

Eduardo da Costa Bresciani

**Reprojeto de motor *BLDC* com o propósito de melhoria na eficiência:** um estudo de caso na aplicação de compressores herméticos para refrigeração

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauricio V. Ferreira da Luz, Dr.

Coorientador: Tiago Staudt, Dr.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bresciani, Eduardo da Costa

Reprojeto de motor BLDC com o propósito de melhoria na eficiência : um estudo de caso na aplicação de compressores herméticos para refrigeração / Eduardo da Costa Bresciani ; orientador, Mauricio Valencia Ferreira da Luz, coorientador, Tiago Staudt, 2019.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

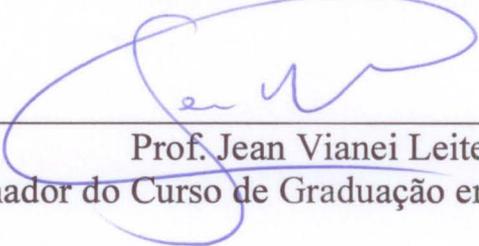
1. Engenharia Elétrica. 2. Compressores. 3. Motores Elétrico de corrente contínua sem escovas. 4. Estudo de caso. I. Valencia Ferreira da Luz, Mauricio . II. Staudt, Tiago . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Eduardo da Costa Bresciani

**REPROJETO DE MOTOR BLDC COM O PROPÓSITO DE  
MELHORIAS NA EFICIÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO NA  
APLICAÇÃO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA  
REFRIGERAÇÃO**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em  
sua forma final, pela Banca Examinadora

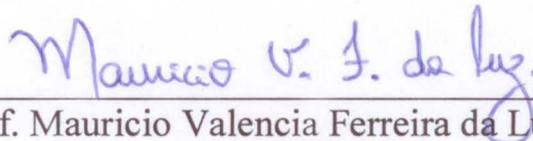
Florianópolis, 04 de dezembro de 2019.



---

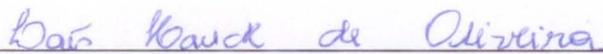
Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**



---

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Eng<sup>a</sup>. Laís Hauck de Oliveira.  
Nidec Global Appliance



---

Eng. Pedro Carvalho Silva Barcelos.  
Mestrando PPGEEL-UFSC

Este trabalho é dedicado aos meus pais, avós e professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Escrever o trabalho de conclusão do curso é uma tarefa desafiadora ao aluno e envolve desde aqueles que incentivaram desde os que agiram de maneira oposta, ensinando-nos a superar os obstáculos.

Ao começar pela minha trajetória, agradeço ao meus pais, Gilberto e Eloá, avós maternos, Joaquim e Maria Odete, e tia, Elaine, os meus maiores educadores e inspiração em minha vida, sem eles eu não seria a pessoa que me tornei. Reconheço também ao mérito deste trabalho aos meus amigos de infância, Rodolfo, Renato, Álvaro, Gabriel, Renan, Davi, Gianluca, Rafael e Matheus que sempre foram um pilar para mim.

Durante a minha caminhada educacional gratifico todas escolas que contribuíram para a minha aprendizagem, sobretudo, ao CLQ e Didatika, onde realmente aprendi a como estudar e conheci o professor que me fez escolher o curso de graduação, Karim Bittar.

Agradeço aos amigos do Laboratório de Vibrações e Acústica Lucas, Bonomo, Gil, Léo, Amanda, Braga, Bernardo, Zé Pedro e Loch pelos bons papos e parceria, especialmente ao Zargos e André tutores de pesquisa e grandes professores que tive em minha vida.

Na jornada pela graduação agradeço aos amigos Rodrigo, Júlio, Vinícius, Duma, Carlo, Lucas, Cristian, Thomas, Luiza e Mirella e acima de tudo Fernando, Leandro e Alessandro amigos que viraram uma família para mim.

Agradeço a empresa EMBRACO, pela confiança e permissão para a utilização de sua estrutura a fim de proporcionar o desenvolvimento do trabalho. Aos colegas do Laboratório Elétrico: Wilian, André, Éder, Omar, Diandra, Ricardo, Jackson, João e Emerson. Além dos amigos de trabalho e equipe: Luiz, Ricardo, Wagner, Célia, Laís, Schappo, Lonzen, Romão e Marcelo.

Aos amigos de LABMAT, Amábile, Antônio, Bernardo, Dudy, Diego, Fred, Giacomelli, Gustavo, Leandro, Letícia, Millene, Monego, Neves e Sewin também deixo meu agradecimento pelos excelentes momentos no final de graduação.

Àqueles que me deram a luz do conhecimento, e me afastaram da ignorância, fontes de incentivo e motivação não bastaria um obrigado, entretanto registro a minha homenagem principalmente aos professores da vida: Mauricio V. F. da Luz, orientador durante toda minha graduação, Tiago Staudt orientador de estágio e coorientador deste trabalho, Thiago Akinaga e Aleandro Espindola, colegas da EMBRACO, Júlio A. Cordioli, orientador no LVA, Heitor Pacheco, professor de Biologia no cursinho e ao meu Pai, professor de minha vida.

Por último, agradeço a Deus, por todas minhas conquistas, ao Brasil e seu governo por me fornecerem uma universidade gratuita e de qualidade.

*"If I have seen further, it is by standing upon the shoulders of giants."  
(Sir Isaac Newton, 1687)*

## RESUMO

O consumo de energia elétrica está cotidianamente em pauta nas discussões da sociedade mundial, seja pela sua falta, custo ou inclusive degradação do meio ambiente. Desta forma, além do apelo à conscientização do consumo por parte do homem, a busca por novas tecnologias que visam a economia de energia são amplamente estudadas. Motores elétricos são conversores eletromecânicos de energia, largamente utilizados no dia a dia, responsáveis por grande parte do consumo doméstico e que podem ser aperfeiçoados de forma a melhorar sua eficiência. Sua aplicação em refrigeradores domésticos, é um exemplo disto. O ciclo de refrigeração compreende pelo tubo capilar, evaporador, condensador e compressor, onde se encontra o motor elétrico. O propósito do trabalho compreende a análise de projeto de um motor *BLDC* utilizado em compressores de refrigeração, cuja execução foi estruturada no estudo de caso de um motor elétrico comercial utilizado pela empresa EMBRACO a fim de se obter um aumento de 1% na eficiência em operação. Para isso, realizou-se uma revisão bibliográfica do assunto, fabricação de amostras para testes, ensaios em laboratório e simulação assistida por um *software* analítico, utilizando-se o espaço de Pesquisa e Desenvolvimento fornecido pela empresa EMBRACO. Como resultado obteve-se um novo modelo aproximadamente 1% mais eficiente que o comercializado, porém algumas análises de viabilidade deverão ser feitas para o desenvolvimento do produto.

**Palavras-chave:** Compressores. Motores Elétrico de corrente contínua sem escovas. Estudo de caso.

## ABSTRACT

The consumption of electric energy is daily on the agenda in the debates of the world society, either by its lack, cost or even degradation of the environment. In this way, in addition to the call for the awareness of the consumption by the man, the search for new technologies that aim at the energy saving are widely studied. Electric motors are electromechanical converters of energy, widely used in the day to day, responsible for much of the domestic consumption and that can be optimized in order to improve its efficiency. Its application in domestic refrigerators, and an example of this. The purpose of the work is to analyze the design of a *BLDC* motor used in refrigeration compressors, the execution of which was structured in the case study of a commercial electric motor used by the company EMBRACO in order to obtain a 1% increase in operating efficiency. For this, a bibliographic review of the subject was carried out, manufacture of samples for tests, laboratory tests and simulation assisted by analytical software, using the Research and Development space provided by EMBRACO. As a result, a new model approximately 1% more efficient than commercialized was obtained, however some feasibility analysis should still be done for the product development.

**Keywords:** Compressors. Brushless DC Electric Motors. Case Study.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplar do compressor da linha Embraco VEM. . . . .	20
Figura 2 – Exemplar do compressor da linha Embraco EG. . . . .	21
Figura 3 – Ciclo de compressão e expansão teórico. . . . .	21
Figura 4 – Desenho explodido do compressor. . . . .	22
Figura 5 – Seção transversal de motor monofásico com bobina auxiliar. . . . .	24
Figura 6 – Motor de indução monofásico com bobinas principal e auxiliar. . . . .	24
Figura 7 – Sistema de acionamento do refrigerador doméstico de velocidade variável. . . . .	26
Figura 8 – Esquemático simplificado de um motor <i>Brushless Direct Current Electric Motor (BLDC)</i> . . . . .	29
Figura 9 – Motor <i>BLDC</i> simplificado trifásico. . . . .	30
Figura 10 – O <i>loop B - H</i> de um ímã permanente. . . . .	32
Figura 11 – Disposição das linhas de campo magnético após um modelo de magnetização. . . . .	33
Figura 12 – Exemplar de um motor <i>BLDC</i> simplificado de dois polos e as linhas de fluxo magnético gerada na operação. . . . .	34
Figura 13 – Bobinas de aço elétrico da empresa Aperam. . . . .	35
Figura 14 – Tratamento térmico das lâminas de motores elétricos. . . . .	35
Figura 15 – Representação simplificada da Lei de <i>Ampère</i> . . . . .	36
Figura 16 – Modelo de circuito magnético do motor <i>BLDC</i> . . . . .	38
Figura 17 – Fluxo concatenado em função da posição do rotor . . . . .	39
Figura 18 – Formas de onda da corrente e tensão induzida no motor <i>BLDC</i> . . . . .	43
Figura 19 – Circuito de entrada simplificado do inversor de frequência. . . . .	44
Figura 20 – Saída do sinal do inversor de frequência trifásico. . . . .	44
Figura 21 – Motor comercial da empresa Embraco utilizado no estudo. . . . .	49
Figura 22 – Interface para inserção das dimensões e formatos do rotor e estator. . . . .	50
Figura 23 – Interface para inserção dos parâmetros de simulação do motor. . . . .	51
Figura 24 – Multímetro digital de bancada]Multímetro digital de bancada. . . . .	52
Figura 25 – Esquemático do circuito do método da medição a quatro fios. . . . .	53
Figura 26 – Circuito elétrico da medição da tensão de linha. . . . .	55
Figura 27 – Circuito elétrico da medição da tensão de fase . . . . .	55
Figura 28 – Procedimento da medição de tensão induzida. . . . .	56
Figura 29 – Forma de onda da tensão induzida de linha medida nos enrolamentos do motor. . . . .	56
Figura 30 – Forma de onda da tensão induzida de fase medida nos enrolamentos do motor. . . . .	57
Figura 31 – Valores médios obtidos experimentalmente expressos em p.u. . . . .	58

Figura 32 – Média das perdas ôhmicas e no aço obtidas na medição. . . . .	59
Figura 33 – Diagrama de blocos do procedimento de calibração da resistência ôhmica dos enrolamentos do motor. . . . .	65
Figura 34 – Gráfico comparativo Resistência medidas vs Calibrada. . . . .	66
Figura 35 – Diagrama de blocos do procedimento de calibração da tensão induzida gerada nos enrolamentos do motor. . . . .	67
Figura 36 – Gráfico comparativo das tensões induzidas de linha. . . . .	68
Figura 37 – Gráfico comparativo das tensões induzidas de fase. . . . .	68
Figura 38 – Diagrama de blocos do procedimento de calibração das perdas no aço gerada. . . . .	69
Figura 39 – Gráfico comparativo da calibração das perdas no aço. . . . .	70
Figura 40 – Comparação entre as curvas de eficiência calibrada antes e após o aumento da bitola do fio. . . . .	70
Figura 41 – Comparação entre a eficiência calibrada antes e após as modificações dos parâmetros que afetam a indução magnética no estator. . . . .	71
Figura 42 – Comparação entre a tensão induzida calibrada antes e após as modificações dos parâmetros que afetam a indução magnética no estator. . . . .	71
Figura 43 – Comparação entre a eficiência calibrada e a obtida após a última modificação dos parâmetros. . . . .	72
Figura 44 – Comparação entre a tensão induzida calibrada e a obtida após a última modificação dos parâmetros. . . . .	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3 – Medições da resistência linha a linha, $R_{LL}$ , obtidas do motor. . . . .	54
Tabela 4 – Resistência de fase média e desvio padrão. . . . .	54
Tabela 5 – Velocidade de rotação e pontos de cargas nas quais as eficiências das amostras foram medidas. . . . .	58
Tabela 6 – Modificações realizadas a fim de melhorar a eficiência a partir da indução magnética do estator. . . . .	63
Tabela 7 – Tabela comparativa das massas dos elementos do motor antes e após as modificações. . . . .	73
Tabela 8 – Tabela das modificações realizadas nas dimensões dos parâmetros do motor. . . . .	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLDC	Brushless Direct Current Electric Motor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
p.u.	por unidade
SPEED	Scottish Power Electronics and Electric Drives
VCC	Variable Capacity Compressor

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	Densidade de Fluxo Magnético
$H$	Campo Magnético
$g$	Gramas
$B_m$	Densidade de Fluxo Magnético dos ímãs permanentes
$\mu_0$	Permeabilidade Magnética do vácuo
$\mu_r$	Permeabilidade Magnética relativa do recuo
$H_c$	Campo Magnético Coercitivo negativo dos ímãs permanentes
$B_r$	Densidade de Fluxo Magnético Remanente
$H_c$	Campo Magnético Coercitivo
$\nabla$	Operador Nabla
$J$	Densidade superficial de corrente elétrica
$R_{fm}$	Resistência de fase do motor
$k_r$	Fator de efeito pelicular
$N_{espiras}$	Número de espiras
$l_{av}$	Comprimento médio de cada espira
$\sigma$	Condutividade elétrica específica do condutor
$A_c$	Área da seção transversal do condutor
$R_T$	Resistência a temperatura específica
$R_{T_{amb}}$	Resistência a uma temperatura de ambiente
$\alpha_R$	Coefficiente de temperatura da resistência
$T$	Temperatura instantânea da bobina
$T_{amb}$	Temperatura ambiente na medição
$R_r$	Relutância do rotor
$R_s$	Relutância do estator
$\mathcal{R}$	Relutância
$l_m$	Comprimento do material
$\mu$	Permeabilidade magnética do material
$A_m$	Área da seção transversal
$\phi_r$	Fluxo magnético dos ímãs do rotor
$R_m$	Relutância dos ímãs
$R_g$	Relutância do entreferro
$R_l$	Relutância dispersa
$\phi$	Fluxo magnético dos ímãs permanentes
$\phi_g$	Fluxo magnético do entreferro
$\phi_l$	Fluxo magnético disperso
$e$	Tensão induzida
$\lambda$	Fluxo concatenado
$t$	Tempo

$\theta_e$	Deslocamento angular representado em graus elétricos
$\omega_m$	Velocidade angular mecânica de operação do motor
$k_e$	Constante de tensão induzida
V	<i>Volts</i>
s	Segundo
rad	Radiano
$P_{ele}$	Potência Elétrica
$P_{mec}$	Potência Mecânica
$I$	Corrente de alimentação
$\tau$	Torque mecânico
$k_t$	Constante de torque
N	Newton
m	Metro
A	Ampère
$n_f$	Número de fases
$k_{Tn_f}$	Constante de torque gerada em cada fase do enrolamento
$\tau_{cogg}$	Cogging Torque
$\tau_{elmag}$	Torque eletromagnético gerado pelo motor
$\tau_{total}$	Torque total gerado pelo motor
$N$	Número de fases
$P_{ohmicas}$	Perdas Ohmica
$P_{Hist}$	Perdas por Histerese
$P_{Din}$	Perdas Dinâmicas
$P_{nucleo}$	Perdas no Núcleo
$k_h$	Constante de Histerese
$f$	Frequência
$n_{mat}$	Expoente em função do material
$P_{C.P.}$	Perdas por corrente parasita
$k_{cp}$	Constante de corrente parasita
$h$	Espessura do material
$\omega_{elec}$	Velocidade angular elétrica de operação do motor
$k_{BLV}$	Constante do método de cálculo BLV
$I_{teste}$	Corrente de teste
$R_{teste}$	Resistência de teste
$V_m$	Tensão de medição
$R_{LL}$	Resistência linha a linha do motor
$\Omega$	Ohms
$^{\circ}\text{C}$	Graus <i>Celsius</i>
$L_{fm}$	Indutância de fase do motor

$R_p$	Resistência de prova da medição
$P_{pos}$	Nó do circuito onde é posicionado o positivo da ponteira de tensão
$P_{neg}$	Nó do circuito onde é posicionado o neutro da ponteira de tensão
$\eta$	Eficiência do motor elétrico
$P_e$	Potência de entrada
$P_s$	Potência de saída
$P_{ima}$	Perdas nos ímãs permanentes
$F_{cc}$	Força exercida pelo rotor
$\tau_{mec}$	Torque mecânico
$d_{sm}$	Distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>18</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS EM COMPRESSORES DE REFRIGERAÇÃO</b>	<b>20</b>
2.1	CONTROLE <i>ON / OFF</i>	23
2.2	CONTROLE VCC	25
<b>3</b>	<b>MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS</b>	<b>28</b>
3.1	FUNCIONAMENTO	29
3.2	ROTOR	30
3.2.1	<b>Laminação</b>	<b>31</b>
3.2.2	<b>Ímãs permanentes</b>	<b>31</b>
3.3	ESTATOR	33
3.3.1	<b>Laminação</b>	<b>34</b>
3.3.2	<b>Enrolamentos</b>	<b>35</b>
3.4	FLUXO E TENSÃO INDUZIDA	37
3.4.1	<b>Fluxo Concatenado</b>	<b>38</b>
3.4.2	<b>Tensão induzida</b>	<b>39</b>
3.5	TORQUE	40
3.5.1	<b><i>Cogging</i> Torque</b>	<b>41</b>
3.6	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	42
3.6.1	<b>Controle</b>	<b>42</b>
3.6.2	<b>Circuito elétrico</b>	<b>43</b>
3.7	PERDAS	45
3.7.1	<b>Perdas Ôhmicas</b>	<b>45</b>
3.7.2	<b>Perdas no aço</b>	<b>45</b>
3.7.3	<b>Perdas nos ímãs</b>	<b>46</b>
3.7.4	<b>Perdas mecânicas</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>48</b>
4.1	DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS	48
4.2	MODELO ANALÍTICO	49
4.2.1	<b>Software Analítico</b>	<b>49</b>
4.2.1.1	<i>SPEED</i>	49
4.2.2	<b>Atributos da simulação analítica</b>	<b>50</b>
4.3	TESTES EXPERIMENTAIS	52
4.3.1	<b>Resistência Ôhmica</b>	<b>52</b>

4.3.2	<b>Medição da Tensão Induzida</b> . . . . .	<b>53</b>
4.3.3	<b>Eficiência no ponto de carga</b> . . . . .	<b>55</b>
4.4	<b>SIMULAÇÃO ANALÍTICA-<i>SPEED</i></b> . . . . .	<b>59</b>
4.4.1	<b>Calibração</b> . . . . .	<b>59</b>
4.4.2	<b>Reprojeto</b> . . . . .	<b>62</b>
5	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>73</b>
5.1	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado de eletrodomésticos de baixa potência vem enfrentando uma concorrência forte e crescente nos últimos anos. Mais especificamente, as novas gerações de compressores têm requisitos permanentes para maior eficiência e menor custo.

O motor, dispositivo responsável pela transformação de energia elétrica em mecânica para o sistema, representa uma parcela significativa tanto no custo do compressor quanto em sua eficiência. Desta maneira esforços para a redução de custo e aumentos de eficiência são bem-vindos.

Estudos para a melhoria do produto são de grande importância para o mercado e, desta forma as empresas desse ramo investem intensamente na área de pesquisa e desenvolvimento. Neste negócio, pequenos decréscimos na ordem de grandeza de 1% na eficiência do motor são de grande importância e podem até desqualificar o produto caso não atenda a demanda dos clientes.

Diante deste cenário, este trabalho tem como propósito relatar um estudo de caso de melhoria do rendimento de motores elétricos de corrente contínua sem escovas comutativas, cuja premissa é o aumento de eficiência em 1% através da modificação de parâmetros construtivos da máquina.

As atividades realizadas foram feitas durante o período de estágio do aluno na empresa EMBRACO Compressores, onde utilizou-se toda a estrutura da mesma para a realização dos ensaios e simulação.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por propósito explorar possibilidades de reprojeto de motores elétricos de Corrente Contínua sem escovas comutativas, cuja topologia caracteriza-se por possuir fluxo magnético radial de rotor interno utilizado em compressores residenciais da empresa Embraco, de forma a melhorar eficiência deste dispositivo em operação.

#### 1.1.2 Objetivos Específicos

A finalidade do estudo baseia-se na criação de um novo projeto de motor com a intenção de melhorar em 1% a eficiência em funcionamento com limite de acréscimo de massa de 200 g, a fim de se diminuir os gastos com um novo projeto de mecanismo do compressor, o qual define a capacidade do compressor. De forma a alcançar o planejado, as seguintes atividades listadas foram realizadas:

1. Análise da aplicação de motores elétricos em compressores herméticos para refrigeração;

2. Estudo dos fundamentos físicos do motor BLDC, *Brushless Direct Current Electric Motor*;
3. Fabricação de amostras;
4. Ensaaios experimentais;
5. Simulação.

Cabe ressaltar que o estudo da utilização de novos materiais assim como novas metodologias de controle não serão aqui incorporadas. Além disso, não será feita uma análise do incremento na eficiência do compressor que a melhoria do motor trará visto que não foi realizado um protótipo a partir do reprojeto.

O texto deste trabalho é dividido em quatro partes. Primeiramente é feita a contextualização da aplicação de motores elétricos em compressores de refrigeração. A segunda parte envolve a teoria do funcionamento físico dos motores do tipo BLDC. Feito isto, é descrita a metodologia utilizada no projeto, e por fim são relatados os resultados do estudo e trabalhos futuros.

## 2 APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS EM COMPRESSORES DE REFRIGERAÇÃO

O compressor é o "coração" de um sistema de refrigeração. Sua função é bombear refrigerante que circula por todo o sistema. No processo de resfriamento de um refrigerador, por exemplo, o compressor recebe o fluido na forma de gás do evaporador, e promove o bombeamento desse gás até o condensador, aparelho que torna a liquidificar o fluido e dissipar o calor do sistema. Desta maneira o dispositivo contribui para a reutilização do refrigerante. Os compressores são tanto usados em refrigeração doméstica, como um refrigerador ou *freezer*, como também em aplicações comerciais, mercado de reposição, *aftermarket*, linhas médicas e bebedouros, como os refrigeradores encontrados em restaurantes, bares, supermercados e outros estabelecimentos comerciais (EMBRACO, 2018a). As Figuras 1 e 2 ilustram exemplos dessas peças.

Figura 1 – Exemplar do compressor da linha Embraco VEM.



Fonte: (EMBRACO, 2018c).

O fenômeno físico realizado por estes aparelhos está relacionado à termodinâmica. Ao operar de maneira cíclica, como ilustrado pela Figura 3, de acordo com (KLEMZ, MARCOS ANTUNES; SELL, LUCAS SANTOS, 2013) seu funcionamento é dividido em quatro etapas:

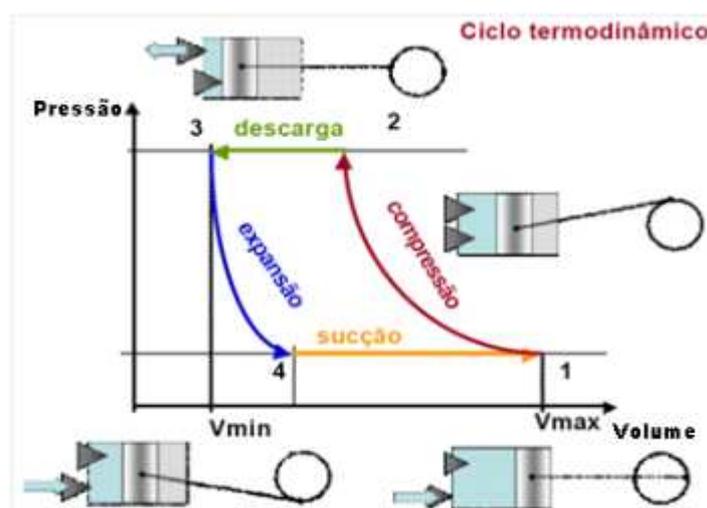
1. Compressão (1 → 2): o pistão inicia o movimento ascendente, que aumenta de maneira rápida a pressão. Desta forma a válvula de sucção se fecha, e o gás fica confinado no interior do cilindro. A medida que o pistão move-se, a pressão e a temperatura elevam-se, dessemelhante ao volume, que diminui. O pistão mantém seu movimento até que o cilindro atinge o ponto preciso para que as molas que mantinham a válvula fechada relaxem, e assim a compressão do gás se encerra;
2. Descarga (2 → 3): após a compressão, o gás sob elevada pressão e temperatura escoar para a câmara de descarga do compressor. Este processo tem início pouco

Figura 2 – Exemplar do compressor da linha Embraco EG.



Fonte: (EMBRACO, 2018b).

Figura 3 – Ciclo de compressão e expansão teórico.



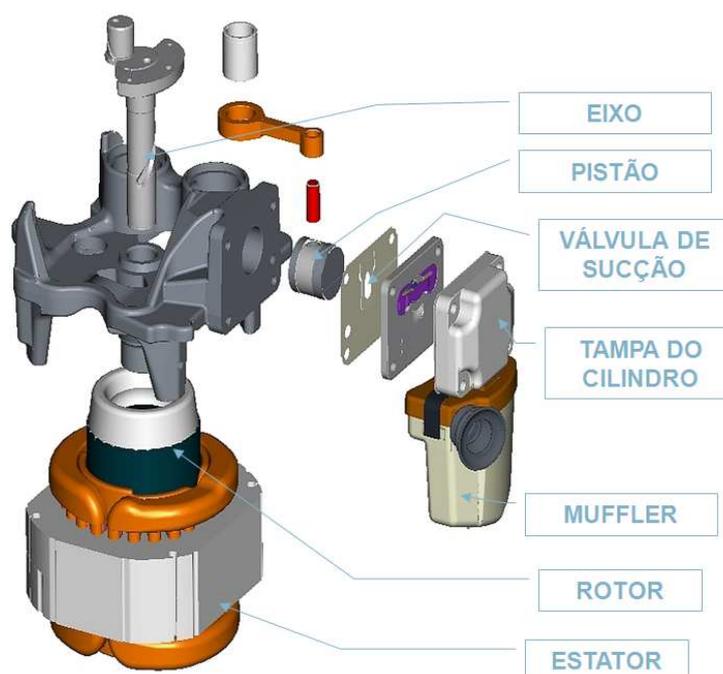
Fonte: (KLEMZ, MARCOS ANTUNES; SELL, LUCAS SANTOS, 2013).

antes do fim do movimento ascendente do pistão e termina quando se inicia o movimento descendente;

3. Expansão (3 → 4): no movimento descendente o cilindro perde pressão rapidamente, o que faz com que a válvula de sucção se abra e libere o gás;
4. Admissão ou sucção (4 → 1): o pistão começa um movimento descendente, a válvula de sucção se abre, que gera aumento do volume interno do cilindro (preenchimento de vapor) e sua pressão interna diminui. A admissão acaba quando o pistão inicia o movimento ascendente (diminuição do volume interno).

O movimento do pistão é realizado por motores elétricos, este está acoplado ao rotor e move-se conforme o motor opera, desta maneira, sua força e velocidade estão diretamente relacionadas ao torque e velocidade de rotação produzidas pelas máquinas respectivamente. A Figura 4 ilustra o acoplamento entre motor e pistão.

Figura 4 – Desenho explodido do compressor.



Fonte: (KLEMZ, MARCOS ANTUNES; SELL, LUCAS SANTOS, 2013).

Motores elétricos são dispositivos eletromecânicos incumbidos de converter energia elétrica em mecânica. De maneira concisa, estes são compostos por uma parte dinâmica, rotor, e estática, estator ou armadura responsável pela excitação elétrica do dispositivo.

No Brasil, a empresa EMBRACO trabalha com duas topologias de motores elétricos:

1. Motor de indução monofásico;
2. Motor de corrente contínua sem escovas comutadoras, comumente chamado de BLDC, do inglês *Brushless DC electric motor*.

Em sistemas de refrigeração, a técnica de controle utilizada é uma ferramenta importante em termos de desempenho térmico. Ao se variar as condições operacionais do refrigerador, o compressor deve necessariamente acompanhar esta mudança. Isto é feito a partir do controle de operação do motor elétrico.

## 2.1 CONTROLE ON / OFF

Compressores que utilizam o controle do tipo *on/off* aplicam como força motriz os motores elétricos de indução monofásicos. Estes equipamentos atuam a velocidade constante e basicamente ligam e desligam de acordo com demanda de refrigeração.

Quando os sensores de temperatura indicam que esta está próxima do ponto de ajuste, normalmente, o termostato *On-Off* vai para a posição *On* e o compressor é inicializado. O motor permanece em operação até que o sensor indique um valor de temperatura mais baixo, quando o termostato muda para a posição *Off* e o compressor é desligado. Assim, o termostato atua na realimentação do sistema e na ativação/desativação do compressor, e deve ser dimensionado para suportar alta corrente elétrica e tensão (BANDARRA FILHO; GARCIA; MENDOZA, 2011). Governado pelo controle *on-off*, o compressor opera somente durante uma fração do tempo, cerca de 60% (BINNEBERG; KRAUS; QUACK, 2002). Quando há o desligamento do motor, as pressões no condensador e evaporador são equilibradas devido à migração do refrigerante. Já ao ser reiniciado o compressor, após um intervalo de tempo, são restabelecidas as pressões necessárias para as condições de operação (JUN; YEZHENG, 1988).

Os motores elétricos de indução monofásico, utilizados, apesar da nomenclatura, são na realidade motores bifásicos, já que além da bobina principal, estes também possuem outra, chamada de auxiliar, que necessariamente auxilia na partida do motor e após é desconectada ou pode continuar a trabalhar em conjunto com a principal, o que depende da aplicação e do sistema de partida considerado.

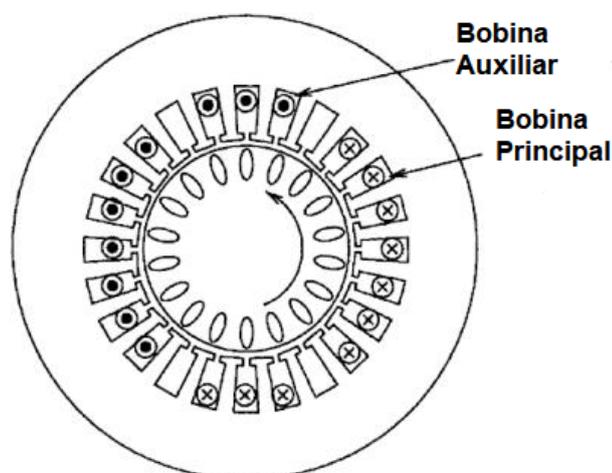
A armadura desta topologia possui dois enrolamentos bem diferentes, com números distintos de espiras e forma de distribuição como mostram as Figuras 5 e 6. Chamados também de motores de fase dividida, estas máquinas elétricas, estruturalmente são semelhantes aos motores com mais de uma fase de gaiola de esquilo, exceto em relação à disposição dos enrolamentos no estator (FITZGERALD *et al.*, 2003). Seus eixos de rolamentos estão deslocados entre si 90 graus elétricos.

A bobina auxiliar possui uma razão entre resistência e reatância mais elevada que a principal, desta forma, as respectivas correntes operam fora de fase. Como a corrente da bobina auxiliar flui adiantada em relação a principal, o campo do estator atinge o seu máximo primeiro no eixo do enrolamento auxiliar, o que gera um campo girante de estator e produz a partida do motor.

Além da combinação com bobina auxiliar, a fim de melhorar o desempenho do motor existem também combinações com capacitores. Estes podem ser conectados em série com a bobina auxiliar e do mesmo modo atuar somente na partida ou permanentemente durante o funcionamento do motor, o que ajuda na eficiência e torque máximo.

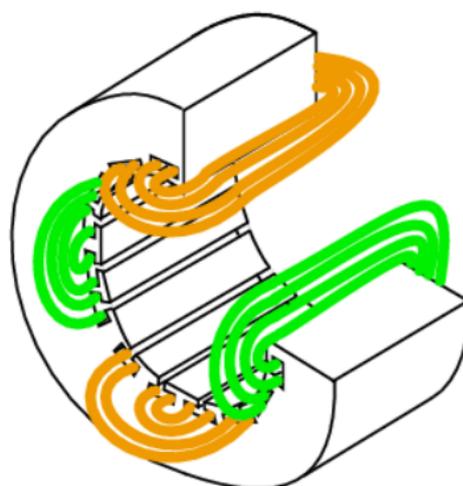
Motores de indução monofásicos são amplamente utilizados em aplicações de

Figura 5 – Seção transversal de motor monofásico com bobina auxiliar.



Fonte: Modificado de (BEATY *et al.*, 1998).

Figura 6 – Motor de indução monofásico com bobinas principal e auxiliar.



Fonte: (CIRCUITS, 2018).

pequenas potências, onde a provisão de um motor polifásico é impossível (como em aplicações domésticas) ou antieconômico. Motores de indução monofásicos compartilham a maioria das vantagens dos motores polifásicos: eles são robustos e econômicos para fabricar (BEATY *et al.*, 1998).

Entretanto, embora desenvolvidas técnicas para as melhorias da eficiência, redução de custo e economia de energia, este controle não apresenta o melhor desempenho energético devido às suas próprias características operacionais, como ligamento e desligamento.

Um compressor de velocidade fixa convencional opera com eficiência máxima

apenas na temperatura do ponto de equilíbrio, ponto de descarga em que a saída da bomba de calor corresponde exatamente à demanda de calor. Em temperatura ambiente abaixo do ponto de equilíbrio a unidade não pode satisfazer a carga de aquecimento (TASSOU; MARQUAND; WILSON, 1983). Além disso, toda vez que o motor parte, há um consumo adicional de energia, desta maneira como o motor liga e desliga constantemente seu consumo passa a ser elevado.

## 2.2 CONTROLE VCC

O uso ineficiente de eletricidade para acionar os compressores de sistemas de refrigeração é considerado como um contribuinte indireto para a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Essas emissões podem ser reduzidas ao melhorar a eficiência de conversão de energia dos sistemas de refrigeração. Um método para conseguir isso é através do controle de capacidade de refrigeração, que combina o funcionamento do sistema com a carga. Este reduz as perdas de ligamento e desligamento do ciclo *on/off* do equipamento e melhora a eficiência de estado estacionário devido a um menor diferencial de pressão em todo o compressor em condições de carga parcial (TASSOU; MARQUAND; WILSON, 1983).

Diante deste cenário, diversas técnicas de otimização e eficiência do controle foram estudadas e desenvolvidas para suprir as desvantagens do sistema *on/off* como, por exemplo: reguladores *by-pass* de gás quente, mas também controle por descarga de cilindros. O uso desses métodos, no entanto, é restrito a dispositivo de ar condicionado e refrigeração relativamente grandes, sem aplicação na área residencial (TASSOU; MARQUAND; WILSON, 1983).

O método mais promissor de empregar modulação em aplicações comerciais residenciais e pequenas foi através do controle de capacidade variável, chamado por *Variable Capacity Compressor (VCC)*. Compressores de velocidade variável oferecem as mais altas eficiências de carga parcial sobre qualquer outra tecnologia de modulação. Esta é projetada especificamente para ser altamente eficiente em aplicações residenciais e comerciais (EMERSON, 2018).

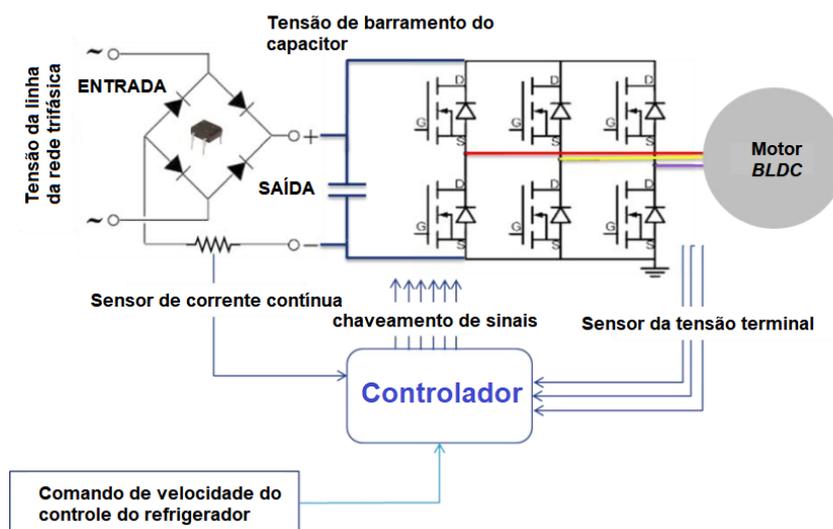
Na refrigeração com o controle por meio de velocidade variável, a capacidade do sistema de refrigeração é adaptada à carga, ou seja, a operação do motor é regulada de tal forma que a capacidade do sistema acompanha a carga ditada por diferentes condições de operação.

Os compressores *VCC* são usados em conjunto com um inversor de frequência, que ajusta dinamicamente a velocidade e o torque a fim garantir uma eficiência ideal, evitando assim o desligamento do compressor. O inversor também oferece importantes recursos de proteção e diagnóstico do compressor.

Além disso, como força eletromotriz do sistema, o motor de indução monofásico acompanhado de um ou mais capacitores, é substituído pela topologia trifásica de ímãs

permanentes sem escovas comutadoras. Estes, sobretudo, são empregados a fim de melhorar a longevidade e eficiência, isto é, aumentar a vida de funcionamento e tornar mais eficaz a relação entre potência de entrada e saída do inversor/motor. A Figura 7 ilustra o circuito elétrico do sistema de controle em compressores de capacidade variável.

Figura 7 – Sistema de acionamento do refrigerador doméstico de velocidade variável.



Fonte: Modificado de (MALLAMPALLI; BOHORI; DEY, 2012).

Ao usar um compressor de velocidade variável com um inversor, é possível diminuir a temperatura de condensação. Além disso, uma alta temperatura do evaporador com baixa taxa de carga pode ser aplicada. O que significa dizer que quando um refrigerador não está totalmente carregado, as máquinas não precisam trabalhar tanto para manter os itens do seu interior conservados. Isso pode resultar em economias de consumo de energia entre 20 a 40% quando comparadas com refrigeradores que utilizam um compressor de velocidade fixa (sistema liga/desliga) (SECOP, 2018).

Ao usar um compressor de velocidade variável com um inversor, é possível diminuir a temperatura de condensação. Além disso, uma alta temperatura do evaporador com baixa taxa de carga pode ser aplicada. O que significa dizer que quando um refrigerador não está totalmente carregado, as máquinas não precisam trabalhar tanto para manter os itens do seu interior conservados. Isso pode resultar em economias de consumo de energia entre 20 a 40% quando comparadas com refrigeradores que utilizam um compressor de velocidade fixa (sistema liga/desliga) (SECOP, 2018).

Como benefícios do compressor do tipo *VCC* pode-se citar:

1. Melhor controle de temperatura e umidade: estes sistemas são capazes de combinar melhor as cargas do que os sistemas de capacidade fixa. Esta capacidade

permite um melhor controle de umidade, ao mesmo tempo em que reduz as perdas de ciclo tipicamente associadas a sistemas de capacidade fixa (EMERSON, 2018);

2. Maior eficiência: com compressores de velocidade variável, a alta eficiência do sistema é obtida pela combinação da capacidade com a demanda de resfriamento/aquecimento, o que permite:
  - a) máxima eficiência de resfriamento ou (Relação de eficiência energética sazonal, SEER (*Seasonal Energy Efficiency Rating*));
  - b) bombas de calor capazes de atingir uma eficiência 31% maior do que a melhor bomba de calor do sistema *on/off* (EMERSON, 2018);
3. Compressor menor em termos de deslocamento e tamanho: o que contribui para a diminuição de custos e transportes (SECOP, 2018);
4. Menor emissão de ruído devido a baixa velocidade - até 5 dBA: como otimização do design de casca, métodos internos de transmissão, ressonância de cavidade e componentes, amortecimento e fontes de ruído, o ruído de compressores também foi diminuído com a metodologia VCC (SECOP, 2018).

Além do aperfeiçoamento do ponto de vista elétrico e eletromecânico, também foram otimizados elementos termodinâmicos concomitantemente a essa nova metodologia como: melhor isolamento, otimização do trocador de calor e do fluxo de ar, que também corresponderam para a melhoria da efetividade e economia do produto.

### 3 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS

Os motores de corrente contínua sem escovas são caracterizados pela presença de ímãs permanentes e como o próprio nome já diz não possuem escovas comutadoras nem anéis coletores ou comutadores mecânicos responsáveis pela alimentação da máquina. Desta forma, estes dispositivos eletromecânicos têm seu funcionamento assegurado graças aos chamados inversores de frequência variável, um tipo de controlador que tem a função de acionar o motor elétrico e ao mesmo tempo variar a frequência e a tensão que é fornecida, com o objetivo de controlar a sua velocidade e potência de saída de acordo com a condição imposta.

Nesta topologia de motor os ímãs permanentes, fonte de campo magnético, estão associados a parte rotativa da máquina, já os enrolamentos a parte estática.

Estas máquinas permitem uma vasta aplicação além da utilização de diferentes materiais em sua constituição, assim como geometrias e formas de controle. Por exemplo, um motor pode ser composto tanto por ímãs de ferrite, neodímio puro ou sinterizado, samário cobalto, etc. Já em relação aos materiais magnéticos, os motores podem ser feitos de aço ferromagnético sinterizado ou até mesmo compósitos de materiais magnéticos mole, *Soft Magnetic Composite*. Quanto ao material dos enrolamentos são comumente utilizados alumínio ou cobre. Desta forma várias máquinas atendem a classificação de motores *BLDC*. De acordo com (HENDERSHOT; MILLER, 2010) exemplos disso são:

- Motores de rotor interno de fluxo radial;
- Motores de rotor externo de fluxo radial;
- Motores de passo;
- Motores de fluxo axial;
- Motores de fluxo transversal.

No entanto, o escopo desse estudo abrangerá apenas as máquinas de rotor interno, cuja aplicação se adéqua ao funcionamento e estrutura de compressores de refrigeração, já que esta é mecanicamente melhor disposta para o acoplamento com o eixo do compressor.

Estes possuem o rotor montado por um conjunto de materiais ferromagnéticos e em sua superfície externa são fixados ímãs permanentes que gerarão campo magnético durante o funcionamento do motor.

Por outro lado o estator, cuja estrutura também é constituída por material ferromagnético, possui uma geometria mais complexa, já que além de servir como caminho do fluxo magnético estes contêm os enrolamentos do motor. O estator é separado em regiões as quais recebem os nomes de:

- Sapata;
- Dente;
- Coroa;
- Ranhura;

esta última é o espaço por onde os fios da bobina passam e circundam o dente.

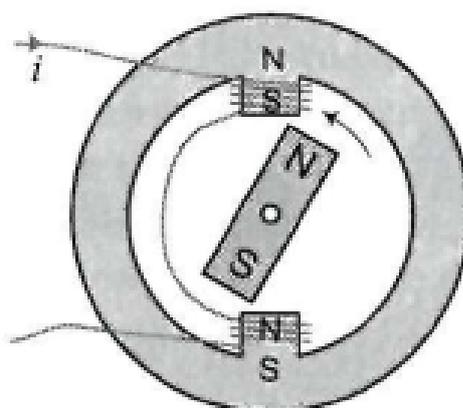
Entre o rotor e estator, existe um espaçamento mínimo para possibilitar a dinâmica do motor, este é chamado de entreferro e possui fundamental importância magnética ao motor.

### 3.1 FUNCIONAMENTO

Para o entendimento do motor de corrente contínua sem escovas, um esquemático simplificado da topologia do motor como ilustrado na Figura 8 será levado em consideração.

Neste, uma corrente é aplicada as bobinas, de forma que um campo magnético é criado e os pólos do estator tornam-se magnetizados. No rotor simplificado é gerada uma força de atração entre o ímã, representado por uma barra, e os pólos eletromagnéticos com polaridade oposta. Conseqüentemente, os pólos semelhantes se repelem, o que faz a barra magnética rotacionar em direção ao pólo do estator com polaridade oposta (HANSELMAN, 2003).

Figura 8 – Esquemático simplificado de um motor *BLDC*.

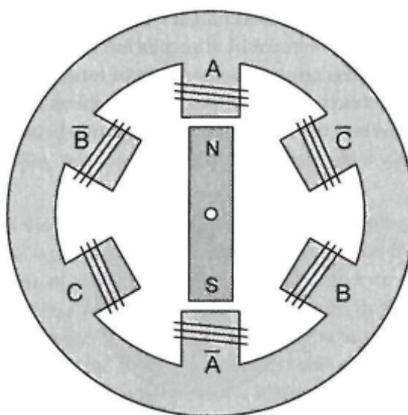


Fonte: (HANSELMAN, 2003).

Para fazer com que a barra magnética gire continuamente, é comum empregar mais de um conjunto de bobinas, isto é, adicionar mais de uma fase. A Figura 9 ilustra

um motor *BLDC* simplificado trifásico, em que A, B e C representam as fases, e as barras sobre cada letra denotam a polaridade criada quando são percorridas correntes pelos fios. Desta forma as correntes das fases dos motores serão excitadas de forma a manter o "rotor" em constante movimento.

Figura 9 – Motor *BLDC* simplificado trifásico.



Fonte: (HANSELMAN, 2003).

Este é o ciclo constante em que se fundamenta um motor do tipo sem escovas de corrente contínua, o ímã do rotor fica em constante perseguição à polaridade oposta da armadura e a corrente que flui pelas bobinas é controlada por um inversor de frequência de modo a permitir o deslocamento do rotor em sentido único.

### 3.2 ROTOR

O rotor num motor elétrico é a parte dinâmica do dispositivo, e no caso da aplicação no compressor está acoplado ao pistão, responsável pela compressão do refrigerante, encarregado pela sua velocidade e força. Estes são projetados de modo a facilitar a dinâmica do motor e conseqüentemente gerar as menores perdas praticáveis: mecânicas e eletromagnéticas.

No *design* de rotor interno, esta peça é constituída por lâminas de materiais ferromagnéticos, ou pó sinterizado e ímãs permanentes fixados em sua superfície externa. No caso, o estudo aborda a utilização de lâminas na constituição do rotor.

As lâminas de aço magnético são empilhadas uma a uma de forma a originar o pacote do rotor. Estas são então fixadas de forma a preservar as propriedades eletromagnéticas, isto é, reduzir as perdas do rotor. Posteriormente os ímãs do estudo, geralmente em formato de arco, são colados exteriormente.

Este arranjo fornece uma maior densidade de fluxo magnético no entreferro uma vez que o ímã está diretamente em contato com o ar entre rotor e estator, sem o bloqueio de qualquer outro meio, como parte das laminações do rotor.

### 3.2.1 Laminação

O rotor da máquina sem escovas consiste em uma pilha de laminações de ferro, em geral, com formato circular.

As lâminas do rotor são fixadas de forma a não curto circuitá-las entre si, fato este que aumenta as perdas no aço do rotor.

Como premissas do *design* da lâmina do rotor tem-se como princípios: diminuições de perdas mecânicas e eletromagnéticas assim como adequado acoplamento com o mecanismo do compressor.

### 3.2.2 Ímãs permanentes

Nos motores *BLDC* existem duas fontes de campos magnéticos: a gerada a partir das correntes que fluem pelos enrolamentos do estator e a produzida pelos ímãs permanentes, atrelados ao rotor.

Os ímãs permanentes são materiais magnéticos com grandes laços de histerese, como ilustrado pela Figura 10, este depende prioritariamente de dois princípios magnéticos:  $B$ , densidade de fluxo magnético e  $H$  o campo magnético, que se relacionam pela expressão 1.

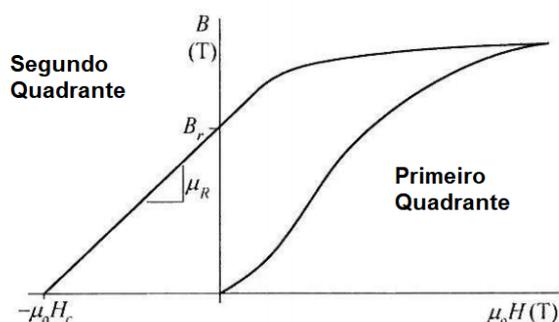
$$B_m = \mu_0 \mu_r H_c + B_r \quad (1)$$

em que  $B_m$  é a densidade de fluxo magnético do ímã,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo,  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa de recuo,  $H_c$  é a quantidade negativa de  $H_c$ , por conta da operação do material no segundo quadrante da curva  $B - H$  e  $B_r$ , a densidade de fluxo magnético remanente do ímã.

A operação dos ímãs permanentes no segundo quadrante, isto é  $B_r$  e  $H_c$  variam proporcionalmente com a temperatura do material (HANSELMAN, 2003). Desta forma, quando se trabalha com estes materiais deve-se levar em consideração, em seu funcionamento, as condições mais extremas de temperatura que o motor pode operar, caso contrário o ímãs poderão se desmagnetizar ou fornecer uma quantidade de fluxo indesejado, o que, conseqüentemente, altera a performance do motor.

O ponto de partida para a compreensão do ímã permanente é o *loop* de histerese, cujo primeiro e segundo quadrantes são mostrados na Figura 10. O laço de histerese é formado pela aplicação da maior intensidade de campo possível a um amostra de material não magnetizada, depois a corrente magnetizadora é desligada. Isso permite que o material relaxe ou recue ao longo da curva superior.

Após o desligamento da corrente o campo tende a anular e a densidade de fluxo o ímã neste ponto é igual à remanência, ou indução residual, denotada por  $B_r$ . A remanência é a densidade de fluxo máxima que o ímã pode produzir por si mesmo. Por outro lado, se nenhum fluxo flui para o exterior do ímã, a densidade de fluxo será nula.

Figura 10 – O loop  $B - H$  de um ímã permanente.

Fonte: Modificado de (HANSELMAN, 2003).

Neste caso, a magnitude da intensidade do campo magnético através do ímã é igual ao negativo da coercividade ou força coercitiva, denotada  $H_c$  (HANSELMAN, 2003).

A remanência e força coercitiva são parâmetros influentes na eficácia de um motor elétrico constituídos por ímãs permanentes. O primeiro intervém diretamente na intensidade de fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes, já o segundo na veemência da corrente que o motor pode suportar.

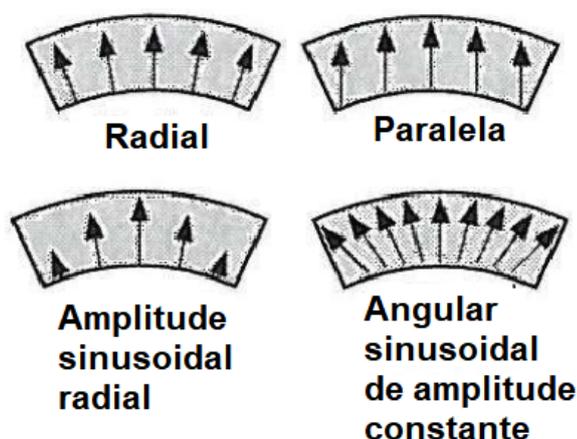
A magnetização do ímã pode ser qualquer forma arbitrária definida por uma série de Fourier. Na prática, os ímãs são tipicamente magnetizados para se aproximar a magnetização radial ou a magnetização paralela, como mostrado na Figura 11. Além disso, a magnetização da amplitude sinusoidal radial e a magnetização angular sinusoidal de amplitude constante, como mostrado na Figura 11, são consideradas.

A magnetização real obtida depende do posicionamento dos ímãs e do dispositivo utilizado para a magnetização. Alguns materiais magnéticos têm uma direção de fluxo magnético pré definida, que favorece um padrão do arranjo das linhas de campo durante o processo de magnetização (HANSELMAN, 2003).

Quando são usados ímãs de ferrite, uma prática normal utilizada pelos projetistas de motores é aumentar a área do ímã e o fluxo resultante, o que torna o comprimento axial mais longo do que a pilha de laminação do estator. Os efeitos do aumento do fluxo ao utilizar o balanço magnético são significativos em um motor (HENDERSHOT; MILLER, 2010). Estes podem aumentar o fluxo concatenado nas bobinas do estator, que conseqüentemente afetarão a tensão induzida gerada nos fios da armadura e a corrente necessária para obtenção de torque.

Outra característica geométrica importante dos ímãs permanentes utilizados na aplicação de motores, é a espessura. Esta além de ser uma variável que pode alterar a máxima corrente desmagnetizadora dos ímãs, isto é, um dos parâmetros que define a coercitividade desses materiais, também determina a dimensão do entreferro, além de

Figura 11 – Disposição das linhas de campo magnético após um modelo de magnetização.



Fonte: Modificado de (HANSELMAN, 2003).

igualmente estabelecer a densidade de fluxo que atravessa o estator, quando o motor em operação.

### 3.3 ESTATOR

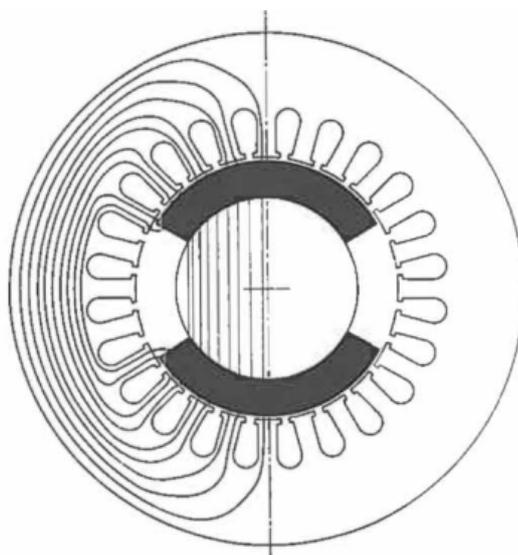
O estator como a própria denominação sugere é a parcela estática do motor. Esta nos motores da categoria *BLDC* é formada por:

1. Estrutura de material ferromagnético;
2. Isolante de ranhura;
3. Placa isolante;
4. Bobinas compostas por fios elétricos.

Tanto o aço do rotor quanto estator além de possuírem o encargo de estruturar o motor, também servem como caminho para o fluxo magnético gerado pelo motor. Essencialmente, a armadura é o elemento por onde a maior quantidade de fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes atravessa, como ilustra a Figura 12. Igualmente ao rotor, o pacote do estator é constituído por lâminas empilhadas uma sobre a outra.

Diferentemente do rotor, a armadura apresenta conexões elétricas por parte dos enrolamentos. As bobinas possuem uma extremidade interligadas entre si, isto é, curto circuitada, se conectadas em "Y", já a outra é ligada ao inversor de frequência que controla o funcionamento do motor.

Figura 12 – Exemplar de um motor *BLDC* simplificado de dois polos e as linhas de fluxo magnético gerada na operação.



Fonte: (HENDERSHOT; MILLER, 2010).

Os fios que compõem os enrolamentos possuem uma espécie de proteção a fim de impedir a sua deterioração, e conseqüentemente a abertura do circuito elétrico que inviabiliza a passagem de corrente. Entretanto, como os fios circundam cada dente do estator, o esmalte protetor dos fios não garante sua proteção plena. Em vista disso, nas ranhuras e na parte superior e inferior do estator, são inseridos anteparos adicionais, estes são respectivamente: isolantes de ranhura e placa isolante. A segunda, além da função protetora, também atua como um objeto que viabiliza o acoplamento do motor a estrutura do mecanismo do compressor, assim como suporte para a conexão entre os enrolamentos e o inversor.

### 3.3.1 Laminação

A laminação do estator é um ponto crucial no *design* de motores elétricos, uma vez que a maioria do fluxo magnético que transita pelos elementos do motor ali flui, logo, esta estrutura é a que mais está sujeita a perdas no aço do motor.

O procedimento de fabricação é semelhante ao do rotor, muitas vezes é feito concomitantemente na mesma máquina, porém, na produção das lâminas do estator existe uma etapa a mais que nos rotores, por conduzirem mais fluxo magnético e possuírem uma geometria complexa, o tratamento térmico.

O material laminado é recebido em forma de bobinas na empresa como mostra a Figura 13. Estas então são estampadas conforme a geometria do projeto do motor.

Este procedimento gera imperfeições no material como rebarbas e estresse me-

Figura 13 – Bobinas de aço elétrico da empresa Aperam.



Fonte: (NOTÍCIAS, 2017).

cânico, que alteram as propriedades magnéticas intrínsecas do aço elétrico. Para tanto, a fim de se preservar as características originais do aço, o recozimento é realizado. A Figura 14 ilustra esta etapa da fabricação de motores elétricos.

Figura 14 – Tratamento térmico das lâminas de motores elétricos.



Fonte: (TENNOVA, 2018).

### 3.3.2 Enrolamentos

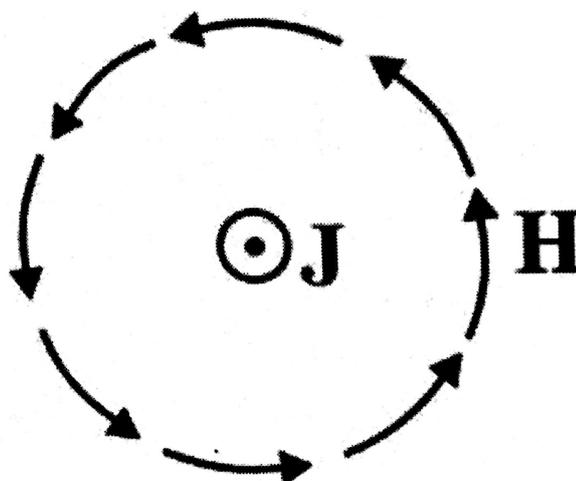
Os enrolamentos do motor são a outra fonte de campo magnético produzido pelos motores elétricos. Este fenômeno é descrito pela lei de *Ampère* como mostra a

equação 2 (BASTOS, 2004):

$$\nabla \vec{H} = \vec{J}. \quad (2)$$

Ao fluir uma corrente elétrica, representada pela densidade superficial de corrente,  $J$ , em um condutor elétrico é criado um campo magnético,  $H$ , rotacional ao filamento como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Representação simplificada da Lei de Ampère.



Fonte: (BASTOS, 2004).

Os enrolamentos do motor elétrico são compostos por bobinas, definidas por um conjunto de espiras dispostas no sentido em que deve ser gerado o campo magnético para que o motor opere. A quantidade de cada um desses elementos depende da aplicação que o motor é empregado, já que estes além de influenciar nas propriedades magnéticas do motor, também afetam as perdas geradas nos condutores, torque, potência e eficiência do motor.

Os motores *BLDC* podem possuir uma ou mais fases, no entanto o escopo do trabalho abordará apenas a topologia trifásica. Os motores polifásicos facilitam a produção de torque constante. Estes possuem seus enrolamentos de fase individuais orientados de modo a permitir que o torque seja uniforme durante o período elétrico, que é mais complexo de obter caso o motor possua fase única (HANSELMAN, 2003).

Assim como o núcleo do motor, formado pelas lâminas do pacote do rotor e estator, os enrolamentos igualmente são fontes de perdas durante a operação do motor, sobretudo as relacionadas a resistência ôhmicas.

A resistência de cada fase dos enrolamentos é descrita por:

$$R_{fm} = k_r \frac{N_{espiras} l_{av}}{\sigma A_c}, \quad (3)$$

onde  $k_r$  é o fator de efeito pelicular para a equação de resistência 3,  $N_{espiras}$  o número de voltas,  $l_{av}$  o comprimento médio de cada espira,  $A_c$  a área da seção transversal do condutor e  $\sigma$  a condutividade elétrica específica do condutor. Usualmente, por tratar-se de uma aplicação em baixas frequências o efeito pelicular é desconsiderado ( $k_r = 1$ ).

Quando em operação, a temperatura dos condutores tende a aumentar de acordo com que a corrente flui. Este comportamento é descrito pela expressão:

$$R_T = R_{T_{amb}} [1 + \alpha_R (T - T_{amb})], \quad (4)$$

em que  $R_T$  é a resistência a uma temperatura específica,  $R_{T_{amb}}$  a temperatura ambiente,  $\alpha_R$  o coeficiente de temperatura da resistência,  $T$  e  $T_{amb}$  respectivamente as temperaturas instantâneas da bobina e a ambiente no momento da medição.

### 3.4 FLUXO E TENSÃO INDUZIDA

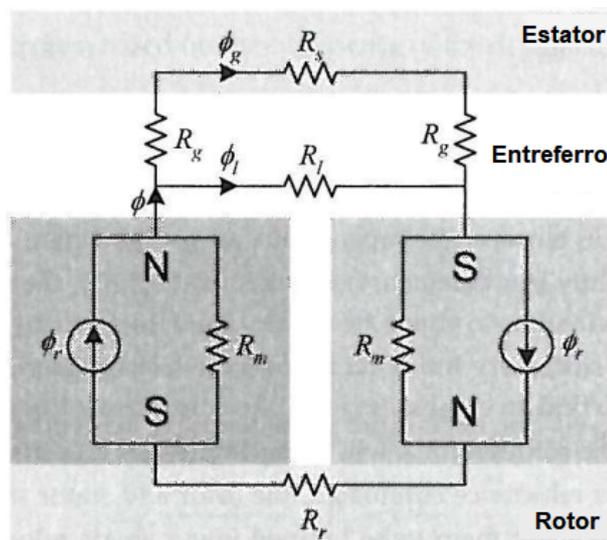
Quando operando em regime permanente o fluxo magnético que por natureza move-se do polo norte ao sul dos ímãs permanentes através de caminhos distintos no motor. Estes são:

1. Pelo estator: o fluxo magnético move-se a partir do polo Norte dos ímãs, atravessa o entreferro do motor e dirige-se ao estator, onde divide-se em duas parcelas semelhantes. Estas, por natureza caminham em direção os ímãs de polaridade Sul, e passam novamente pelo entreferro neste percurso.
2. Pelo entreferro: uma parcela do fluxo do ímã salta de um ímã para o adjacente pelo entreferro sem passar para o estator. O fluxo que segue esse caminho é chamado de fluxo disperso;
3. Pelo rotor: com comportamento semelhante o fluxo magnético também flui pelo aço do rotor.

A Figura 16 ilustra os caminhos realizados pelos fluxos magnéticos no motor.

Nesta figura, o rotor e estator são modelados como relutâncias magnéticas  $R_r$  e  $R_s$ , respectivamente. A relutância é a resistência exercida por um material face a um determinado fluxo magnético, esta é matematicamente representada pela expressão 5.

$$\mathcal{R} = \frac{l_m}{\mu A_m}, \quad (5)$$

Figura 16 – Modelo de circuito magnético do motor *BLDC*.

Fonte: Modificado de (HANSELMAN, 2003)).

sendo  $l_m$  é o comprimento do material,  $A_m$ , área da seção transversal e  $\mu$  a permeabilidade magnética do material.

Os ímãs são modelados como uma fonte de fluxo  $\phi_r$  e relutância magnética associada  $R_m$ . A direção da fonte do fluxo é determinada pela polaridade dos ímãs.

O fluxo que segue em direção ao estator, ao passar pelo entreferro desloca-se através da relutância  $R_g$ . Já o fluxo disperso flui através da relutância dispersa, representada por  $R_l$ .

Os três fluxos representados pelo circuito magnético da Figura 16 são:

1. Fluxo dos ímãs permanentes:  $\phi$ ;
2. Fluxo do entreferro:  $\phi_g$ ;
3. Fluxo disperso:  $\phi_l$ ;

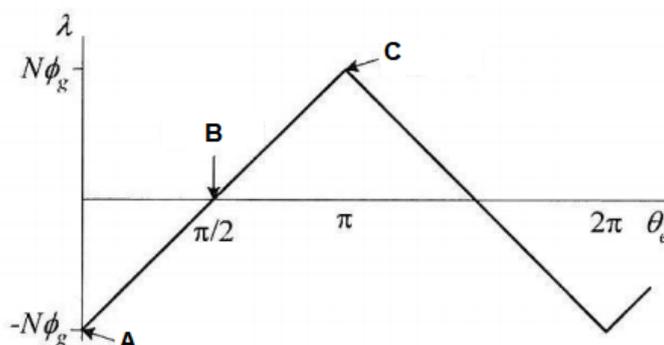
### 3.4.1 Fluxo Concatenado

Quando o rotor gira, o fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes do rotor contido no entreferro é capturado pelas bobinas do rotor, este é denominado de fluxo concatenado e possui significativa importância para a produção de tensão induzida nos enrolamentos do motor *BLDC*.

O fluxo magnético concatenado possui comportamento cíclico que depende da posição em que o rotor se encontra, isto é, qual polaridade dos ímãs estão apontando para a bobina do motor. Além disso, este fluxo também se comporta em função do sentido da corrente do enrolamento, as vezes os fluxos pode somar com o fluxo gerado

pela corrente ou atuar de forma subtrativa. A Figura 17 ilustra um exemplo de fluxo magnético resultante na bobina do motor.

Figura 17 – Fluxo concatenado em função da posição do rotor



Fonte: (HANSELMAN, 2003).

1. Em *A*: a direção do fluxo é oposta daquela produzida pela corrente que circula na bobina, portanto o fluxo concatenado é negativo;
2. Em *B*: a bobina está centrada sobre as metades dos ímãs, neste caso em uma polaridade o fluxo contrapõe ao gerado pela corrente enquanto na outra os fluxos estão no mesmo sentido, o que resulta num fluxo nulo;
3. Em *C*: a direção do fluxo está em concordância com a produzida pela corrente que circula na bobina, portanto o fluxo concatenado é positivo;

### 3.4.2 Tensão induzida

A tensão induzida é um fenômeno físico que se sucede nos enrolamentos do estator dos motores assistidos por ímãs permanentes. Este fundamenta-se a partir da Lei de *Faraday* sintetizado pela expressão 6, sem o sinal de menos:

$$e = \frac{d\lambda}{dt}. \quad (6)$$

O fluxo magnético concatenado ( $\lambda$ ) induz uma tensão ( $e$ ), através do enrolamento sempre que este varia com o tempo ( $t$ ). Como no motor em questão o rotor está constantemente em movimento, quando em funcionamento, o fluxo concatenado varia de acordo com a rotação. Desta forma a equação 6 aplicada é expressa por:

$$e = \frac{d\theta_e}{dt} \frac{d\lambda}{d\theta_e}, \quad (7)$$

em que  $\theta_e$  é o deslocamento angular representado em graus elétricos. Pela definição de velocidade angular, e conversão de graus elétricos em mecânicos ( $\omega_e = \omega_m \frac{N_{espiras}}{2}$ ), o termo a esquerda da equação 7 pode ser substituído, o que resulta em:

$$e = \omega_m \frac{N_{espiras}}{2} \frac{d\lambda}{d\theta_e}, \quad (8)$$

onde  $\omega_m$  é a velocidade angular mecânica de operação do motor.

Os termos a direita de 8,  $\frac{d\lambda}{d\theta_e}$ , referem-se a densidade de fluxo magnético gerado pelos ímãs no entreferro, logo estes são dependentes de aspectos construtivos do motor como: número de polos, espessura, comprimento dos ímãs, altura do pacote do estator, espessura do entreferro e número de espiras na bobina. Desta maneira, para simplificação a tensão induzida gerada nos enrolamentos é comumente expressa por:

$$e = \omega_m k_e, \quad (9)$$

na qual  $k_e$  é denominada por constante de tensão induzida expressa em: V.s/rad

A tensão induzida gerada nestes motores é um importante parâmetro para o controle do motor, pois esta define a forma de onda da corrente que alimenta o motor além de atuar como indicativo do funcionamento do motor. Outra atribuição relevante a este fenômeno está diretamente relacionada com o torque gerado, já que limita a intensidade de corrente necessária para geração de energia mecânica.

### 3.5 TORQUE

Quando opera sob velocidade constante, a forma de onda do torque assim como a corrente configuram uma conversão constante de energia eletromecânica representada pela equação 10.

$$P_{ele} = P_{mec}, \quad (10)$$

em que  $P_{ele}$  e  $P_{mec}$  são respectivamente as potências elétricas e mecânicas, descritas pelas expressões 11 e 12.

$$P_{ele} = eI, \quad (11)$$

$$P_{mec} = \omega_m \tau, \quad (12)$$

onde  $e$  é a tensão induzida,  $I$  a corrente de alimentação e  $\tau$  o torque mecânico gerado no rotor.

Desta forma, ao combinar as expressões 9, 11, e 12 de forma a descrever de forma concisa o fenômeno do torque em uma máquina elétrica, obtém-se:

$$\tau = k_t I. \quad (13)$$

Conseqüentemente, percebe-se que o torque é um parâmetro em função da corrente de alimentação do motor  $I$ . A proporcionalidade é tão considerável que a constante escalar da equação 13 é usualmente chamada de constante de torque,  $k_t$ , expressa em: N.m/A.

A partir das equações evidencia-se que  $k_e = k_t$ , entretanto, na prática estas constantes não são iguais, e deferem-se moderadamente. A igualdade dos parâmetros é válida desde que uma delas seja escalonada por um fator (HENDERSHOT; MILLER, 2010).

Quando o motor tem mais de uma fase nos enrolamentos, que é o caso de estudo, a conservação da energia representada pela equação 10 deve ser aplicada simultaneamente a todas as fases. Desta forma:

$$\tau \omega_m = \sum_{n_f=1}^3 e_{n_f} I_{n_f}, \quad (14)$$

em que  $n_f$  é o número de fases que compõem o enrolamento do motor. Desta forma, ao utilizar noções da equação 13 em 14, o torque pode ser descrito por:

$$\tau = \sum_{n_f=1}^3 k_{Tn_f} I_{n_f}, \quad (15)$$

em que  $k_{Tn_f}$  é a constante de torque gerada em cada fase do enrolamento.

Na prática, o torque desejado deve ser constante, proporcional à amplitude da corrente. Ou seja, o motor deve produzir torque que não varia em função da posição do rotor, mas linearmente com a amplitude da corrente. Entretanto, para que o motor continue a operar continuamente as correntes devem fazer as transições de amplitudes instantaneamente, com duração finita de tempo. Como resultado disto são criadas ondulações de torque, ou torque *ripple* como são comumente chamadas, toda vez que ocorre a comutação da corrente em cada fase. Este fenômeno é tido como a maior desvantagem da configuração do drive do motor Corrente Contínua (CC) sem escova.

### 3.5.1 Cogging Torque

Esse torque existe em máquinas de ímãs permanentes mesmo quando não há excitação dos enrolamentos do estator. O fenômeno surge devido à interação entre o rotor constituído por ímãs e os dentes do estator.

Quando o ímã do rotor se aproxima ou afasta do dente, o campo em seu entorno é variado, o que resulta num torque, regularmente chamado de torque de relutância,

ou em inglês, *cogging torque*, uma vez que a mudança de campo magnético faz com que a relutância do dente e das ranhura também modifique-se com a movimentação do rotor (KRISHNAN, 2009).

Isto posto infere-se que o motor em operação gera dois gêneros de torque, estes são:

1. *Cogging* Torque ( $\tau_{cogg}$ ): resultado da interação entre campo magnético gerado pelos ímãs permanentes e componentes do aço do estator, isto é, torque de atração entre ímãs e o núcleo ferromagnético devido a abertura das ranhuras;
2. Torque eletromagnético ( $\tau_{elmag}$ ): consequência relação entre corrente elétrica dos enrolamentos e campo magnético gerado pelos ímãs permanentes do rotor.

O somatório entre esses dois fatores constituem o Torque total ( $\tau_{total}$ ) fornecido pelo motor, como mostra a equação:

$$\tau_{total} = \tau_{cogg} + \tau_{elmag} \quad (16)$$

## 3.6 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

### 3.6.1 Controle

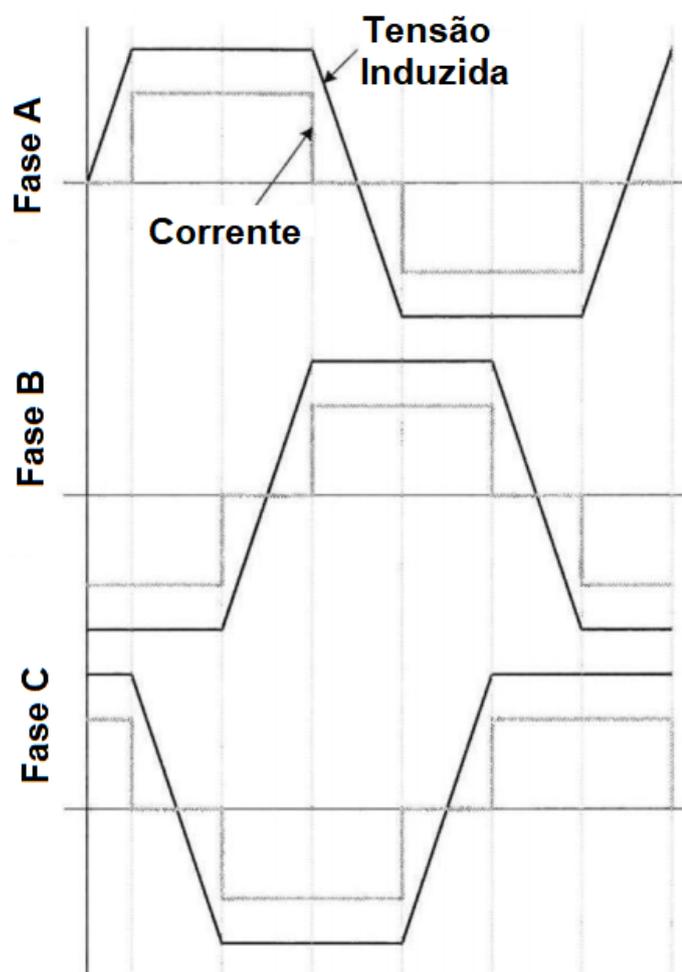
O controle dos motores *BLDC* fundamenta-se essencialmente na comutação da corrente elétrica que alimenta os enrolamentos do motor.

Como princípio de controle, necessita-se conhecer a forma de onda da tensão induzida nas bobinas do motor. Desta forma o inversor comuta a corrente de alimentação CC para a bobina com a mesma polaridade e fase da tensão induzida.

Visto que a forma de onda das correntes de fase estão em fase com as tensões induzidas reproduzidas nas fases do motor, o produto entre essas duas formas de onda como mostrado pela expressão 14 resulta sempre em um valor positivo de torque, isto é, em todos os ciclos do motor é produzido um torque unidirecional o que é o efeito das inversões de corrente em sincronismo com a tensão induzida. A Figura 18, de maneira simplificada, ilustra esse fenômeno de controle.

Para que isso seja possível, os inversores utilizam métodos de sensoriamento de fase do campo elétrico gerado pelos ímãs permanentes.

Os motores de ímãs permanentes sem escovas requerem correntes de fase alternadas que podem ser ondas senoidais ou trapezoidais, característica que depende da forma de onda da tensão induzida, que por sua vez decorre da distribuição das linhas de campo nos ímãs. Por exemplo, caso seja radial, a tensão induzida gerada terá comportamento sinusoidal, por outro lado se paralela, a forma de onda gerada tenderá a um formato trapezoidal. Tudo para que o produto corrente e tensão seja positivo durante o funcionamento da máquina.

Figura 18 – Formas de onda da corrente e tensão induzida no motor *BLDC*

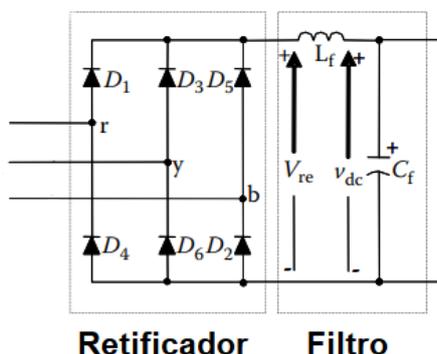
Fonte: Adaptado de (HANSELMAN, 2003)).

Em ambos os casos, os controladores eletrônicos de potência são idênticos, e somente a estratégia de controle é diferente. Este é o conjunto de regras ou algoritmos que determinam quando os transistores de potência são chaveados, para a comutação da corrente. Sua premissa é o controle preciso e suave de torque e velocidade, enquanto limita a corrente a um valor seguro (HENDERSHOT; MILLER, 2010).

### 3.6.2 Circuito elétrico

A entrada Corrente Alternada (CA) do inversor é retificada através de uma ponte de diodos e sua saída é filtrada de forma a manter a tensão CC constante. O filtro compreende um indutor,  $L_f$  e um capacitor eletrolítico,  $C_f$ . Este filtro suaviza a tensão retificada. A Figura 19 ilustra o circuito de entrada simplificado de um inversor, em que  $D$  representa os diodos,  $V_{re}$ , a tensão retificada e  $v_{dc}$  a tensão contínua na saída do filtro.

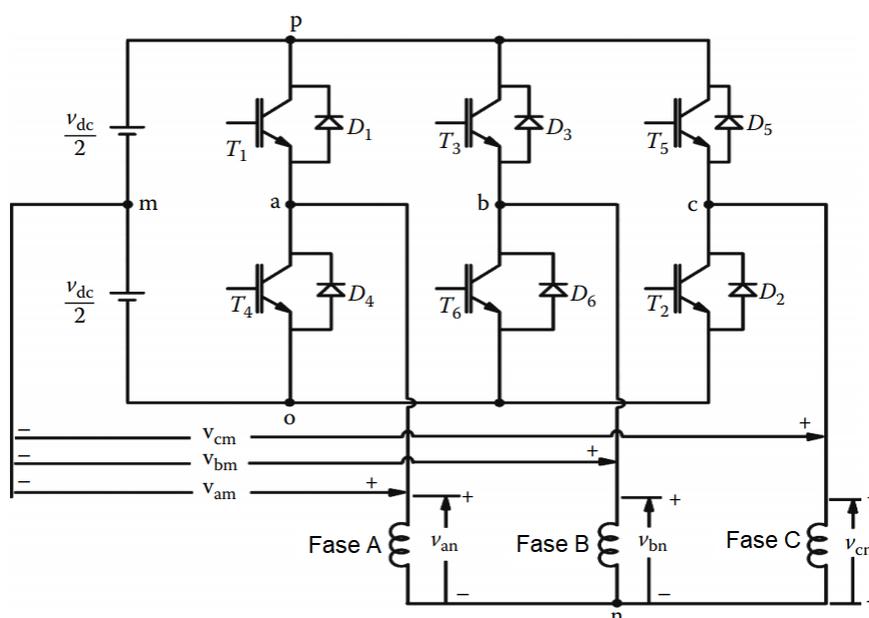
Figura 19 – Circuito de entrada simplificado do inversor de frequência.



Fonte: Adaptado de (KRISHNAN, 2009).

A tensão contínua,  $v_{dc}$ , da saída do filtro é uma das tensões que os transistores responsáveis pela comutação da corrente que alimentam as fases do motor. A outra tensão é a induzida gerada nas fase do motor, enquanto isso, conectados o terminal *gate* dos transistores os microprocessadores transmitem um sinal, de acordo com o posicionamento do rotor para que as chaves abram ou fechem consoante a demanda. A Figura 20 ilustra um esquemático simplificado do circuito de saída do inversor de frequência, em que os enrolamentos do motor estão representados pelas indutâncias.

Figura 20 – Saída do sinal do inversor de frequência trifásico.



Fonte: Adaptado de (KRISHNAN, 2009).

Além de alimentar o circuito de saída do inversor, a tensão contínua da saída do filtro, promove o funcionamento do microprocessador e outros componentes que controlam a corrente de excitação do motor. Esta alimenta alguns subsistemas do inversor que modificam sua amplitude, conforme suas necessidades. Portanto existem ainda uma relativa quantidade de circuitos de importância significativa para a operação do motor. No entanto, como este dispositivo de potência não é o escopo do trabalho não será relatado em detalhes todas as suas características elétricas.

### 3.7 PERDAS

Os motores de corrente contínua sem escovas são notáveis pela alta eficiência que apresentam durante sua operação.

As perdas se dividem em:

1. Ôhmicas;
2. No aço;
3. Mecânicas;
4. Nos ímãs.

#### 3.7.1 Perdas Ôhmicas

As perdas ôhmicas ou resistivas são aquelas como o próprio nome diz, relacionadas a resistência dos enrolamentos da armadura já que a topologia do motor em estudo, leva apenas bobinagem no estator (uma vez que o rotor é de ímãs), quando estes são percorridos por uma corrente elétrica.

As perdas resistivas nos enrolamentos com  $N$  fases e corrente  $I$  é descrita por:

$$P_{ohmicas} = NI^2 R_{fm}, \quad (17)$$

em que  $R_{fm}$  é a resistência de fase dos enrolamentos do motor.

#### 3.7.2 Perdas no aço

Quando os materiais ferromagnéticos são excitados por um fluxo magnético variável no tempo, a energia é dissipada devido a perdas por histerese,  $P_{Hist}$ , e dinâmicas,  $P_{Din}$ , que incluem as perdas por correntes induzidas e as perdas por excesso ou anômalas. Estas são difíceis de isolar experimentalmente, portanto, o que se mede são as perdas no núcleo ou aço,  $P_{nucleo}$ , uma combinação das demais. Matematicamente este fenômeno é expresso pela equação 18.

$$P_{nucleo} = P_{Din} + P_{Hist}. \quad (18)$$

Nos motores de ímã permanente sem escovas, diferentes partes do material ferromagnético são expostas a diversas amplitudes de densidade de fluxo magnético e formas de onda, logo as perdas não são constantemente distribuídas pelo núcleo do motor.

As perdas por histerese ocorrem devido à energia perdida toda vez que um ciclo de histerese é percorrido. Essa perda é diretamente proporcional ao tamanho do *loop* de histerese de um dado material e, portanto, é proporcional à amplitude da excitação (HANSELMAN, 2003). Em geral, a perda por histerese é descrita pela equação 19.

$$P_{Hist} = k_h f B^{n_{mat}}, \quad (19)$$

onde  $k_h$ , é uma constante que depende do tipo e das dimensões do material,  $f$  é a frequência,  $B$  é a amplitude da densidade do fluxo dentro do material e  $n_{mat}$  é um expoente do material geralmente entre 1,5 e 2,5 (HANSELMAN, 2003).

As perdas dinâmicas são compostas por outras perdas, as anômalas ou excedentes e as por corrente parasita. As perdas anômalas são definidas como a diferença entre as perdas totais e a soma das perdas histeréticas e parasitas.

Já a perda por corrente parasita é causada por correntes elétricas induzidas no material ferromagnético sob excitação variável no tempo. Estas correntes parasitas induzidas fluem pelo material, logo devido à resistividade destes, é dissipada em forma de calor (HANSELMAN, 2003). A perda de energia por corrente parasita, para indução senoidal, é descrita aproximadamente pela relação 20.

$$P_{C.P.} = k_{cp} h^2 B^2 f^2, \quad (20)$$

em que  $h$  é a espessura do material e  $k_{cp}$  é uma constante dependente do material. Neste caso, a perda de energia é proporcional ao quadrado da frequência, da amplitude da densidade do fluxo e da espessura do material no plano perpendicular ao fluxo magnético.

### 3.7.3 Perdas nos ímãs

As perdas por corrente parasita induzida nos ímãs permanentes de máquinas sem escova são frequentemente negligenciadas. No entanto, essa suposição pode nem sempre ser justificada. Devido à condutividade elétrica relativamente alta dos ímãs de terras raras, a perda por corrente parasita resultante pode ser significativa, e causar uma substancial perda nesses materiais além de aumentar a temperatura e resultar na desmagnetização parcial e irreversível dos ímãs, especialmente em máquinas com alta carga elétrica, alta velocidade de rotação ou um alto número de polos (ISHAK; ZHU; HOWE, 2005).

Entretanto, o dispositivo de estudo é constituído por ímãs permanente do material ferrite, uma cerâmica não condutora, cujas perdas são insignificantes, esta representa apenas 0,5% das perdas totais do motor (DUTTA; CHONG; RAHMAN, 2013). Desta forma estas serão desprezadas na análise do motor.

#### **3.7.4 Perdas mecânicas**

As perdas mecânicas são consequência dos fenômenos de atrito nos enrolamentos e ventilação. As perdas de rolamentos dependem da velocidade do eixo, tipo de rolamento, propriedades do lubrificante e a carga no rolamento. Já as perdas por ventilação são uma consequência da fricção entre as superfícies rotativas e o fluido circundante, geralmente ar. Estas tornam-se cada vez mais significativas com o aumento da velocidade da máquina (PYRHONEN; JOKINEN; HRABOVCOVA, 2013).

Contudo, assim como as perdas obtidas nos ímãs permanentes, as mecânicas também serão negligencias no estudo. Porém, neste caso, porque os sistemas de medição utilizados mensuram apenas as perdas eletromagnéticas do motor.

## 4 METODOLOGIA

O embasamento prático deste trabalho constituiu-se da seguintes fases:

1. Fabricação de amostras;
2. Testes experimentais;
3. Realimentação no software de simulação para :
  - a) calibração;
  - b) remodelagem;

todas realizadas na empresa EMBRACO Compressores.

### 4.1 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

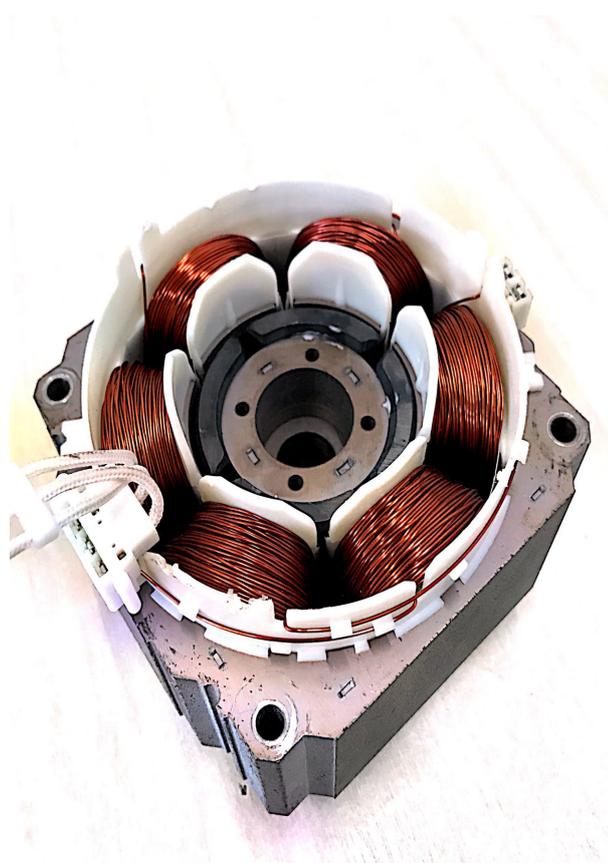
Para estudo foi escolhido um motor de ímãs permanentes sem escovas de uso comercial da empresa, com rotor interno, composto por 6 ranhuras, onde estão agrupadas as bobinas e 4 polos no rotor formado por ímãs permanentes de ferrite, com distribuição radial das linhas de fluxo.

O motor possui tanto o pacote do rotor quanto estator constituídos por lâminas de aço elétrico, cujo processo de fabricação envolveram:

1. Estampagem;
2. Tratamento térmico;
3. Soldagem das lâminas do estator;
4. Colagem dos ímãs no rotor e magnetização aplicando corrente nas bobinas do estator;
5. Inserção de isolantes de ranhuras e placa isolante;
6. Bobinagem;
7. Inserção de cabos.

Todas etapas foram feitas na linha de produção da empresa EMBRACO, e obedeceram os procedimentos padrões de fabricação de motores. A Figura 21 ilustra o motor utilizado no trabalho.

Figura 21 – Motor comercial da empresa Embraco utilizado no estudo.



Fonte: Autoria Própria.

## 4.2 MODELO ANALÍTICO

### 4.2.1 Software Analítico

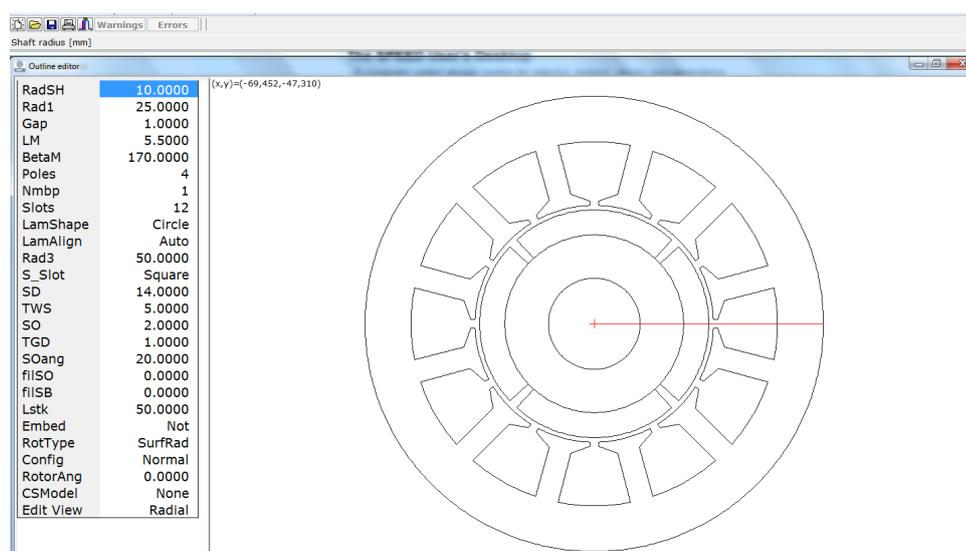
Como software analítico para a simulação, calibração e reprojeto utilizou-se o *Scottish Power Electronics and Electric Drives (SPEED)* (MILLER; MCGILP; WEARING, 1999), este foi escolhido pela sua facilidade na modificação de geometria, oferecimento de uma biblioteca de cálculo avançada, velocidade de processamento em comparação a um *software* de elementos finitos, além de fácil integração entre a modelagem e os testes experimentais.

#### 4.2.1.1 *SPEED*

O *SPEED (Scottish Power Electronics and Electric Drives)* é um consórcio de empresas industriais com um interesse comum em eletrônica de potência e tecnologia de acionamento de motor. O *SPEED* foi desenvolvido em 1987 pelo professor Timothy J. E. Miller no Departamento de Eletrônica e Engenharia Elétrica da Universidade de *Glasgow*, com a finalidade de projetos de motores elétricos. O *software* atende a de-

manda para motores de indução (polifásico/monofásico); motores de ímã permanente sem escovas (onda quadrada/onda senoidal); motores de corrente contínua de escova; motores de relutância comutados; e motores de relutância síncronos. Ele é executado na plataforma IBM PC, com documentação completa que inclui informações extensas sobre teoria e projeto motor (MILLER; MCGILP; WEARING, 1999). As Figuras 22 e 23 ilustram a interface do usuário para inserção das dimensões e dos parâmetros de simulação respectivamente.

Figura 22 – Interface para inserção das dimensões e formatos do rotor e estator.



Fonte: Autoria Própria.

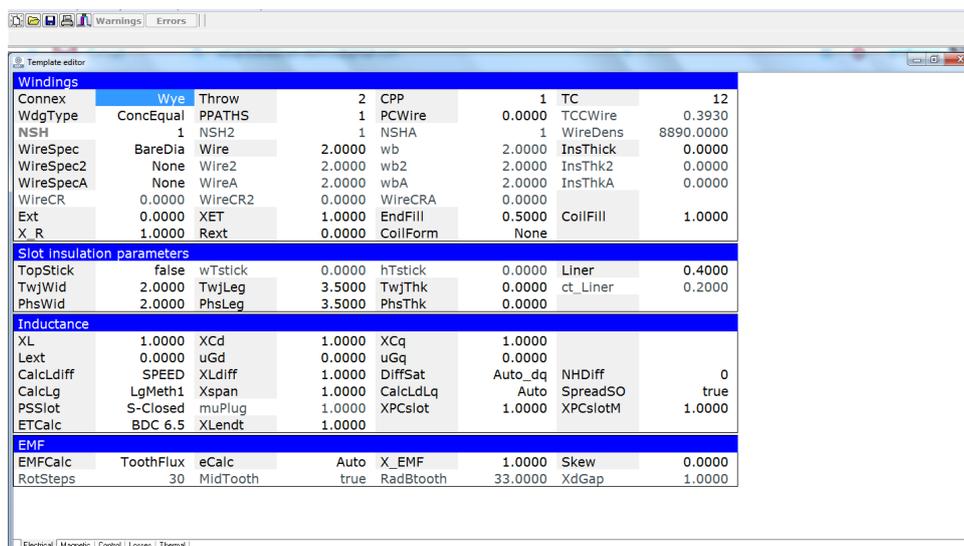
#### 4.2.2 Atributos da simulação analítica

Na simulação, inicialmente, foram inseridos os parâmetros do motor, como listado:

- Dimensões do estator;
- Dimensões do rotor;
- Materiais;
- Número de espiras;
- Controle (parâmetros do inversor);
- Modelo de cálculo para tensão induzida e perdas.

Como modelo de cálculo da tensão induzida gerada nas bobinas do motor adotou-se o método "BLV" (HENDERSHOT; MILLER, 2010), que trata os condutores

Figura 23 – Interface para inserção dos parâmetros de simulação do motor.



Fonte: Autoria Própria.

do estator como filamentos no diâmetro localizados em orifícios de um estator sem ranhuras. É empregado um modelo de circuito magnético equivalente de parâmetro fixo não linear juntamente com uma função semi-empírica que descreve o perfil ou a distribuição de fluxo no entreferro. A saturação do dente e coroa do estator são consideradas.

O princípio de cálculo deste método é a lei de *Faraday*, como representada pela equação 6 aplicada a máquinas rotativas, expressão 8. Por este procedimento a tensão induzida é calculada a partir da diferença da densidade de fluxo magnético gerado em cada limitação angular do passo da bobina, como mostra a equação 21.

$$e = (B_{\theta_2} - B_{\theta_1}) \omega_{elec} k_{BLV}, \quad (21)$$

em que  $B_{\theta_2}$  e  $B_{\theta_1}$  são respectivamente as densidades de fluxo em cada limitação angular do passo da bobina e  $k_{BLV}$ , constante de tensão induzida que depende das dimensões do estator e entreferro.

Neste método a densidade de fluxo magnético no entreferro é considerada estática, não modulada pelas ranhuras. Assim a forma de onda da tensão induzida em um passo completo da bobina tem a mesma forma de onda que a distribuição da densidade de fluxo magnético não modulada no entreferro.

Quando o método de cálculo da tensão induzida é o "BLV" as perdas no aço são computadas a partir da expressão Modificada de *Steinmetz* (HENDERSHOT; MILLER, 2010). A forma de onda da densidade de fluxo gerado no aço é considerada com forma sinusoidal, e o cálculo das perdas é feito a partir dos valores de pico no dente, na sapata e na coroa.

### 4.3 TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais deste trabalho foram realizados no Laboratório Elétrico da empresa EMBRACO, estes foram divididos em:

1. Resistência ôhmica;
2. Tensão induzida;
3. Eficiência no ponto de carga.

#### 4.3.1 Resistência Ôhmica

O método utilizado para a medição de resistência ôhmica nos enrolamentos foi o a quatro fios. Este foi realizado através de um multímetro digital de bancada, como o mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Multímetro digital de bancada]

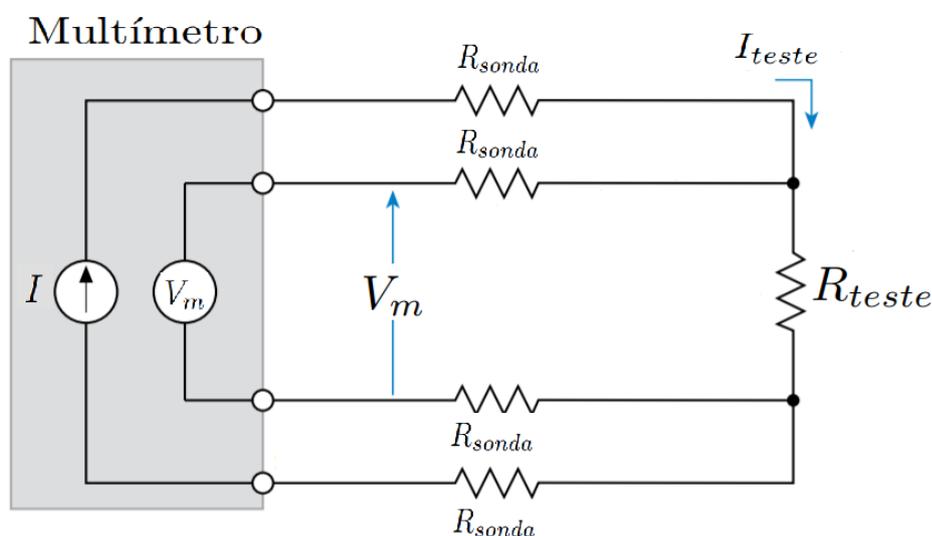


Fonte: (DEBUGSTORE, 2018).

O método de medição de resistência a quatro fios é geralmente preferido para medições de baixa resistência porque reduz o efeito resistivo do cabo de medição que conecta os enrolamentos do motor ao dispositivo. A Figura 25 mostra o esquemático do circuito elétrico da medição.

Com esta configuração, a corrente de teste,  $I_{teste}$ , é forçada através da resistência teste,  $R_{teste}$ , por meio de um conjunto de terminais, enquanto a tensão de medição ( $V_m$ ) é medida por intermédio de um segundo conjunto de derivações. Embora alguma corrente pequena (normalmente menor que 100 pA) possa fluir através das derivações sensoriais, ela é geralmente insignificante e pode ser ignorada para todos os

Figura 25 – Esquemático do circuito do método da medição a quatro fios.



Fonte: Modificado de (JANESCH, 2013).

fins práticos. A queda de tensão nas derivações dos sensores também é irrelevante, de modo que a tensão medida,  $V_m$ , é essencialmente a mesma que a tensão sob a resistência do motor. Como resultado, o valor medido pode ser determinado com muito mais precisão do que com o método de dois fios (JANESCH, 2013).

Ao medir a resistência nesses terminais do motor, o resultado na prática é a resistência linha a linha do motor,  $R_{fm}$ , já que este é o único acesso possível para se realizar a medição.

A bobinagem do motor possui poucas variações, ou seja, o número de espiras que circundam as ranhuras são as mesmas para cada uma e a resistência da fase do motor,  $R_{LL}$ , pode ser obtida por:

$$R_{fm} = \frac{R_{LL}}{2}. \quad (22)$$

As medições foram feitas apenas uma vez em cada motor, em cada uma obteve-se três valores de resistência de linha. A Tabela 3 demonstra os resultados obtidos.

O valor médio e o desvio padrão da resistência de fase, ao se levar em consideração a premissa da equação 22, são apresentados na Tabela 4.

#### 4.3.2 Medição da Tensão Induzida

Para a medição da tensão induzida gerada nas bobinas do motor de corrente contínua sem escovas foi montada uma bancada no Laboratório elétrico da empresa EMBRACO.

Tabela 3 – Medições da resistência linha a linha,  $R_{LL}$ , obtidas do motor.

<b>Amostra</b>	<b>A-B [<math>\Omega</math>]</b>	<b>A-C [<math>\Omega</math>]</b>	<b>B-C [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Temperatura [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>
1	15.56	15.62	15.56	24.30
2	15.53	15.61	15.57	24.30
3	15.53	15.53	15.55	24.30
4	15.69	15.56	15.60	24.30
5	15.57	15.64	15.56	24.30
6	15.50	15.59	15.53	24.30
7	15.55	15.56	15.63	24.30
8	15.68	15.57	15.65	24.30
9	15.63	15.57	15.59	24.30
10	15.49	15.59	15.56	24.30

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Resistência de fase média e desvio padrão.

<b>Média [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Desvio Padrão [<math>\Omega</math>]</b>
7.7895	0.023781996

Fonte: Autoria Própria.

As medições foram feitas de acordo com os circuitos retratados nas Figuras 26 e 27.

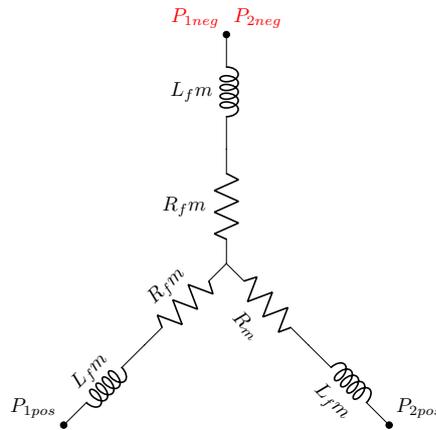
Em que  $L_{fm}$ ,  $R_{fm}$  e  $R_p$  são respectivamente a indutância de fase do motor, a resistência de fase do motor e a resistência de prova da medição que possui alto valor, de forma a impedir a passagem de corrente, e curto circuitar uma das fases do motor, o que dá assim acesso ao neutro e permite a medição da tensão induzida de fase.

As ponteiros de tensão são posicionadas nos nós indicados por  $P_{pos}$  e  $P_{neg}$ , que correspondem ao positivo e negativo da ponteira de prova.

O procedimento de medição foi feito de acordo com o esquemático ilustrado pela Figura 28.

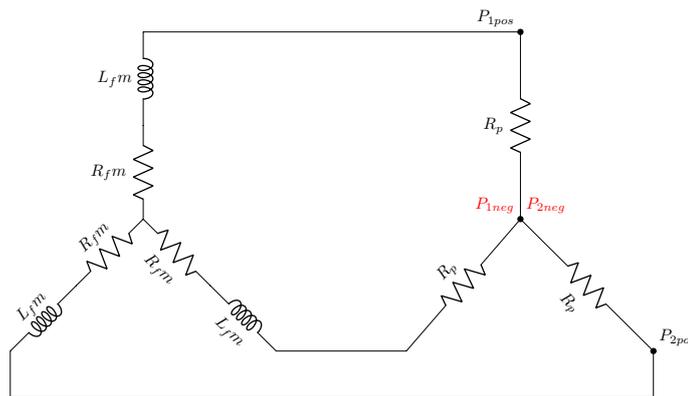
A medição da tensão induzida nas bobinas foi realizada em apenas uma amostra, na condição de 2000 rpm, pois aferiu-se que a variação entre os motores era baixa. As formas de onda obtidas nas medições são ilustradas nas Figuras 29 e 30. Cabe ressaltar que os valores estão expostos em por unidade (p.u.) cuja referência é o maior valor obtido em cada teste.

Figura 26 – Circuito elétrico da medição da tensão de linha.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 27 – Circuito elétrico da medição da tensão de fase



Fonte: Autoria Própria.

### 4.3.3 Eficiência no ponto de carga

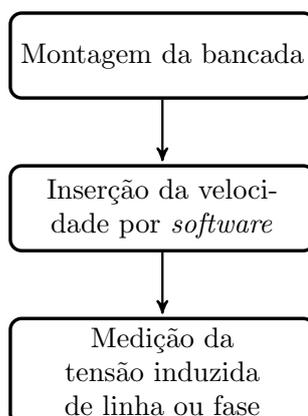
A eficiência do motor elétrico,  $\eta$ , é a razão entre a potência de entrada,  $P_e$ , e a de saída,  $P_s$ , desconsiderando a impedância de linha, como expressa pela equação 23.

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}, \tag{23}$$

A potência de entrada ainda se subdivide em outras cinco parcelas como descrito na equação:

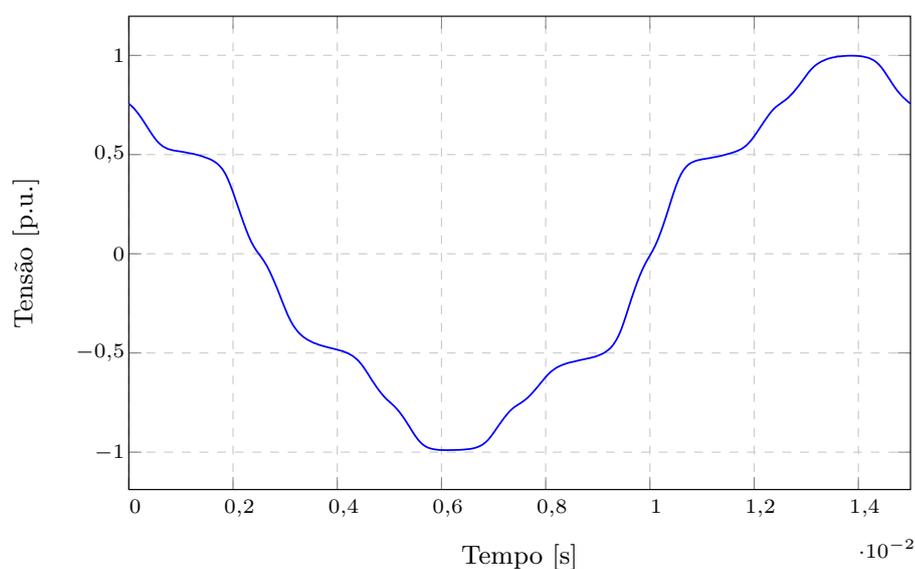
$$P_e = P_{ohmicas} + P_{nucleo} + P_{mec} + P_{ima} + P_s, \tag{24}$$

Figura 28 – Procedimento da medição de tensão induzida.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 29 – Forma de onda da tensão induzida de linha medida nos enrolamentos do motor.



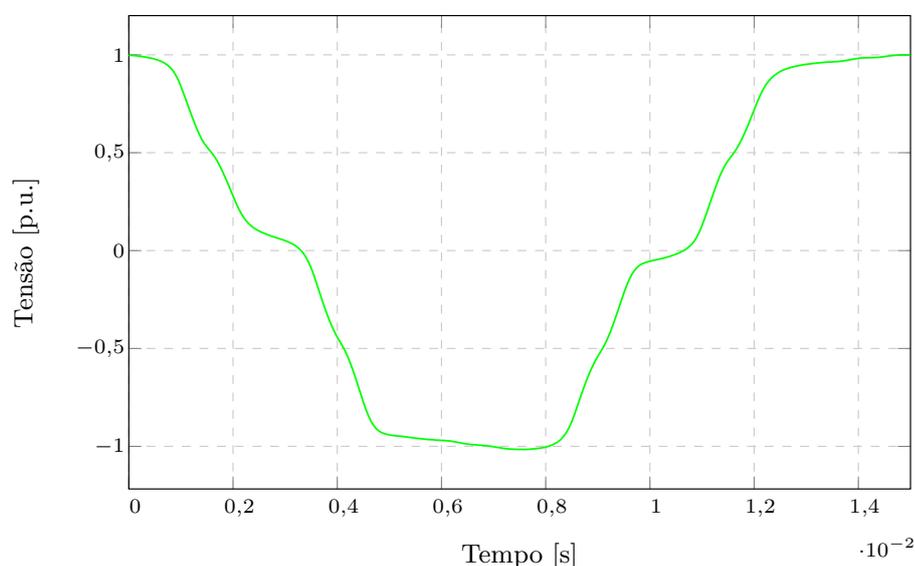
Fonte: Autoria Própria.

em que  $P_{mec}$  e  $P_{ima}$ , são respectivamente as perdas mecânicas e no ímã, ambas desprezadas na análise.

A potência de saída do motor é descrita pela equação 12, o que evidência a relevância do torque e velocidade na análise da eficiência do motor.

Durante os testes, o rotor da amostra é rotacionado pelo motor instalado à bancada de testes, a força exercida,  $F_{cc}$ , é medida por um transdutor de carga, na

Figura 30 – Forma de onda da tensão induzida de fase medida nos enrolamentos do motor.



Fonte: Autoria Própria.

aquisição esta é multiplicada pela distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação,  $d_{sm}$ , cujo resultado é o torque mecânico como mostra a expressão 25:

$$\tau_{mec} = F_{cc}d_{sm}. \quad (25)$$

Uma vez que se tem a medição do torque exercido e a velocidade inserida ao sistema a potência de saída do motor é obtida.

A potência de entrada do circuito trifásico do sistema é medida através do método dos dois wattímetros, estes são instrumentos de medição responsável pela mensuração de potência, cujo funcionamento é fundamentado em quatro entradas, ou as vezes três, já que uma delas pode ser compartilhada, porém geralmente, tem-se duas entradas de tensão e corrente, cujas configurações de ligação são respectivamente em paralelo e série.

Os pontos de carga e velocidade foram escolhidos de acordo com o compressor ao qual o motor será destinado de forma que os valores escolhidos estão representados na Tabela 5.

Cujos valores de ponto de carga, isto é, torque estão representados em p.u. sendo o valor de base o maior valor obtido experimentalmente nos testes de eficiência.

Para definir esses parâmetros determinou-se o torque e a velocidade de acordo com as características do modelo de refrigeração em que ele é utilizado. As condições de teste foram estimadas de acordo com os testes de calorímetro feitos no projeto do

Tabela 5 – Velocidade de rotação e pontos de cargas nas quais as eficiências das amostras foram medidas.

<b>Velocidade [rpm]</b>	<b>Pontos de carga [p.u]</b>	
2000	0,65	0,98

Fonte: Autoria Própria.

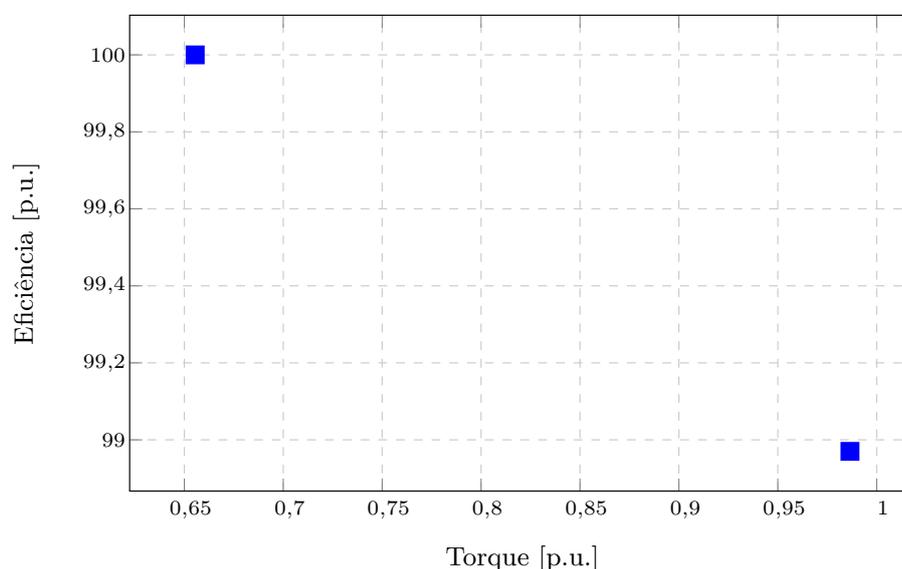
compressor comercial.

A ideia para a seleção dos parâmetros das condições de teste foi:

1. 2000 rpm: avaliar a eficácia do motor, ao operar na condição em que o compressor mais atua em seu funcionamento permanente;
2. 0,65 p.u. e 0,98 p.u.: avaliar o comportamento das perdas ôhmicas nos enrolamentos do fio.

As médias dos dez valores medidos para cada ponto de carga estão ilustradas na Figura 31.

Figura 31 – Valores médios obtidos experimentalmente expressos em p.u.

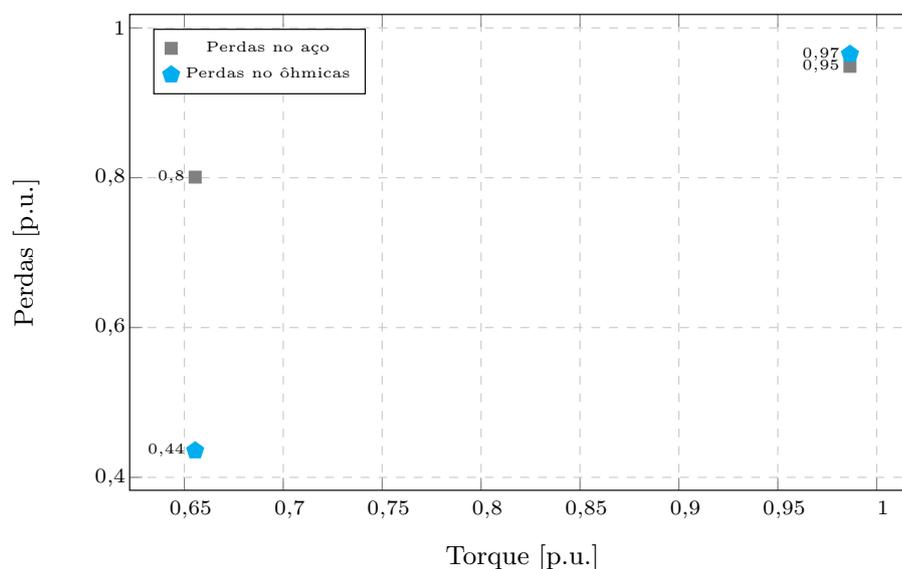


Fonte: Autoria Própria.

Após feitos os testes, e obtidos os valores de eficiência em função do torque exercido, foi realizada a análise da origem das perdas do motor, para que na remodelagem possam ser ajustados parâmetros de forma que as perdas sejam reduzidas e, conseqüentemente, torne o dispositivo mais eficaz. A Figura 32 ilustra as perdas

ôhmicas e no ferro, obtidas em cada ponto de torque testado, ambas representadas no sistema por unidade, cujos valores bases são os maiores obtidos experimentalmente em cada perda.

Figura 32 – Média das perdas ôhmicas e no aço obtidas na medição.



Fonte: Autoria Própria.

A sincronização do inversor de frequência também contribui na performance do motor. No entanto não foram consideradas no escopo do trabalho.

#### 4.4 SIMULAÇÃO ANALÍTICA-*SPEED*

O reprojeto do motor foi realizado em duas etapas. A primeira fundamentou-se na calibração do motor a partir de suas características construtivas e os resultados de resistência, tensão induzida e eficiência obtidos experimentalmente. Já a segunda parte foi destinada ao reprojeto propriamente dito. Neste, os fundamentos de funcionamento dos motores *BLDC* foram utilizados de modo a serem reduzidas as perdas na máquina.

##### 4.4.1 Calibração

O *SPEED* permite a utilização de dois gêneros de simulação, os quais foram utilizados durante o procedimento de calibração, estes são:

1. *design* estático:

- a) cálculos térmicos: usa temperaturas fixas especificadas como dados de entrada e não realiza cálculos de aumento de temperatura;
- b) controle da velocidade: nas simulações feitas de maneira estática a velocidade é mantida constante;
- c) forma de onda: calcula com as formas de onda de correntes ideais e assume que a tensão de alimentação é adequada para acionar essas formas de onda;

## 2. *design* dinâmico:

- a) cálculos térmicos: incorpora vários cálculos térmicos de diferentes níveis de complexidade. O cálculo é recursivo para que a resistência do enrolamento e as propriedades do ímã sejam ajustadas automaticamente para a temperatura;
- b) controle da velocidade: velocidade pode ser variada;
- c) forma de onda: são integradas as equações de tensão do sistema e calculadas as formas de onda de corrente e torque em um ciclo elétrico, é levado em conta os efeitos dinâmicos da indutância e o formato de onda da tensão induzida.

A calibração do motor deve ser feita uma vez que incertezas relacionadas às propriedades dos materiais, fabricação do motor, condições de testes afetam o funcionamento do dispositivo, e não são ideais.

Para isto existem alguns parâmetros que devem ser modificados a fim de se obter o resultado de simulação mais fidedigno possível ao medido, estes são :

1. XET: o comprimento da espira está sujeito a incertezas decorrentes de diferenças na fabricação. O XET ajusta diretamente (multiplica) o comprimento da curva final internamente calculada. Por isso, afeta a resistência do estator e o peso do cobre;
2. XBrT: fator de utilização que representa a fração da densidade de fluxo remanescente do ímã que parece ser eficaz no estabelecimento do entreferro e da tensão induzida. Seu trabalho é corrigir o valor da tensão induzida devido a, por exemplo, variações na magnetização. Ao escalar o valor efetivo da densidade de fluxo remanescente do ímã, BrT (no *software*), ele ajusta todos os valores de densidade de fluxo em circuito aberto, bem como a forma de onda da densidade de fluxo no entreferro;
3. XFe: fator de ajuste para perdas do núcleo. Um valor maior que 1 é normalmente necessário, devido à natureza aproximada dos cálculos de perda de núcleo e incertezas que frequentemente existem nos dados para aços, especialmente

quando os valores de densidade de fluxo ou frequência são diferentes daqueles nos quais foram obtidos pelo teste de *Epstein*.

Para a calibração da resistência ôhmica dos enrolamentos, primeiramente, inseriu-se as temperaturas ambiente e de bobina (consideradas iguais). Posteriormente, realizou-se uma simulação estática de modo a verificar o quanto se deveria modificar XET para obter o valor mais próximo à medição. Após feito isto, realizou-se mais algumas tentativas de forma a ter-se uma resistência ôhmica de enrolamento mais fiel à medição. O diagrama de blocos da Figura 33 ilustra o procedimento realizado nesta tarefa.

Após algumas iterações o valor ideal encontrado para XET que calibrou e resistência ôhmica foi de 0,84, o que resultou numa diferença relativa de -0,0886% em relação a resistência medida experimentalmente. A Figura 34 compara a resistência ôhmica obtida experimentalmente e a calibrada.

Assim como na calibração da resistência, o procedimento realizado pela tensão induzida também se baseia primeiramente no ajuste da temperatura, inserção do parâmetro da velocidade de controle (este é o mesmo da medição), simulação dinâmica e ajuste do parâmetro XBrT, que ajusta o valor de  $B_r$  do ímã permanente, caso o valor não seja próximo do obtido experimentalmente, o procedimento é repedido desde a simulação dinâmica. Como comparação entre o simulado e obtido na medição é analisado o valor de pico da tensão induzida de linha.

Neste caso os ajustes de temperatura foram:

1. Temperatura ambiente;
2. Temperatura da bobina;
3. Temperatura dos ímãs;

todos estes baseados nos aspectos obtidos durante os testes experimentais.

O diagrama de blocos que ilustra a calibração da tensão induzida nas bobinas é mostrado na Figura 35.

Feitos os procedimentos, o valor XBrT que melhor ajustou os resultados obtidos pela simulação analítica aos experimentais foi de 0,9427, o que modela a indução remanente do ímã a 0,3738 T. As Figuras 36 e 37 ilustram os comparativos das tensões de linha e fase respectivamente.

Após feitas as calibrações da resistência e do ímã permanente o próximo passo realizado foi calibrar as perdas no aço. Nesta etapa assim como nas etapas anteriores primeiramente foram ajustadas as temperaturas em que as medições foram realizadas. Posteriormente o controle da velocidade.

Após inseridos os parâmetros de temperatura e velocidade de rotação, estabeleceu-se a corrente de pico, ISP (no *software*), necessária para que seja atingido o torque específico de ensaio.

Variou-se então o parâmetro de calibração das perdas no aço, XFe, de modo a obter a eficiência naquele ponto de torque. A simulação dinâmica foi feita. Caso não fosse obtida uma eficiência próxima da medida efetua-se novamente as duas últimas etapas até que fosse atingido um valor próximo do obtido em laboratório.

A Figura 38 ilustra os procedimentos realizados na calibração das perdas no aço.

Feita as interações a fim de se calibrar o mais ideal possível, obteve-se um valor de XFe igual a 2,2. O resultado da calibração encontra-se na Figura 39.

#### 4.4.2 Reprojeto

A partir da análise da Figura 32 alterou-se os parâmetros construtivos do motor de forma a reduzir-se as perdas da máquina.

Desta maneira a primeira solução proposta para que as perdas ôhmicas fossem reduzidas e conseqüentemente aumento da eficiência, durante a operação do motor foi aumentar a bitola do fio condutor, já que este parâmetro é inversamente proporcional à resistência ôhmica.

Foram feitas algumas análises quanto ao valor que deveria-se acrescer para que obtivesse um aumento significativo da eficiência e o que melhor correspondeu as perspectivas de ganho foi o aumento de 0,03 mm no diâmetro da seção transversal útil, sem contar o esmalte isolante, do condutor. A modificação realizada resultou numa elevação de 0,877% , em relação aos resultados da calibração, como pode ser visto na Figura 40, onde é feito uma comparação entre as curvas de eficiência.

Isto posto, constatou-se que o objetivo do aumento de 1% não havia sido atingido.

Portanto, inferiu-se que as próximas alterações deveriam ser feitas no comportamento da tensão induzida de forma a se reduzir a corrente necessária para entregar um determinado torque no eixo. Em outras palavras, deveria-se aumentar o valor da tensão induzida nos enrolamentos de forma a ampliar o valor da constante  $k_e$ , a qual é diretamente proporcional a  $k_T$ , e assim o motor careceria de um montante de corrente menor para atender a demanda de torque.

Desta forma, foram modificados parâmetros do *design* do motor que contribuíram para a maior captação de fluxo magnético concatenado nas bobinas e diminuição das perdas no aço. Estes foram:

1. Altura do pacote do estator: melhorar a captação do fluxo disperso gerado pelos ímãs no *design* antigo;

2. Abertura da ranhura: diminuir a densidade de fluxo magnético que flui para as extremidades da sapata e direcioná-lo à coroa, que conseqüentemente, aumenta o fluxo concatenado;
3. Diminuição do *overhang*: reduzir as perdas no aço. Uma prática normal no motores *BLDC* é aumentar a área do ímã e o fluxo magnético resultante, que torna o comprimento axial do ímã maior que o pacote de laminação do estator. No entanto esta prática também aumenta as perdas no aço uma vez que o fluxo magnético nas regiões do aço será maior.

A Tabela 6 mostra as modificações realizadas a fim de se melhorar a captação de fluxo magnético pelo estator do motor. Os sinais a esquerda representam o aumento ou diminuição da dimensão do parâmetro.

Tabela 6 – Modificações realizadas a fim de melhorar a eficiência a partir da indução magnética do estator.

<b>Parâmetro de modificação</b>	<b>Dimensão</b>
Altura do estator	+ 2,5 mm
<i>Overhang</i>	-0,2 mm
Abertura da ranhura	+ 0,15 mm

Fonte: Autoria Própria.

As alterações resultaram num acréscimo percentual de 1,027% na eficiência e 5% na tensão de pico induzida gerada nos enrolamentos, em relação a calibração. As Figuras 41 e 42 mostram o comparativo entre a curva de eficiência obtida e a tensão induzida, antes e após as modificações.

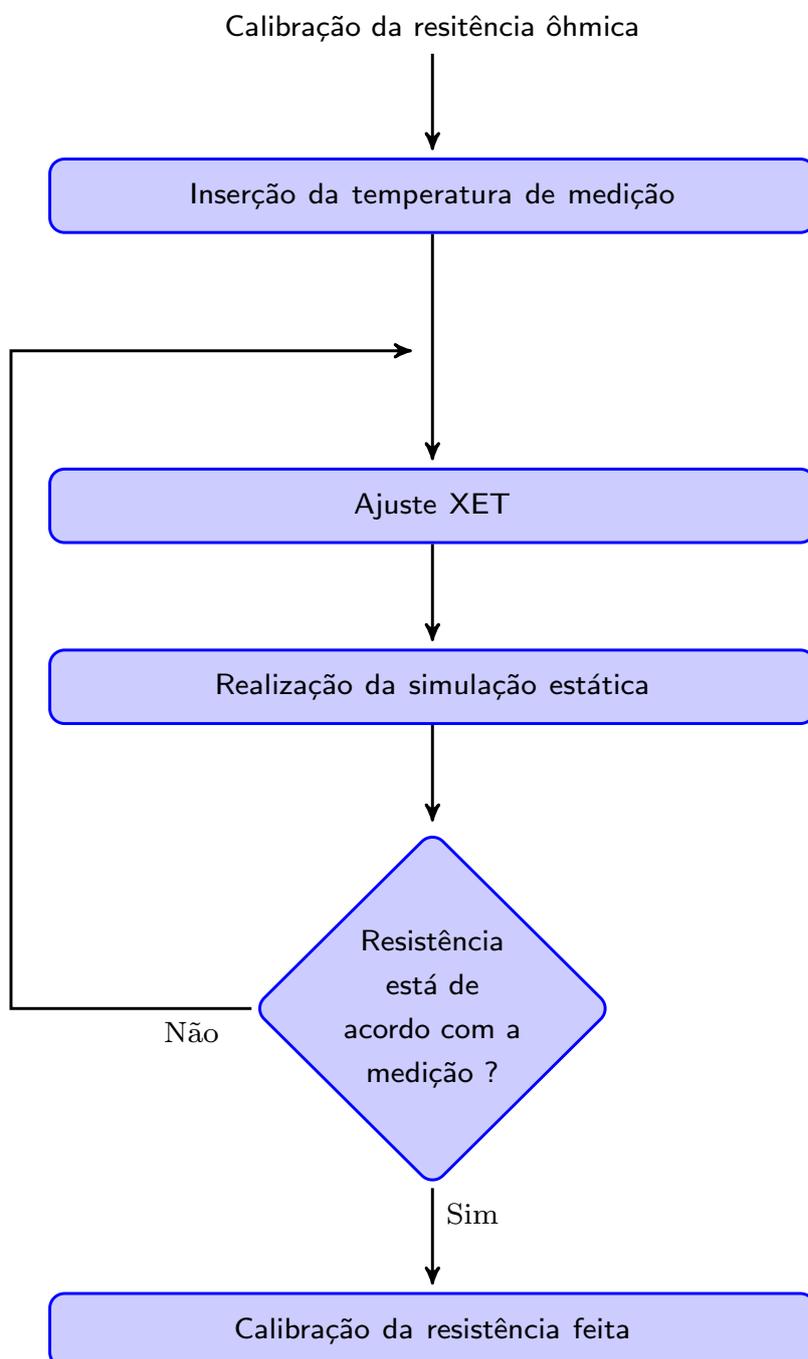
No entanto, apesar de ter atingido valores pertinentes ao escopo do trabalho, o projeto deparou-se com um obstáculo em relação ao processo de fabricação, o fator de enchimento. Este associa a área da ranhura disponível para o preenchimento com condutores, e o dimensional ocupado pelos fios.

A empresa, atualmente, com base no maquinário que possui adota valores inferiores dos limites em que um projeto pode ser viabilizado, e o alterado não os obedeceu, o que inviabiliza o processo de bobinagem.

Para tanto, modificou-se o raio da ranhura de forma que o fator de enchimento caísse. Entretanto, com esta modificação o valor percentual do ganho da eficiência foi para 0,996%, o que não atende as especificações do objetivo do trabalho, visto que para que o projeto obtenha este ganho experimentalmente deve-se obter um resultado simulado um pouco acima do esperado. Desse modo, a fim de melhorar o desempenho do motor aumentou-se altura de pacote em 1 mm em relação a última modificação, de forma a ampliar ainda mais o fluxo magnético concatenado.

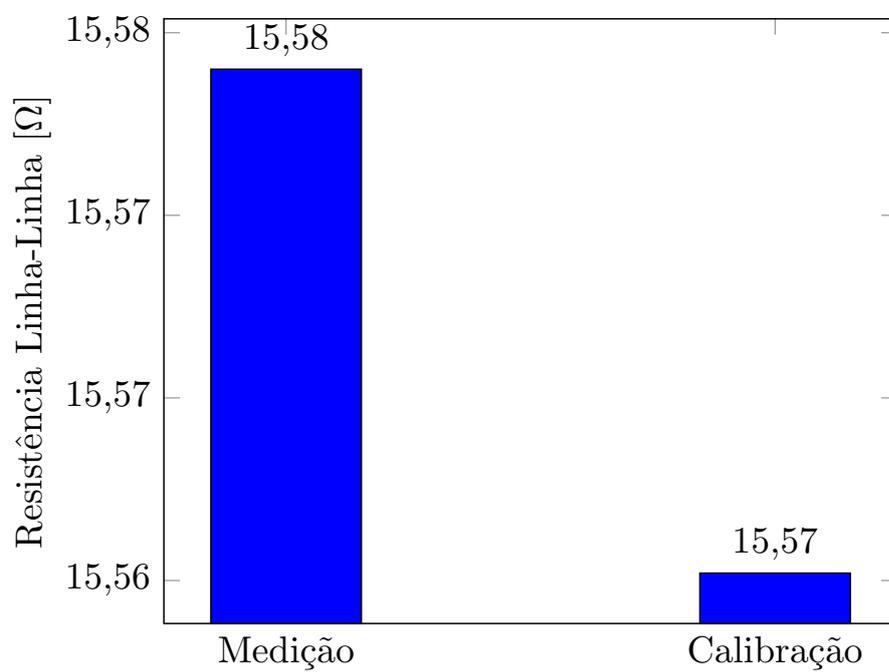
Feitos os últimos ajustes, atingiu-se as expectativas de eficiência e viabilidade de fabricação do motor. As Figuras 43 e 44 ilustram as curvas de tensão induzida e eficiência do motor remodelado.

Figura 33 – Diagrama de blocos do procedimento de calibração da resistência ôhmica dos enrolamentos do motor.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 34 – Gráfico comparativo Resistência medidas vs Calibrada.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 35 – Diagrama de blocos do procedimento de calibração da tensão induzida gerada nos enrolamentos do motor.

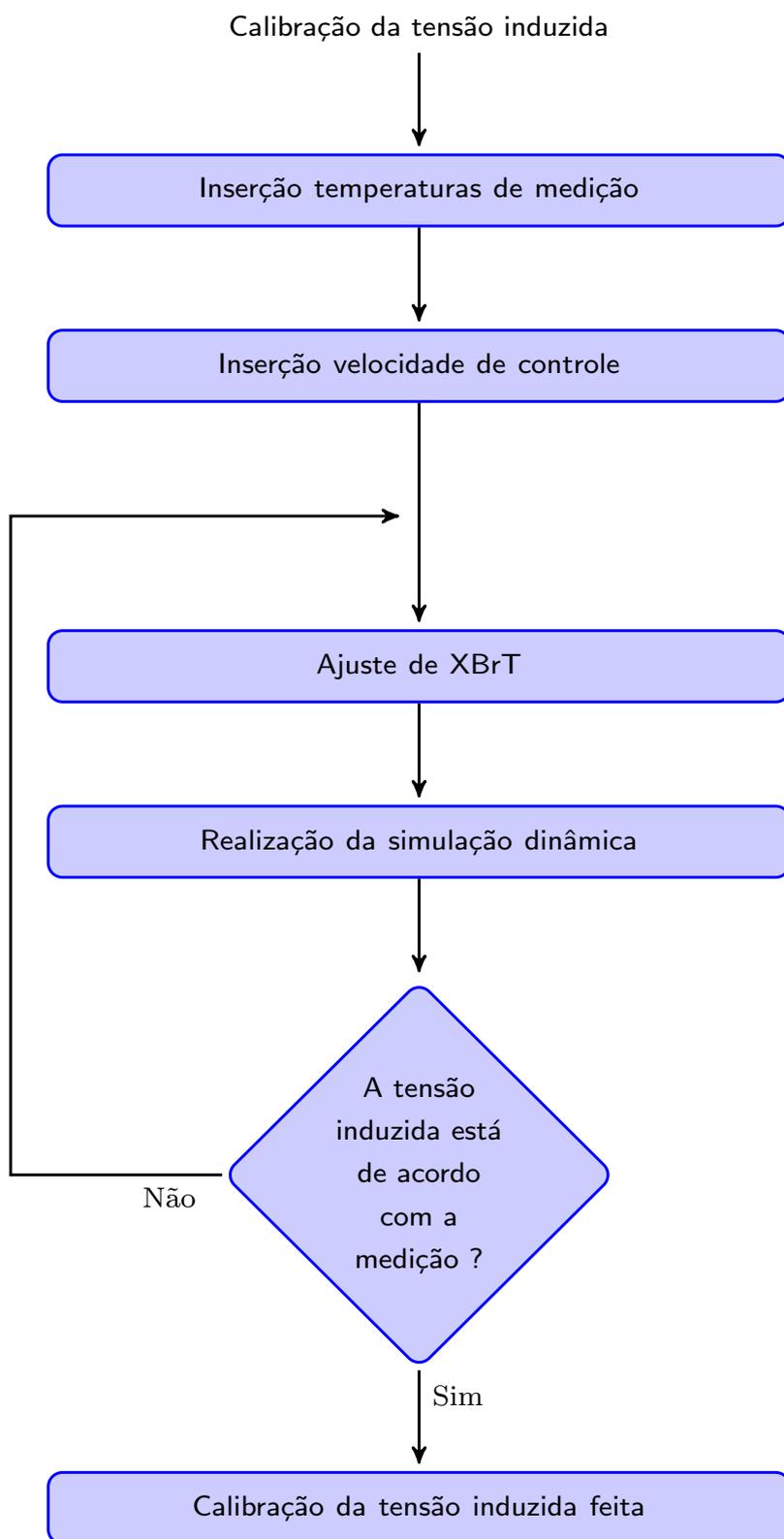
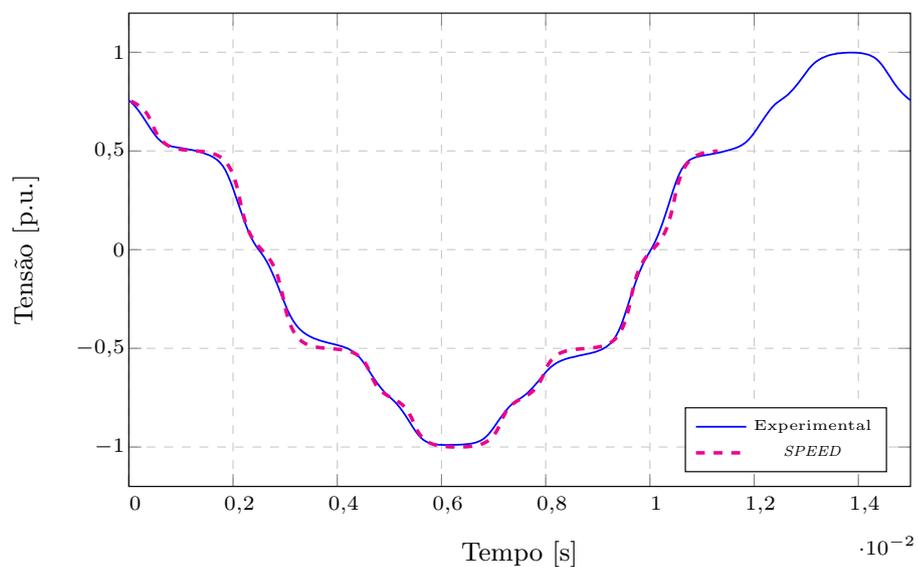
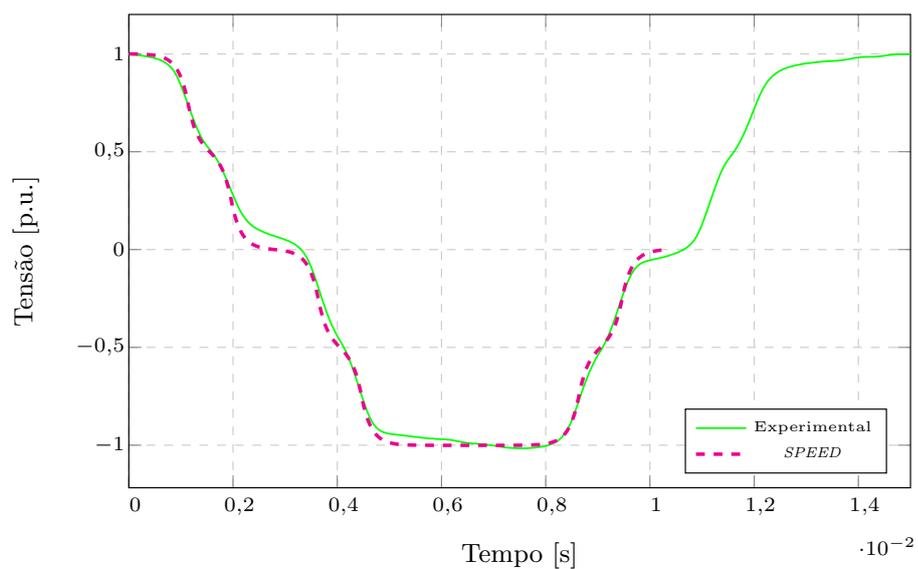


Figura 36 – Gráfico comparativo das tensões induzidas de linha.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 – Gráfico comparativo das tensões induzidas de fase.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 38 – Diagrama de blocos do procedimento de calibração das perdas no aço gerada.

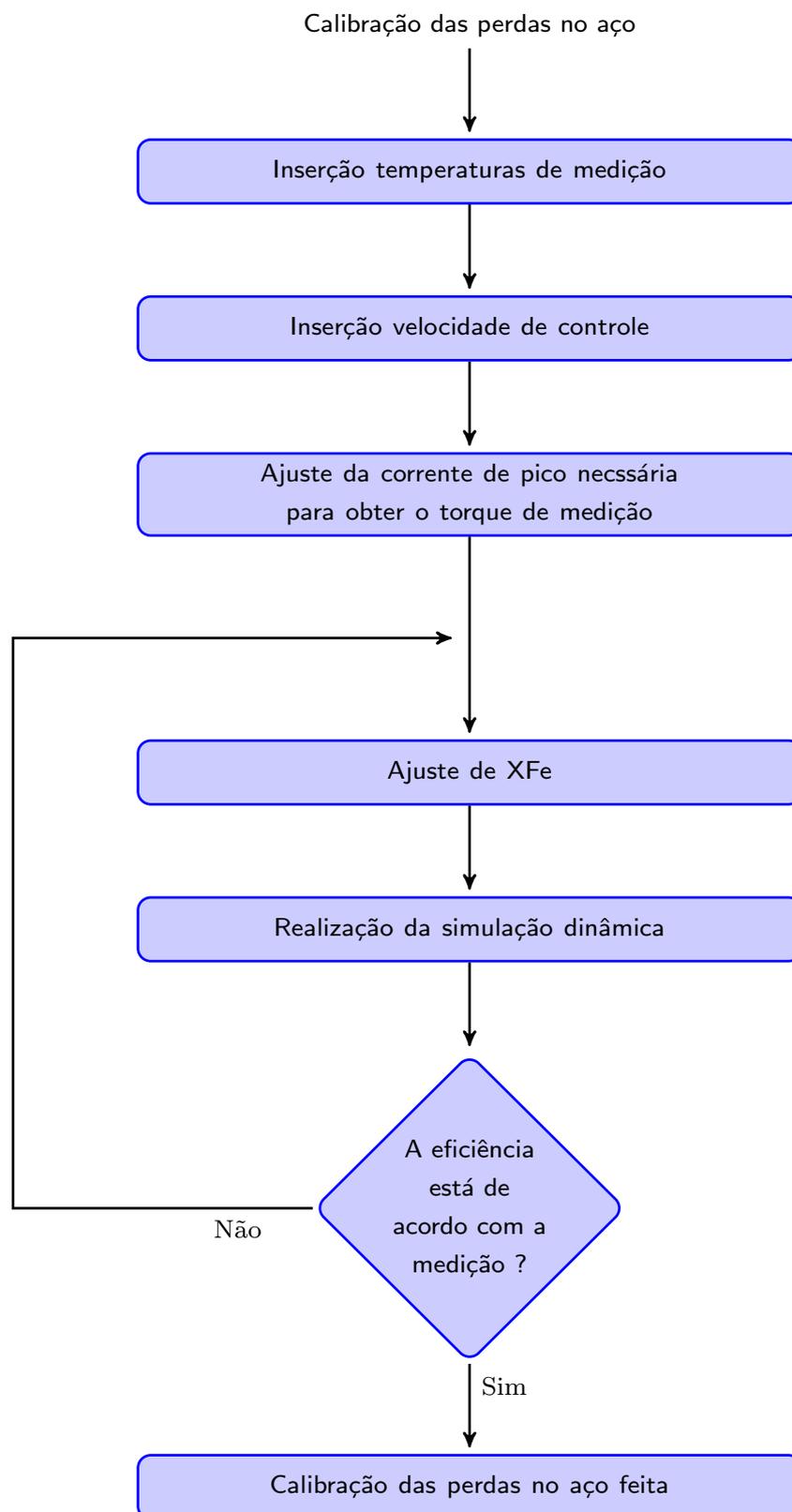
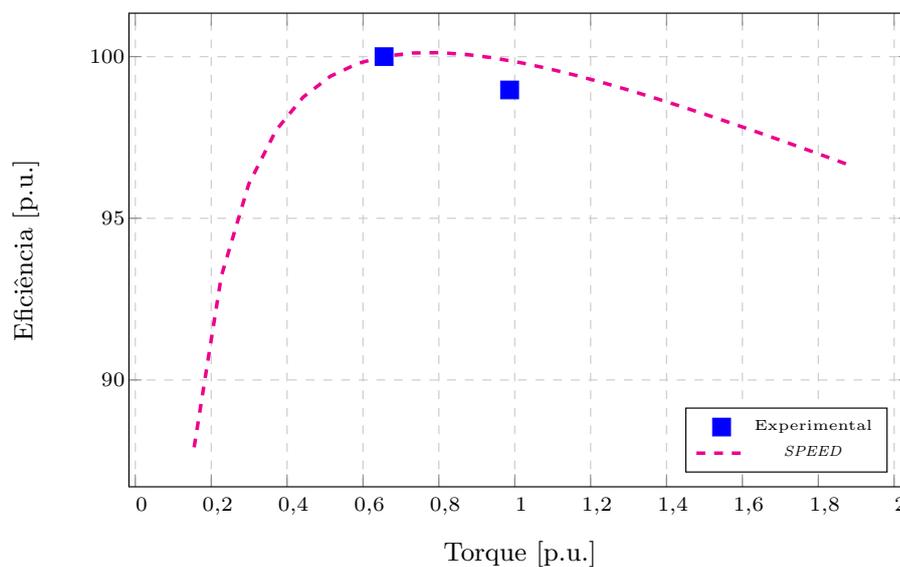
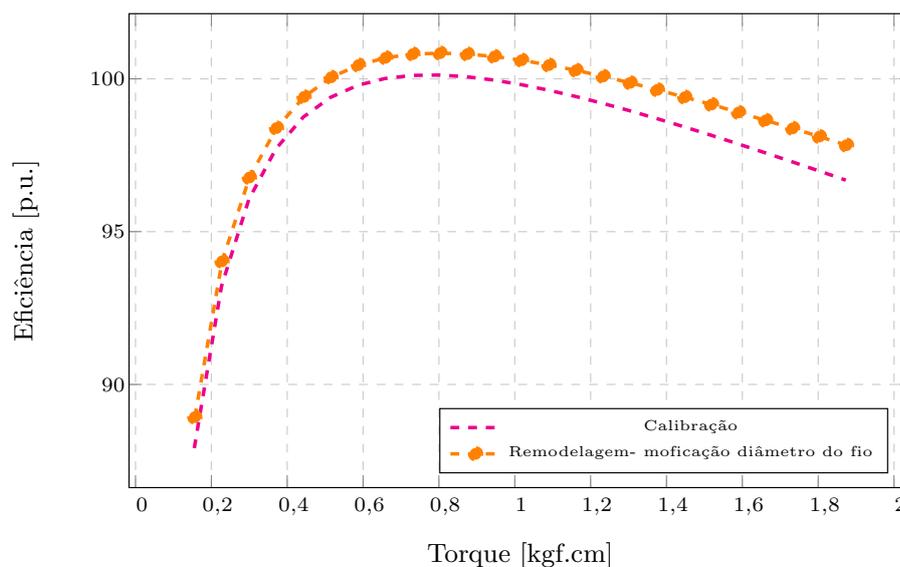


Figura 39 – Gráfico comparativo da calibração das perdas no aço.



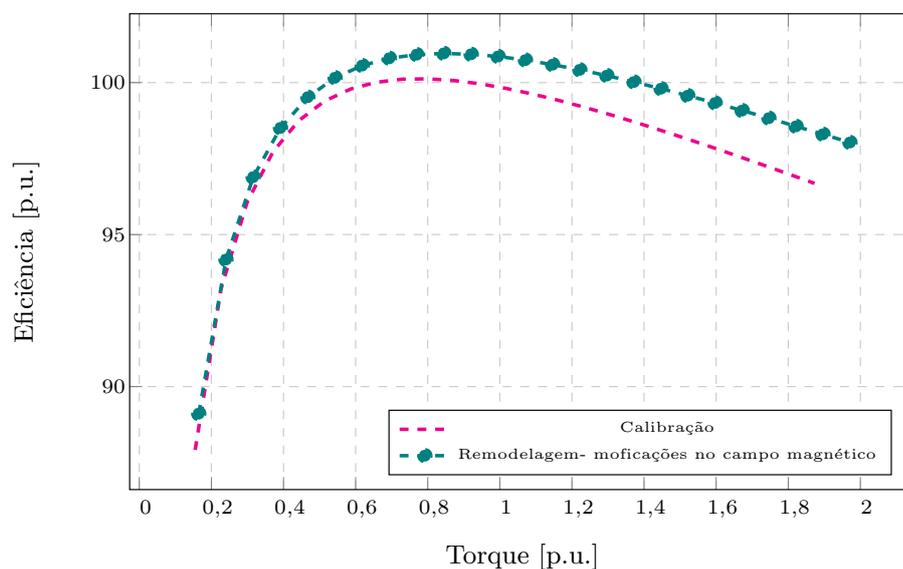
Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 – Comparação entre as curvas de eficiência calibrada antes e após o aumento da bitola do fio.



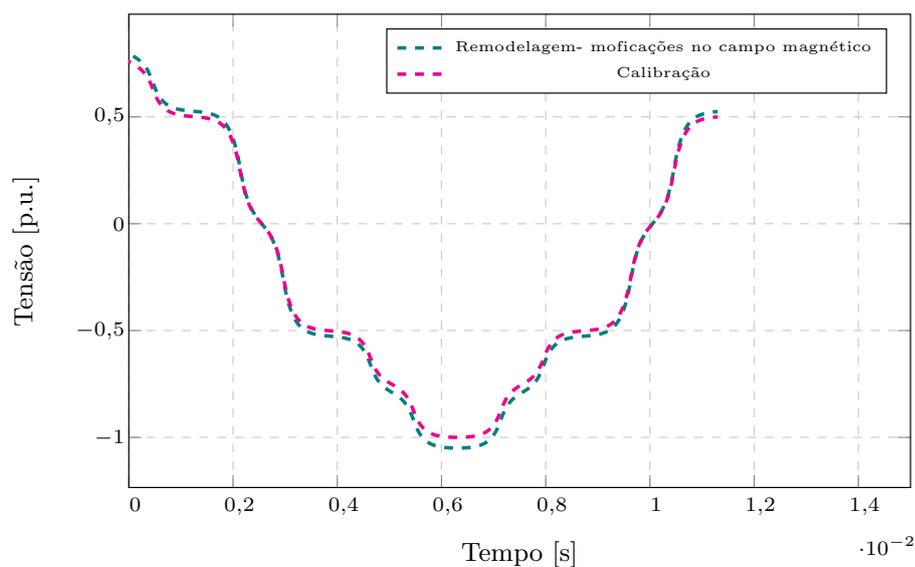
Fonte: Autoria Própria.

Figura 41 – Comparação entre a eficiência calibrada antes e após as modificações dos parâmetros que afetam a indução magnética no estator.



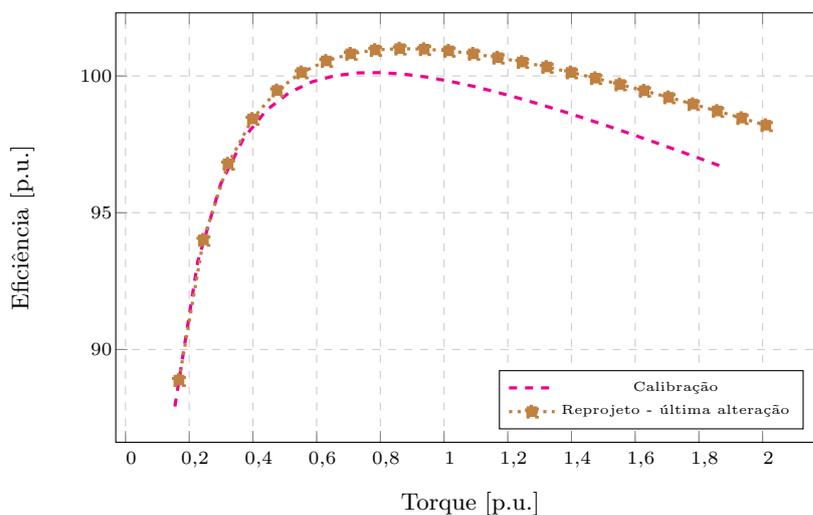
Fonte: Autoria Própria.

Figura 42 – Comparação entre a tensão induzida calibrada antes e após as modificações dos parâmetros que afetam a indução magnética no estator.



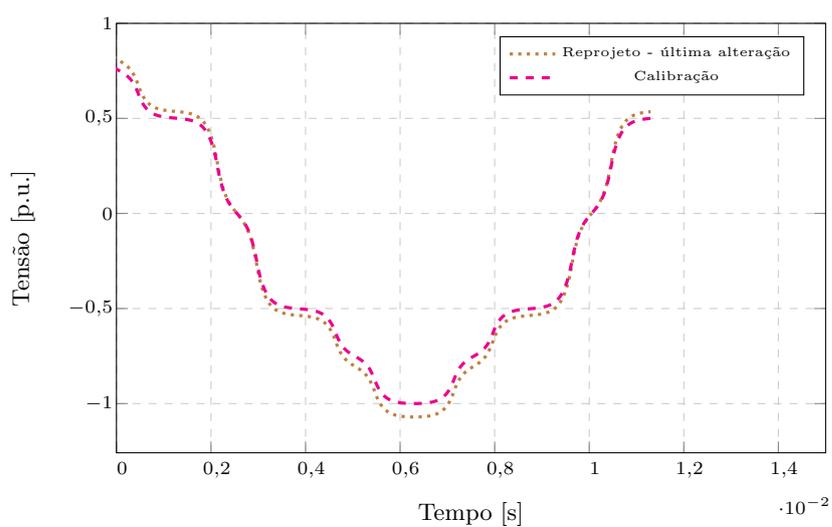
Fonte: Autoria Própria.

Figura 43 – Comparação entre a eficiência calibrada e a obtida após a última modificação dos parâmetros.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 44 – Comparação entre a tensão induzida calibrada e a obtida após a última modificação dos parâmetros.



Fonte: Autoria Própria.

## 5 CONCLUSÃO

No passo final houve um ganho percentual de 1,068% na eficiência além de 7% na tensão de pico induzida, modificação que contribuiu para a redução de corrente para se atingir o torque demandado. As alterações dos parâmetros remodelados do motor e da massa dos elementos que o compõe são apresentados nas respectivas Tabelas 7 e 8. Na Tabela 7 nota-se que houve um aumento percentual relativo de 6,37% da massa, o que equivale a 0,157 kg de acréscimo na massa total da máquina e atende a premissa do trabalho.

Tabela 7 – Tabela comparativa das massas dos elementos do motor antes e após as modificações.

	<b>Aumento percentual relativo [%]</b>
<b>Aço elétrico</b>	4,39
<b>Fio de cobre</b>	19,42
<b>Ferrite</b>	7,02
<b>Total</b>	6,37

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Tabela das modificações realizadas nas dimensões dos parâmetros do motor.

<b>Parâmetros de modificação</b>	<b>Dimensão [mm]</b>
Diâmetro do fio	+ 0,03
Altura do estator	+ 3,5
<i>Overhang</i>	- 0,2
Abertura da ranhura	+ 1,85
Diâmetro da ranhura	+ 0,925

Fonte: Autoria Própria.

As modificações realizadas englobaram apenas um novo *design* geométrico do motor, isto é, modificações das dimensões do estator e rotor a fim de reduzir a perdas do dispositivo. No entanto pode-se também aumentar a eficiência da máquina elétrica através da modificação dos materiais que a compõe . A seguir serão dados alguns exemplos de mudanças nos materiais envolvendo o motor que trariam melhoras na eficiência da máquina:

1. Avaliação da utilização de aços elétricos com potenciais de perdas menores:
  - a) Aços com menores espessuras;

- b) Outros tipos de aços totalmente processados com menores perdas;
2. Análise da substituição dos ímãs de ferrite por ímãs com poder de geração de campo magnético mais intenso:
    - a) NdFeB sinterizado;
    - b) NdFeB *bonded*;
    - c) SmCo.

melhorias ainda mais significantes seriam observadas na eficiência da máquina. Para tanto deve-se estudar sua aplicação em compressores herméticos de refrigeração assim com analisar a viabilidade econômica do projeto com estas alterações.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este TCC realizou o estudo da simulação do reprojeto do motor. Porém, há ainda a realização de algumas análises para que o projeto do motor seja finalizado e possa-se chegar em um produto de compressor. Desse modo como sugestões de trabalhos futuros citam-se:

1. Estudo da viabilidade financeira, de manufatura e de gestão;
2. Pesquisa de novos materiais magnéticos para melhora da performance do motor;
3. Análise de novas topologias de motores que podem ser utilizados em compressores de refrigeração,

## REFERÊNCIAS

- BANDARRA FILHO, Enio Pedone; GARCIA, Francisco E Moreno; MENDOZA, Oscar S Hernandez. Application of adaptive control in a refrigeration system to improve performance. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, SciELO Brasil, v. 33, n. 2, p. 176–182, 2011.
- BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. [S./]: Ed. da UFSC, 2004.
- BEATY, H Wayne *et al.* **Electric motor handbook**. [S./]: McGraw-Hill California, 1998.
- BINNEBERG, P; KRAUS, E; QUACK, H. Reduction in power consumption of household refrigerators by using variable speed compressors, 2002.
- CIRCUITS, All About. **Single-phase Induction Motors**: Chapter 13 - AC Motors. [S./], 2018. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/single-phase-induction-motors/>. Acesso em: 24 nov. 2018.
- DEBUGSTORE, The. **M3500A 6.5 Digit Bench Multimeter**. [S./], 2018. Disponível em: <https://www.thedebugstore.com/m3500a-bench-multimeter-picotest.html>. Acesso em: 5 out. 2018.
- DUTTA, Rukmi; CHONG, Lester; RAHMAN, Faz. Analysis and experimental verification of losses in a concentrated wound interior permanent magnet machine. **Progress In Electromagnetics Research**, EMW Publishing, v. 48, p. 221–248, 2013.
- EMBRACO. **Conhecendo o compressor**. [S./], 2018. Disponível em: <http://www.embraco.com/Default.aspx?tabid=71>. Acesso em: 24 nov. 2018.
- EMBRACO. **EG**. [S./], 2018. Disponível em: <http://www.embraco.com/default.aspx?tabid=108%5C&idcat=1%5C&idfam=1>. Acesso em: 24 nov. 2018.
- EMBRACO. **VEM**. [S./], 2018. Disponível em: <http://www.embraco.com/default.aspx?tabid=108%5C&idcat=1%5C&idfam=3>. Acesso em: 24 nov. 2018.
- EMERSON. **Single-phase Induction Motors**: Chapter 13 - AC Motors. [S./], 2018. Disponível em: <https://climate.emerson.com/documents/view-ebook-en-us-3844210.pdf>. Acesso em: 24 set. 2018.
- FITZGERALD, Arthur Eugene *et al.* **Electric machinery**. [S./]: McGraw-Hill New York, 2003. v. 5.

HANSELMAN, Duane C. **Brushless permanent magnet motor design**. [S.l.]: The Writers' Collective, 2003.

HENDERSHOT, James R; MILLER, Timothy John Eastham. **Design of brushless permanent-magnet machines**. [S.l.]: Motor Design Books, 2010.

ISHAK, Dahaman; ZHU, ZQ; HOWE, David. Eddy-current loss in the rotor magnets of permanent-magnet brushless machines having a fractional number of slots per pole. **IEEE Transactions on magnetics**, IEEE, v. 41, n. 9, p. 2462–2469, 2005.

JANESCH, Jerry. Two-wire vs. four-wire resistance measurements: Which configuration makes sense for your application. **no. May**, p. 2–4, 2013.

JUN, W; YEZHENG, W. On the on-off operation in a reciprocating compressor refrigeration system with capillary, 1988.

KLEMZ, MARCOS ANTUNES; SELL, LUCAS SANTOS. **Manual de treinamento: Treinamento Embraco**. Joinville: Empresa Brasileira de Compressores, 2013.

KRISHNAN, Ramu. **Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives**. [S.l.]: CRC press, 2009.

MALLAMPALLI, Srinivas; BOHORI, Adnan; DEY, Subhrajit. Design and Development of Three Phase Permanent Magnet Brushless DC (PM BLDC) Motor for Variable Speed, 2012.

MILLER, TJE; MCGILP, M; WEARING, A. Motor design optimisation using SPEED CAD software. IET, 1999.

NOTÍCIAS, carta de. **Aperam implanta o conceito do aço verde: Aperam completa 73 anos como a maior produtora de aços inox, carbono e elétrico da América do Sul**. [S.l.], 2017. Disponível em: <http://cartadenoticias.com.br/2017/10/aperam-implanta-o-conceito-do-aco-verde/>. Acesso em: 1 dez. 2018.

PYRHONEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVA, Valeria. **Design of rotating electrical machines**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

SECOP. **Variable-Speed Drive Controller (CCD): Variable Frequency Drive (VFD), Variable Speed Drive (VSD), Adaptable Capacity Inverter**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.secop.com/solutions/application-detail/variable-speed-drive-controller-ccd/>. Acesso em: 24 set. 2018.

TASSOU, SA; MARQUAND, CJ t; WILSON, DR. Comparison of the performance of capacity controlled and conventional on/off controlled heat pumps. **Applied energy**, Elsevier, v. 14, n. 4, p. 241–256, 1983.

---

TENOVA. **Product:** Annealing and Coating Line (ACL) for Silicon Steel Strip. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.tenova.com/product/annealing-and-coating-line-%5C%28acl%5C%29-for-silicon-steel-strip/>. Acesso em: 1 dez. 2018.