

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUIZ GUSTAVO ALVES**

**ESTUDO DE UMA MÁQUINA *BLDC*, INICIALMENTE PROJETADA  
COMO MOTOR, OPERANDO COMO GERADOR ELÉTRICO**

**FLORIANÓPOLIS, 2023.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUIZ GUSTAVO ALVES**

**ESTUDO DE UMA MÁQUINA *BLDC*, INICIALMENTE PROJETADA  
COMO MOTOR, OPERANDO COMO GERADOR ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador:

Prof. Leandro de Medeiros Sebastião,  
Mestre

Coorientador:

Prof. Rafael Henrique Eckstein, Mestre

**FLORIANÓPOLIS, 2023.**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

ALVES, LUIZ GUSTAVO  
ESTUDO DE UMA MÁQUINA BLDC, INICIALMENTE PROJETADA  
COMO MOTOR, OPERANDO COMO GERADOR ELÉTRICO / LUIZ GUSTAVO ALVES;  
orientação de Leandro de Medeiros Sebastião;  
coorientação de Rafael Henrique Eckstein. - Florianópolis,  
SC, 2024.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico  
de Eletrotécnica.  
Inclui Referências.

1. Motores Brushless DC. 2. Gerador BLDC. 3. Modelo  
Matemático. 4. Carga não linear. I. Sebastião, Leandro  
de Medeiros. II. Eckstein, Rafael Henrique. III. Instituto  
Federal de Santa Catarina. IV. ESTUDO DE UMA  
MÁQUINA BLDC, INICIALMENTE PROJETADA COMO MOTOR, OPERANDO  
COMO GERADOR ELÉTRICO.

# **ESTUDO DE UMA MÁQUINA *BLDC*, INICIALMENTE PROJETADA COMO MOTOR, OPERANDO COMO GERADOR ELÉTRICO**

**LUIZ GUSTAVO ALVES**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de dezembro, 2023.

Banca Examinadora:

---

Prof. Leandro de Medeiros Sebastião, Mestre

---

Prof. Rafael Henrique Eckstein, Mestre

---

Prof. Gabriel Beu Nogueira de Macedo, Mestre

---

Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Doutor

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com a ajuda de diversas pessoas, dentre as quais agradeço:

Aos meus Pais, Angelita e Vilmar, que me deram todo o suporte e incentivos necessários para atingir meus objetivos.

A minha parceira Amanda, por estar ao meu lado, nos momentos difíceis e por me apoiar nas decisões tomadas.

Aos familiares e amigos, pelos diversos votos de incentivo, em especial meu irmão Andrei e minha cunhada Camila.

Aos professores orientadores, que durante o ano de 2023 deram todo auxílio necessário para elaboração do projeto.

Aos meus colegas de classe, que tornaram mais leve todo o trajeto percorrido até aqui.

*“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de  
começar de novo”  
(F. Scott Fitzgerald)*

## RESUMO

Este trabalho propõe um método para modelar matematicamente a máquina *BLDC* (*Brushless Direct Current*), visando estabelecer a relação entre sua operação como motor e como gerador elétrico. O objetivo é aumentar a autonomia de voo de um drone em desenvolvimento no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), utilizando um sistema híbrido série acoplado ao drone. Devido à escassez de informações técnicas sobre as máquinas *BLDC* de pequeno porte disponíveis no mercado, o método apresentado facilita a busca por máquinas específicas, utilizando motores *BLDC* como geradores e reduzindo os custos de aquisição do equipamento. O modelo proposto visa representar as limitações de entrega de potência e as perdas que não são consideradas pelo modelo convencional simplificado, permitindo determinar os limites de operação da máquina como gerador. A metodologia inclui ensaios realizados na máquina *BLDC* operando como gerador a vazio e em carga, além do ensaio de resistência dos enrolamentos. Os testes foram feitos com cargas não lineares utilizando uma ponte retificadora trifásica e resistores para representar a carga do sistema híbrido. Um diferencial deste trabalho foi a inclusão no modelo proposto de impedâncias indutivas e resistivas variáveis, que dependem da carga aplicada ao gerador, representando as perdas e limitações da máquina *BLDC*. Os resultados reais foram comparados com os resultados simulados no *software PSIM* para validar o modelo.

**Palavras-chave:** Motores *Brushless DC*. Gerador *BLDC*. Modelo Matemático. Carga não linear.

## ABSTRACT

This work proposes a method to mathematically model the BLDC (Brushless Direct Current) machine, aiming to establish the relationship between its operation as a motor and as an electric generator. The goal is to increase the flight autonomy of a drone under development at the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC), using a series hybrid system coupled to the drone. Due to the scarcity of technical information about small BLDC machines available in the market, the method presented facilitates the search for specific machines, using BLDC motors as generators and reducing the equipment acquisition costs. The proposed model aims to represent the power delivery limitations and losses that are not considered by the conventional simplified model, allowing to determine the operating limits of the machine as a generator. The methodology includes tests carried out on the BLDC machine operating as a generator under no-load and loaded conditions, as well as the winding resistance test. The tests were conducted with nonlinear loads using a three-phase rectifier bridge and resistors to represent the load of the hybrid system. A differentiating factor of this work was the inclusion in the proposed model of variable inductive and resistive impedances, which depend on the load applied to the generator, representing the losses and limitations of the BLDC machine. The actual results were compared with the simulated results in the PSIM software to validate the model.

**Keywords:** Brushless DC motors. BLDC generator. Mathematical Model. Non-linear load.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Motor de rotor externo.....                                                                                                    | 22 |
| Figura 2 - Motor de rotor interno.....                                                                                                    | 22 |
| Figura 3 - Motor tipo disco.....                                                                                                          | 23 |
| Figura 4 - Ponte inversora trifásica.....                                                                                                 | 24 |
| Figura 5 - Transistores em condução e formas de onda das correntes de fase do motor .....                                                 | 25 |
| Figura 6 - Representação do motor <i>BLDC</i> .....                                                                                       | 26 |
| Figura 7 - Esquemático do ensaio para obtenção da resistência de enrolamento ....                                                         | 30 |
| Figura 8 - Esquemático do teste para obtenção da curva de torque de atrito .....                                                          | 32 |
| Figura 9 - Esquemático do teste para obtenção da constante da força eletromotriz .....                                                    | 34 |
| Figura 10 - Esquemático do teste para obtenção da constante de torque .....                                                               | 35 |
| Figura 11 - Bancada para ensaios da máquina <i>BLDC</i> .....                                                                             | 36 |
| Figura 12 - Motor <i>BLDC</i> modelo Tmotor MN1010 KV135 .....                                                                            | 37 |
| Figura 13 - Características técnicas do motor <i>BLDC</i> Tmotor MN1010 KV135.....                                                        | 38 |
| Figura 14 - Motor de indução trifásico da máquina primária .....                                                                          | 39 |
| Figura 15 - Conversor de frequência trifásico.....                                                                                        | 39 |
| Figura 16 - Célula de carga tipo <i>single point</i> .....                                                                                | 40 |
| Figura 17 - Osciloscópio Tektronix TBS 1102B.....                                                                                         | 41 |
| Figura 18 - Multímetro digital Minipa ET-1002.....                                                                                        | 41 |
| Figura 19 - Fonte de bancada Politerm POL-16E .....                                                                                       | 42 |
| Figura 20 - Curva de tensão em condução do diodo Schottky .....                                                                           | 43 |
| Figura 21 - Montagem do circuito para medição da resistência de enrolamento .....                                                         | 45 |
| Figura 22 - Tensão $V_{ab}$ nos terminais da máquina <i>BLDC</i> com aplicação de corrente contínua de 3 A .....                          | 46 |
| Figura 23 - Tensão $V_{ab}$ nos terminais da máquina <i>BLDC</i> operando como gerador síncrono a vazio em 1054 rpm .....                 | 48 |
| Figura 24 - Tensão $V_{ab}$ nos terminais da máquina <i>BLDC</i> operando como gerador síncrono a vazio em 4177 rpm .....                 | 49 |
| Figura 25 - Tensão no barramento CC após o retificador com a máquina <i>BLDC</i> operando como gerador síncrono a vazio em 1054 rpm ..... | 49 |
| Figura 26 - Tensão no barramento CC após o retificador com a máquina <i>BLDC</i> operando como gerador síncrono a vazio em 4177 rpm ..... | 50 |
| Figura 27 - Torque aplicado ao gerador <i>BLDC</i> a 7109 rpm e carga resistiva de 5 $\Omega$ .....                                       | 53 |

|                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28 - Tensão <i>DC</i> nos terminais da carga com gerador <i>BLDC</i> a 7109 rpm e carga resistiva de 5 $\Omega$ .....                                                                                                | 54 |
| Figura 29 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 7109 rpm com carga resistiva de 5 $\Omega$ (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul).....                                          | 54 |
| Figura 30 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 7043 rpm com carga resistiva de 2,5 $\Omega$ (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) .....                                       | 55 |
| Figura 31 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 6843 rpm com carga resistiva de 1,25 $\Omega$ (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) .....                                      | 55 |
| Figura 32 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 5954 rpm com carga resistiva de 0,5 $\Omega$ (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) .....                                       | 56 |
| Figura 33 - Modelo simplificado da máquina <i>BLDC</i> .....                                                                                                                                                                | 59 |
| Figura 34 - Modelo final da máquina <i>BLDC</i> .....                                                                                                                                                                       | 60 |
| Figura 35 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais gerador do <i>BLDC</i> a 7109 rpm com carga resistiva de 5 $\Omega$ (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) – Ensaio Real versus Simulação PSIM .....    | 66 |
| Figura 36 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 7043 rpm com carga resistiva de 2,5 $\Omega$ (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) - Ensaio Real versus Simulação PSIM .....  | 66 |
| Figura 37 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 6843 rpm com carga resistiva de 1,25 $\Omega$ (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) - Ensaio Real versus Simulação PSIM ..... | 67 |
| Figura 38 - Tensão <i>Vab</i> nos terminais do gerador <i>BLDC</i> a 5954 rpm com carga resistiva de 0,50 $\Omega$ (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) - Ensaio Real versus Simulação PSIM ..... | 67 |
| Figura 39 - Configuração proposta para análises futuras - Resistor em paralelo com a fonte .....                                                                                                                            | 74 |
| Figura 40 - Configuração proposta para análises futuras - Resistor em paralelo com a fonte e metade das impedâncias série .....                                                                                             | 74 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Desempenho de motores <i>BLDC</i> com diferentes números de fases.....                           | 21 |
| Tabela 2 - Tensão de condução dos diodos.....                                                               | 43 |
| Tabela 3 - Teste de resistência dos enrolamentos.....                                                       | 46 |
| Tabela 4 - Parâmetros coletados para ensaio de constante elétrica – Gerador à vazio .....                   | 48 |
| Tabela 5 - Torque de atrito .....                                                                           | 51 |
| Tabela 6 - Dados de ensaio de carga da máquina <i>BLDC</i> .....                                            | 57 |
| Tabela 7 - Impedância resistiva total versus impedância resistiva de perdas excedentes “ <i>RsA</i> ” ..... | 61 |
| Tabela 8 - Impedância resistiva total versus indutância .....                                               | 64 |
| Tabela 9 - Tensão de linha versus corrente de carga - (real versus simulado) .....                          | 65 |
| Tabela 10 - Rendimento da máquina real versus simulação no <i>software</i> PSIM.....                        | 68 |
| Tabela 11 - Teste de desempenho para tensão de alimentação de 49 V .....                                    | 70 |
| Tabela 12 - Teste de desempenho para tensão de alimentação de 43 V .....                                    | 70 |
| Tabela 13 - Simulação no <i>software</i> PSIM para tensão de saída CC de 50 V .....                         | 71 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Principais características dos motores <i>BLDC</i> e <i>BLAC</i> ..... | 20 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Tensão em condução do diodo versus corrente .....                               | 43 |
| Gráfico 2 - Constante de velocidade .....                                                   | 50 |
| Gráfico 3 - Torque de atrito .....                                                          | 52 |
| Gráfico 4 - Torque elétrico aplicado ao gerador em função da corrente elétrica gerada ..... | 58 |
| Gráfico 5 - Impedância resistiva total versus <i>RsA</i> .....                              | 62 |
| Gráfico 6 - Indutância versus impedância da carga .....                                     | 64 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*AC – Alternate Current*

*BLAC – Brushless Alternate Current*

*BLDC – Brushless Direct Current*

CC – Corrente Contínua

*CD – Compact Disc*

DAE – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

*DC – Direct Current*

FCEM – Força Contra Eletromotriz

FEM – Força Eletromotriz

*HD – Hard Disc*

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

*IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor*

*LiPo – Lithium-ion Polymer*

*MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

PIB – Produto Interno Bruto

*PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor*

*PM-BLDC – Permanent Magnet Brushless Direct Current*

RPM – Rotações Por Minuto

SEP – Sistema Elétrico de Potência

*SG – Strain Gauges*

## LISTA DE SÍBOLOS

$V_a, V_b, V_c$  – Tensão por fase [V]

$R$  – Resistência de fase [ $\Omega$ ]

$L$  – Indutância própria [H]

$M$  – Indutância Mútua [H]

$i_a, i_b, i_c$  – Corrente por fase [A]

$e_i$  – Força eletromotriz induzida em qualquer fase [V]

$f_i$  – Função normalizada que caracteriza um formato de onda qualquer.

$\theta_e$  – Posição angular do motor [rad]

$k_e$  – Constante elétrica da máquina

$\omega_m$  – Velocidade mecânica do motor [rad/s]

$\tau_m, \tau$  – Torque mecânico [N.m]

$e$  – Força eletromotriz induzida [V]

$i$  – Corrente elétrica da máquina [A]

$J_r$  – Constante do momento de inércia

$\beta$  – Constante de atrito viscoso

$\tau_e$  – Torque eletromagnético [N.m]

$\tau_c$  – Torque exercido pela carga ao eixo [N.m]

$\omega_e$  – Velocidade angular elétrica [rad/s]

$p$  – Número de polos

$R_L$  – Resistência de linha [ $\Omega$ ]

$R_{fase}, R_s$  – Resistência de fase [ $\Omega$ ]

$T$  – Temperatura de trabalho da máquina [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_0$  – Temperatura no momento da medição [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\tau_0$  – Coeficiente linear de torque de atrito ou coeficiente de atrito estático [N.m]

$\tau_{at}$  – Torque de atrito [N.m]

$e_{Lpico}$  – Força eletromotriz induzida de linha de pico (entre duas fases) [V]

$k_{\tau}$  – Constante de torque

$V_d$  – Tensão de condução do diodo [V]

$I_d$  – Corrente elétrica no diodo [A]

$k_v$  – Constante de velocidade da máquina

$\omega_{rpm}$  – Velocidade mecânica do motor [rpm]

$P_{mec}$  – Potência mecânica [W]

$\eta_{\%}$  - Rendimento percentual

$P_{ele}$  – Potência elétrica [W]

$R_{sA}$  - Resistência série de fase que representa as perdas excedentes [ $\Omega$ ]

$R_{pA}$  – Resistência paralela de fase que representa as perdas excedentes [ $\Omega$ ]

$Perdas_{Excedentes}$  – Perdas excedentes na máquina BLDC [W]

$Perda_{P.retificadora}$  – Perdas na ponte retificadora de diodos [W]

$Perda_{Joule}$  – Perda por efeito Joule nos enrolamentos das bobinas [W]

$Perda_{Mec}$  – Perdas Mecânicas por atrito [W]

$I_{Frms}$  – Corrente de fase eficaz [A]

$I_{Lrms}$  – Corrente de linha eficaz [A]

$R_C$  – Resistência da carga [ $\Omega$ ]

$X_s$  – Reatância indutiva [ $\Omega$ ]

$FEM_{rms}$  – Força eletromotriz induzida eficaz [V]

$V_{Lrms}$  – Tensão de linha eficaz [V]

$R_s$  – Resistência série de fase [ $\Omega$ ]

$L_s$  – Indutância série de fase [H]

$f$  – Frequência [Hz]

$V_{cc}$  – Tensão no barramento CC [V]

$V_F$  – Tensão de fase eficaz [V]

$I_{cc}$  – Corrente contínua média na carga [A]

$I_{Dm}$  – Soma dos valores médios das correntes de cada par de diodos da ponte [A]

$I_{D1rms}$  – Corrente elétrica eficaz no diodo [A]

## SUMÁRIO

|            |                                                                              |           |
|------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                      | <b>15</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa .....</b>                                                   | <b>16</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Definição do Problema .....</b>                                           | <b>17</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivos.....</b>                                                        | <b>17</b> |
| 1.3.1      | Objetivo Geral .....                                                         | 17        |
| 1.3.2      | Objetivos Específicos .....                                                  | 18        |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                           | <b>19</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Configurações da máquina <i>BLDC</i> .....</b>                            | <b>20</b> |
| 2.1.1      | Tipos comuns de rotores da máquina <i>BLDC</i> .....                         | 21        |
| <b>2.2</b> | <b>Inversores trifásicos .....</b>                                           | <b>23</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Modelo Matemático do motor <i>BLDC</i> .....</b>                          | <b>25</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Torque eletromagnético para um motor <i>BLDC</i> .....</b>                | <b>27</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Perdas na máquina <i>BLDC</i> .....</b>                                   | <b>28</b> |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE MÁQUINAS <i>BLDC</i>.....</b>                 | <b>29</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Resistência dos enrolamentos .....</b>                                    | <b>29</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Parâmetros mecânicos .....</b>                                            | <b>31</b> |
| 3.2.1      | Torque de atrito .....                                                       | 31        |
| 3.2.2      | Curva de desaceleração .....                                                 | 32        |
| <b>3.3</b> | <b>Constante da força eletromotriz .....</b>                                 | <b>33</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Constante de torque eletromecânico .....</b>                              | <b>34</b> |
| <b>4</b>   | <b>BANCADA PARA ENSAIOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÕES .....</b>                 | <b>36</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Máquina <i>BLDC</i> em análise .....</b>                                  | <b>37</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Máquina Primária .....</b>                                                | <b>38</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Conversor de frequência trifásico .....</b>                               | <b>39</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Célula de carga.....</b>                                                  | <b>40</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Instrumentos de medição / Instrumentos auxiliares.....</b>                | <b>40</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Ponte retificadora de diodos de onda completa .....</b>                   | <b>42</b> |
| <b>5</b>   | <b>ENSAIOS NA PRÁTICA E RESULTADOS .....</b>                                 | <b>45</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Resistência dos enrolamentos - testes e resultados .....</b>              | <b>45</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Ensaio da constante de força eletromotriz - testes e resultados .....</b> | <b>47</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Ensaio de obtenção de parâmetros mecânicos .....</b>                      | <b>51</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Ensaio da constante de torque - testes e resultados .....</b>             | <b>52</b> |
| <b>6</b>   | <b>MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO VIA SOFTWARE PSIM ..</b>                 | <b>59</b> |
| <b>7</b>   | <b>COMPARATIVO DADOS OBTIDOS X FABRICANTE .....</b>                          | <b>70</b> |
| <b>8</b>   | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                      | <b>72</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Sugestões de trabalhos futuros .....</b>                                  | <b>73</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                      | <b>76</b> |
|            | <b>APENDICE A - RETIFICADOR TRIFÁSICO (PONTE DE GRAETZ) .....</b>            | <b>79</b> |
|            | <b>APENDICE B - CONVERSÃO DE IMPEDÂNCIAS .....</b>                           | <b>80</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do setor elétrico está diretamente relacionado ao crescimento econômico de um país, em outras palavras, o aumento do produto interno bruto (PIB) influi diretamente na demanda de energia. Para atender à demanda crescente de energia elétrica, é necessário estabelecer um sistema interligado que conecte geração e consumo, formando um Sistema Elétrico de Potência (SEP). PINTO (2022, p.12)

Além da segurança e confiabilidade, a integração das fontes de geração em um sistema interligado permite a otimização do uso dos reservatórios das hidrelétricas, resultando em menor custo para a energia gerada. Para PINTO (2022, p.12) a manutenção adequada desse sistema é fundamental para evitar interrupções no fornecimento de energia, pois falhas podem ser causadas por diversos fatores, como condições climáticas adversas, depreciação, vandalismo e sobreaquecimento.

Na manutenção preventiva, a inspeção dos equipamentos das linhas de transmissão é uma tarefa de extrema importância, a fim de garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica. No entanto, muitas vezes, essas linhas estão localizadas em áreas de difícil acesso, como áreas remotas, montanhas ou regiões de vegetação densa. Nesses casos, a utilização de drones (veículo aéreo não tripulado e controlado remotamente) tem se mostrado uma solução eficiente e econômica para realizar inspeções regulares, identificar falhas e até mesmo realizar pequenos reparos.

No entanto, os drones tradicionais enfrentam um desafio significativo: o tempo limitado de voo devido à capacidade das baterias. Isso impõe restrições operacionais, exigindo retornos frequentes à base para recarga das baterias, o que compromete a eficiência e a produtividade das operações de manutenção. Mesmo as tecnologias de baterias mais avançadas possuem densidade de energia significativamente menor do que os sistemas de energia movido a hidrocarbonetos. (HAGEMAN; MCLAUGHLIN, 2018, p.1)

Diante dessa limitação, surge a necessidade de desenvolver soluções que aumentem o tempo de voo dos drones. Uma abordagem promissora é a utilização de sistemas híbridos, que combinam um motor de combustão interna a um gerador

elétrico *BLDC* (*Brushless Direct Current Motor*). Nesta configuração, o motor a combustão é acoplado a um gerador elétrico, ao qual fornece energia para os motores de propulsão do drone. Desta maneira, a energia química do combustível líquido (descontando-se as perdas do sistema) é convertida em energia elétrica durante o voo. (FONSECA; MAYA; SARMIENTO, 2022, p.4)

Os combustíveis fósseis possuem uma densidade energética muito maior em relação a bateria de lítio recarregável. Essa característica proporciona uma maior autonomia, sendo capaz de fornecer uma quantidade significativa de energia em relação ao seu peso e volume. “Os combustíveis à base de carbono são aproximadamente 50 vezes mais densos em energia do que baterias de lítio recarregáveis”. (HAGEMAN; MCLAUGHLIN, 2018, p.1)

Embora a utilização de sistemas híbridos em série possa oferecer uma solução promissora para estender a autonomia dos drones, a dificuldade em encontrar geradores *BLDC* específicos representa um desafio. Apesar dos motores *BLDC* serem amplamente disponíveis no mercado devido à sua popularidade em várias aplicações, encontrar geradores *BLDC* pode ser mais difícil. O desenvolvimento de um gerador específico para uma determinada aplicação tende a inviabilizar o investimento, pois sua produção seria em baixíssima escala.

## **1.1 Justificativa**

A utilização de sistemas híbridos em série, com a integração de um motor de combustão interna e um gerador elétrico *BLDC*, apresenta uma justificativa sólida para solucionar o problema de limitação do tempo de voo dos drones.

Os motores *BLDC* possuem tamanho e peso reduzidos quando comparados a outros tipos de máquinas convencionais de mesma potência, como os motores de indução, trazendo um grande benefício de sua aplicação em sistemas híbridos.

Porém, a dificuldade em encontrar geradores *BLDC* de baixa potência e suas informações técnicas detalhadas, torna o sistema híbrido praticamente inviável economicamente. Procurar soluções economicamente viáveis, através da adaptação

de máquinas *BLDC* inicialmente projetadas como motor, a fim de operarem como gerador elétrico, justifica a aplicação destes sistemas.

Sendo assim, é necessário encontrar soluções que permitam a obtenção de geradores por meio da adaptação de motores *BLDC* convencionais para operarem como geradores, o que facilita a aquisição dessa parte do sistema híbrido. Dessa forma, utilizar um motor *BLDC* como gerador no sistema híbrido em série pode ser uma alternativa viável devido à sua disponibilidade, menor custo, e maior facilidade em encontrar informações técnicas.

## **1.2 Definição do Problema**

O desafio deste trabalho está em encontrar um modelo matemático que represente o comportamento da máquina *BLDC* operando como gerador elétrico, e assim poder prever quais serão suas características operacionais e estimar como será seu rendimento. Para tal, é de grande importância estabelecer um procedimento de ensaios a serem realizados e uma metodologia para definir um modelo matemático da máquina em análise.

Além disso, é essencial compreender as características de operação como motor elétrico e qual a relação com a operação como gerador elétrico, tendo como pressuposto que no mercado não serão fornecidos dados para operação como gerador. Logo, encontrar uma relação entre as duas formas de operação da máquina *BLDC* facilitará na escolha adequada do motor *BLDC* a ser utilizado como gerador elétrico.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho propõe estudar os aspectos construtivos e analisar o comportamento dos motores *BLDC* quando operando como gerador elétrico. Os resultados obtidos servirão como base para uma futura determinação de máquina *BLDC*, ou as especificações da mesma para um projeto de drone híbrido que está em desenvolvimento no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

### 1.3.2 Objetivos Específicos

A elaboração deste trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- a) Conhecer os aspectos construtivos da máquina *BLDC*;
- b) Levantar os parâmetros da máquina *BLDC* real para um modelo matemático;
- c) Definir o modelo matemático com base nos parâmetros coletados;
- d) Simular o modelo matemático do comportamento do motor *BLDC* operando como gerador elétrico;
- e) Comparar os resultados de simulação e teste da máquina *BLDC* quando operado como gerador.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Os motores síncronos de ímã permanente, também conhecidos como *PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor)* são compostos por um rotor com ímãs permanentes e por um estator constituído de bobinas. Estes tipos de motores não possuem escovas, comutadores mecânicos ou anéis, e por essa característica são também denominados de motores *Brushless*. De acordo com TEIXEIRA (2006, p.26) “são denominados síncronos, pois o campo magnético do estator e rotor estão em sincronismo e estão girando mecanicamente na mesma velocidade angular do rotor”.

Esses motores podem ser classificados de acordo com a força contra eletromotriz (FCEM) produzida pelo fluxo magnético incidindo no enrolamento do estator, que pode ser trapezoidal e senoidal. JULIANI (2007, p.15)

Assim, os motores são classificados como motores sem escovas de corrente contínua *BLDC* ou motores sem escovas de corrente alternada *BLAC (Brushless Alternate Current)*.

O que os diferencia é que o motor *BLDC* é operado com correntes contínuas retangulares e possui enrolamento concentrado, gerando uma força eletromotriz (FEM) trapezoidal, enquanto o motor *BLAC* é operado com correntes senoidais e possui um enrolamento distribuído ou concentrado gerando uma FEM senoidal. (SCHMITZ, 2017, p.5).

O motor *BLDC* é um tipo de máquina elétrica que utiliza corrente contínua para seu funcionamento. Diferentemente de motores *DC (Direct Current)* tradicionais, o motor *BLDC* não possui escovas para fazer a comutação entre as bobinas, em vez disso, utiliza-se a eletrônica para fazer a comutação das bobinas.

O motor *BLDC* é um motor síncrono, ou seja, sua frequência elétrica está vinculada a sua velocidade mecânica de rotação do rotor, porém geralmente motores síncronos são alimentados diretamente por tensão trifásica senoidal enquanto o motor *Brushless DC* é alimentado através de um controlador responsável pela comutação das bobinas. Entretanto, as características construtivas de ambos os motores são similares. (TRISTÃO; BARBOSA, 2018, p.15).

Com a evolução dos semicondutores e o aperfeiçoamento dos ímãs permanentes, as máquinas de corrente contínua foram aprimoradas substituindo os comutadores de escovas por comutadores eletrônicos. Segundo TRISTÃO e BARBOSA (2018, p.15) “o motor *BLDC* é composto basicamente por um estator e um rotor, o estator é a parte inerte, ao qual aloca os enrolamentos e os sensores de efeito

Hall quando necessários, já o rotor é a parte girante, que é composta por ímãs permanentes”.

Algumas das principais características dos motores *BLDC* e *BLAC* são mostrados no quadro 1.

**Quadro 1 - Principais características dos motores *BLDC* e *BLAC***

| <i>BLDC</i>                                                                                  | <i>BLAC</i>                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Não funciona ligado diretamente à rede                                                       |                                                                                    |
| Controle necessita da informação sobre a posição do rotor para alimentar as fases do estator |                                                                                    |
| O fluxo do rotor é constante e gerado pelos ímãs permanentes                                 |                                                                                    |
| Requer pouca manutenção                                                                      |                                                                                    |
| As fases são chaveadas sequencialmente                                                       | As fases tem alimentação senoidal                                                  |
| Possui enrolamentos concentrados                                                             | Possui enrolamentos distribuídos ou concentrados                                   |
| As formas de onda da FEM e das correntes do estator devem ser idealmente trapezoidais        | As formas de onda da FEM e das correntes do estator devem ser idealmente senoidais |
| Controle mais simples, apenas com chaveamento sequencial                                     | Controle mais complexo, com modulação por largura de pulso ( <i>PWM</i> )          |

Fonte: Adaptado de SCHMITZ (2017, p.5)

Além das características acima, dependendo da sua configuração construtiva, estes motores podem apresentar alta densidade de potência, ou seja, produzem alta potência em tamanhos reduzidos quando comparado a motores convencionais de indução.

## 2.1 Configurações da máquina *BLDC*

Um motor *BLDC* possui diversas configurações que podem variar dependendo da aplicação específica e dos requisitos de desempenho. No entanto, as configurações mais comuns estão relacionadas ao número de fases, número de polos e ao tipo de rotor.

Na sua maioria, os motores *BLDC* possuem três fases, pois conciliam torque com baixa oscilação, proporcionando também em um menor número de comutadores. Porém existem outras configurações de fases, de acordo com TRINDADE (2009, p.6) “Um dos primeiros motores *BLDC* lançados no mercado foi um

motor de quatro fases fabricado pela Siemens, no início da década de 1960. Seu controlador possuía oito transistores, sendo dois por fase. Porém, tal configuração é muito rara atualmente”.

Os motores *BLDC* trifásicos são mais comuns pois apresentam uma boa utilização dos condutores, com uma baixa oscilação de torque e menor número de comutadores. Na Tabela 1 é apresentado o comparativo entre motores com diferentes números de fases.

**Tabela 1 - Desempenho de motores *BLDC* com diferentes números de fases**

| Número de Fases | Utilização de condutores | Número de comutadores eletrônicos | Oscilação do torque |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| 1               | 50%                      | 2                                 | 100%                |
| 2               | 50%                      | 4 ou 8                            | 30%                 |
| 3               | 67%                      | 6 ou 3                            | 15%                 |
| 4               | 75%                      | 8                                 | 10%                 |
| 6               | 83%                      | 12                                | 7%                  |
| 12              | 92%                      | 24                                | 3%                  |

Fonte: Adaptado de HENDERSHOT; MILLER, 1994

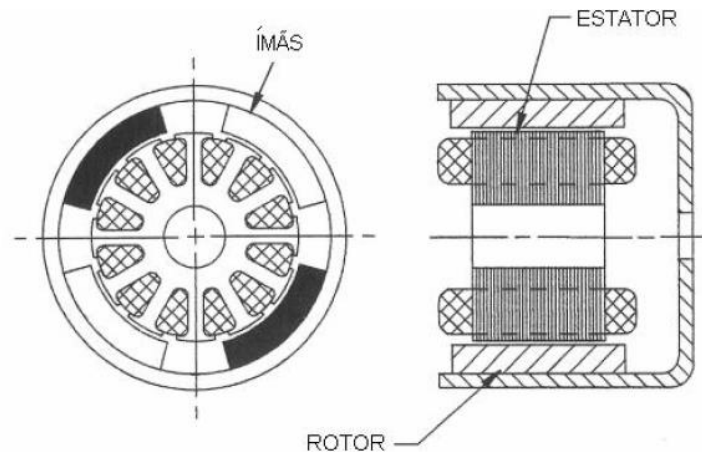
Além disso, a configuração trifásica permite que os enrolamentos das bobinas sejam conectados em triângulo ou estrela, trazendo outras possibilidades relacionadas à tensão e corrente de operação, sem alterar as formas de controle.

#### 2.1.1 Tipos comuns de rotores da máquina *BLDC*

Quanto ao tipo do rotor, alguns autores apontam diferentes classificações. Hendershot Jr. e Miller (1994) apresentam os seguintes modelos de motores, sendo eles: motores com rotor externo, com rotor interno e por fim com rotor tipo disco.

Motores com rotor externo são aplicados em dispositivos que necessitam de altas rotações e velocidade constante, como em *HD's (Hard Disc)* e ventiladores. Esta configuração facilita a fabricação e reduz o seu custo, além de não haver preocupações com fixação especial dos ímãs no rotor, visto que as forças que atuam sobre os ímãs não favorecem seu deslocamento quando em funcionamento. (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

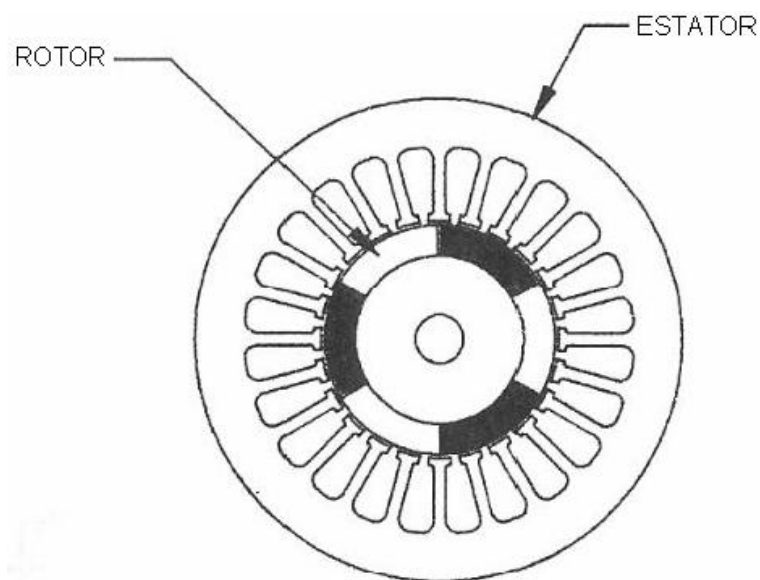
A figura 1 apresenta a configuração de um motor *BLDC* de rotor externo.

**Figura 1 - Motor de rotor externo**

Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994

Já os motores com rotor interno possuem o estator semelhante aos motores por indução. Suas principais vantagens são a baixa inércia e o alto torque, em geral possuindo múltiplos polos. Neste tipo de configuração são necessários cuidados quanto a fixação dos ímãs no rotor, para que não se desprendam de suas posições quanto ao movimento do rotor (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

A figura 2 apresenta a configuração de um motor *BLDC* de rotor interno.

**Figura 2 - Motor de rotor interno**

Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994

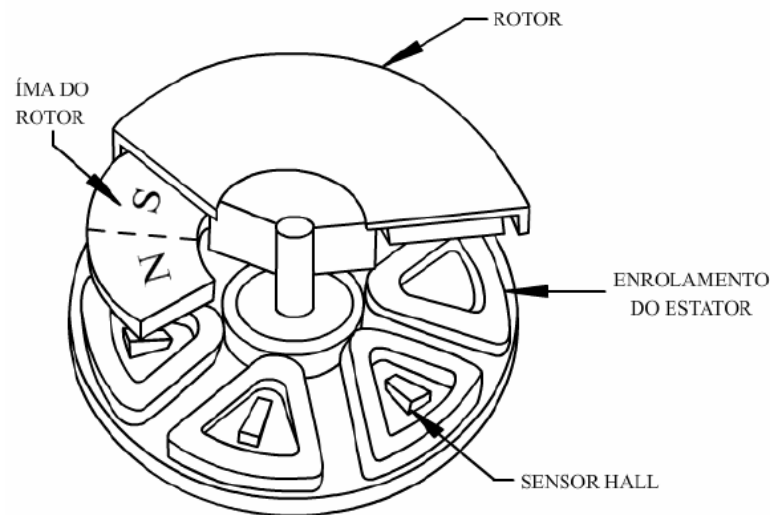
Já motores com rotor tipo disco apresentam velocidades mais baixas, como em leitores de *CD's* (*Compact Disc*). Suas vantagens são o baixo custo e seu formato



plano, além disso, por não possuírem ranhuras também não há torques de relutância e de borda. São utilizados em aplicações com baixo torque e velocidades próximas de 1000 rotações por minuto (rpm). (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

A figura 3 apresenta a configuração de um motor *BLDC* de rotor tipo disco.

**Figura 3 - Motor tipo disco**



Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994

Por fim, o número de polos é definido por diversos aspectos como a velocidade de rotação do motor, o tipo de material empregado nos ímãs, o tipo de rotor e as características inerciais. Para SCHMITZ (2017, p.6) “Em um motor de ímãs permanentes sem escovas o número de polos do motor está diretamente ligado ao número de ímãs no rotor, onde os ímãs podem ser dispostos em diferentes configurações”.

Deve-se considerar que o número de polos é inversamente proporcional à velocidade de rotação. Para velocidades muito altas, motores de dois ou quatro polos são mais adequados, buscando redução das perdas por chaveamento excessivo e das perdas no ferro do estator. Quando se necessita de torque sem oscilações em baixas velocidades, o motor deverá ter um número grande de polos. (TRINDADE, 2009, p.7)

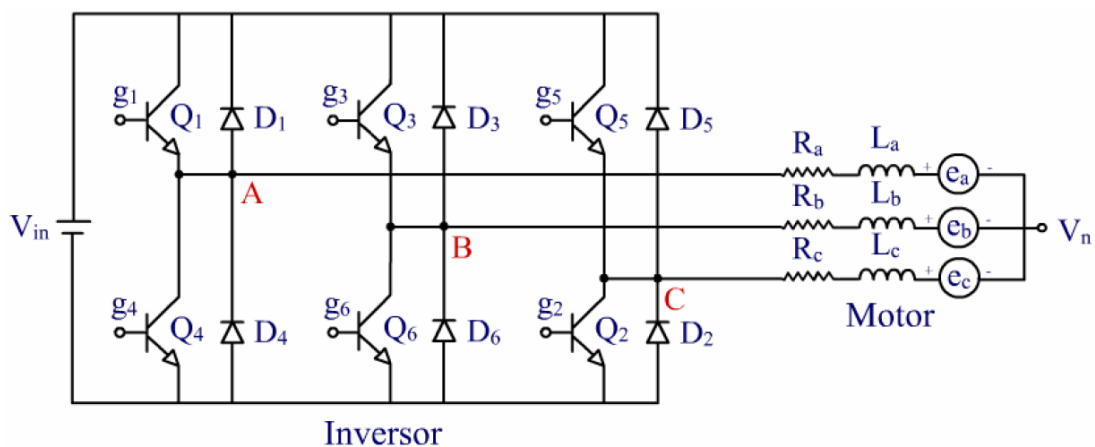
## 2.2 Inversores trifásicos

O inversor trifásico é um dispositivo eletrônico responsável por fornecer a tensão necessária para as bobinas do motor. Sua função é converter a tensão contínua proveniente de uma fonte de energia, como uma bateria, em uma tensão alternada trifásica com amplitude simétrica e frequência ajustável, para alimentar as

bobinas do motor. Para JULIANI (2007, p.19) “De acordo com a aplicação, os inversores podem utilizar dispositivos com disparo e bloqueios controlados, (*MOSFETs* ou *IGBTs*), ou tiristores em comutação forçada”

Basicamente um inversor trifásico é constituído por três inversores em meia ponte conectados em paralelo (PRADO, 2016, p.42). A ponte inversora trifásica contém seis transistores que atuam como chaves e seis diodos operando como roda livre, protegendo as chaves no instante em que são abertas, como mostra a figura 4.

**Figura 4 - Ponte inversora trifásica**

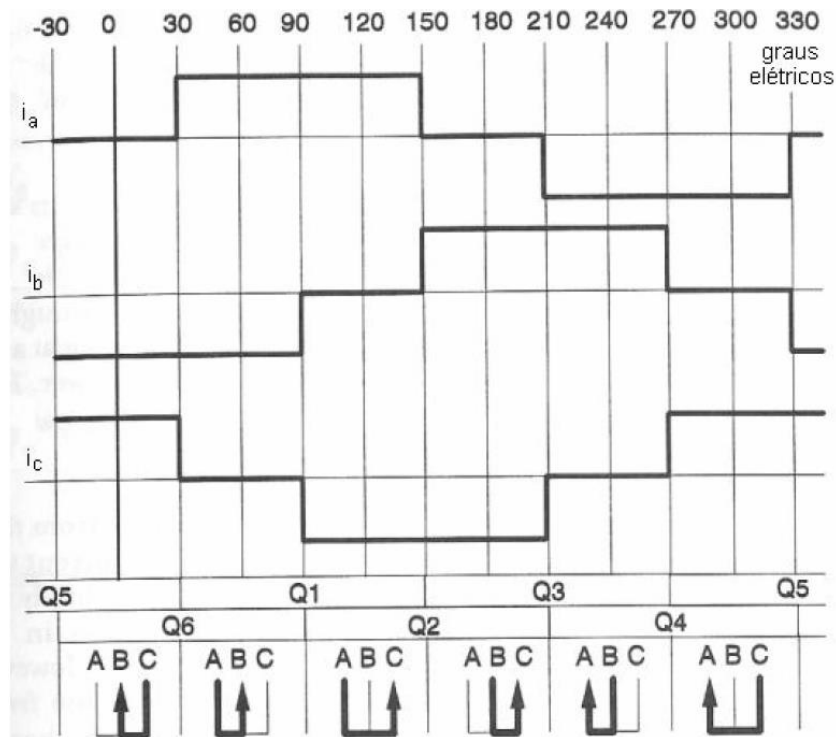


Fonte: JULIANI (2007, p.19).

Para acionar o motor *BLDC*, cada transistor deve conduzir por  $120^\circ$  de maneira que cada fase do estator seja percorrida por uma corrente elétrica de forma quadrada, defasadas de  $120^\circ$  entre si.

Idealmente a forma de onda das correntes em cada fase, junto ao sentido das correntes nas bobinas do estator e o período de condução de cada transistor é representado na figura 5:

**Figura 5 - Transistores em condução e formas de onda das correntes de fase do motor**



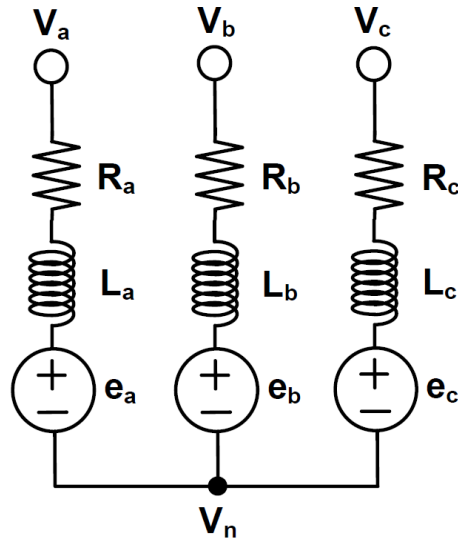
Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994

De acordo com TRINDADE (2009, p.8) “Os disparos dos transistores são feitos de modo que sempre duas chaves estão fechadas, formando um circuito tal que a cada 60° elétricos o par de fases percorridas pela corrente se alterne e cada chave permanece em condução durante 120° elétricos.”

### 2.3 Modelo Matemático do motor *BLDC*

Para modelagem matemática do motor *BLDC* é utilizado o modelo por fase apresentado na figura 6, que é caracterizado por três circuitos em série conectados em estrela, onde cada circuito em série contém um resistor, um indutor e uma fonte de tensão representando a força contra eletromotriz. JULIANI (2007, p.22)

Figura 6 - Representação do motor BLDC



Fonte: GONELLA (2006, p.26)

A fim de simplificar o modelo, desconsidera-se as correntes induzidas no rotor pelos campos harmônicos do estator além das perdas por dispersão e por Foucault (GONELLA, 2006, p.26). Deste modo, o equacionamento para o circuito é representado na equação 1.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_n \\ V_n \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Atribuindo-se que as fases sejam simetricamente equilibradas e que o rotor possui polos lisos, então obtém-se as equações 2, 3 e 4.

$$L = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \quad (2)$$

$$M = M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} = M_{ba} = M_{cb} = M_{ac} \quad (3)$$

$$R = R_a = R_b = R_c \quad (4)$$

Aplicando a lei de Kirchoff, a soma das correntes de fase será nula quando o terminal neutro estiver isolado. Assim a equação 1 pode ser reescrita conforme equação 5.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_n \\ V_n \\ V_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

As tensões induzidas de cada fase podem ser expressas pela equação 6.  
JULIANI (2007, p.24)

$$e_i = f_i(\theta_e) \cdot k_e \cdot \omega_m \quad (6)$$

na qual:

$f_i(\theta_e)$  É uma função normalizada que caracteriza o formato de onda da força contra eletromotriz em cada uma das fases, de acordo com a posição do rotor em radianos elétricos;

$k_e$  é a constante da força contra-eletromotriz que depende da construção do motor;

$\omega_m$  é a velocidade angular do rotor [rad/s].

## 2.4 Torque eletromagnético para um motor *BLDC*

Segundo CUNHA (2018, p.25) “A análise de transferência de potência e energia no motor *PM-BLDC* (*Permanent Magnet Brushless Direct Current*) é comumente dita como ideal, uma vez que as perdas obtidas na operação por conta da resistência dos materiais energizados são desprezíveis”. A conversão de energia eletromecânica pode ser expressa pela equação 7.

$$e \cdot i = \tau_m \cdot \omega_m \quad (7)$$

Onde:

$\tau_m$  é o torque mecânico [N.m];

$e$  é a tensão induzida [V];

$i$  é a corrente elétrica do motor [A].

Em um motor *BLDC* o torque eletromecânico depende da corrente de fase, da forma de onda da FCEM e velocidade. Desta forma, para um motor *BLDC* trifásico, o torque eletromagnético é expresso pela soma dos torques fornecidos pelas três fases, conforme equação 8. (Baldursson, 2005 apud TRISTÃO; BARBOSA, 2018, p.24)

$$\tau_e = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\omega_m} \quad (8)$$

O comportamento mecânico do motor pode ser expresso então por uma equação diferencial. Este comportamento dinâmico é dado pela equação (9). VIEIRO (2013, p.36)

$$J_r \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + \beta \cdot \omega_m = (\tau_e - \tau_c) \quad (9)$$

na qual:

$J_r$  é a constante do momento de inércia [kg.m<sup>2</sup>];

$\beta$  é a constante de atrito viscoso do eixo da máquina [N.m.s/rad];

$\tau_c$  é o torque exercido pela carga ao eixo [N.m];

$\tau_e$  é o torque eletromagnético [N.m]

A velocidade angular elétrica  $\omega_e$  é expressa pela equação 10. (JULIANI, 2007, p.25)

$$\omega_e = \frac{p}{2} \cdot \omega_m \quad (10)$$

Onde

$p$  é o número de polos.

## 2.5 Perdas na máquina *BLDC*

Segundo BRESCIANI (2019, p.45), as perdas na máquina *BLDC* podem ser divididas em: Perdas ôhmicas, perdas no ferro, perdas mecânicas e perdas nos ímãs.

As perdas ôhmicas podem ser associadas à resistência dos enrolamentos das bobinas. As perdas mecânicas são relacionadas ao atrito da máquina e a ventilação.

Já as perdas no ferro são compostas por perdas por histerese, perdas por correntes parasitas, e perdas excedentes, sendo difíceis de caracterizá-las experimentalmente. Enquanto as perdas nos ímãs são relativas às correntes parasitas nos ímãs.

### 3 METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE MÁQUINAS *BLDC*

Para obtenção dos parâmetros mecânicos TRINDADE (2009) trouxe um método de análise que se baseia em operar a máquina como motor elétrico. Desta forma foi levantada a curva de operação do motor em três níveis de carga para até quatro níveis de tensão de saída do retificador, analisando a corrente de saída do retificador, a potência elétrica, potência mecânica fornecida pelo motor, a velocidade e o torque.

Já PRADO (2016) estudou o processo inverso, onde a máquina *BLDC* opera como gerador elétrico para obtenção dos dados. Neste sentido, foi necessário a inserção de uma máquina primária que fornece energia mecânica ao gerador *BLDC*, ao invés de uma carga mecânica acoplada ao eixo. Além disso, outros parâmetros importantes foram apontados em suas análises.

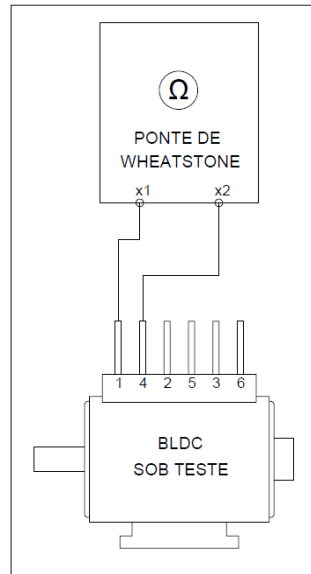
Em ambos os casos, a potência mecânica disponível no eixo da máquina foi mensurada de forma similar, porém no último caso, dispensa-se o uso de uma ponte inversora trifásica que opera o motor *BLDC*, obtendo os dados de tensão, corrente e potência elétrica diretamente aos terminais da máquina *BLDC* acoplado à uma carga resistiva trifásica.

Os métodos empregados são mostrados individualmente para obtenção dos principais parâmetros do gerador *BLDC*.

#### 3.1 Resistência dos enrolamentos

Com o objetivo de realizar a medição das resistências de enrolamento, PRADO (2016, p.54) propõe a utilização da ponte de Wheatstone para levantamento dos parâmetros através dos terminais da máquina *BLDC*. Além disso, apresenta a importância de medir separadamente cada grupo de bobinas quando se tem acesso aos terminais de cada enrolamento, isto é, quando estes enrolamentos não estão conectados internamente. A figura 7 apresenta o diagrama esquemático do ensaio para obtenção da resistência de enrolamento.

**Figura 7 - Esquemático do ensaio para obtenção da resistência de enrolamento**



Fonte: PRADO (2016, p.54)

Na maior parte dos casos, as máquinas *BLDC* trifásicas já possuem seus enrolamentos internamente conectados, possuindo apenas o acesso aos três terminais na sua parte externa. Neste caso, é conveniente medir a resistência entre os três pares de terminais possíveis.

A resistência de linha é considerada a média das resistências medidas em cada par dos terminais da máquina *BLDC*, descontando a resistência dos cabos, conforme apresentado na equação (11). Também é importante medir e anotar a temperatura ambiente no instante da medição das resistências.

$$R_L = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{3} - R_{cabos} \quad (11)$$

Os enrolamentos podem estar conectados em estrela ou triângulo internamente. Caso a ligação interna esteja em estrela, o valor da resistência de cada grupo de bobinas (resistência de fase) é a metade da resistência de linha, conforme equação 12.

$$R_{fase} = \frac{R_L}{2} \quad (12)$$

Após as medições realizadas de resistência interna dos enrolamentos, faz-se a correção do valor para a temperatura de trabalho da máquina utilizando a equação 13.



$$R_{fase}(T) = R_{fase}(T_0) \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (13)$$

Onde

$\alpha$  é o coeficiente de temperatura do material condutor;

$T$  é a temperatura de trabalho da máquina [°C];

$T_0$  é a temperatura no momento da medição [°C].

### 3.2 Parâmetros mecânicos

Segundo Prado (2016, p.57) “os parâmetros mecânicos a serem determinados são o coeficiente de atrito viscoso  $\beta$  (N.m.s/rad), o coeficiente de atrito estático  $\tau_0$  (N.m) e o momento de inércia do rotor  $J_r$  (kg.m<sup>2</sup>)”. Esses parâmetros são obtidos através do levantamento do torque de atrito e da curva de desaceleração.

#### 3.2.1 Torque de atrito

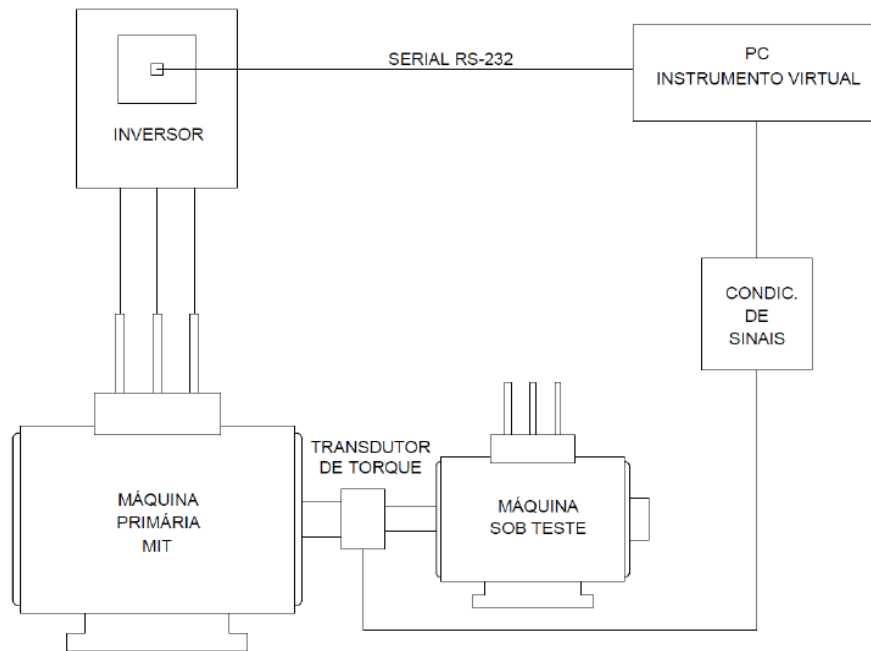
O torque de atrito ( $\tau_{at}$ ) é proporcional a velocidade do eixo da máquina, conforme apresentado na equação 14.

$$\tau_{at} = \tau_0 + \beta \cdot \omega_m \quad (14)$$

Para obtenção dos parâmetros acima, realiza-se um ensaio que consiste em operar a máquina *BLDC* sob teste como um gerador a vazio em diferentes regimes de velocidades, por meio de uma máquina primária controlada por um conversor de frequência. Através de um transdutor de torque mede-se o torque em diferentes velocidades. Traça-se uma curva, que é linearizada, com as informações de torque em função da velocidade, obtendo o coeficiente linear  $\tau_0$  e coeficiente angular  $\beta$  da reta.

Conforme figura 8, o esquemático do teste para obter os parâmetros  $\tau_0$  e  $\beta$  é apresentado.

**Figura 8 - Esquemático do teste para obtenção da curva de torque de atrito**



Fonte: PRADO (2016, p.58)

Os parâmetros obtidos com este teste representam as perdas mecânicas da máquina *BLDC*, sendo um parâmetro de grande importância para a modelagem matemática da máquina.

### 3.2.2 Curva de desaceleração

O parâmetro  $J_r$  é obtido através do levantamento da curva de desaceleração natural do motor *BLDC*, isto é, sem fontes ou cargas elétricas conectadas em seus terminais, ou cargas mecânicas acopladas ao eixo. O ensaio consiste em operar a máquina *BLDC* como motor elétrico em sua velocidade nominal, medindo a velocidade em função do tempo após o seu desligamento.

Nas condições de teste acima, onde a velocidade ao final do teste tende a zero e, as componentes de torque eletromagnético e torque de carga são nulas, a componente de atrito estático torna-se relevante. Assim, a equação 9 pode ser reescrita, onde a equação diferencial 15 representa o comportamento dinâmico nesta condição especial:

$$J_r \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + \beta \cdot \omega_m + \tau_0 = 0 \quad (15)$$

A equação diferencial de primeira ordem tem sua solução expressa pela equação 16:

$$\omega_m(t) = c \cdot e^{-\frac{\beta}{J_r}t} - \frac{\tau_0}{\beta} \quad (16)$$

A constante  $c$  pode ser obtida através do valor inicial da curva  $\omega_m(0)$ , e das constantes  $\beta$  e  $\tau_0$  já calculados, conforme apresentado na equação 17.

$$c = \omega_m(0) + \frac{\tau_0}{\beta} \quad (17)$$

O parâmetro  $J_r$  é alcançado após a determinação dos valores de  $\beta$ ,  $c$  e  $\tau_0$ , realizando o ajuste entre a equação 16 e a curva de velocidade em função do tempo.

### 3.3 Constante da força eletromotriz

Alguns autores apontam o teste de força eletromotriz como o mais importante a ser feito em motores *BLDC*. Para (HENDERSHOT J.R.; MILLER, 2010, apud PRADO, 2016, p.59) “Em muitos casos este é o único teste de performance requerido na linha de produção para qualificação do motor, porque considera-se que a relação entre a força eletromotriz e o torque é previsível”.

O teste consiste em acionar a máquina como um gerador a vazio por meio de uma máquina primária. Mede-se a tensão de pico de linha entre fases da máquina *BLDC* ( $e_{Lpico}$ ) e a velocidade mecânica do eixo. As medições são realizadas para diferentes níveis de velocidades, que dependem da velocidade nominal da máquina.

Os pontos de tensão em função da velocidade formam uma curva em que é realizada um ajuste linear. A inclinação da reta indica o valor da constante eletromotriz ( $k_e$ ), podendo ser determinada pela equação 18.

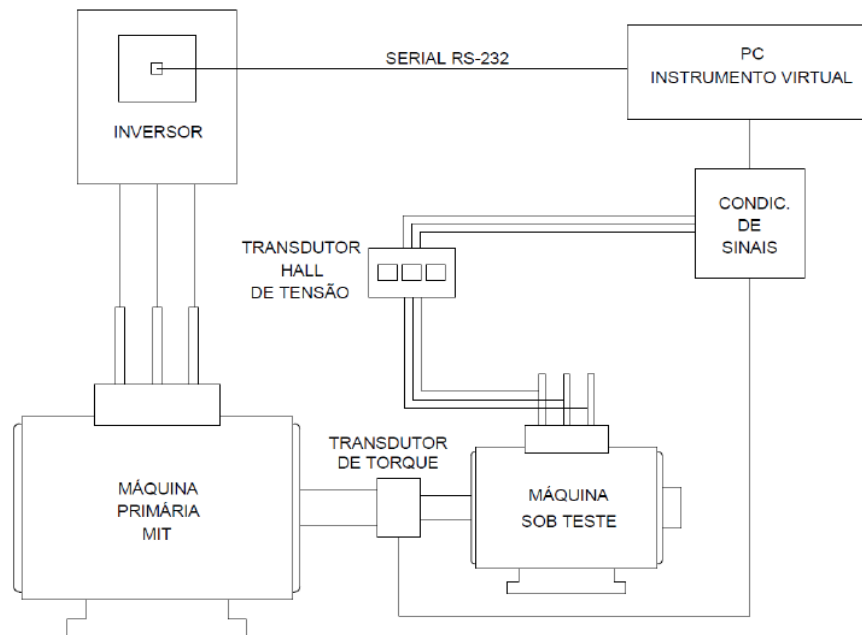
$$k_e = \frac{e_{Lpico}}{\omega_m} \quad (18)$$

Em que

$e_{Lpico}$  é a força eletromotriz induzida de pico entre as fases [V]

O esquemático do teste realizado para obtenção da constante  $k_e$  é apresentado na figura 9.

**Figura 9 - Esquemático do teste para obtenção da constante da força eletromotriz**



Fonte: PRADO (2016, p.61)

A velocidade mecânica da máquina pode ser determinada pela frequência elétrica disposta nos terminais da máquina *BLDC*. Ajustando a equação 10 é possível determinar a velocidade mecânica do rotor utilizando a frequência elétrica através da equação 19.

$$\omega_m = \frac{2}{p} \cdot \omega_e \quad (19)$$

### 3.4 Constante de torque eletromecânico

Em geral, a constante de torque  $k_\tau$  não é informada pelo fabricante, por razão de que, segundo PRADO (2016, p.61) “ $k_\tau$  pode ser assumida igual à constante  $k_e$  na estimativa de corrente necessária para produção do conjugado exigido em determinada aplicação”.

Efetivamente a  $k_\tau$  sofre influência das perdas mecânicas, magnéticas e perdas no enrolamento de armadura. Porém quando as perdas são desprezadas,  $k_\tau$  pode ser dada pela equação (20), que depende do torque  $\tau$  e da corrente elétrica  $i$ .

$$k_\tau = \frac{\tau}{i} \quad (20)$$

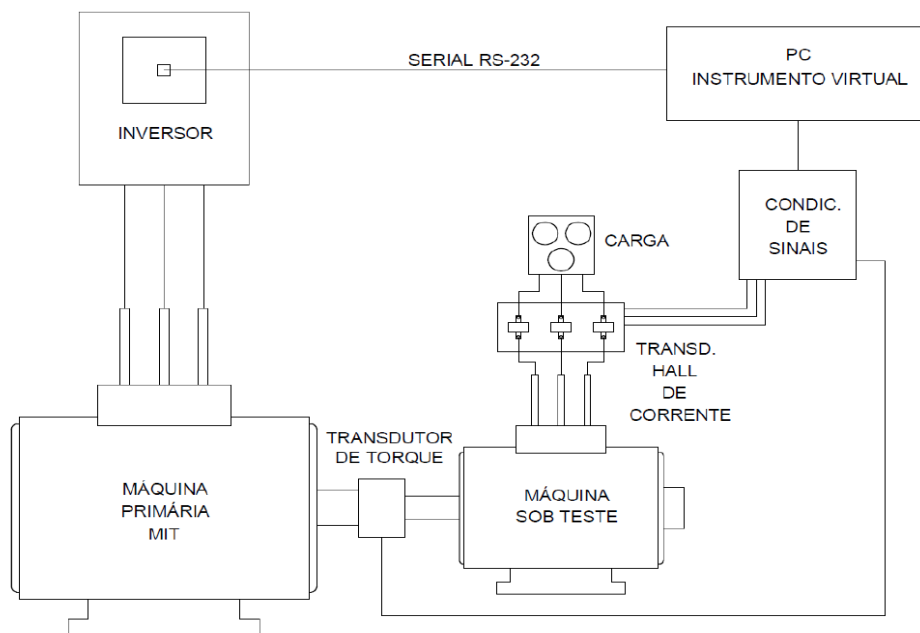
Neste caso, a equação (7) da conversão eletromecânica ideal é utilizada para justificar a igualdade das constantes  $k_\tau$  e  $k_e$ , conforme apresentado na equação 21.

$$k_\tau = \frac{\tau}{i} = \frac{e_{Lpico}}{\omega_m} = k_e \quad (21)$$

O teste para obtenção de  $k_\tau$  consiste em acionar a máquina *BLDC* como um gerador elétrico acoplado a uma carga elétrica resistiva. Assim, é realizado repetidas vezes para níveis de cargas diferentes, que dependem da potência nominal da máquina sob teste.

Os dados de torque mecânico e corrente elétrica são coletados, descontando-se os valores de torque de atrito para obtenção do torque elétrico. O torque elétrico e a corrente elétrica são plotados em uma curva, que é ajustada em uma reta, quando considerado um caso de conversão eletromecânica ideal de energia. A inclinação da reta representa numericamente a constante  $k_\tau$ . O esquemático do ensaio para obtenção de  $k_\tau$  é apresentado na figura 10.

**Figura 10 - Esquemático do teste para obtenção da constante de torque**



Fonte: PRADO (2016, p.62)

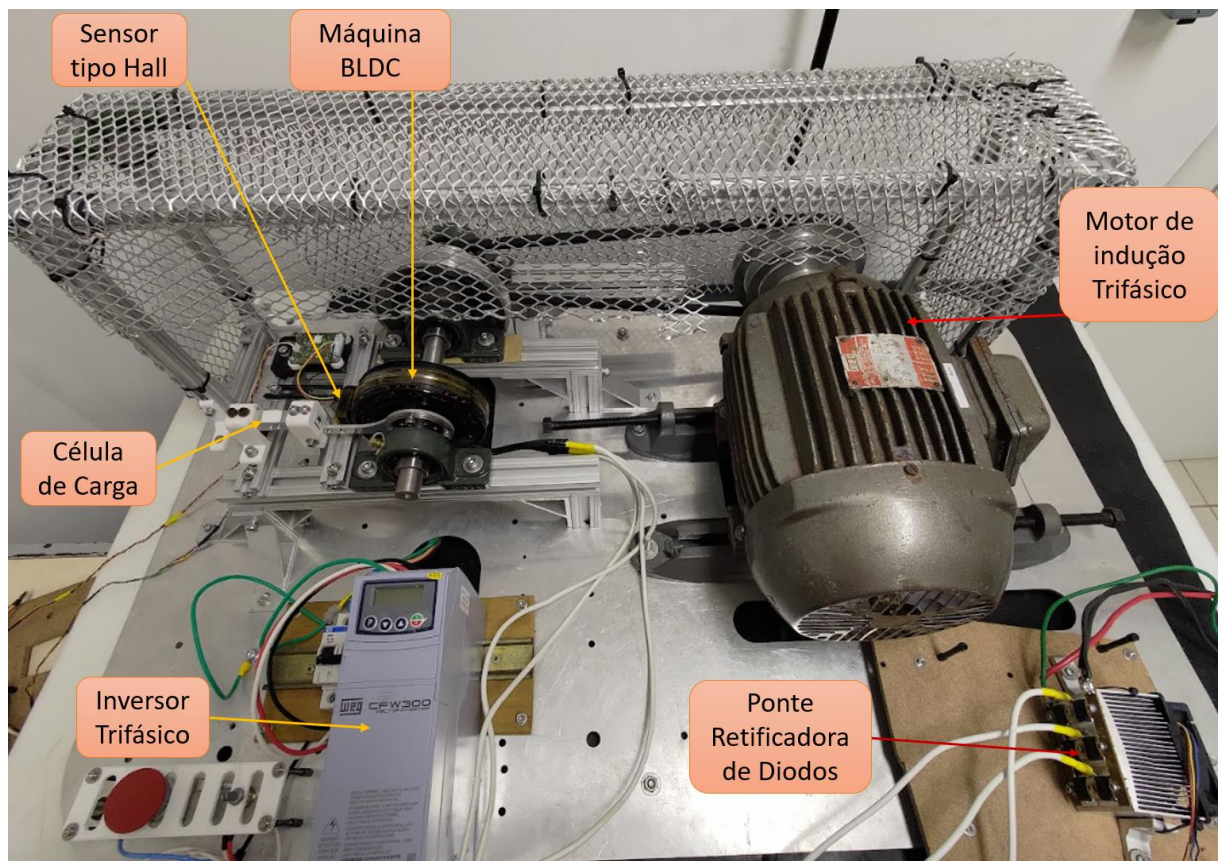
Na prática, as perdas mecânicas por atrito, o efeito de saturação magnética, a indutância dos enrolamentos e a temperatura dos ímãs influenciam no valor de  $k_\tau$ . PRADO (2016, p.62)

#### 4 BANCADA PARA ENSAIOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÕES

A bancada para ensaio da máquina *BLDC* consiste dos seguintes componentes principais: um motor de indução trifásico como máquina primária; conversor de frequência trifásico para controle de velocidade da máquina primária; máquina *BLDC* sob teste; célula de carga para obtenção do torque; sensor *Hall* para obtenção da velocidade mecânica; ponte retificadora de diodos; além dos instrumentos de medições de tensão e corrente.

A figura 11 apresenta a bancada para ensaios com seus principais componentes.

Figura 11 - Bancada para ensaios da máquina *BLDC*



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Observa-se na imagem que alguns dos instrumentos de medições não estão presentes, pois são aparelhos móveis que foram conectados em determinados pontos da bancada, sendo apresentados no decorrer do capítulo.

#### 4.1 Máquina *BLDC* em análise

Neste trabalho foi escolhido para análise o motor *BLDC* da Tmotor modelo MN1010 KV135, que possui uma potência máxima de pico de 4930 W. Operando como motor, sua tensão de operação nominal é de até 50 V e a faixa de rotação em máxima potência está entre 4000 à 4500 rpm. Trata-se de um motor *BLDC* de rotor externo com 36 bobinas e 42 polos, sendo apresentado na figura 12.

**Figura 12 - Motor *BLDC* modelo Tmotor MN1010 KV135**



Fonte: TMOTOR (2023)

A potência máxima de 4930 W pode ser mantida por até 180 s, devido ao aquecimento dos enrolamentos, e sua corrente de pico máxima é de 104 A, podendo ser mantida por até 180 s. Além disso, a resistência interna dos enrolamentos possui 25 mΩ. A figura 13 apresenta as principais características técnicas do motor *BLDC*.

**Figura 13 - Características técnicas do motor *BLDC* Tmotor MN1010 KV135**

|                                |                                                                                              |                            |        |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|
| Motor Size                     | Φ118*34mm                                                                                    |                            |        |
| Stator                         | Imported silicon steel sheet; Anti-rust treatment; 150°C high temperature-resisting coatings |                            |        |
| Configuration                  | 36N42P                                                                                       |                            |        |
| Shaft Diameter                 | IN: 15mm                                                                                     |                            |        |
| Bearing                        | Imported 6902ZZ                                                                              |                            |        |
| Magnet Level                   | N45SH                                                                                        |                            |        |
| Copper Wire                    | 220°C high temperature resistance: Level C                                                   |                            |        |
| Coil Insulation Test           | 1000V                                                                                        |                            |        |
| Centrifugal Cooling Design     | YES                                                                                          |                            |        |
| Rotor Dynamic Balance Standard | ≤5Mg                                                                                         |                            |        |
| Motor Dynamic Balance Standard | ≤10Mg                                                                                        |                            |        |
|                                |                                                                                              |                            |        |
| KV                             | 135                                                                                          | Rated Voltage (Lipo)       | 6-12S  |
| Idle Current (10V)             | 2A                                                                                           | Propeller Recommendation   | 30-32" |
| Peak Current (180s)            | 104A                                                                                         | Motor Weight (Incl. Cable) | 645g   |
| Max. Power (180s)              | 4930W                                                                                        | Package Weight             | 1028g  |
| Internal Resistance            | 25mΩ                                                                                         |                            |        |

Fonte: TMOTOR (2023)

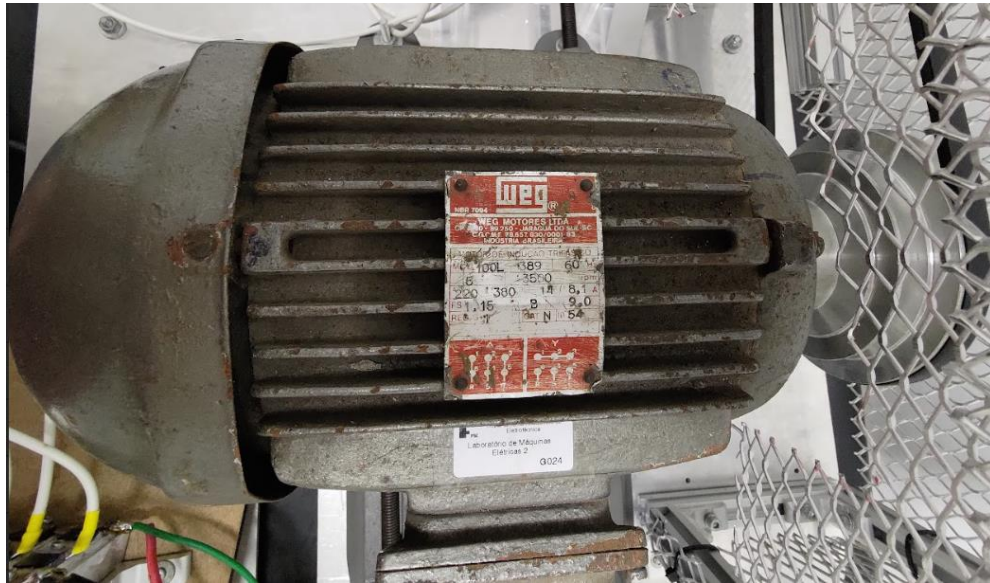
Algumas outras informações importantes também estão disponíveis como peso do motor, resistência interna das bobinas, teste de tensão de isolamento, temperatura de trabalho entre outros.

## 4.2 Máquina Primária

Como máquina primária, foi utilizado um motor de indução trifásico WEG, com tensão de linha de 380 V para ligação estrela e corrente nominal de operação de 8,1 A. Seus dados de placa são apresentados na figura 14.



**Figura 14 - Motor de indução trifásico da máquina primária**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Trata-se do modelo WEG 100L que pode disponibilizar até 5 CV ao eixo em velocidade de 3550 rpm, com fator de serviço de 1,15.

### 4.3 Conversor de frequência trifásico

O controle de velocidade da máquina primária foi realizado com a utilização de um conversor de frequência trifásico modelo WEG CFW300, que permite o acionamento com velocidade variável para motores de indução trifásicos, possuindo uma interface de fácil operação. A figura 15 ilustra o conversor utilizado na bancada de teste.

**Figura 15 - Conversor de frequência trifásico**



Fonte: WEG (2023)

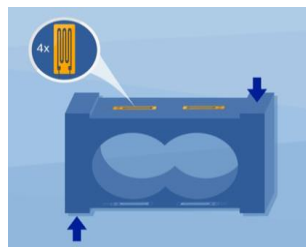
Este conversor de frequência pode operar com correntes de saída de 1,1 A à até 15,2 A, com tensão de alimentação de 110-127 V e 200-240 V monofásico e, 200-240 V e 380-480 V trifásico.

#### 4.4 Célula de carga

As células de carga geralmente são produzidas em aço ou alumínio, sendo muito resistentes, porém possuem uma pequena elasticidade. Quando submetida a uma carga, o aço ou alumínio sofre uma pequena deformação, conhecida como deformação elástica, retornando a sua posição inicial como resposta na retirada da carga. Estas micro deformações podem ser medidas por dispositivos medidores de deformação *strain gauges*, ou simplesmente SG, que estão fixados na célula de carga. HBK (2023)

Existem diversos tipos de células de carga, para diversas aplicações, principalmente voltadas para aplicações em balanças de pesagem. O modelo utilizado para medição do torque foi do tipo de ponto único ou *single point*, conforme apresentado na figura 16.

**Figura 16 - Célula de carga tipo *single point***



Fonte: HBK (2023)

Dependendo do modelo, as células de carga do tipo *single point* podem ser empregados de pequenas balanças eletrônicas até plataformas de pesagem, entre outras aplicações.

#### 4.5 Instrumentos de medição / Instrumentos auxiliares

Para coleta dos dados foram utilizados os seguintes instrumentos nos ensaios: Osciloscópio Tektronix TBS 1102B; Fonte de Bancada Politerm POL-16E e Multímetro digital Minipa ET-1002.

O osciloscópio é um importante instrumento de medição, pois é possível analisar com precisão os detalhes dos sinais de tensão em função do tempo, como também identificar o formato de onda em seu *display* e analisá-los com até 34 tipos de medições automatizadas. Além disso, é possível registrar as imagens com o auxílio de um *pen-drive*.

Sua utilização teve grande importância, principalmente no registro da tensão de pico e frequência do sinal nos terminais da máquina *BLDC*. Além disso, o osciloscópio possui uma ponteira de medição de corrente elétrica, auxiliando nas análises de ensaio de carga. A figura 17 apresenta o modelo do osciloscópio utilizado nos ensaios.

**Figura 17 - Osciloscópio Tektronix TBS 1102B**



Fonte: TEKTRONIX (2023)

Já o multímetro digital Minipa ET-1002 possui diversas funções auxiliares, podendo medir tensões AC e DC, corrente DC, resistências, teste de continuidade, possuindo uma precisão de até 0,5%, conforme a função utilizada, auxiliando nos testes de resistência dos enrolamentos e na medição de tensão no barramento CC. O multímetro utilizado é apresentado na figura 18.

**Figura 18 - Multímetro digital Minipa ET-1002**



Fonte: MINIPA (2023)

A fonte de bancada é um instrumento auxiliar muito útil em determinadas análises, pois pode ser controlada tanto a tensão de saída quanto a corrente de saída. O modelo utilizado foi o Politerm POL-16E (figura 19), que permite o controle de tensão entre os valores 0-32 V além de permitir o controle de corrente elétrica de 0-5 A.

**Figura 19 - Fonte de bancada Politerm POL-16E**



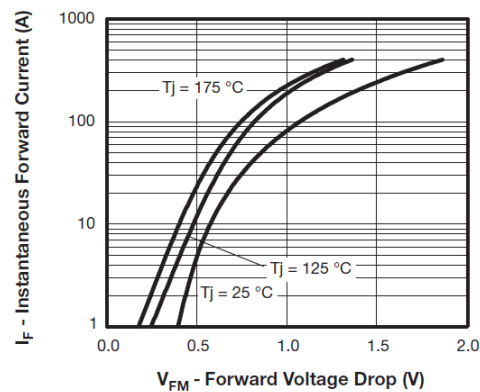
Fonte: Elaboração Própria (2023)

Esta fonte foi utilizada para alimentar o circuito eletrônico que faz a leitura do *sensor Hall* de rotação e da célula de carga.

#### **4.6 Ponte retificadora de diodos de onda completa**

Para a ponte retificadora foram utilizados diodos de alta performance do tipo Schottky, modelo VS-100BGQ100. Este diodo permite altas frequências de operação, baixa queda de tensão direta em condução, e temperaturas de operação de até 175°C. A figura 20 apresenta o gráfico da queda de tensão em condução para o diodo utilizado.

**Figura 20 - Curva de tensão em condução do diodo Schottky**



Fonte: VISHAY (2023)

Para representar as perdas na ponte retificadora foi considerada apenas a queda de tensão direta em condução. Os dados de tensão em condução foram estimados por meio do gráfico fornecido pelo fabricante e inseridos na tabela 2.

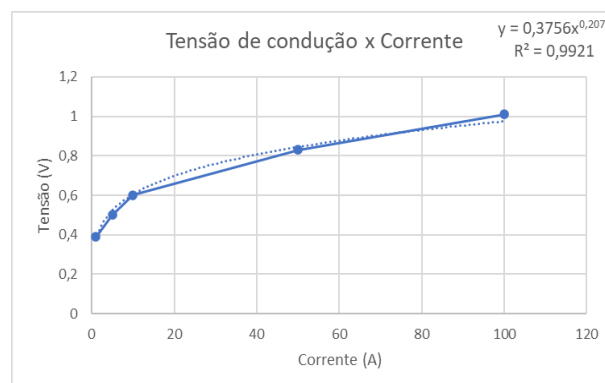
**Tabela 2 - Tensão de condução dos diodos**

| Corrente (A) | Tensão (V) |
|--------------|------------|
| 100          | 1,01       |
| 50           | 0,83       |
| 10           | 0,6        |
| 5            | 0,5        |
| 1            | 0,39       |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Com base nos dados da tabela 2 é possível determinar uma equação que descreve, aproximadamente, o comportamento da tensão de condução em função da corrente elétrica, como apresentado no gráfico 1.

**Gráfico 1 - Tensão em condução do diodo versus corrente**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Nota-se que o comportamento da tensão de condução  $V_d$  em função da corrente elétrica no diodo  $I_d$  pode ser aproximado por uma função exponencial, resultando na equação 22.

$$V_d = 0,3756 \cdot (I_d)^{0,2071} \quad (22)$$

Esta equação apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 99,2% nos pontos avaliados, sendo utilizada para determinar as perdas na ponte retificadora.

## 5 ENSAIOS NA PRÁTICA E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os testes realizados na máquina *BLDC* em análise, como também alguns ajustes necessários na metodologia, além dos resultados obtidos.

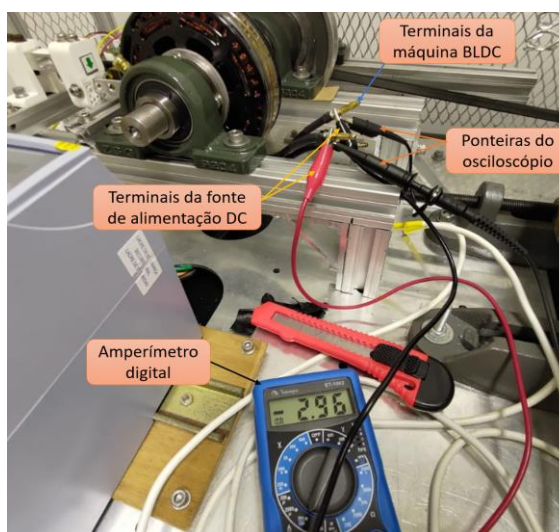
### 5.1 Resistência dos enrolamentos - testes e resultados

A medição da resistência dos enrolamentos deve ser realizada por instrumentos de precisão que consigam mensurar a ordem de grandeza das resistências, principalmente por serem muito pequenas em motores elétricos.

Devido à ausência de uma ponte de Wheatstone, o teste consistiu em ligar a fonte de corrente *DC* em dois terminais da máquina *BLDC*, interligada por um amperímetro digital a fim de garantir o valor de corrente elétrica fornecido pela fonte. A fonte foi configurada a fornecer três amperes e, então, foi medido a tensão direta que está sendo aplicada nos terminais máquina.

A leitura de tensão elétrica foi realizada utilizando o osciloscópio. Pela lei de Ohm, é possível então determinar o valor de resistência de linha dos enrolamentos. O teste foi repetido para as três combinações possíveis de pares com os terminais A, B e C da máquina. A montagem do circuito é apresentada na figura 21, indicando a corrente elétrica em um dos pares de terminais da máquina.

**Figura 21 - Montagem do circuito para medição da resistência de enrolamento**

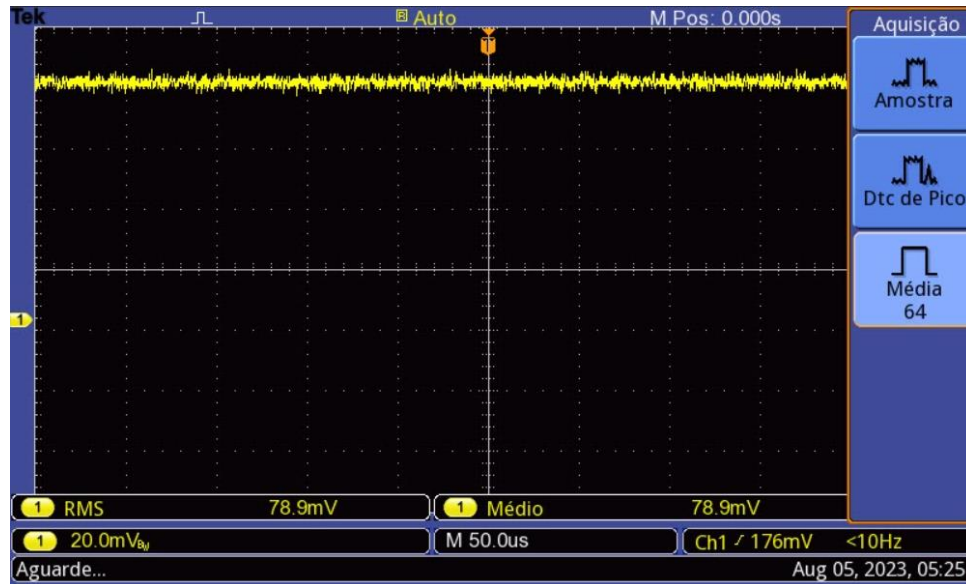


Fonte: Elaboração Própria (2023)



A tensão aplicada aos terminais A e B da máquina *BLDC*, durante o teste de resistência dos enrolamentos, pode ser analisada na figura 23.

**Figura 22 - Tensão  $V_{ab}$  nos terminais da máquina *BLDC* com aplicação de corrente contínua de 3 A**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Os resultados obtidos estão expostos na tabela 3, onde é apresentado o valor médio da resistência de linha encontrado.

**Tabela 3 - Teste de resistência dos enrolamentos**

| Resistências dos enrolamentos |              |             |                            |                       |                  |          |                             |
|-------------------------------|--------------|-------------|----------------------------|-----------------------|------------------|----------|-----------------------------|
|                               | Corrente (A) | Tensão (mV) | Resistência Calculada (mΩ) | $R_L$ Médio (mΩ) 25°C | $R_L$ (mΩ) 100°C | Variação | Temperatura de medição (°C) |
| Rab                           | 2,96         | 78,9        | 26,66                      | 27,47                 | <b>32,37</b>     | 7%       | 25                          |
| Rbc                           | 2,96         | 79,8        | 26,96                      |                       |                  |          |                             |
| Rca                           | 2,96         | 85,2        | 28,78                      |                       |                  |          |                             |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Como a máquina *BLDC* em seu *datasheet* traz apenas o valor de resistência interna, sem informar o tipo de ligação das bobinas, então foi considerado que se tratam de resistência de linha, devido aos valores serem muito próximos aos encontrados nas medições.

Para os cálculos futuros foi considerado o valor de resistência de 25 mΩ fornecido pelo fabricante, com correção da resistência para uma temperatura de



operação arbitrada de 100 °C através da equação 13, conforme resultado apresentado na tabela 3.

A ligação interna das bobinas da máquina *BLDC* pode ser do tipo triângulo ou estrela. Em ambos os casos se faz necessário corrigir o valor da resistência de linha “ $R_L$ ” para resistência em série “ $R_s$ ”. Nas simulações realizadas optou-se por uma ligação do tipo triângulo. A equação 23 apresenta o cálculo realizado para ajuste da resistência série.

$$R_s = R_L \cdot \frac{3}{2} = 32,37 \cdot \frac{3}{2} = 48,5 \text{ m}\Omega \quad (23)$$

Para uma ligação do tipo estrela, o cálculo pode ser realizado conforme equação 24.

$$R_s = R_L \cdot \frac{1}{2} \quad (24)$$

## 5.2 Ensaio da constante de força eletromotriz - testes e resultados

O ensaio para constante de força eletromotriz foi realizado de dois modos, a fim de coletar o máximo de informações. O teste consiste em operar a máquina *BLDC* como gerador à vazio em diferentes níveis de velocidade. Então foi medido a tensão eletromotriz induzida de linha “ $V_{ab}$ ” nos terminais da máquina *BLDC*, além disso, foi medido a tensão de saída retificada “ $V_{cc}$ ” apenas para comparação.

Para obter com precisão e confiabilidade a velocidade mecânica da máquina, foi utilizado a equação 19 para determiná-la, por meio dos valores de frequência elétrica coletados em cada nível de velocidade do teste. Deste modo, o *sensor Hall* de velocidade não precisou ser utilizado, evitando possíveis erros de leitura devido a sua fixação ou alguma interferência no circuito eletrônico responsável pela leitura.

Os valores foram coletados para até sete níveis de velocidades. Para melhor visualização, é apresentado os resultados obtidos do ensaio na tabela 4.

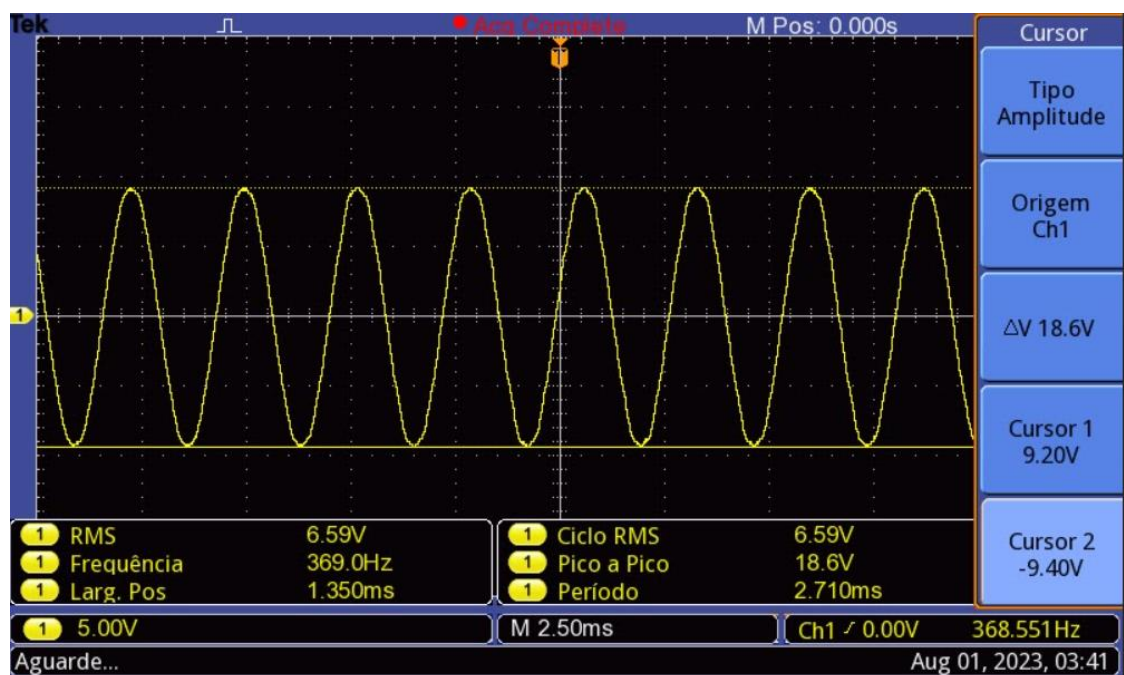
Tabela 4 - Parâmetros coletados para ensaio de constante elétrica – Gerador à vazio

| Constante Elétrica - 7 níveis de Velocidade |                 |                           |          |                    |                             |
|---------------------------------------------|-----------------|---------------------------|----------|--------------------|-----------------------------|
| n°                                          | Frequência (Hz) | Velocidade do rotor (RPM) | N. Polos | Vab Pico "FEM" (V) | V cc após o retificador (V) |
| 1                                           | 182,8           | 522                       | 42       | 4,64               | 5,42                        |
| 2                                           | 369             | 1054                      |          | 9,3                | 10,7                        |
| 3                                           | 548,2           | 1566                      |          | 13,9               | 15,7                        |
| 4                                           | 728,8           | 2082                      |          | 18,4               | 20,6                        |
| 5                                           | 915,7           | 2616                      |          | 23                 | 25,9                        |
| 6                                           | 1104            | 3154                      |          | 27,6               | 31                          |
| 7                                           | 1462            | 4177                      |          | 36                 | 40,4                        |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

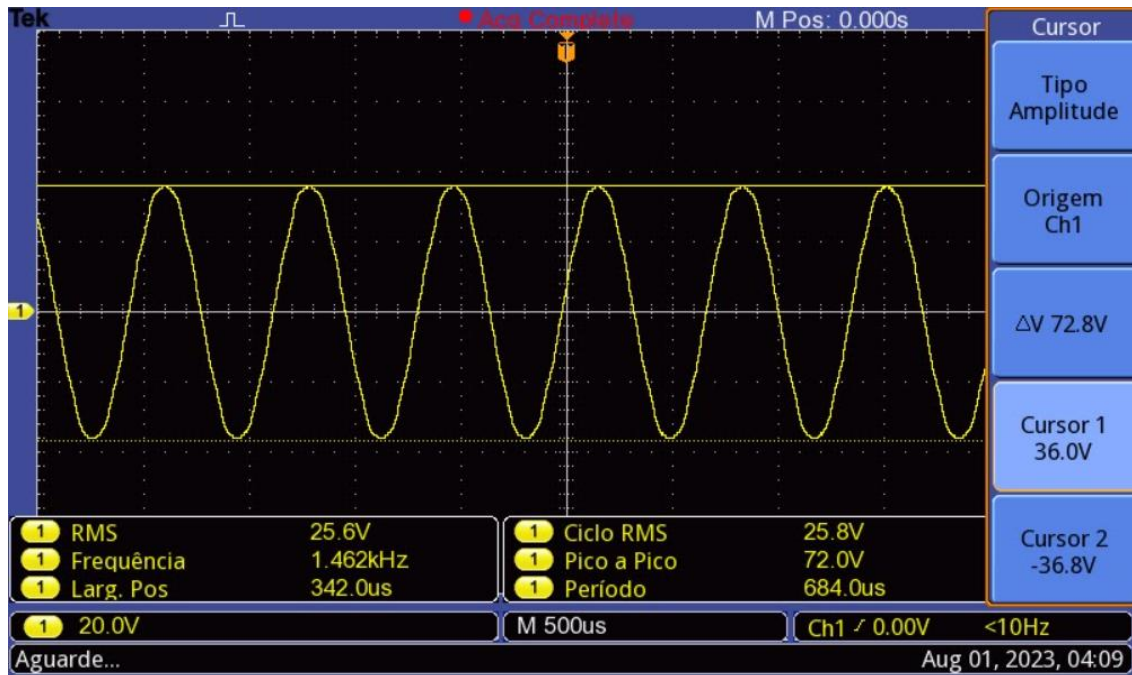
As figuras 23 e 24 apresentam a forma de onda da FEM induzida, o nível de tensão e frequência elétrica para velocidades de 1054 rpm e 4177 rpm respectivamente.

Figura 23 - Tensão Vab nos terminais da máquina BLDC operando como gerador síncrono a vazio em 1054 rpm



Fonte: Elaboração Própria (2023)

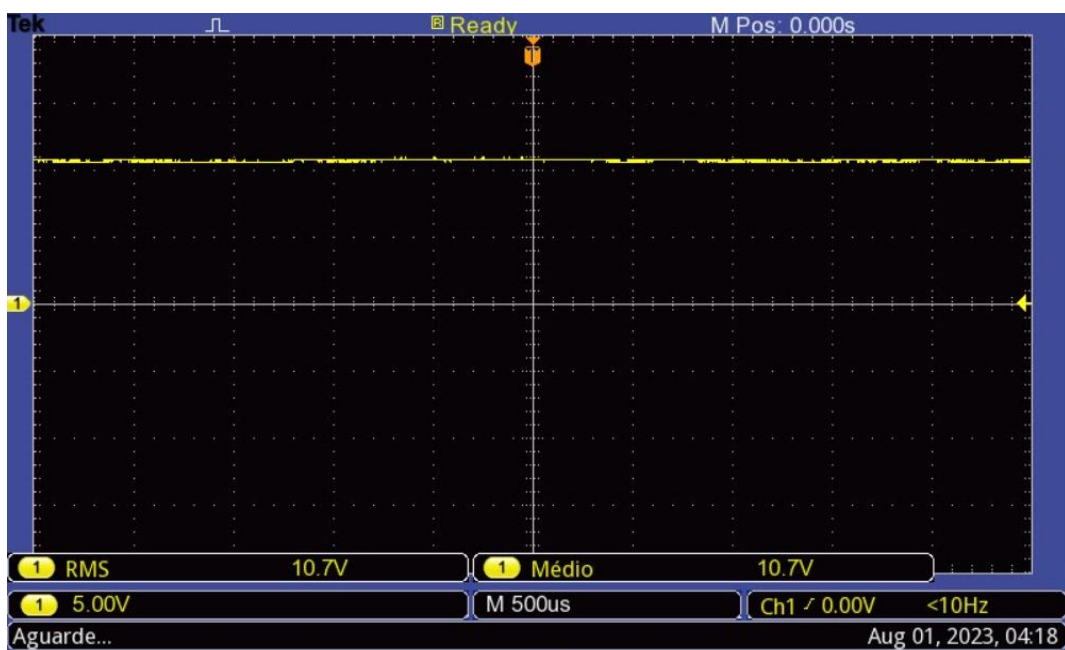
**Figura 24 - Tensão  $V_{ab}$  nos terminais da máquina *BLDC* operando como gerador síncrono a vazio em 4177 rpm**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

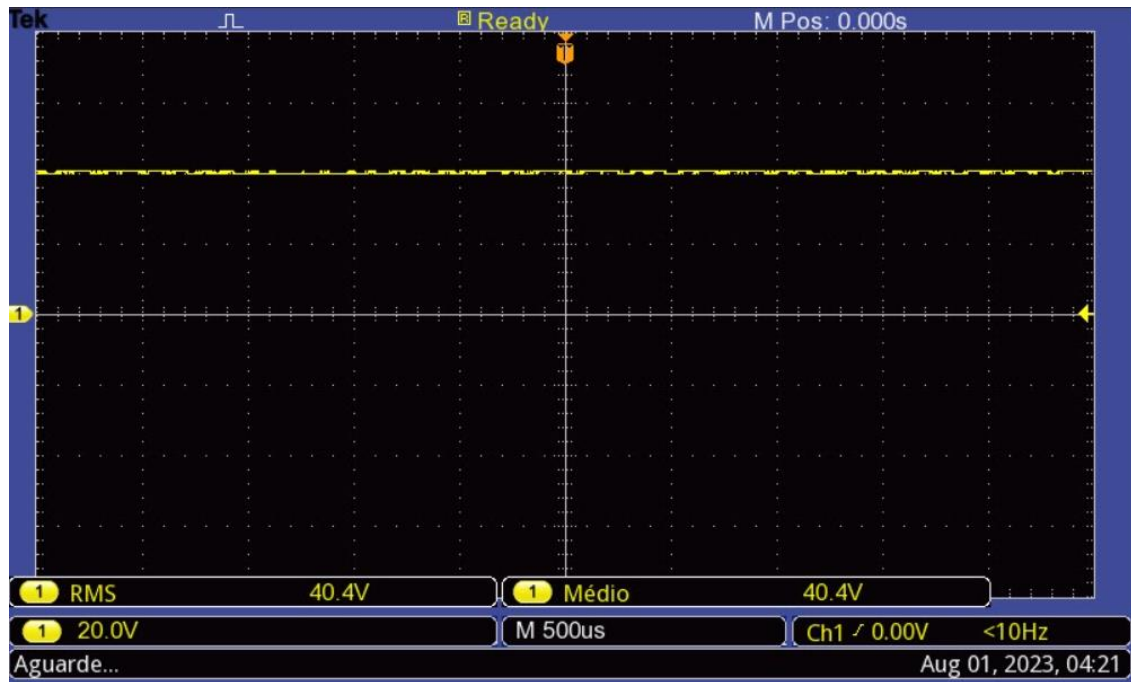
Nas figuras 25 e 26 é possível avaliar o nível de tensão para as velocidades de 1054 rpm e 4177 rpm, respectivamente, no barramento CC da ponte retificadora de onda completa.

**Figura 25 - Tensão no barramento CC após o retificador com a máquina *BLDC* operando como gerador síncrono a vazio em 1054 rpm**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

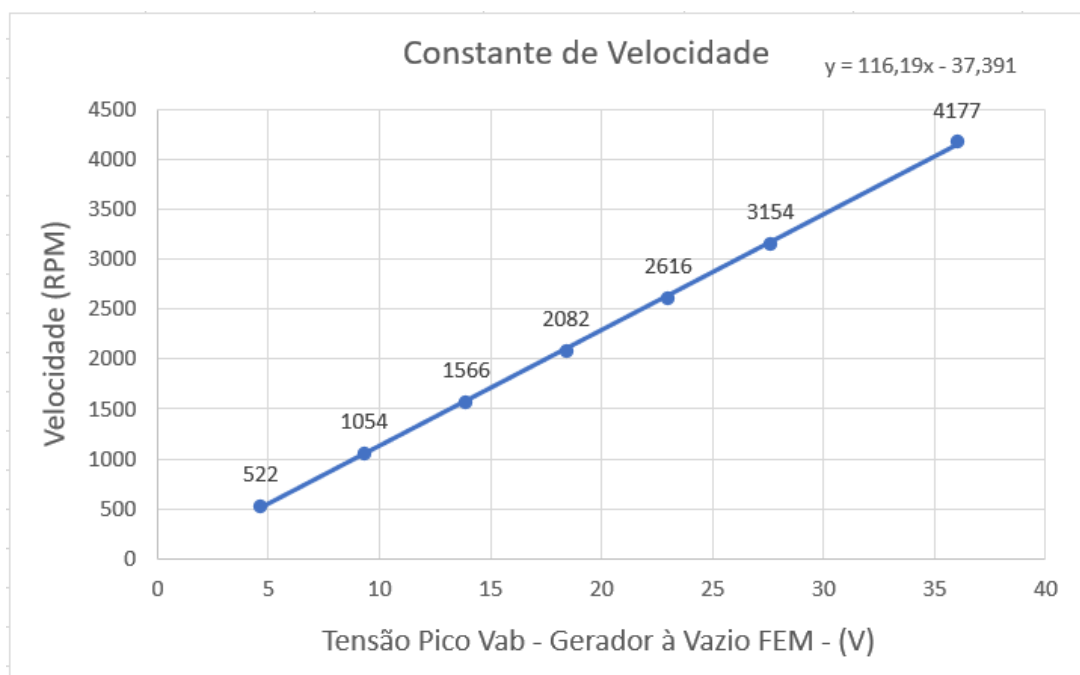
**Figura 26 - Tensão no barramento CC após o retificador com a máquina *BLDC* operando como gerador síncrono a vazio em 4177 rpm**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

A partir dos dados coletados foi traçado a curva de RPM x FEM, onde a linearização desta curva representa a constante de velocidade ( $k_v$ ), como visto no gráfico 2.

**Gráfico 2 - Constante de velocidade**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Verifica-se que a constante de velocidade possui o comportamento linear e o valor para a máquina *BLDC* avaliada é aproximadamente 116. A diferença encontrada entre a especificação, originalmente informada de  $135 k_v$ , pode estar relacionada ao modo de operação, onde na operação como motor os terminais são alimentados por forma de onda quadradas, já as formas de onda obtidas da FEM no osciloscópio possuíam formato senoidal, ao qual induzem a esta conclusão.

A constante de força eletromotriz ( $k_e$ ) é tida como o inverso da constante de velocidade, como apresentado na equação 25.

$$k_e = \frac{1}{k_v} \quad (25)$$

### 5.3 Ensaio de obtenção de parâmetros mecânicos

Como os ensaios de carga são realizados à velocidade constante, a constante de inércia torna-se desprezível nas análises realizadas. Sendo assim, apenas é relevante obter os parâmetros de torque de atrito.

O ensaio consiste em medir o torque aplicado à máquina *BLDC* à vazio, em diferentes níveis de velocidade. A linearização da curva trás o coeficiente de atrito dinâmico e estático.

A tabela 5 apresenta os valores de torque medidos em diferentes velocidades.

**Tabela 5 - Torque de atrito**

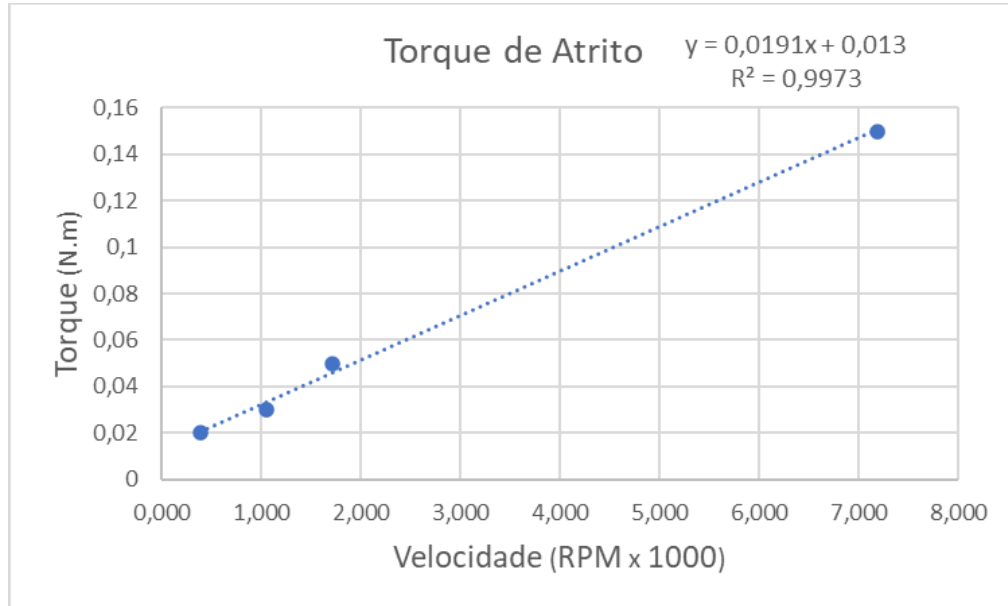
| n° | Frequência (Hz) | Velocidade do rotor (RPMx1000) | Torque (N.m) |
|----|-----------------|--------------------------------|--------------|
| 1  | 136,6           | 0,390                          | 0,02         |
| 2  | 369             | 1,054                          | 0,03         |
| 3  | 598,8           | 1,711                          | 0,05         |
| 4  | 2513            | 7,180                          | 0,15         |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

O comportamento do torque de atrito pode ser observado através do gráfico

3.

**Gráfico 3 - Torque de atrito**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

A curva de torque apresenta um comportamento linear, onde é possível determinar a constante de atrito dinâmico e estático.

#### 5.4 Ensaio da constante de torque - testes e resultados

Como um dos objetivos do trabalho é avaliar as características do gerador *BLDC* em fornecer energia para um sistema elétrico híbrido em série aplicado a drones, neste caso, a tensão no barramento CC e das baterias de *LiPo* (*lithium-ion polymer*), ou polímero de lítio, opera entre as faixas de 45 à 50 Vcc. Assim, os ensaios foram realizados considerando a corrente de saída no barramento CC da ponte retificadora.

Outrossim, este ajuste no método do ensaio de torque proporciona uma visão mais assertiva do desempenho da máquina *BLDC* para o objetivo inicial. Além disso, facilita a variação da carga elétrica aplicada à máquina, com a utilização de uma bancada de resistores em paralelo chaveadas, podendo ser adicionado carga ou retirado com uma simples alteração da chave de ligação de cada unidade resistiva.

A bancada de resistores foi composta por oito resistores, sendo quatro resistores de  $10\ \Omega$ , dois resistores de  $5\ \Omega$ , um resistor de  $2,5\ \Omega$  e, por fim, um resistor de  $1,25\ \Omega$ . Como todos os resistores estão em paralelo, o chaveamento dos mesmos permite qualquer combinação em paralelo entre eles, trazendo assim uma ampla variedade de carga a ser aplicada, que pode ficar entre  $10\ \Omega$  e  $0,5\ \Omega$ .

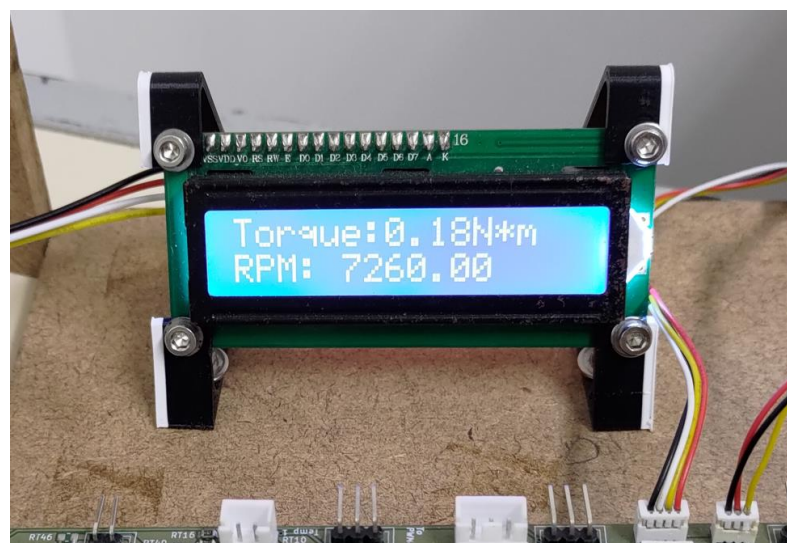
Nestes ensaios foram analisados a tensão de linha ( $V_{ab}$ ) do gerador *BLDC*, a tensão ( $V_{cc}$ ) nos terminais no barramento CC da ponte retificadora, o torque fornecido ao gerador, a corrente elétrica no barramento CC e a rotação mecânica do eixo, para cada carga aplicada.

Com as informações de tensão e corrente fornecidos à carga, torque e velocidade mecânica aplicadas à máquina *BLDC*, é possível então determinar o rendimento da máquina e seu comportamento como gerador elétrico.

Nos testes realizados foram coletados dados para até 37 diferentes pontos de operação, variando a carga resistiva ou a velocidade aplicada ao gerador. No decorrer deste capítulo são apresentados os pontos mais importantes.

As figuras 27, 28 e 29 apresentam respectivamente o torque aplicado à máquina *BLDC*, a tensão  $V_{cc}$  aplicada à carga resistiva e, o gráfico contendo o formato de onda da tensão  $V_{ab}$  nos terminais do gerador e a corrente CC da carga, quando operado a 7109 rpm com carga resistiva de  $5\ \Omega$  (dois resistores de  $10\ \Omega$  em paralelo).

**Figura 27 - Torque aplicado ao gerador *BLDC* a 7109 rpm e carga resistiva de  $5\ \Omega$**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

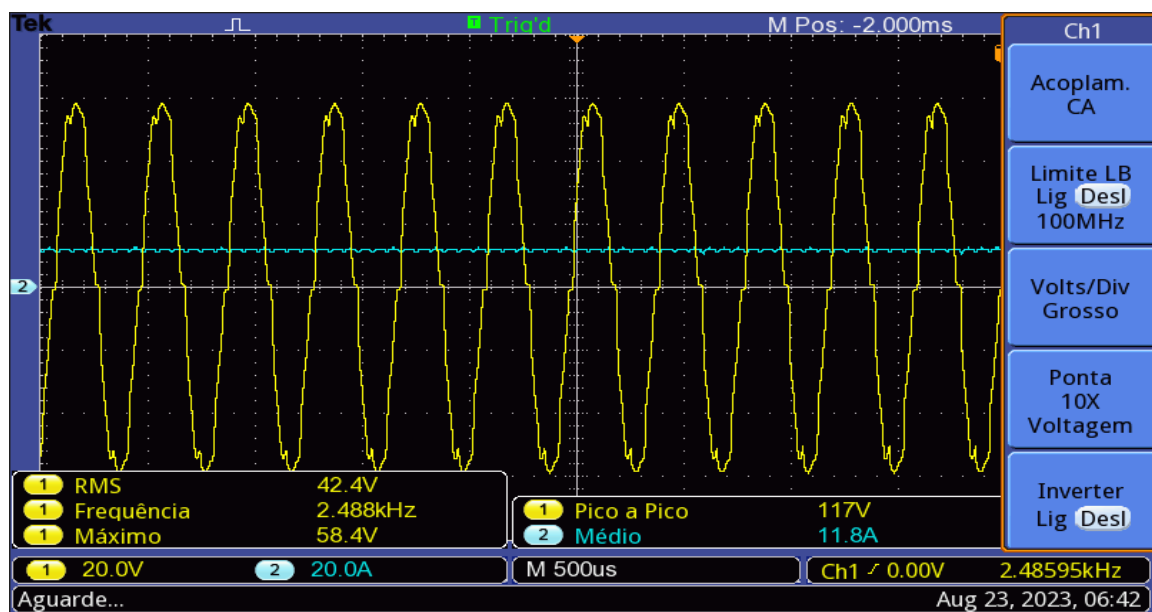


Figura 28 - Tensão DC nos terminais da carga com gerador *BLDC* a 7109 rpm e carga resistiva de 5  $\Omega$



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Figura 29 - Tensão  $V_{ab}$  nos terminais do gerador *BLDC* a 7109 rpm com carga resistiva de 5  $\Omega$  (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul)



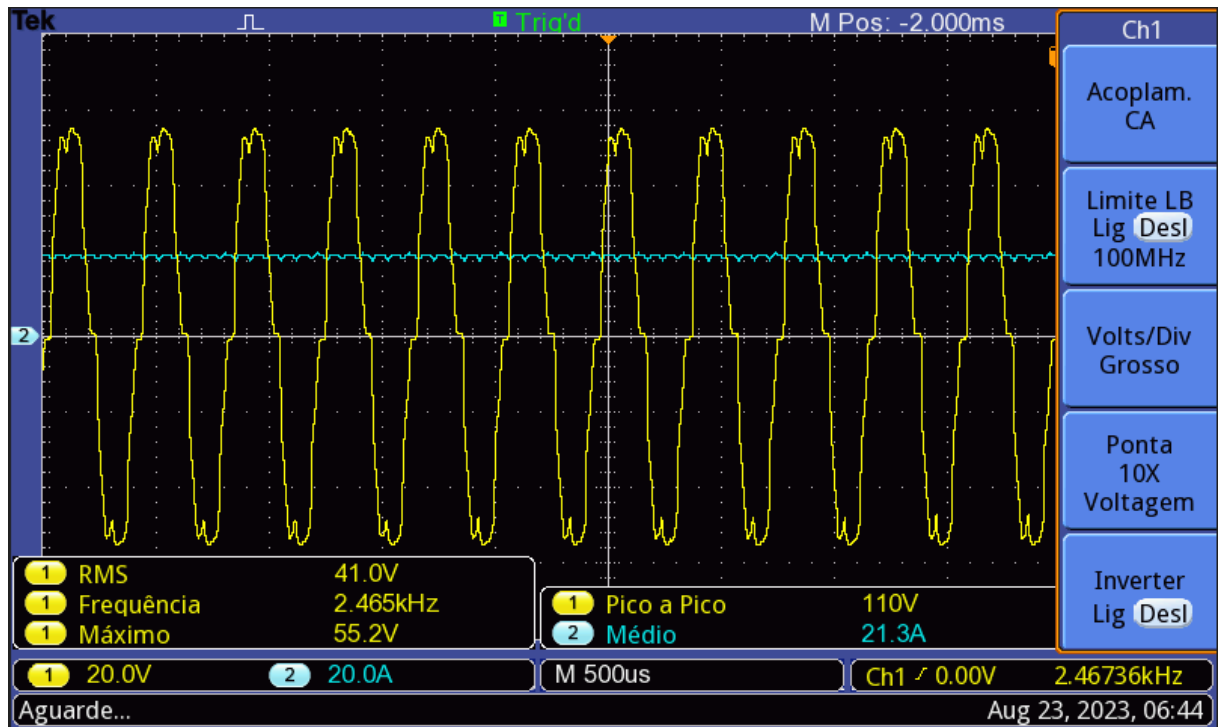
Fonte: Elaboração Própria (2023)

Conforme são adicionadas cargas resistivas ao gerador *BLDC*, nota-se uma alteração no formato de onda da tensão de linha do gerador. Estas deformações ocorrem devido às impedâncias internas da máquina, assim como o efeito de reação da armadura e também a comutação da ponte retificadora de diodos, gerando reativos de distorção harmônica, além de uma queda da tensão de pico.

As figuras 30, 31 e 32 apresentam o comportamento da tensão de linha do gerador e a corrente CC fornecida para as cargas de 2,5  $\Omega$ , 1,25  $\Omega$  e 0,5  $\Omega$  respectivamente.

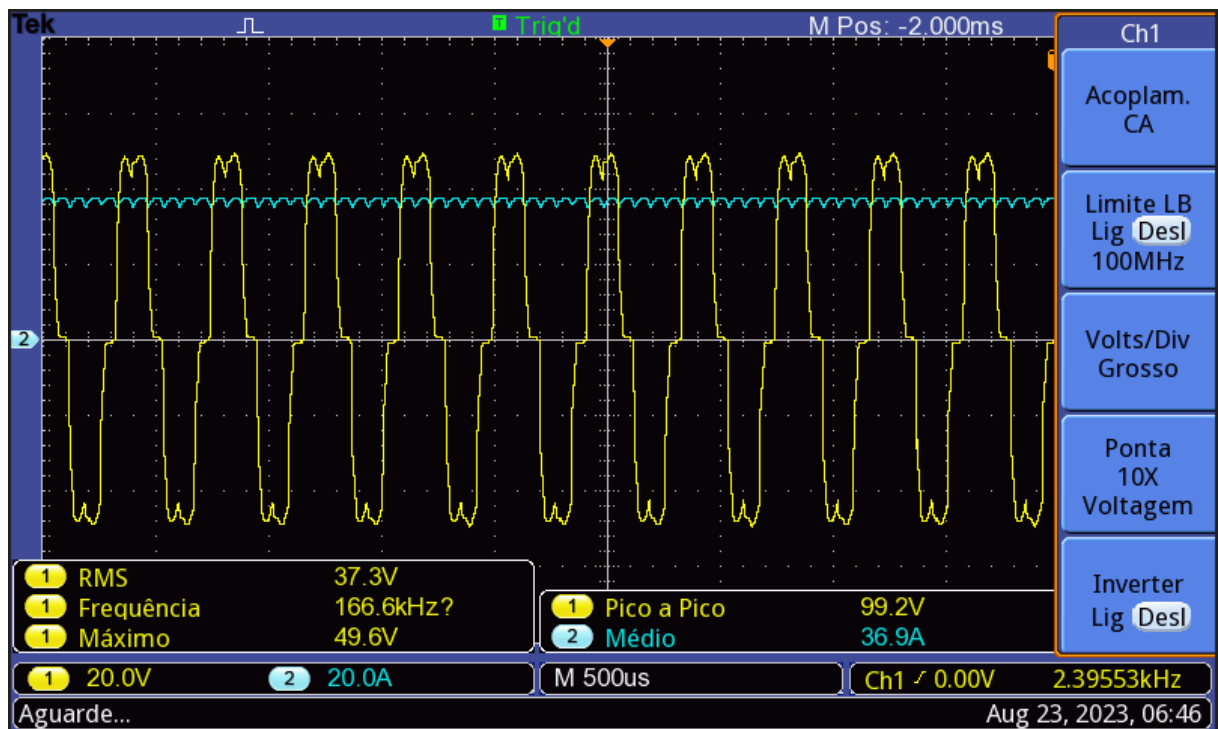


Figura 30 - Tensão Vab nos terminais do gerador BLDC a 7043 rpm com carga resistiva de 2,5  $\Omega$  (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul)



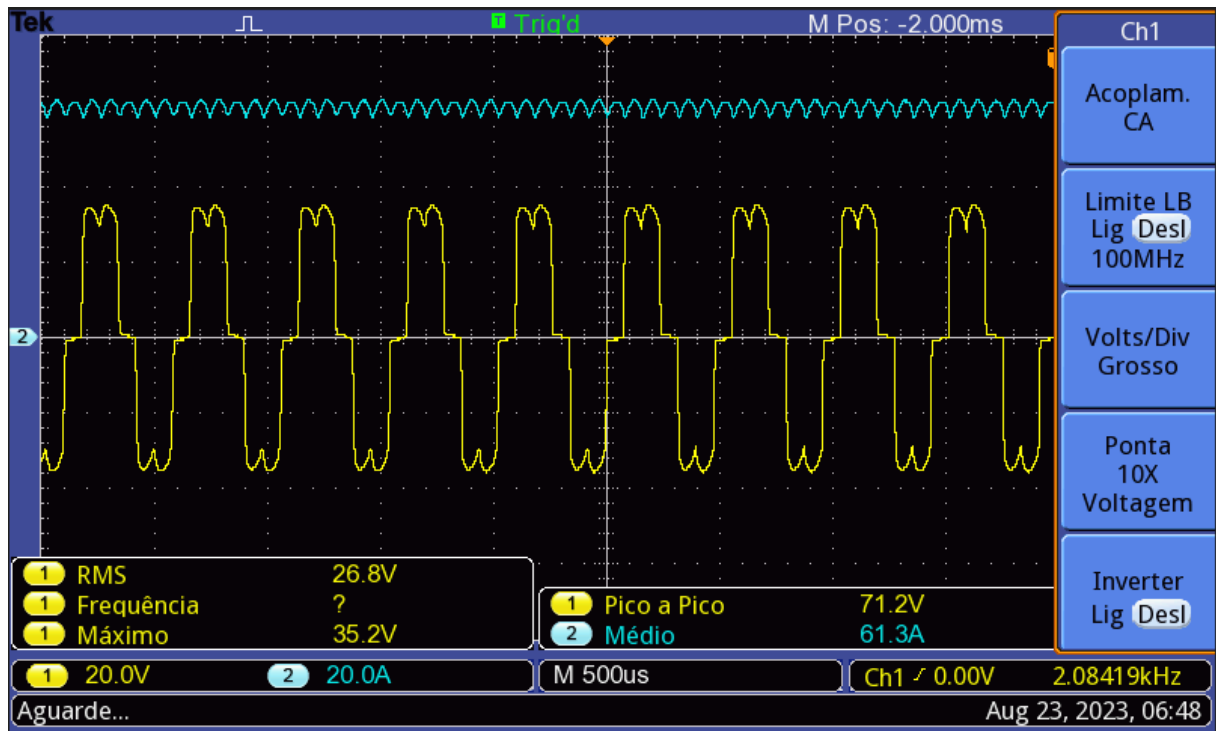
Fonte: Elaboração Própria (2023)

Figura 31 - Tensão Vab nos terminais do gerador BLDC a 6843 rpm com carga resistiva de 1,25  $\Omega$  (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul)



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Figura 32 - Tensão  $V_{ab}$  nos terminais do gerador *BLDC* a 5954 rpm com carga resistiva de 0,5  $\Omega$  (amarelo) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul)



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Na medida em que se aumenta a carga elétrica aplicada ao gerador, nota-se uma queda na velocidade do mesmo, pois a máquina primária não possui potência suficiente para manter a rotação. Este fator também contribui para a queda de tensão de linha nos terminais do gerador.

Todos os dados coletados no ensaio de carga foram agrupados e inseridos na tabela 6, considerando a ordem crescente em relação ao torque aplicado à máquina *BLDC*.

Calcula-se o torque elétrico subtraindo-se o torque de atrito, previamente determinado em teste, dos dados de torque coletados durante o ensaio de carga. Deste modo, a perda mecânica da máquina *BLDC* é isolada, restando apenas para análise o comportamento referente as perdas elétricas e da carga elétrica aplicada, facilitando na obtenção do modelo que representa o comportamento elétrico da máquina.

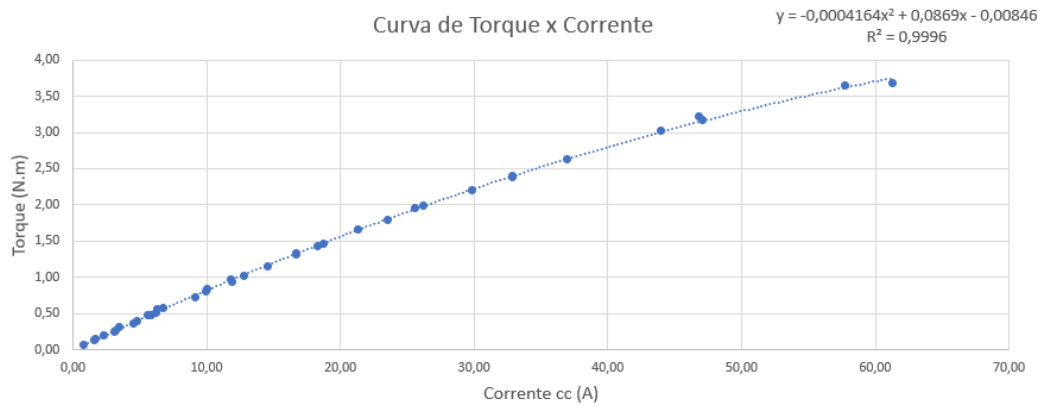
Tabela 6 - Dados de ensaio de carga da máquina *BLDC*

| Freq.<br>(Hz) | Veloc.<br>Rotor<br>(RPM) | Torque<br>total<br>(N.m) | Torque<br>atrito<br>(N.m) | Carga<br>Resistiva<br>( $\Omega$ ) | Vcc<br>(V) | Icc<br>(A) | Torque<br>elétrico<br>(N.m) |
|---------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------|------------|-----------------------------|
| 371,0         | 1060                     | 0,10                     | 0,03                      | 10,00                              | 8,0        | 0,82       | 0,06                        |
| 369,0         | 1054                     | 0,16                     | 0,03                      | 5,00                               | 7,9        | 1,57       | 0,13                        |
| 727,2         | 2078                     | 0,20                     | 0,05                      | 10,00                              | 16,2       | 1,68       | 0,16                        |
| 369,6         | 1056                     | 0,22                     | 0,03                      | 3,33                               | 7,8        | 2,32       | 0,19                        |
| 368,3         | 1052                     | 0,28                     | 0,03                      | 2,50                               | 7,7        | 3,06       | 0,24                        |
| 727,2         | 2078                     | 0,32                     | 0,05                      | 5,00                               | 16,0       | 3,23       | 0,27                        |
| 1462,0        | 4177                     | 0,39                     | 0,07                      | 10,00                              | 33,4       | 3,49       | 0,32                        |
| 367,6         | 1050                     | 0,39                     | 0,03                      | 1,67                               | 7,6        | 4,49       | 0,36                        |
| 724,6         | 2070                     | 0,44                     | 0,05                      | 3,33                               | 15,7       | 4,79       | 0,40                        |
| 2140,0        | 6114                     | 0,57                     | 0,10                      | 10,00                              | 48,8       | 5,57       | 0,47                        |
| 364,9         | 1043                     | 0,51                     | 0,03                      | 1,25                               | 7,4        | 5,85       | 0,48                        |
| 722,0         | 2063                     | 0,56                     | 0,05                      | 2,50                               | 15,5       | 6,24       | 0,52                        |
| 2488,0        | 7109                     | 0,66                     | 0,11                      | 10,00                              | 56,9       | 6,31       | 0,55                        |
| 1453,0        | 4151                     | 0,64                     | 0,07                      | 5,00                               | 32,7       | 6,75       | 0,57                        |
| 719,4         | 2055                     | 0,78                     | 0,05                      | 1,67                               | 15,2       | 9,14       | 0,73                        |
| 1462,0        | 4177                     | 0,88                     | 0,07                      | 3,33                               | 32,1       | 9,96       | 0,80                        |
| 2119,0        | 6054                     | 0,93                     | 0,10                      | 5,00                               | 47,6       | 10,00      | 0,83                        |
| 2488,0        | 7109                     | 1,08                     | 0,11                      | 5,00                               | 55,2       | 11,80      | 0,96                        |
| 717,7         | 2051                     | 0,99                     | 0,05                      | 1,25                               | 14,7       | 11,90      | 0,95                        |
| 1462,0        | 4177                     | 1,10                     | 0,07                      | 2,50                               | 31,5       | 12,80      | 1,03                        |
| 2132,0        | 6091                     | 1,25                     | 0,10                      | 3,33                               | 46,5       | 14,60      | 1,15                        |
| 710,9         | 2031                     | 1,36                     | 0,05                      | 0,83                               | 14,0       | 16,70      | 1,32                        |
| 2474,0        | 7069                     | 1,44                     | 0,11                      | 3,33                               | 53,6       | 16,70      | 1,33                        |
| 1445,0        | 4129                     | 1,51                     | 0,07                      | 1,67                               | 30,3       | 18,30      | 1,44                        |
| 2119,0        | 6054                     | 1,56                     | 0,10                      | 2,50                               | 45,3       | 18,70      | 1,46                        |
| 2465,0        | 7043                     | 1,77                     | 0,11                      | 2,50                               | 52,1       | 21,30      | 1,66                        |
| 1453,0        | 4151                     | 1,86                     | 0,07                      | 1,25                               | 29,2       | 23,50      | 1,79                        |
| 709,2         | 2026                     | 2,00                     | 0,05                      | 0,50                               | 12,9       | 25,60      | 1,95                        |
| 2101,0        | 6003                     | 2,08                     | 0,10                      | 1,67                               | 43,0       | 26,20      | 1,98                        |
| 2439,0        | 6969                     | 2,31                     | 0,11                      | 1,67                               | 49,1       | 29,80      | 2,21                        |
| 1437,0        | 4106                     | 2,46                     | 0,07                      | 0,83                               | 27,4       | 32,90      | 2,38                        |
| 2083,0        | 5951                     | 2,49                     | 0,10                      | 1,25                               | 41,0       | 32,90      | 2,40                        |
| 2395,0        | 6843                     | 2,74                     | 0,11                      | 1,25                               | 45,9       | 36,90      | 2,63                        |
| 2043,0        | 5837                     | 3,12                     | 0,09                      | 0,83                               | 36,9       | 44,00      | 3,03                        |
| 1398,0        | 3994                     | 3,29                     | 0,07                      | 0,50                               | 23,9       | 46,80      | 3,22                        |
| 2243,0        | 6409                     | 3,27                     | 0,10                      | 0,83                               | 39,6       | 47,10      | 3,17                        |
| 1874,0        | 5354                     | 3,73                     | 0,09                      | 0,50                               | 29,6       | 57,70      | 3,64                        |
| 2084,0        | 5954                     | 3,79                     | 0,10                      | 0,50                               | 31,3       | 61,30      | 3,69                        |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Os dados postos em gráfico facilitam a visualização do comportamento do torque elétrico aplicado à máquina *BLDC* em função da corrente elétrica *CC*, desconsiderando o torque de atrito, como visto no gráfico 4.

**Gráfico 4 - Torque elétrico aplicado ao gerador em função da corrente elétrica gerada**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Ao observar a curva de pontos geradas nota-se um comportamento não linear, que pode ser aproximado por um polinômio de segundo grau, apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 99,96%. Apesar do comportamento ter a característica de uma equação de segundo grau, esta curva não pode ser extrapolada para prever o comportamento do torque em função da corrente, pois esta depende também dos parâmetros de operação da máquina, que devem ser validados em uma eventual nova coleta de dados.

Com base nos dados coletados de velocidade  $\omega_{rpm}$  [rpm] e torque  $\tau$  [N] aplicados à máquina *BLDC*, é possível calcular a potência mecânica  $P_{mec}$  entregue ao gerador utilizando a equação 26.

$$P_{mec} = \tau \cdot \omega_{rpm} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (26)$$

Com as informações de potência mecânica fornecida à máquina *BLDC* e potência elétrica gerada, calcula-se o rendimento percentual do gerador através da equação 27.

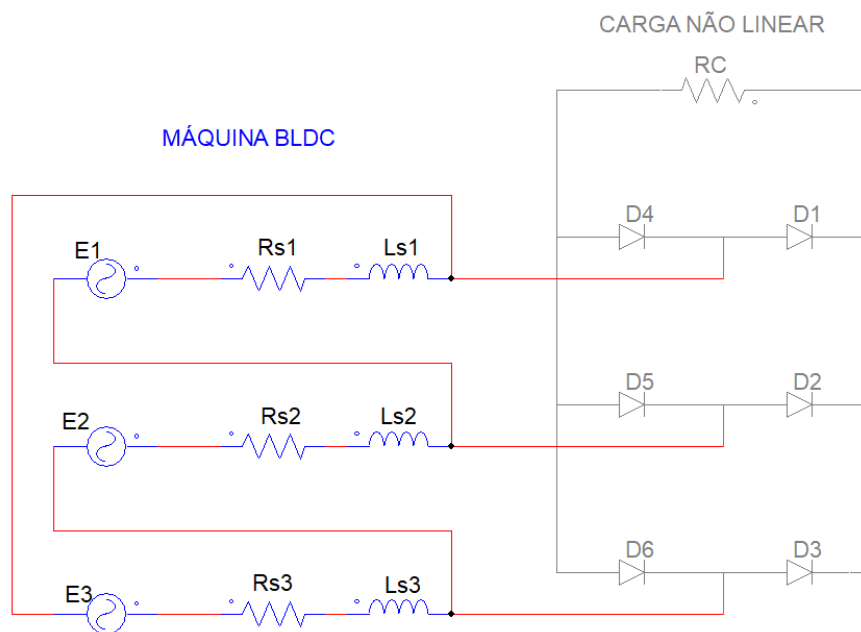
$$\eta_{\%} = \frac{P_{ele}}{P_{mec}} \cdot 100\% \quad (27)$$

Cada ponto de operação possui seu rendimento, que depende da carga aplicada e da velocidade do gerador.

## 6 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO VIA SOFTWARE PSIM

Para modelagem da máquina *BLDC*, arbitrou-se o modelo de ligação interna das bobinas em triângulo. A figura 33 apresenta o modelo simplificado da máquina. Neste caso, apenas está considerado a perda Joule nos enrolamentos do estator, enquanto as perdas no ferro e nos ímãs não são representadas.

**Figura 33 - Modelo simplificado da máquina *BLDC***

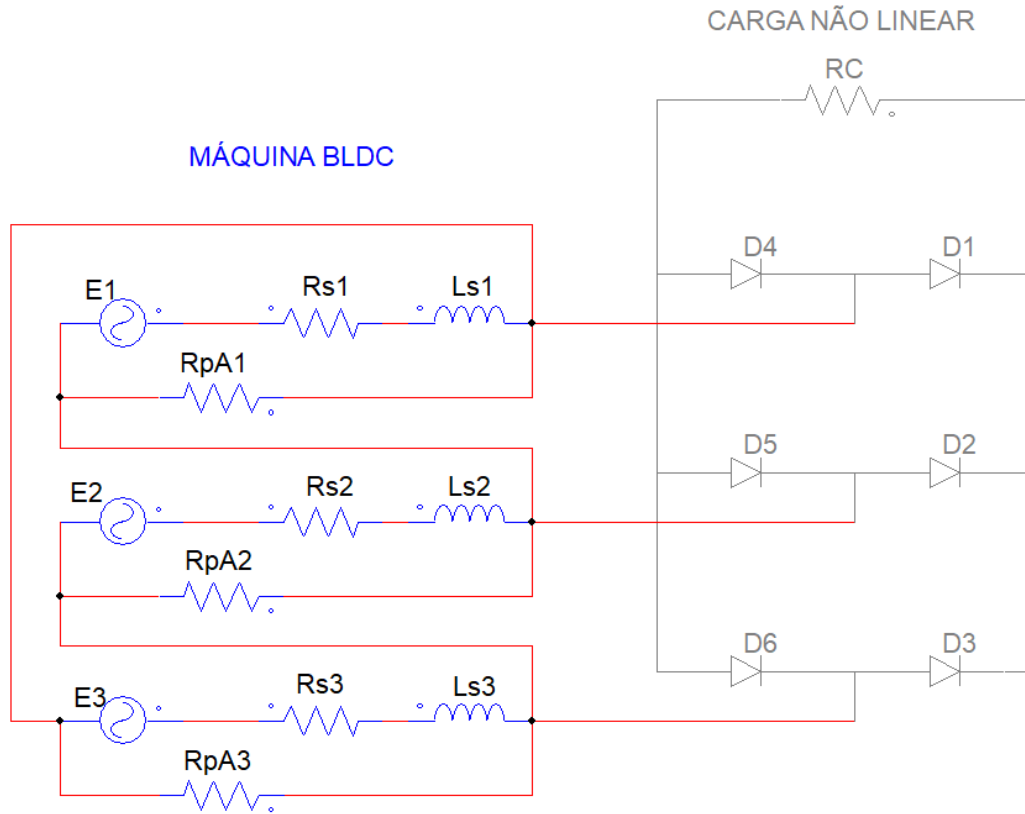


Fonte: Elaboração Própria (2023)

A fim de representar as perdas no ferro e nos ímãs, foram inseridas impedâncias no circuito que aproximem as perdas reais da máquina, denominadas  $R_{sA}$ . Ao inseri-las em série com as impedâncias características iniciais, observou-se que a máquina *BLDC* fica limitada em relação a entrega de potência em determinados regimes de operação.

Então optou-se por um modelo em que as impedâncias de perdas no aço e nos ímãs estejam em paralelo com as impedâncias iniciais, denominadas  $R_{pA}$ . A figura 34 apresenta o modelo final considerado para simulações.

**Figura 34 - Modelo final da máquina *BLDC***



Fonte: Elaboração Própria (2023)

As perdas excedentes no gerador *BLDC* são expressas pela equação 28, quando considerado um circuito retificador associado a uma carga resistiva.

$$Perda_{S_{Excedentes}} = P_{mec} - P_{ele} - Perda_{P_{retificadora}} - Perda_{Joule} - Perda_{Mec} \quad (28)$$

Na qual, a perda na ponte retificadora é representada pela equação 29, considerando  $V_d$  como a queda de tensão nos diodos Schottky empregados na ponte, obtida da ficha técnica. Como a condução ocorre sempre em pares de diodos nesta configuração, justifica o fator 2x inserido na equação.

$$Perda_{P_{retificadora}} \cong 2 \cdot I_{cc} \cdot V_d \cong 2 \cdot I_{cc} \cdot 0,3756 \cdot (I_{cc})^{0,2071} \quad (29)$$

A perda, por efeito Joule, nos enrolamentos das bobinas pode ser expressa pela equação 30.

$$Perda_{Joule} = 3 \cdot (I_{Frms})^2 \cdot R_s = 3 \cdot (I_{Frms})^2 \cdot 0,0485 \quad (30)$$

Onde a corrente de fase eficaz  $I_{Frms}$  é expressa pela equação 31.

$$I_{Frms} = \frac{I_{Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

Na qual a corrente de linha eficaz  $I_{Lrms}$  pode ser aproximada pela equação 32, em função da corrente contínua da carga resistiva (detalhado no apêndice A).

$$I_{Lrms} \cong \frac{I_{cc} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

Já as perdas mecânicas  $Perda_{mec}$  são expressas pela equação 33, onde é considerado o torque de atrito para o cálculo.

$$Perda_{mec} = \tau_{at} \cdot \omega_{rpm} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (33)$$

O torque de atrito  $\tau_{at}$  da máquina em análise é expresso pela equação 34, obtido por meio do ensaio para obtenção de parâmetros mecânicos.

$$\tau_{at} = \frac{0,0191 \cdot \omega_{rpm}}{1000} + 0,013 \quad (34)$$

Logo é possível determinar uma impedância resistiva série em função da corrente elétrica de fase, conforme equação 35.

$$R_{SA} = \frac{Perdas_{Excedentes}}{3 \cdot (I_{Frms})^2} = \frac{Perdas_{Excedentes}}{(I_{Lrms})^2} \quad (35)$$

Considerando uma faixa de operação próxima a 6000 rpm, é possível então relacionar a impedância resistiva série “ $R_{SA}$ ” com a impedância resistiva da carga  $R_C$ . Como a corrente elétrica depende da carga, é possível fazer essa relação, como visto na tabela 7.

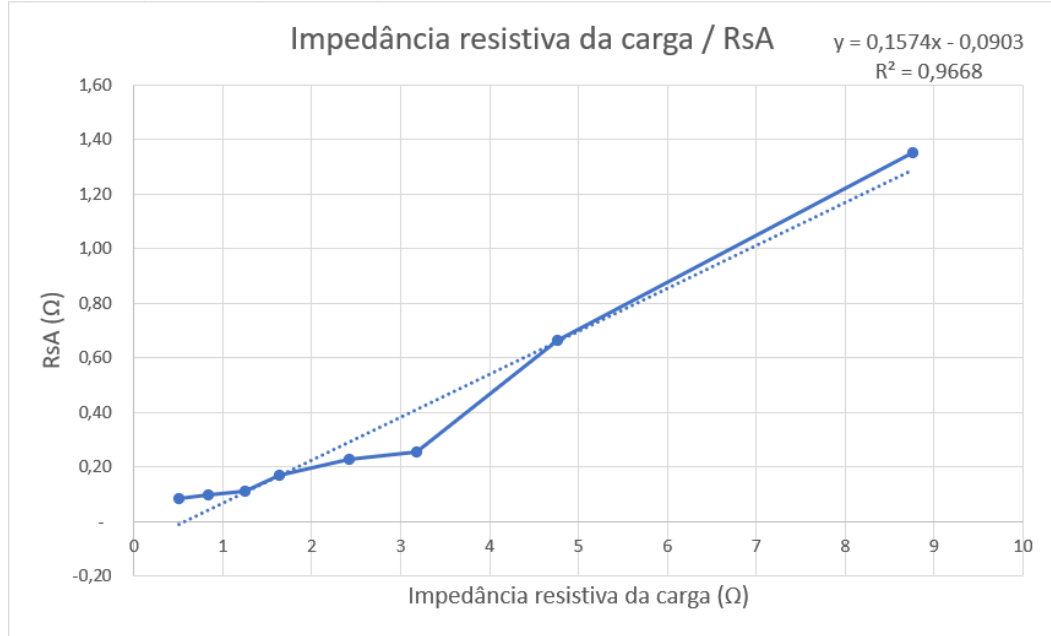
**Tabela 7 - Impedância resistiva total versus impedância resistiva de perdas excedentes “ $R_{SA}$ ”**

| Velocidade<br>rotor<br>(RPM) | Impedância<br>Resistiva<br>da carga<br>( $\Omega$ ) | $R_{SA}$<br>( $\Omega$ ) |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| 6114                         | 8,76                                                | 1,35                     |
| 6054                         | 4,76                                                | 0,66                     |
| 6091                         | 3,18                                                | 0,25                     |
| 6054                         | 2,42                                                | 0,22                     |
| 6003                         | 1,64                                                | 0,17                     |
| 5951                         | 1,24                                                | 0,11                     |
| 5837                         | 0,84                                                | 0,10                     |
| 5954                         | 0,51                                                | 0,08                     |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Nota-se um comportamento que pode ser aproximado por uma função linear, como visto no gráfico 5.

**Gráfico 5 - Impedância resistiva total versus  $R_{sA}$**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Observando o comportamento do gráfico, então, é possível aproximar a impedância  $R_{sA}$  através da equação 36 para a máquina *BLDC* em análise. Esta representação mostra-se oportuna pois evita o método iterativo para determinar a impedância de perdas excedentes.

$$R_{sA} \cong 0,157 \cdot R_c \quad (36)$$

Porém, ao acrescentar a impedância em série que representa as perdas excedentes na máquina *BLDC*, esta provoca uma limitação no fornecimento de potência à carga. Por meio da equação 37 (detalhada no apêndice B) é possível converter a impedância série para uma impedância em paralelo, denominada  $R_{pA}$ .

$$R_{pA} \cong 2,467 \cdot \frac{(R_c)^2}{R_{sA}} \cong 2,467 \cdot \frac{(R_c)^2}{0,157 \cdot (R_c)} \cong 15,71 \cdot (R_c) \quad (37)$$

Esta conversão apresentada é válida apenas para o modelo da máquina *BLDC* com bobinas conectadas em triângulo. Vale salientar que a equação representa uma aproximação das perdas excedentes em função da carga aplicada ao gerador,



desconsiderando os efeitos das impedâncias indutivas e resistivas internas da máquina, que geram distorções harmônicas.

Quanto à impedância indutiva, que representa uma limitação na entrega de potência da máquina, observou-se um comportamento variável, que depende do ponto de operação da máquina *BLDC*. A ordem de grandeza aproximada da reatância indutiva pode ser obtida por meio da expressão 38, utilizando um dos pontos de operação.

$$X_s \cong \sqrt{\left(\frac{FEM_{rms} - V_{L\,rms}}{I_{F\,rms}}\right)^2 - (R_s)^2} \quad (38)$$

Com isso, é possível obter a grandeza da indutância aproximada, utilizando a equação 39.

$$L_s \cong \frac{X_s}{(2 \cdot \pi \cdot f)} \quad (39)$$

Devido a carga aplicada no gerador *BLDC* não ser linear, existe a presença de distorções harmônicas, fazendo com que a expressão 39 não apresente um valor correto. Porém observa-se que nos pontos analisados de operação, a indutância calculada por meio da expressão 39 oscila entre 10mH e 100mH.

Com a utilização do *software PSIM*, então são inseridos os componentes e os valores calculados. Os pontos de operação escolhidos são próximos a 6000rpm, evitando variações em função da velocidade. Deste modo, para cada ponto de operação é ajustado o parâmetro de indutância da máquina, a fim de que a tensão de linha e a corrente na carga, simulados, sejam o mais próximo possível das medições realizadas.

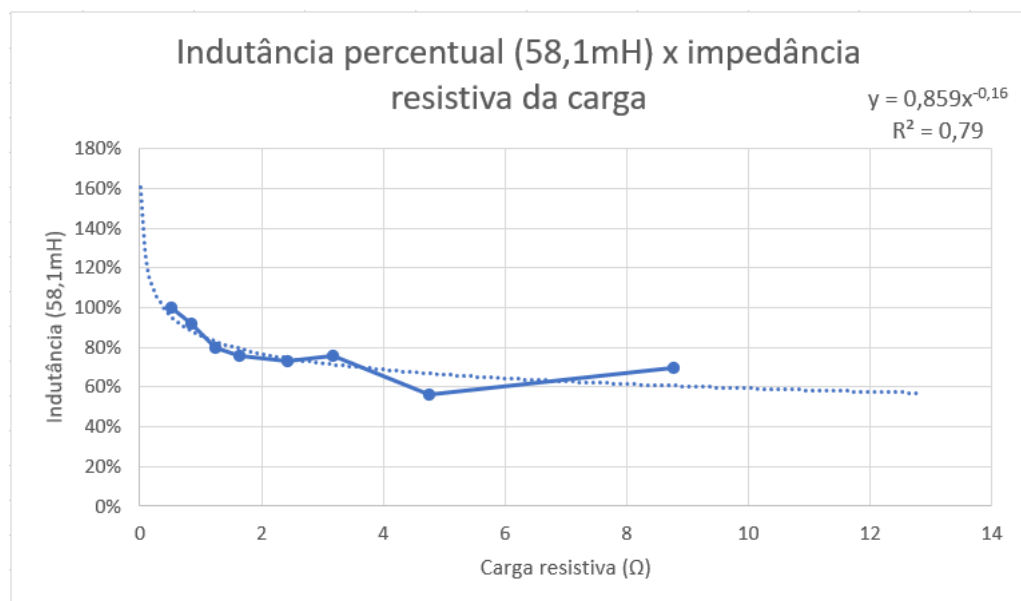
O objetivo é atingir o ponto em que o produto entre  $V_{L\,rms}$  e  $I_{cc}$  sejam iguais entre a simulação e o real. Com esse propósito, utiliza-se o método da bisseção, de cálculo numérico, para alcançar o valor da indutância para cada ponto de operação. Por conseguinte, é possível construir uma tabela contendo os valores de indutância utilizados e da carga aplicada a máquina *BLDC*, onde o maior valor de indutância encontrado é considerado como 100%, e os demais valores são postos em função do maior valor encontrado, conforme mostrado na tabela 8.

**Tabela 8 - Impedância resistiva total versus indutância**

| RPM  | impedância<br>"carga" ( $\Omega$ ) | indutância<br>(%) | indutância<br>(mH) |
|------|------------------------------------|-------------------|--------------------|
| 5954 | 0,511                              | 100%              | 58,1               |
| 5837 | 0,838                              | 92%               | 53,5               |
| 5951 | 1,245                              | 80%               | 46,4               |
| 6003 | 1,642                              | 76%               | 43,9               |
| 6054 | 2,421                              | 73%               | 42,4               |
| 6091 | 3,184                              | 76%               | 44                 |
| 6054 | 4,760                              | 56%               | 32,6               |
| 6114 | 8,763                              | 69%               | 40,3               |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Observa-se que quanto maior a impedância de carga, menor será a indutância, conforme mostrado no gráfico 6.

**Gráfico 6 - Indutância versus impedância da carga**

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Consequentemente é possível reescrever a indutância da máquina *BLDC* em função da carga utilizando a equação 40.

$$L_s = 58,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,859 \cdot (R_c)^{-0,16} \quad (40)$$

Com isto, define-se aproximadamente o valor de indutância para qualquer carga aplicada. Posto isso, então são inseridos dentro do *software* de simulação *PSIM* e avaliado todos os pontos de operação, conforme mostrado na tabela 9.

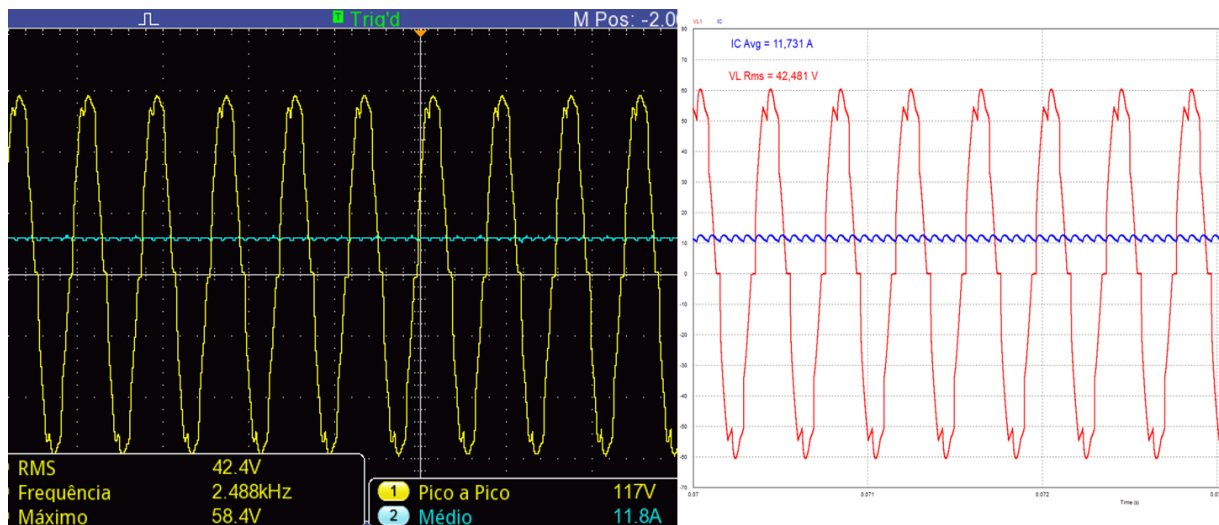
Tabela 9 - Tensão de linha versus corrente de carga - (real versus simulado)

| Icc Real (A) | Icc Simulação versus Real (%) | VL rms Real (V) | VL rms Simulação versus Real (%) | VL Pico Real (V) | VL Pico Simulação versus Real (%) | Velocidade (RPM) | Carga ( $\Omega$ ) |
|--------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|
| 0,82         | 2,18%                         | 6,51            | 2,12%                            | 9,3              | 1,22%                             | 1060             | 9,860              |
| 1,57         | 1,40%                         | 6,50            | 1,43%                            | 9,1              | 2,56%                             | 1054             | 5,039              |
| 1,68         | 0,95%                         | 12,60           | 1,67%                            | 18,0             | 0,78%                             | 2078             | 9,663              |
| 2,32         | 1,29%                         | 6,46            | 2,04%                            | 9,1              | 2,43%                             | 1056             | 3,373              |
| 3,06         | 1,08%                         | 6,42            | 1,78%                            | 9,1              | 1,73%                             | 1052             | 2,520              |
| 3,23         | 1,08%                         | 12,50           | 2,10%                            | 17,8             | 1,57%                             | 2078             | 4,943              |
| 3,49         | -0,49%                        | 25,40           | 0,54%                            | 35,6             | 1,49%                             | 4177             | 9,562              |
| 4,49         | 0,69%                         | 6,36            | 1,98%                            | 8,9              | 3,16%                             | 1050             | 1,684              |
| 4,79         | 0,96%                         | 12,40           | 2,22%                            | 17,6             | 1,94%                             | 2070             | 3,277              |
| 5,57         | -0,59%                        | 36,80           | 1,13%                            | 51,5             | 2,32%                             | 6114             | 8,763              |
| 5,85         | 0,12%                         | 6,28            | 2,32%                            | 8,9              | 1,76%                             | 1043             | 1,266              |
| 6,24         | 0,46%                         | 12,30           | 2,49%                            | 17,6             | 1,17%                             | 2063             | 2,488              |
| 6,31         | -0,90%                        | 43,20           | 0,12%                            | 60,0             | 2,01%                             | 7109             | 9,022              |
| 6,75         | -1,07%                        | 25,20           | 0,17%                            | 35,2             | 1,52%                             | 4151             | 4,850              |
| 9,14         | -0,20%                        | 12,30           | 0,71%                            | 17,2             | 1,76%                             | 2055             | 1,661              |
| 9,96         | -0,42%                        | 25,00           | 0,87%                            | 34,8             | 2,27%                             | 4177             | 3,223              |
| 10,00        | -1,29%                        | 36,30           | 0,72%                            | 50,0             | 3,40%                             | 6054             | 4,760              |
| 11,80        | -0,58%                        | 42,40           | 1,04%                            | 58,5             | 3,12%                             | 7109             | 4,681              |
| 11,90        | 0,13%                         | 12,10           | 1,49%                            | 16,8             | 1,93%                             | 2051             | 1,238              |
| 12,80        | -0,23%                        | 24,70           | 1,34%                            | 34,0             | 3,08%                             | 4177             | 2,458              |
| 14,60        | -0,86%                        | 35,90           | 1,35%                            | 49,6             | 2,52%                             | 6091             | 3,184              |
| 16,70        | -0,44%                        | 11,80           | 0,80%                            | 16,2             | 0,19%                             | 2031             | 0,840              |
| 16,70        | -0,89%                        | 41,70           | 1,00%                            | 57,0             | 2,43%                             | 7069             | 3,212              |
| 18,30        | -1,20%                        | 24,20           | 0,61%                            | 32,8             | 1,50%                             | 4129             | 1,654              |
| 18,70        | -1,26%                        | 35,40           | 1,12%                            | 48,0             | 2,42%                             | 6054             | 2,421              |
| 21,30        | -1,08%                        | 41,00           | 0,96%                            | 55,0             | 2,34%                             | 7043             | 2,447              |
| 23,50        | -0,67%                        | 23,70           | 1,24%                            | 31,6             | 1,10%                             | 4151             | 1,241              |
| 25,60        | -0,73%                        | 11,10           | 2,38%                            | 15,0             | -1,83%                            | 2026             | 0,504              |
| 26,20        | -1,68%                        | 34,30           | 1,08%                            | 45,6             | 0,66%                             | 6003             | 1,642              |
| 29,80        | -1,35%                        | 39,50           | 0,75%                            | 52,0             | -0,04%                            | 6969             | 1,648              |
| 32,90        | -1,84%                        | 22,50           | 1,35%                            | 30,0             | -1,94%                            | 4106             | 0,832              |
| 32,90        | -1,84%                        | 33,00           | 1,28%                            | 43,6             | -0,82%                            | 5951             | 1,245              |
| 36,90        | -0,91%                        | 37,30           | 1,65%                            | 49,6             | -1,46%                            | 6843             | 1,245              |
| 44,00        | -0,47%                        | 30,40           | 1,82%                            | 40,0             | -0,34%                            | 5837             | 0,838              |
| 46,80        | -1,27%                        | 20,30           | 0,49%                            | 26,8             | -2,08%                            | 3994             | 0,511              |
| 47,10        | 0,30%                         | 32,90           | 1,68%                            | 43,2             | -0,19%                            | 6409             | 0,842              |
| 57,70        | 0,53%                         | 25,00           | 1,87%                            | 33,2             | -1,52%                            | 5354             | 0,512              |
| 61,30        | 2,03%                         | 26,80           | 1,72%                            | 35,6             | -1,45%                            | 5954             | 0,511              |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

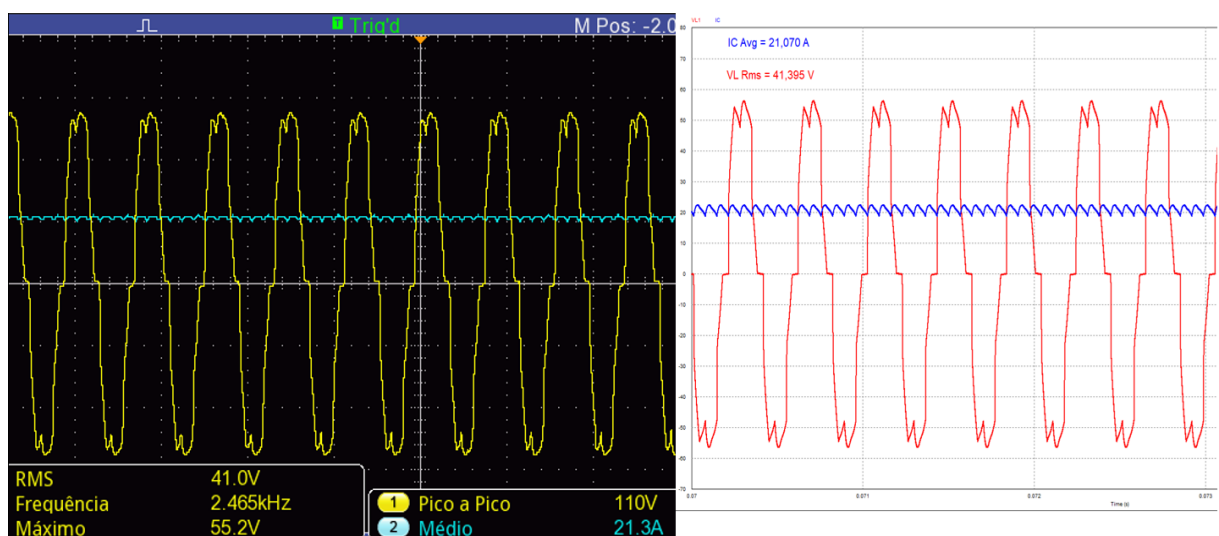
Os valores acima expostos apresentam uma boa aproximação em relação ao real. As figuras 35, 36, 37 e 38 apresentam o comportamento da tensão de linha  $V_{ab}$  e a corrente CC fornecida para as cargas nominais de  $5,0\Omega$ ,  $2,5\Omega$ ,  $1,25\Omega$  e  $0,5\Omega$  respectivamente, nos ensaios realizados em comparação com a simulação utilizando o software PSIM.

**Figura 35 - Tensão  $V_{ab}$  nos terminais gerador do BLDC a 7109 rpm com carga resistiva de  $5\Omega$  (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) – Ensaio Real versus Simulação PSIM**



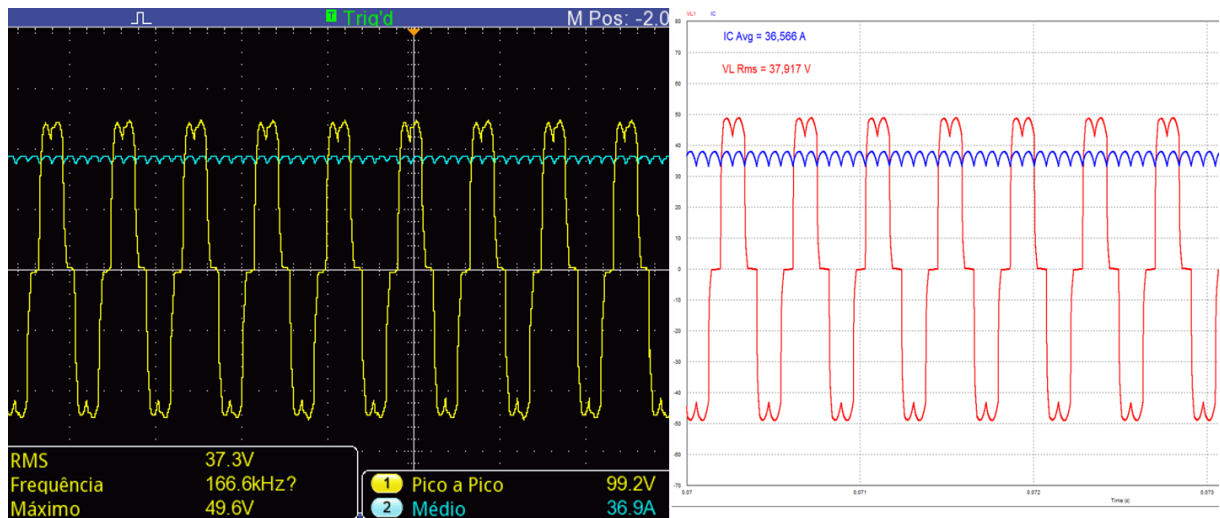
Fonte: Elaboração Própria (2023)

**Figura 36 - Tensão  $V_{ab}$  nos terminais do gerador BLDC a 7043 rpm com carga resistiva de  $2,5\Omega$  (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) - Ensaio Real versus Simulação PSIM**



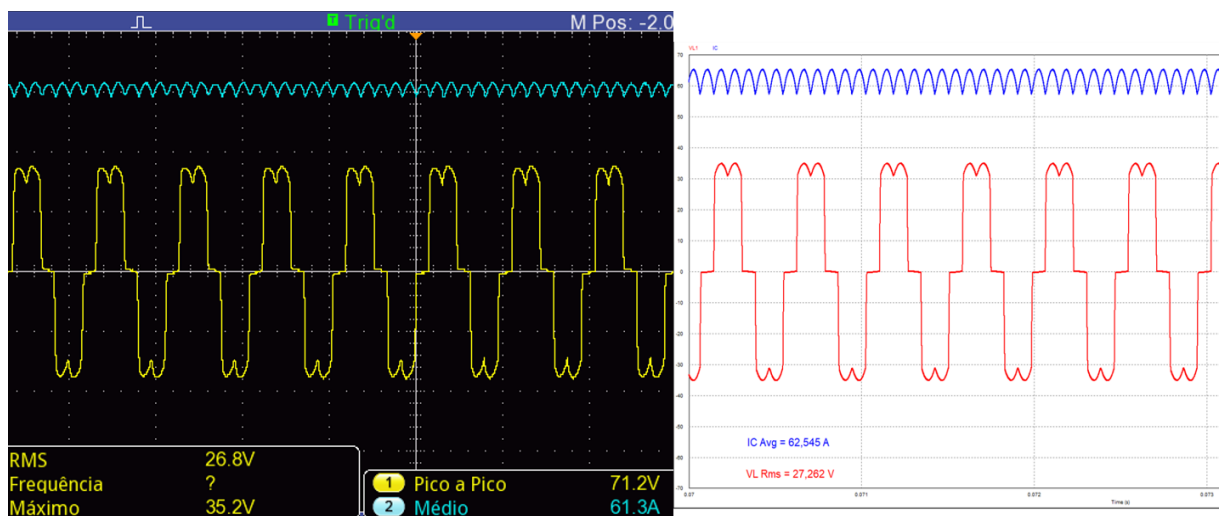
Fonte: Elaboração Própria (2023)

**Figura 37 - Tensão Vab nos terminais do gerador BLDC a 6843 rpm com carga resistiva de 1,25  $\Omega$  (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) - Ensaio Real versus Simulação PSIM**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

**Figura 38 - Tensão Vab nos terminais do gerador BLDC a 5954 rpm com carga resistiva de 0,50  $\Omega$  (vermelho) e, a corrente CC fornecida à carga resistiva (azul) - Ensaio Real versus Simulação PSIM**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Nota-se que a simulação apresentou resultados muito próximos aos valores reais medidos. A tabela 10 apresenta o comparativo da potência de entrada e potência de saída entre os dados de ensaio e simulados via *software*.

Tabela 10 - Rendimento da máquina real versus simulação no *software* PSIM

| Icc Real (A) | Pot. entrada Real (W) | Pot. entrada Simulação versus Real (%) | Pot. saída Real (W) | Pot. saída Simulação versus Real (%) | $\eta$ % Real | $\eta$ % Simulação | Velocidade (RPM) | Carga ( $\Omega$ ) |
|--------------|-----------------------|----------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 0,82         | 10,7                  | 10,68%                                 | 6,5                 | 4,66%                                | 61,4%         | 58,1%              | 1060             | 9,860              |
| 1,57         | 17,6                  | 8,52%                                  | 12,4                | 3,06%                                | 70,6%         | 67,0%              | 1054             | 5,039              |
| 1,68         | 43,8                  | -4,12%                                 | 27,3                | 2,20%                                | 62,3%         | 66,4%              | 2078             | 9,663              |
| 2,32         | 24,7                  | 7,39%                                  | 18,2                | 2,86%                                | 73,6%         | 70,5%              | 1056             | 3,373              |
| 3,06         | 30,4                  | 10,10%                                 | 23,6                | 2,51%                                | 77,5%         | 72,2%              | 1052             | 2,520              |
| 3,23         | 69,1                  | 3,19%                                  | 51,6                | 2,48%                                | 74,7%         | 74,1%              | 2078             | 4,943              |
| 3,49         | 170,8                 | -5,23%                                 | 116,5               | -0,66%                               | 68,2%         | 71,5%              | 4177             | 9,562              |
| 4,49         | 43,3                  | 8,61%                                  | 33,9                | 1,78%                                | 78,4%         | 73,5%              | 1050             | 1,684              |
| 4,79         | 96,4                  | 3,65%                                  | 75,2                | 2,29%                                | 78,0%         | 77,0%              | 2070             | 3,277              |
| 5,57         | 364,6                 | -0,28%                                 | 271,9               | -0,85%                               | 74,6%         | 74,1%              | 6114             | 8,763              |
| 5,85         | 55,9                  | 5,90%                                  | 43,3                | 0,60%                                | 77,6%         | 73,7%              | 1043             | 1,266              |
| 6,24         | 121,3                 | 3,47%                                  | 96,9                | 1,28%                                | 79,9%         | 78,2%              | 2063             | 2,488              |
| 6,31         | 494,3                 | -3,60%                                 | 359,2               | -1,48%                               | 72,7%         | 74,3%              | 7109             | 9,022              |
| 6,75         | 280,0                 | -0,92%                                 | 221,0               | -1,77%                               | 78,9%         | 78,2%              | 4151             | 4,850              |
| 9,14         | 167,0                 | 5,12%                                  | 138,8               | -0,05%                               | 83,1%         | 79,0%              | 2055             | 1,661              |
| 9,96         | 383,9                 | 2,87%                                  | 319,7               | -0,48%                               | 83,3%         | 80,6%              | 4177             | 3,223              |
| 10,00        | 588,8                 | -0,64%                                 | 476,0               | -2,21%                               | 80,8%         | 79,6%              | 6054             | 4,760              |
| 11,80        | 801,2                 | 0,82%                                  | 651,8               | -0,82%                               | 81,4%         | 80,0%              | 7109             | 4,681              |
| 11,90        | 212,8                 | 4,80%                                  | 175,4               | 0,54%                                | 82,4%         | 79,0%              | 2051             | 1,238              |
| 12,80        | 481,6                 | 2,51%                                  | 402,6               | -0,10%                               | 83,6%         | 81,5%              | 4177             | 2,458              |
| 14,60        | 795,6                 | 3,09%                                  | 678,8               | -1,41%                               | 85,3%         | 81,6%              | 6091             | 3,184              |
| 16,70        | 289,5                 | 2,67%                                  | 234,4               | -0,68%                               | 80,9%         | 78,3%              | 2031             | 0,840              |
| 16,70        | 1063,7                | 1,41%                                  | 895,7               | -1,47%                               | 84,2%         | 81,8%              | 7069             | 3,212              |
| 18,30        | 652,0                 | 1,44%                                  | 553,9               | -2,12%                               | 85,0%         | 82,0%              | 4129             | 1,654              |
| 18,70        | 986,5                 | 1,86%                                  | 846,6               | -2,25%                               | 85,8%         | 82,4%              | 6054             | 2,421              |
| 21,30        | 1303,4                | 1,21%                                  | 1110,3              | -1,93%                               | 85,2%         | 82,5%              | 7043             | 2,447              |
| 23,50        | 810,5                 | 2,10%                                  | 685,5               | -1,17%                               | 84,6%         | 81,9%              | 4151             | 1,241              |
| 25,60        | 423,4                 | 0,94%                                  | 330,5               | -1,39%                               | 78,1%         | 76,3%              | 2026             | 0,504              |
| 26,20        | 1308,4                | 0,84%                                  | 1127,2              | -3,17%                               | 86,2%         | 82,7%              | 6003             | 1,642              |
| 29,80        | 1689,2                | 1,85%                                  | 1463,1              | -2,51%                               | 86,6%         | 82,9%              | 6969             | 1,648              |
| 32,90        | 1056,1                | 1,44%                                  | 900,1               | -3,46%                               | 85,2%         | 81,1%              | 4106             | 0,832              |
| 32,90        | 1553,9                | 1,30%                                  | 1347,5              | -3,50%                               | 86,7%         | 82,6%              | 5951             | 1,245              |
| 36,90        | 1962,0                | 2,57%                                  | 1695,1              | -1,66%                               | 86,4%         | 82,8%              | 6843             | 1,245              |
| 44,00        | 1907,4                | 2,85%                                  | 1622,7              | -0,81%                               | 85,1%         | 82,1%              | 5837             | 0,838              |
| 46,80        | 1375,2                | -0,04%                                 | 1120,2              | -2,46%                               | 81,5%         | 79,5%              | 3994             | 0,511              |
| 47,10        | 2194,6                | 4,27%                                  | 1867,1              | 0,78%                                | 85,1%         | 82,2%              | 6409             | 0,842              |
| 57,70        | 2092,7                | 2,77%                                  | 1705,3              | 1,18%                                | 81,5%         | 80,2%              | 5354             | 0,512              |
| 61,30        | 2361,0                | 5,46%                                  | 1920,3              | 4,26%                                | 81,3%         | 80,4%              | 5954             | 0,511              |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Comparando os resultados medidos e simulados, observa-se que os valores de potência de entrada estão bem próximos, representando uma diferença de no máximo 6% para velocidade acima de 2000 rpm, que este autor considera um resultado satisfatório para o modelo proposto.

A utilização de instrumentos mais precisos, nas medições de tensão da carga e medições de torque mecânico, pode trazer um refinamento ainda melhor do modelo apresentado.

## 7 COMPARATIVO DADOS OBTIDOS X FABRICANTE

Na ficha técnica do fabricante do motor *BLDC* é possível encontrar alguns dados de operação do motor. Como a máquina foi projetada para operar como motor elétrico a ser utilizado em drones, os testes foram realizados acoplando uma hélice ao eixo do motor (carga mecânica), e assim foram extraídos os dados de torque, rotação, potência elétrica, corrente CC e tensão de alimentação CC.

Assim, as tabelas 11 e 12 apresentam os testes realizados pelo fabricante para tensões de alimentação aproximadas de 49 V e 43 V respectivamente.

**Tabela 11 - Teste de desempenho para tensão de alimentação de 49 V**

| Type         | Propeller | Throttle | Voltage (V) | Thrust (g) | Torque (N*m) | Current (A) | RPM  | Power (W) | Efficiency (g/W) | Operating Temperature (°C) |
|--------------|-----------|----------|-------------|------------|--------------|-------------|------|-----------|------------------|----------------------------|
| MN1010-KV135 | G32*11    | 40%      | 49.20       | 4943       | 1.82         | 10.57       | 2131 | 520       | 9.50             | HOT                        |
|              |           | 45%      | 49.13       | 6341       | 2.31         | 14.70       | 2403 | 722       | 8.78             |                            |
|              |           | 50%      | 49.02       | 7790       | 2.83         | 19.80       | 2661 | 971       | 8.03             |                            |
|              |           | 55%      | 48.92       | 9233       | 3.35         | 25.42       | 2896 | 1243      | 7.43             |                            |
|              |           | 60%      | 48.82       | 10611      | 3.85         | 31.43       | 3107 | 1534      | 6.92             |                            |
|              |           | 65%      | 48.71       | 12084      | 4.38         | 38.25       | 3310 | 1863      | 6.49             |                            |
|              |           | 70%      | 48.56       | 13711      | 4.94         | 46.51       | 3506 | 2259      | 6.07             |                            |
|              |           | 75%      | 48.40       | 15359      | 5.56         | 56.22       | 3702 | 2721      | 5.65             |                            |
|              |           | 80%      | 48.22       | 16992      | 6.14         | 65.75       | 3883 | 3170      | 5.36             |                            |
|              |           | 90%      | 47.79       | 20218      | 7.36         | 90.39       | 4238 | 4320      | 4.68             |                            |
|              |           | 100%     | 47.56       | 21561      | 7.85         | 103.67      | 4372 | 4930      | 4.37             |                            |

Fonte: TMOTOR (2023)

**Tabela 12 - Teste de desempenho para tensão de alimentação de 43 V**

| Type         | Propeller | Throttle | Voltage (V) | Thrust (g) | Torque (N*m) | Current (A) | RPM  | Power (W) | Efficiency (g/W) | Operating Temperature (°C) |
|--------------|-----------|----------|-------------|------------|--------------|-------------|------|-----------|------------------|----------------------------|
| MN1010-KV135 | G32*11    | 40%      | 43.79       | 3708       | 1.40         | 8.27        | 1893 | 362       | 10.24            | HOT                        |
|              |           | 45%      | 43.66       | 4744       | 1.76         | 11.34       | 2114 | 495       | 9.58             |                            |
|              |           | 50%      | 43.55       | 5986       | 2.19         | 15.39       | 2346 | 670       | 8.93             |                            |
|              |           | 55%      | 43.42       | 7207       | 2.64         | 20.10       | 2568 | 873       | 8.26             |                            |
|              |           | 60%      | 43.30       | 8433       | 3.08         | 25.20       | 2763 | 1091      | 7.73             |                            |
|              |           | 65%      | 43.15       | 9608       | 3.51         | 30.73       | 2953 | 1326      | 7.24             |                            |
|              |           | 70%      | 43.00       | 10738      | 3.92         | 36.57       | 3126 | 1573      | 6.83             |                            |
|              |           | 75%      | 42.84       | 12023      | 4.39         | 43.58       | 3315 | 1867      | 6.44             |                            |
|              |           | 80%      | 42.64       | 13308      | 4.86         | 51.29       | 3490 | 2187      | 6.08             |                            |
|              |           | 90%      | 42.03       | 15897      | 5.81         | 69.29       | 3806 | 2912      | 5.46             |                            |
|              |           | 100%     | 41.86       | 17155      | 6.29         | 78.42       | 3943 | 3283      | 5.23             |                            |

Fonte: TMOTOR (2023)



Ao analisar a tabela 11, nota-se o ponto de potência máxima de entrada como sendo 4930 W. Porém esta informação revela a potência elétrica consumida pelo motor *BLDC* e seu controlador eletrônico de velocidade. Sua potência mecânica pode ser obtida através da equação 26, utilizando as informações de velocidade e torque. Fazendo este cálculo obtém-se o valor de potência mecânica de 3594 W, representando uma eficiência energética de 73% do sistema.

Neste sentido, espera-se que o processo inverso seja similar, isto é, ao receber uma potência mecânica de 4930 W quando operando como gerador, espera-se como valor de geração elétrica algo próximo de 3594 W. Colocando como fator limitante o ponto de potência de saída máxima de 3594 W e a tensão terminal de 50 V, representando o banco de baterias, nota-se uma impedância característica da carga de 0,696  $\Omega$ .

Então foram simulados considerando cinco pontos de operação, de 20% em 20% até que atinja os 100% da potência desejada, ou aproximadamente 3600 W. A tabela 13 apresenta os valores alcançados.

**Tabela 13 - Simulação no software PSIM para tensão de saída CC de 50 V**

| Veloc.<br>(RPM) | Carga<br>( $\Omega$ ) | Icc<br>(A) | Pot.<br>Entrada<br>(W) | Pot.<br>Saída<br>(W) | $\eta$ % | Perdas<br>Mec.<br>(W) | Perdas<br>Exced.<br>(W) | Perdas<br>Joule (W) | Perdas<br>na Ponte<br>Retific.<br>(W) |
|-----------------|-----------------------|------------|------------------------|----------------------|----------|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| 6585            | 3,478                 | 14,4       | 886,1                  | 721,3                | 81,4%    | 72,2                  | 66,5                    | 7,5                 | 18,2                                  |
| 7153            | 1,739                 | 28,8       | 1736,4                 | 1439,8               | 82,9%    | 84,0                  | 141,7                   | 28,8                | 42,0                                  |
| 7731            | 1,159                 | 43,1       | 2603,0                 | 2158,8               | 82,9%    | 96,8                  | 217,2                   | 62,5                | 66,5                                  |
| 8434            | 0,870                 | 57,5       | 3486,1                 | 2880,9               | 82,6%    | 113,7                 | 288,8                   | 108,5               | 93,2                                  |
| 9627            | 0,696                 | 71,9       | 4393,2                 | 3601,9               | 82,0%    | 145,4                 | 356,2                   | 166,6               | 122,9                                 |

Fonte: Elaboração Própria (2023)

Considerando o modelo proposto, observa-se que no pico de potência do gerador *BLDC* sua velocidade é de aproximadamente 9630 rpm e, possui um rendimento de 82%, apresentando uma eficiência maior que quando operado como motor elétrico.

Devido a limitação mecânica do sistema da máquina primária, não foi possível atingir a potência máxima nos ensaios, pois a velocidade mecânica excede a velocidade nominal para qual foi projetada, quando em potências maiores que 1900 W de saída do gerador *BLDC*.

## 8 CONCLUSÕES

A máquina *BLDC* possui características ideais para ser aplicada em sistemas híbridos, pois além de possuir um alto rendimento e dimensões reduzidas, seu baixo peso favorece na eficiência do sistema. Outrossim, este tipo de máquina, quando aplicado em sistemas híbridos corretamente dimensionados, apresentam um comportamento estável, ou seja, o pico de corrente elétrica não será maior que a capacidade da máquina *BLDC*, e sua tensão de operação não excederá a tensão especificada, operando sempre em níveis aceitáveis.

A utilização da máquina *BLDC* como gerador elétrico apresenta um rendimento muito interessante, porém, para a entrega de potência elétrica atingir especificações próximas às originais como motor elétrico, a velocidade mecânica de operação como gerador ficarão próximas ao dobro da velocidade como motor. Esta consideração é importante, pois é necessário identificar se as características construtivas da máquina suportam tais regimes de velocidade.

Nos ensaios realizados foram atingidas potências de até 50% da capacidade nominal da máquina *BLDC*, potências estas que não validam na totalidade o modelo proposto em operações superiores a esta. Todavia, é importante ressaltar a boa aproximação alcançada com o modelo proposto comparado aos ensaios realizados. Assim considera-se plausível a aplicação do método apresentado em comparação ao circuito simplificado, composto por três conjuntos conectados em estrela, formados por uma fonte de tensão, um resistor e um indutor ligados em série.

O modelo simplificado de parâmetros fixos consegue representar apenas um ponto de operação, o que não reproduz o comportamento real da máquina. Ou seja, quando considerado parâmetros fixos no modelo matemático, não é possível representar as perdas e a entrega de potência de forma adequada, nos diversos regimes de operação da máquina.

Nota-se, nos ensaios realizados, que existem outros fatores que alteram o comportamento da máquina, variando as perdas e limitando a entrega de potência do gerador. A adição de uma resistência em paralelo a cada um dos três conjuntos série, aproxima os efeitos das perdas internas existentes na máquina, que não são supridas pelas resistências internas medidas nos ensaios.

Este efeito de perdas excedentes não pode ser adicionado como uma resistência série, pois limita em excesso a entrega de potência em operações de baixas cargas. Quando em altas cargas, a resistência série que representa as perdas excedentes, não é o suficiente para limitar a entrega de potência da máquina *BLDC*, sendo necessário adicionar outro fator limitante.

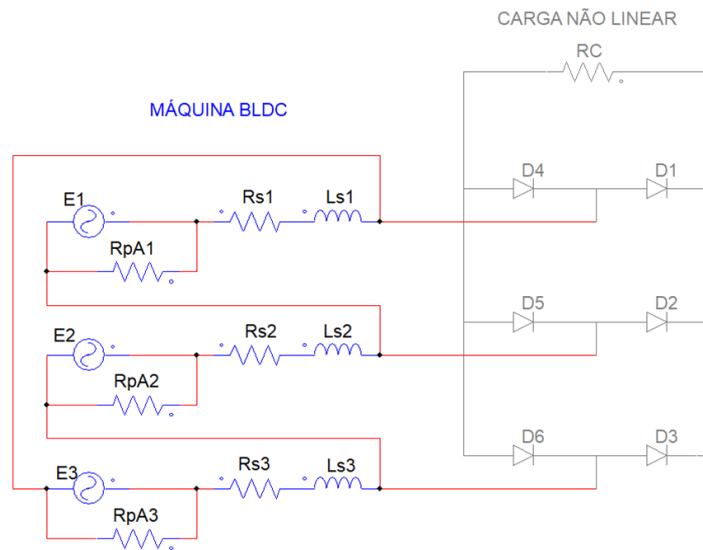
Para limitar a entrega de potência da máquina de maneira eficiente, é necessário determinar a indutância como um parâmetro variável, onde torná-la dependente da carga elétrica aplicada é um método interessante e que se apresentou razoavelmente eficaz nos pontos avaliados.

Alguns dos instrumentos de medições utilizados podem ser alterados para atingir uma maior precisão nos resultados alcançados. Além disso, é interessante mensurar as correntes reais de linha e as tensões de linha da máquina *BLDC*, utilizando um segundo osciloscópio, em que será possível identificar as distorções e a defasagem entre os parâmetros. Também, é importante refinar o método de análise do torque mecânico, pois há grande impacto nos resultados relacionados à estratégia de cálculo das perdas.

## **8.1 Sugestões de trabalhos futuros**

Para um maior campo de visão, sugere-se realizar o ensaio de carga até a capacidade nominal da máquina *BLDC*. Além disso, é possível realizar algumas mudanças sutis que impactam nos resultados das perdas, apenas ajustando a posição da resistência paralelo em relação aos demais componentes, como exemplos mostrados nas figuras 39, em que a impedância está ligada em paralelo direto à fonte.

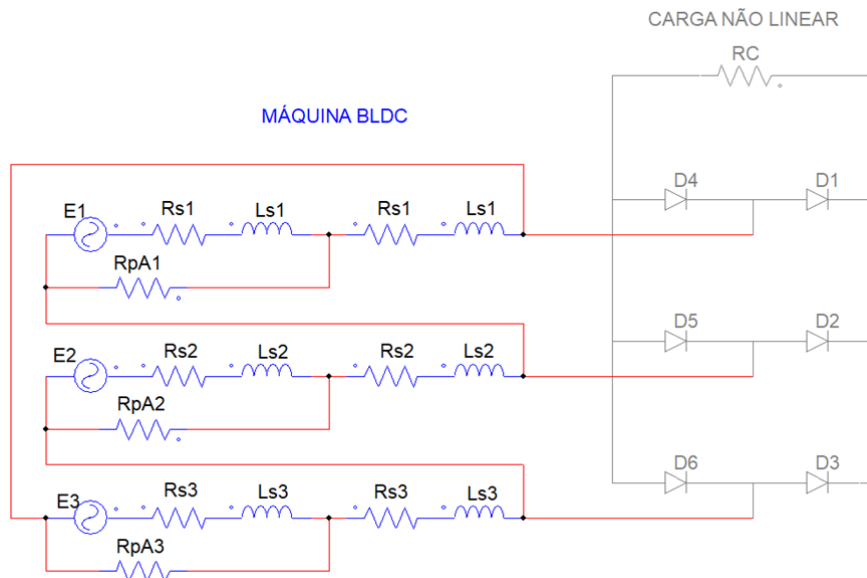
**Figura 39 - Configuração proposta para análises futuras - Resistor em paralelo com a fonte**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Este tipo de configuração proporciona uma perda maior em relação à velocidade mecânica da máquina. Quanto maior a velocidade, maior será a perda. Outra configuração possível é apresentada na figura 40, em que o resistor é inserido em paralelo entre a fonte de tensão e a metade das impedâncias série do sistema.

**Figura 40 - Configuração proposta para análises futuras - Resistor em paralelo com a fonte e metade das impedâncias série**



Fonte: Elaboração Própria (2023)

Nesta configuração os cálculos das impedâncias série “ $R_s$ ” e “ $L_s$ ” devem ser divididos por dois, pois serão inseridos duplicados ao sistema. Esta é uma

configuração intermediária entre a apresentada no decorrer do trabalho e a proposta para análise. Logo existirá um pequeno aumento nas perdas excedentes.

Ainda o estudo realizado apresentou um método para modelagem de um motor *BLDC* operando como um gerador elétrico de corrente contínua, em que neste foi utilizado uma ponte retificadora de onda completa, composta de seis diodos, para realizar a retificação da tensão alternada trifásica. Porém este tipo de configuração gera muita distorção harmônica, podendo impactar nos resultados obtidos.

Sugere-se então realizar o ensaio utilizando cargas trifásicas simétricas, em que será possível determinar com maior exatidão os efeitos das impedâncias internas da máquina *BLDC*.

## REFERÊNCIAS

- 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**. Orientador: Mauricio V. Ferreira da Luz, Dr. 2019. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, 2019.
- CUNHA, Vitor Heitor Cardoso. **Motores elétricos sem escovas com ímãs permanentes: Modelagem, simulação e análise**. Orientador: Mauro Speranza Neto. 2018. 57 p. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.
- FONSECA, Fábio P. O.; MAYA, Diego M. Y.; SARMIENTO, Angie L. E. Projeto Preliminar de Multirrotor Híbrido Pulverizador. **XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, Madrid, España, p. 1-8, 2022. Disponível em: <http://e-spacio.uned.es/fez/view/bibliuned:congresoCIBIM-2022UPMEspana-Fpofonseca>. Acesso em: 29 set. 2023.
- GONELLA, MÁRIO CELSO. **Acionamento e Controle Sensorless para Motores Brushless DC Aplicados a Compressores Herméticos para Refrigeração Doméstica**. Orientador: Prof. Dr. Manoel Luís de Aguiar. 2006. 120 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo EESC/USP, São Carlos, 2006.
- HAGEMAN, Mitchell D.; MCLAUGHLIN, Thomas E. Considerations for Pairing the IC Engine and Electric Motor in a Hybrid Power System for Small UAVs. **AIAA SciTech Forum**, Department of Aeronautics, US Air Force Academy, Colorado, 80840, ano 2018, p. 1-13, 7 jan. 2018. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.2018-2132>. Acesso em: 13 mar. 2023.
- HBK. **Como uma célula de carga trabalha?**. 2023. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>. Acesso em: 2023-10-22
- HENDERSHOT JUNIOR, J.R.; MILLER, T.J.E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors**. First Edition. New York: Oxford University Press, 1994.
- JULIANI, ALINE DURRER PATELLI. **Análise do Campo Magnético de um Motor de Ímã Permanente no Rotor Utilizando o Método dos Elementos Finitos**. Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga. 2007. 115 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo EESC/USP, São Carlos, 2007.
- KOMATSU, Wilson; JUNIOR, Lourenço Matakas; KAISER, Walter. **PEA-3487 Eletrônica de Potência I: NOTAS DE AULA**. Ano 2017, v. 1.12 - 1º semestre/2017, p. 1-156, 2017. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2708167/mod\\_resource/content/1/Apostila%20de%20Eletr%C3%B4nica%20de%20Pot%C3%Aancia%20vers%C3%A3o%20112\\_06mar%C3%A7o2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2708167/mod_resource/content/1/Apostila%20de%20Eletr%C3%B4nica%20de%20Pot%C3%Aancia%20vers%C3%A3o%20112_06mar%C3%A7o2017.pdf). Acesso em: 11 dez. 2023.

MINIPA. **Multímetros Digitais ET-1002**. 2023. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/multímetros/multímetros-digitais/8-et-1002>. Acesso em: 2023-10-22

PINTO, THIAGO DE ANDRADE. **INSPEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO EM LOCAIS DE DIFÍCIL ACESSO: UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO TERRESTRE E AÉREO POR MEIO DE VANT**. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues. 2022. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), CURITIBA, 2022.

PRADO, RENATO DE ALMEIDA. **Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Máquinas Brushless DC**. Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga. 2016. 131 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SCHMITZ, Claudio. **PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE MOTORES BLDC DE ÍMÃS PERMANENTES SUPERFICIAIS**. Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr. 2017. 151 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2017.

TEIXEIRA, FERNANDO HENRIQUE PISANI. **Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquina síncrona de ímã permanente - MSIP**. Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga. 2006. 142 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo EESC/USP, São Carlos, 2006.

TEKTRONIX. **Digital Storage Oscilloscopes TBS1000B Series Datasheet**. 2023. Disponível em: <https://download.tek.com/datasheet/TBS1000B-Series-Oscilloscope-Datasheet-3GW300046.pdf>. Acesso em: 2023-10-22

TMOTOR. **TMOTOR Aircraft Engine Brushless Motor MN1010**. 2023. Disponível em: <https://shop.tmotor.com/products/mn1010-brushless-multirotor-motor>. Acesso em: 2023-10-22.

TRINDADE, Rafael Henrique. **ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS NÃO-CONVENCIONAIS: Motor Brushless DC**. Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga. 2009. 30 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo EESC/USP, São Carlos, 2009.

TRISTÃO, Luan Gabriel de Oliveira; BARBOSA, Roney Souza. **MOTOR BRUSHLESS DC: ANÁLISE TEÓRICA E PROJETO DE CONTROLADOR ELETRÔNICO SEM A UTILIZAÇÃO DE SENSORES**. Orientador: Prof. Me. Marlon Lucas Gomes Salmento. 2018. 95 p. Monografia (Engenharia Elétrica) - Faculdade Doctum de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: <http://dspace.doctum.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/1934>. Acesso em: 12 abr. 2023.

VIEIRO, JÚNIOR SANTIS. **MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE DO MOTOR BRUSHLESS DC**. Orientador: Rodrigo Padilha Vieira. 2013. 96 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, ALEGRETE, 2013.

VISHAY. **VS-100BGQ100 PRODUCT INFORMATION**. 2023. Disponível em: <https://www.vishay.com/en/product/94581/>. Acesso em: 2023-10-22

WEG. **Inversor de Frequência CFW300**. 2023. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Micro-e-Mini-Drives/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW300/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW300/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_INVERTERCFW300](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Micro-e-Mini-Drives/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW300/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW300/p/MKT_WDC_BRAZIL_INVERTERCFW300). Acesso em: 2023-10-22



## APENDICE A - RETIFICADOR TRIFÁSICO (PONTE DE GRAETZ)

Em geral, a literatura traz o equacionamento das grandezas elétricas, de uma ponte trifásica, considerando um circuito alimentado pelo secundário de um transformador em ligação estrela. Nestes equacionamentos não são considerados as impedâncias internas da fonte e dos diodos da ponte trifásica, quanto as distorções provocadas por estas.

Conforme (Komatsu; Junior; Kaiser, 2017, p. 107), a tensão média de saída  $V_{cc}$  pode ser expressa em função da tensão de fase eficaz  $V_F$  por meio da equação 41:

$$V_{cc} \cong \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_F}{\pi} = 0,955 \cdot \sqrt{6} \cdot V_F = 2,34 \cdot V_F \quad (41)$$

Assim,  $V_{cc}$  pode ser expresso em função da tensão eficaz de linha  $V_l$  por meio da equação 42:

$$V_{cc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_l}{\pi \cdot \sqrt{3}} = 0,955 \cdot \sqrt{2} \cdot V_l = 1,35 \cdot V_l \quad (42)$$

Levando em conta um circuito onde possui o secundário de um transformador em ligação triângulo, então deve-se considerar apenas o cálculo em função da tensão de linha.

Para determinar a corrente média na carga  $I_{cc}$ , que também pode ser considerado como o somatório dos valores médios das correntes de cada par de diodos em condução  $I_{Dm}$ , utiliza-se a equação 43, em função da tensão de linha  $V_l$  e da carga  $R_C$ :

$$I_{Dm} = I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_C} = \frac{2,34 \cdot V_F}{R_C} = \frac{1,35 \cdot V_{Lrms}}{R_C} \quad (43)$$

Desprezando as impedâncias internas do circuito de alimentação em ligação triângulo, então a FEM pode ser considerada igual a tensão de linha, e assim pode ser reescrita conforme equação 44:

$$I_{Dm} = I_{cc} = \frac{0,955 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{Lrms}}{R_C} \cong \frac{0,955 \cdot \sqrt{2} \cdot FEM_{rms}}{R_C} = \frac{1,35 \cdot FEM_{rms}}{R_C} \quad (44)$$

## APENDICE B - CONVERSÃO DE IMPEDÂNCIAS

Para realizar a conversão do modelo com impedância em série ao circuito, denominada  $R_{SA}$  para o modelo com impedâncias em paralelo ao circuito, denominada  $R_{pA}$ , é necessário igualar as potências de ambas, conforme equação 45:

$$R_{SA} \cdot (I_{Lrms})^2 = 3 \cdot \frac{(V_{Lrms})^2}{R_{pA}} \quad (45)$$

A tensão de linha  $V_{Lrms}$  pode ser escrita em função da tensão no barramento cc  $V_{cc}$ , então a equação pode ser reescrita conforme equação 46:

$$R_{SA} \cdot (I_{Lrms})^2 = 3 \cdot \frac{\left(\frac{V_{cc}}{0,955 \cdot \sqrt{2}}\right)^2}{R_{pA}} \quad (46)$$

Conforme (Komatsu; Junior; Kaiser, 2017, p. 108), a corrente eficaz de linha  $I_{Lrms}$  pode ser expressa em função da corrente de média na carga  $I_{cc}$  por meio da equação 47:

$$I_{Lrms} = \sqrt{(I_{D1rms})^2 + (-I_{D4rms})^2} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{cc}}{\sqrt{3}} \quad (47)$$

Com a corrente de linha  $I_{Lrms}$  e a tensão no barramento cc  $V_{cc}$ , em função da corrente  $I_{cc}$  e carga  $R_C$  do barramento cc, a equação 46 pode ser reescrita conforme equação 48:

$$R_{SA} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot I_{cc}}{\sqrt{3}}\right)^2 = 3 \cdot \frac{\left(\frac{I_{cc} \cdot R_C}{0,955 \cdot \sqrt{2}}\right)^2}{R_{pA}} \quad (48)$$

Eliminando os termos iguais da equação e isolando o termo  $R_{pA}$ , então pode ser reescrita conforme equação 49:

$$R_{pA} = 3 \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{1}{0,955 \cdot \sqrt{2}}\right)^2 \cdot \frac{(R_C)^2}{R_{SA}} \quad (49)$$

Substituindo  $R_{SA}$  encontrado no decorrer deste trabalho para máquina BLDC em análise, então  $R_{pA}$  pode ser reescrito conforme equação 50:

$$R_{pA} = 2,467 \cdot \frac{(R_C)^2}{0,157 \cdot (R_C)} = 15,71 \cdot (R_C) \quad (50)$$