



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MARCIO MASSAO NISHIDE MORI**

**EMULADOR DE CARGAS MECÂNICAS COM FREIO ELETROMAGNÉTICO**  
**PARA ENSAIOS DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO**

**FORTALEZA**

**2018**

MARCIO MASSAO NISHIDE MORI

EMULADOR DE CARGAS MECÂNICAS COM FREIO ELETROMAGNÉTICO PARA  
ENSAIOS DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça

Coorientador: Prof. Dr.-Ing Tobias Rafael Fernandes Neto

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M849e Mori, Marcio Massao Nishide.  
Emulador de Cargas Mecânicas com Freio Eletromagnético para Ensaio de Motores Elétricos de Indução / Marcio Massao Nishide Mori. – 2018.  
113 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça.  
Coorientação: Prof. Dr. Tobias Rafael Fernandes Neto.
1. Ensaio de motores de indução. 2. freio eletromagnético. I. Título.

CDD 621.3

---

MARCIO MASSAO NISHIDE MORI

EMULADOR DE CARGAS MECÂNICAS COM FREIO ELETROMAGNÉTICO PARA  
ENSAIOS DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Aprovada em: 24 de maio de 2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr.-Ing Tobias Rafael Fernandes  
Neto (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Antonio Barbosa de Souza Júnior  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará e às pessoas com quem convivi neste espaço e tempo de sabedoria e amizade. A oportunidade de uma convivência plena de companheirismo e cultura foi o melhor aprendizado desta etapa da minha formação acadêmica. Ficarão para sempre registradas em minhas memórias.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça pela orientação segura e estimulante durante toda a elaboração da minha dissertação de mestrado.

Ao Prof. Dr. Tobias Rafael Fernandes Neto, meu coorientador, imprescindível na fase de definição do escopo e objetivos finais do projeto.

Agradeço a todos os professores que, direta ou indiretamente, participaram da elaboração desta dissertação, não apenas pelo aprendizado técnico transmitido, mas também pelo ensinamento de como trabalhar num grupo empenhado no avanço da Ciência e Tecnologia.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica Ednardo Moreira Rodrigues e Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação, agradeço a valiosa ajuda na formatação da documentação da dissertação.

Aos onipresentes colegas do Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ) e Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica (GPAR) pelos constantes e variados incentivos e ajudas. Andressa Oliveira, Gabriela Casimiro, Basílio Alberto Patrício Filho, Bruno Rodrigues Lisboa, Jucelino Talieres Filho, Eduardo Moreira Costa, Felipe Bandeira, Kleymilson do Nascimento Souza, Ramon Sampaio, Renan Almeida do Nascimento Barroso, Victor de Paula Brandão Aguiar, Adriano Rodrigues de Paula, Clauson Sales do Nascimento e René Descartes Olímpio Pereira, muito obrigado a todos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que através da concessão da bolsa de estudos viabilizou esta pesquisa.

Ao meu padrasto Douglas Bock e ao meu tio Paulo Outi pelos seus profundos conhecimentos no universo das ciências humanas, os quais puderam compartilhar comigo na revisão deste trabalho.

Por último, porém mais próximos do coração, agradeço a minha mãe Noemi Naomi Nishide, meu pai Mauro Mori (*in memoriam*) e todos os meus familiares, que sempre estiveram comigo, me apoiando irrestritamente.

“Nossa tecnologia passou a frente de nosso entendimento, e a nossa inteligência desenvolveu-se mais do que a nossa sabedoria.”

(Roger Revelle)

## RESUMO

Este trabalho apresenta um emulador de carga acoplado a um freio eletromagnético que possibilita a simulação das principais cargas mecânicas utilizadas pela indústria. Permitindo avaliar o desempenho de motores de até 10cv em aplicações com tipos cargas constante, linear, parabólica e hiperbólica.

O Emulador de Cargas Mecânicas é composto por um sistema de informações e gráficos dinâmicos, controlado por uma amigável interface parametrizada, executada em duas plataformas (Raspberry Pi<sup>®</sup> II e Arduino<sup>®</sup> Uno), que, durante os ensaios de motor, coordena a aquisição e exibição de dados como: tensão, corrente, potência, velocidade, temperatura e conjugado.

**Palavras-chave:** Ensaio de motores de indução, freio eletromagnético.

## ABSTRACT

This work presents a load emulator coupled to an electromagnetic brake that enables the simulation of the main mechanical loads used by the industry. Allowing to evaluate the performance of motors of up to 10cv in applications with constant loads types, linear, parabolic and hyperbolic. The Mechanical Load Emulator consists of a dynamic information and graphing system, controlled by a user-friendly parameterized interface, executed on two platforms (Raspberry Pi<sup>®</sup> II and Arduino<sup>®</sup> Uno), which during the motor tests coordinates the acquisition and display of data such as voltage, current, power, speed, temperature and torque.

**Keywords:** Induction motors benchmark, electromagnetic brake.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes alternativas de energia . . . . .	20
Figura 2 – Consumo de Energia no Brasil em 2015 . . . . .	21
Figura 3 – Bancada utilizada por Pereira (2006) . . . . .	22
Figura 4 – Emulador de Cargas Mecânicas . . . . .	22
Figura 5 – Conjunto do freio eletromagnético . . . . .	25
Figura 6 – Bancada de ensaios . . . . .	28
Figura 7 – Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico . . . . .	29
Figura 8 – Fasores de tensão do Modelo ABC. . . . .	30
Figura 9 – Carga Constante. . . . .	31
Figura 10 – Carga Linear. . . . .	32
Figura 11 – Carga parabólica. . . . .	33
Figura 12 – Carga Hiperbólica. . . . .	34
Figura 13 – Diagrama Emulador de Cargas Mecânicas . . . . .	35
Figura 14 – Esquema do conversor <i>Chopper</i> utilizado . . . . .	37
Figura 15 – Condicionamento do sinal do sensor de corrente . . . . .	37
Figura 16 – Transdutor de temperatura PT-100 . . . . .	38
Figura 17 – Transmissor MARKARE MTT-101 . . . . .	39
Figura 18 – Encoder RB6044 . . . . .	39
Figura 19 – Medidor de energia PowerLogic <sup>®</sup> PM850 . . . . .	40
Figura 20 – Conversor USB-i485 . . . . .	41
Figura 21 – Fluxograma da plataforma Raspberry . . . . .	42
Figura 22 – Fluxograma da plataforma Arduino . . . . .	43
Figura 23 – Interface gráfica . . . . .	45
Figura 24 – Seleção de tipo de carregamento . . . . .	46
Figura 25 – Janela de equação do tipo de carga . . . . .	46
Figura 26 – Bloco de corrente e temperatura . . . . .	47
Figura 27 – Medidas de grandezas elétricas . . . . .	48
Figura 28 – Grandezas Mecânicas . . . . .	49
Figura 29 – Gráfico de Conjugado para Carga Hiperbólica . . . . .	49
Figura 30 – Corrente do Motor pela Corrente do Freio . . . . .	51
Figura 31 – Fator de Potência pela Corrente do Freio . . . . .	52

Figura 32 – Potência pela Corrente do freio . . . . .	53
Figura 33 – Velocidade do motor pela Corrente do Freio . . . . .	54
Figura 34 – Corrente média do motor pela velocidade do motor . . . . .	55
Figura 35 – foto do teste de carga linear . . . . .	56
Figura 36 – foto do teste de carga parabólico . . . . .	57
Figura 37 – foto do teste de carga hiperbólico . . . . .	58
Figura 38 – Diagrama de Bode do conversor <i>Chopper</i> em malha aberta . . . . .	93
Figura 39 – Diagrama de Bode do conversor com o controlador em malha aberta . . . . .	95
Figura 40 – Corrente nas Bobinas do Freio por Tempo . . . . .	97
Figura 41 – Corrente nas Bobinas do Freio por Tempo . . . . .	97
Figura 42 – Tensão do capacitor de retificação . . . . .	98
Figura 43 – Circuito de Pré-Carga . . . . .	99
Figura 44 – Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico . . . . .	107
Figura 45 – Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico, simplificado pelo teorema de Thévenin. . . . .	107
Figura 46 – Fasores de tensão do Modelo ABC. . . . .	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de projeto do Freio eletromagnético acionado por correntes induzidas (FEACI) . . . . .	26
Tabela 2 – Dados elétricos das bobinas do freio . . . . .	26
Tabela 3 – Dado do motor <i>Premium</i> . . . . .	27
Tabela 4 – Dados do motor da bancada . . . . .	27
Tabela 5 – Dados reduzidos das variações de corrente do freio . . . . .	50
Tabela 6 – Dados estendidos das variações de corrente do freio com torque do fabricante	102



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEACI	Freio eletromagnético acionado por correntes induzidas
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LAMOTRIZ	Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes
ONU	Organização das Nações Unidas
PI	Proporcional-integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RCD	Resistor, capacitor e diodo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_{rot}$	Perdas rotacionais [W]
$P_{vz}$	Potência ativa a vazio [W]
$P_{nucleo}$	Perdas no núcleo [W]
$P_{av}$	Perdas no atrito e ventilação [W]
$P_{diversas}$	Perdas diversas [W]
$X_{vz}$	Reatância aparente a vazio [ $\Omega$ ]
$X_{11}$	Indutância próprio do estator [ $\Omega$ ]
$I_{1,vz}$	Corrente no estator a vazio [W]
$R_1$	Resistência do estator [ $\Omega$ ]
$R_2$	Resistência do rotor [ $\Omega$ ]
$Q_{vz}$	Potência reativa a vazio [VAr]
$FP$	Fator de potência [adimensional]
$\alpha$	Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente [ $^\circ$ ]
$P_{bl,16Hz}$	Potência ativa a com rotor bloqueado na frequência de 16Hz [W]
$V_{bl}$	Tensão para rotor bloqueado [V]
$I_n$	Corrente nominal [A]
$Z_{bl,16Hz}$	Impedância com roto bloqueado na frequência de 16Hz [ $\Omega$ ]
$R_{bl}$	Resistência para rotor bloqueado [ $\Omega$ ]
$X_{bl,16Hz}$	Reatância para rotor bloqueado na frequência de 16Hz [ $\Omega$ ]
$X_{bl}$	Reatância para rotor bloqueado [ $\Omega$ ]
$X_1$	Reatância do estator [ $\Omega$ ]
$X_2$	Reatância do rotor [ $\Omega$ ]
$X_m$	Reatância magnetização [ $\Omega$ ]
$Z_{1,eq}$	Impedância de dispersão [ $\Omega$ ]
$V_{1,eq}$	Tensão da fonte equivalente [V]
$T_{mec}$	Conjugado mecânico [N·m]

$P_{mec}$	Potência mecânica [W]
$w_m$	Velocidade angular da máquina [rad/s]
$w_s$	Velocidade angular síncrona [rad/s]
$s$	Escorregamento [adimensional]
$V_{1,eq}$	Tensão da fonte equivalente do rotor referenciada ao rotor [V]
$R_{1,eq}$	Resistência equivalente do estator referenciada ao rotor [ $\Omega$ ]
$RR_1$	Matriz de resistência do estator [ $\Omega$ ]
$RR_2$	Matriz de resistência do rotor [ $\Omega$ ]
$LL_1$	Matriz de indutância do estator [H]
$LL_2$	Matriz de indutância do rotor [H]
$M_1$	Indutância mútua do estator [H]
$M_2$	Indutância mútua do rotor [H]
$LL_{12}$	Matriz de indutância estator-rotor [H]
$M_{12}$	Matriz de indutância mútua do rotor [H]
$\theta$	Fasor de ângulo entre o estator e o rotor [rad]
$vv_1$	Matriz de tensões do estator [V]
$vv_2$	Matriz de tensões do rotor [V]
$ii_1$	Matriz de correntes do estator [A]
$ii_2$	Matriz de correntes do rotor [A]
$T$	Conjugado do motor [N· m]
$J$	Momento de inércia [kg· m <sup>2</sup> ]
$B$	Coefficiente de atrito [adimensional]
$T_c$	Conjugado de carga [N· m]
$T_o$	Conjugado de carga para velocidade nula [N·m]
$k_c$	Coefficiente de carregamento [adimensional]
$n$	Velocidade rotacional [rpm]
$P_c$	Potência da carga [W]
$f_c$	Frequência de corte [rad]

$G_i$	Ganho do circuito integrador [adimensional]
$I_{cmax}$	Corrente máxima do capacitor [A]
$V_c$	Tensão do capacitor [V]
$\tau_{temp}$	Constante de tempo do circuito de pré-carga [s]
$R_{temp}$	Resistência do resistor do circuito de pré-carga [ $\Omega$ ]
$C_{temp}$	Capacitância do capacitor do circuito de pré-carga [F]
$V_{be}$	Tensão base-emissor do transistor [V]
$t$	Tempo [s]
$C_{sn}$	Capacitância do circuito de <i>snubber</i> [F]
$V_{ce,IGBT}$	Tensão entre o coletor e emissor do IGBT [V]
$I_{e,IGBT}$	Corrente do emissor do IGBT [I]
$P_{Rsn}$	Potência do resistor do <i>snubber</i> [W]
$f_{chav}$	Frequência de chaveamento do IGBT [Hz]
$K$	Ganho estático [adimensional]
$G$	Função de transferência do conversor
$L$	Indutância [H]
$R$	Resistência [ $\Omega$ ]
$\tau$	Tempo de atraso [s]
$T_1$	Constante de tempo [s]
$T_e$	Tempo morto [s]
$F_a$	Fator de atraso [adimensional]
$G_p$	Função de transferência do conversor com ganhos do conversor analógico-digital e da moduladora em malha aberta
$K_{ad}$	Ganho do conversor analógico-digital [adimensional]
$K_m$	Ganho do modulador [adimensional]
$G_c$	Função de transferência do controlador
$K_c$	Ganho proporcional do controlador [adimensional]
$T_i$	Tempo de integração [s]

$k$	Ganho estático do sistema em malha aberta [adimensional]
$G_{mf}$	Função de transferência do sistema em malha fechada
$w$	Parcela integradora
$u$	Sinal de controle
$e$	Erro de controle
$I_{Freio}$	Corrente de acionamento do freio [A]
$I_{med}$	Corrente média entre fases do motor [A]

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	20
1.1	<b>Considerações preliminares</b> . . . . .	21
1.2	<b>Escopo do trabalho</b> . . . . .	23
2	<b>REFERÊNCIAS TÉCNICAS E FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS</b> . .	24
2.1	<b>Referências técnicas</b> . . . . .	24
2.2	<b>Detalhamento do freio eletromagnético</b> . . . . .	24
2.3	<b>Ensaio e características do motor <i>premium</i></b> . . . . .	26
2.4	<b>Interação freio eletromagnético motor (sistema freio-motor)</b> . . . . .	27
2.5	<b>Metodologia de cálculo para a proposta do conjugado mecânico</b> . . . . .	29
2.5.1	<i>Modelo Circuito Equivalente</i> . . . . .	29
2.5.2	<i>Modelo ABC</i> . . . . .	29
2.6	<b>Principais Tipos de Carregamentos</b> . . . . .	30
2.6.1	<i>Carga com conjugado constante</i> . . . . .	30
2.6.2	<i>Carga com conjugado linear</i> . . . . .	31
2.6.3	<i>Carga com conjugado parabólico</i> . . . . .	32
2.6.4	<i>Carga com conjugado hiperbólico</i> . . . . .	33
3	<b>DETALHAMENTO DO PROJETO EMULADOR DE CARGAS MECÂNICAS</b> . . . . .	35
3.1	<b>Plataforma Raspberry® Pi II – Sistema de Emulador de Cargas (Lazarus® - Delphi®/Pascal®)</b> . . . . .	35
3.2	<b>Plataforma <i>Hardware/Software</i> Arduino Uno</b> . . . . .	36
3.2.1	<i>Controle Proporcional-Integral</i> . . . . .	36
3.3	<b>Conversores e Sensores</b> . . . . .	36
3.3.1	<i>Conversor CC-CC - tipo Chopper abaixador de tensão</i> . . . . .	36
3.3.2	<i>Condicionador do sinal de corrente elétrica com sensor de efeito Hall</i> . . .	37
3.3.3	<i>Transdutor de temperatura</i> . . . . .	38
3.3.4	<i>Encoder</i> . . . . .	39
3.3.5	<i>Medidor de energia</i> . . . . .	40
3.4	<b>Fluxogramas de dados do Emulador de Cargas Mecânicas</b> . . . . .	41
3.4.1	<i>Fluxograma da plataforma Raspberry Pi</i> . . . . .	41

3.4.2	<i>Fluxograma da plataforma Arduino</i> . . . . .	43
3.5	<b>Sistema Gráfico do Emulador de Cargas Mecânicas</b> . . . . .	44
3.5.1	<i>Ambiente e plataforma de processamento</i> . . . . .	44
3.5.2	<i>Detalhamento das telas de processamentos</i> . . . . .	44
3.5.3	<i>Detalhamento dos blocos de informação</i> . . . . .	45
4	<b>ENSAIOS E TESTES REALIZADOS</b> . . . . .	50
4.1	<b>Ensaio de carga constantes</b> . . . . .	50
4.1.1	<i>Correlação entre corrente média consumida pelo motor e a corrente aplicada no freio</i> . . . . .	51
4.1.2	<i>Correlação do fator de potência e a corrente aplicada no freio</i> . . . . .	52
4.1.3	<i>Correlação da potência ativa consumida pelo motor e a corrente aplicada no Freio</i> . . . . .	53
4.1.4	<i>Correlação da velocidade do motor e a corrente aplicada no freio</i> . . . . .	53
4.2	<b>Comparativo entre modelo de Circuito Equivalente, modelo ABC, dados do fabricante e dados coletados</b> . . . . .	54
4.3	<b>Ensaio de cargas variáveis: linear, parabólica e hiperbólica</b> . . . . .	55
4.3.1	<i>Ensaio com carga Linear</i> . . . . .	56
4.3.2	<i>Ensaio com carga parabólica</i> . . . . .	57
4.3.3	<i>Ensaio com carga hiperbólica</i> . . . . .	58
4.3.4	<i>Avaliação e comentários - incongruência dos testes com cargas variáveis (linear, parabólica e hiperbólica)</i> . . . . .	59
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	60
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	62
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	64
	<b>APÊNDICE A</b> – Códigos do sistemas do Raspberry® Pi . . . . .	64
	<b>APÊNDICE B</b> – Códigos do Arduino® de controle de corrente do freio . . . . .	88
	<b>APÊNDICE C</b> – Detalhamento do Controle Proporcional-Integral . . . . .	93
	<b>APÊNDICE D</b> – Conversor CC-CC - Circuito de Pré-Carga e <i>Snubber</i> . . . . .	98
	<b>APÊNDICE E</b> – Documentação suplementar do cálculo das cargas mecânicas . . . . .	101
	<b>ANEXOS</b> . . . . .	103
	<b>ANEXO A</b> – Portaria Interministerial número 1 . . . . .	104
	<b>ANEXO B</b> – Ensaio e características do motor <i>premium</i> . . . . .	105

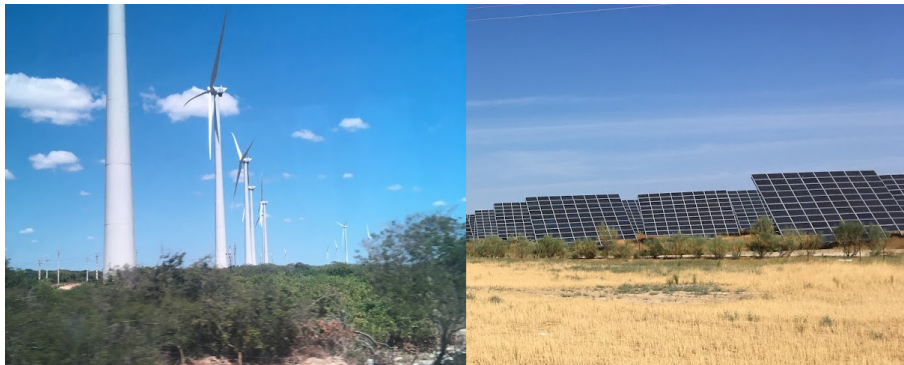
<b>ANEXO C</b> – Modelos para estimativa de conjugado mecânico . . . . .	107
<b>ANEXO D</b> – Ficha Técnica do Motor . . . . .	111



## 1 INTRODUÇÃO

Nas planilhas de custos das empresas o item energia elétrica é quase sempre o principal ponto de atenção, em muitos casos a maior despesa do processo produtivo. Com a exaustão das reservas de combustíveis fósseis os países desenvolvidos e em desenvolvimento estão fortemente empenhados em diversificar e expandir suas fontes de energia sustentável. Entretanto, todos os estudos concordam que o uso racional da energia produzida é a melhor economia e a política mais indicada.

Figura 1 – Fontes alternativas de energia

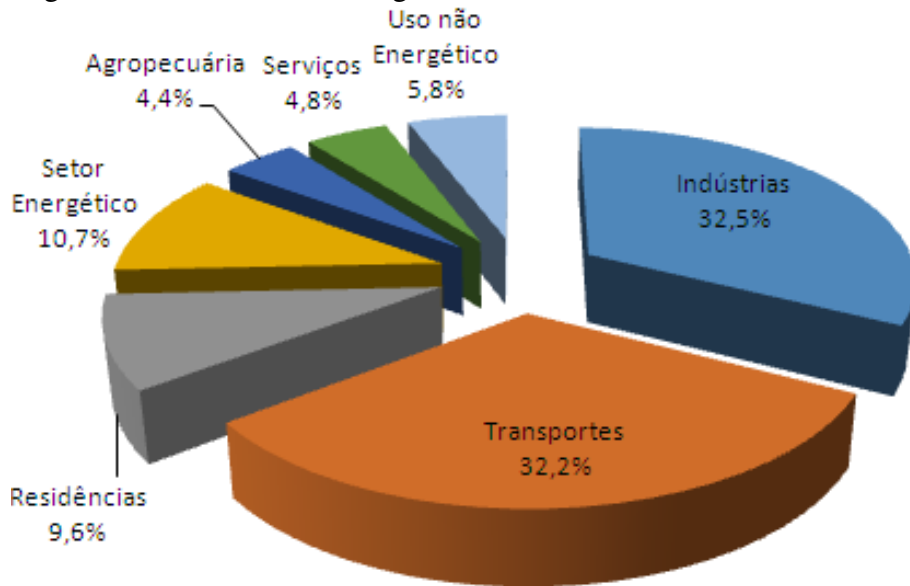


Fonte: o autor.

Segundo o estudo *Human development report* da Organização das Nações Unidas (ONU) de 2016, uma das 17 metas do desenvolvimento sustentável é assegurar acesso à energia barata, viável, sustentável e moderna para todos. Indicando que, paralelamente ao aumento da geração de energia, os processos devem buscar melhorias e aprimoramentos tornando-os mais eficientes no quesito uso de energia (JAHAN *et al.*, 2016).

A indústria, por ser a maior consumidora de energia, conforme mostra a Figura 2, é o setor com maior peso no balanço energético. Porém, como seus processos produtivos são complexos e diversificados, também oferecem inúmeras oportunidades de redução da demanda de energia. Potencialmente cada máquina ou motor utilizado na planta pode ser analisado e otimizado, considerando o uso de energia mais racional.

Figura 2 – Consumo de Energia no Brasil em 2015



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016).

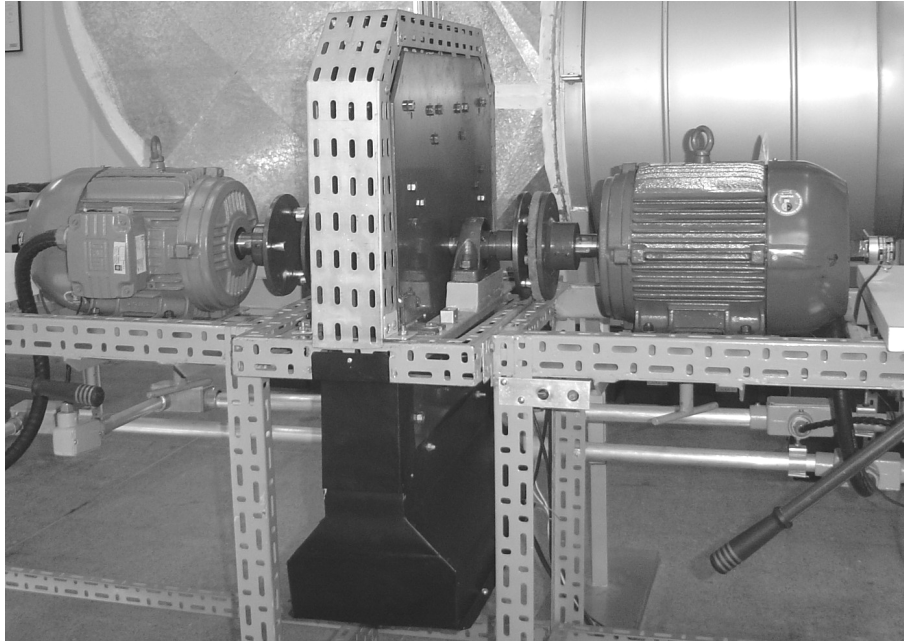
Os motores de indução trifásicos são largamente utilizados pelas indústrias em diversas atividades, tais como: bombas, misturadores, pressurizadores, ventiladores, elevadores. Todas essas modalidades de aplicações são ótimas candidatas a agentes de economia. Neste contexto o objetivo deste trabalho é propor um Emulador de Cargas Mecânicas, conectado a um freio eletromagnético, para simular e analisar alguns dos principais usos dos motores trifásicos nas instalações industriais. Também, baseado nos ensaios, analisar os cenários vantajosos em termos de custo/benefício.

### 1.1 Considerações preliminares

Este trabalho utiliza como subsídios teóricos duas publicações acadêmicas, a monografia de Denardi Jr. (2013) e a dissertação de mestrado de Silva (2015), e tem como base prática o projeto de freio eletromagnético, acionado por correntes induzidas (para motores até 10 cv), desenvolvido por Pereira (2006).

A bancada de testes de Pereira (2006), ponto de partida deste estudo, era composta por dois motores de indução trifásica de 10 cv (vide Figura 3): lado esquerdo motor WEG<sup>®</sup> padrão; lado direito motor WEG<sup>®</sup> de alto rendimento. Esta configuração possibilitava comparar as medidas de potências ativas, fatores de potência, correntes e velocidades em propulsores diferentes.

Figura 3 – Bancada utilizada por Pereira (2006)

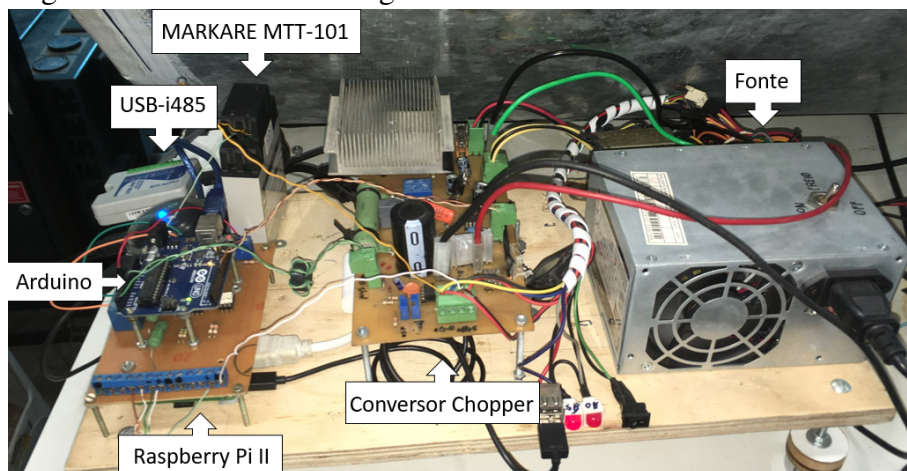


Fonte: (PEREIRA, 2006)

A proposta de emulador de cargas, que será apresentada neste estudo, aproveitou o freio eletromagnético da bancada acima, porém substituiu o motor da esquerda (motor WEG<sup>®</sup> padrão) por um motor WEG<sup>®</sup> *premium*, atendendo a portaria interministerial número 1 (Anexo A) que regula o setor (MINISTÉRIO DE MINAS DE ENERGIA, 2017).

Assim sendo, todos os ensaios e simulações referentes aos ensaios com o Emulador de Cargas Mecânicas (vide Figuras 4) - núcleo desse estudo -acoplado ao sistema freio-motor de Pereira (2006), utilizarão o novo motor (WEG<sup>®</sup> *premium*) adicionado à bancada.

Figura 4 – Emulador de Cargas Mecânicas



Fonte: o autor.

## 1.2 Escopo do trabalho

As cargas mecânicas têm características distintas, dependendo do seu uso. Para as simulações deste projeto foram selecionados preferencialmente os quatro principais carregamentos adotadas pelas indústrias.

### 1. Carga com conjugado constante.

–Usado em: compressores de pistão, portões eletrônicos, talhas e transportadores.

### 2. Carga com conjugado linear.

–Encontra-se essa característica em geradores de excitação independente, calandra com atrito viscoso (para calandrar papel), misturadores de líquidos, etc.

### 3. Carga com conjugado parabólico.

–Como exemplos de cargas com conjugado parabólico: bombas centrífugas, ventiladores e misturadores centrífugos.

### 4. Carga com conjugado hiperbólico.

–Normalmente encontrado em: bobinadeira de fios, bobinadeira de papel com motor CC, bobinadeira de pano com motor CC, descascador de toras e tornos com motores de dupla velocidade.

## 2 REFERÊNCIAS TÉCNICAS E FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

### 2.1 Referências técnicas

Os trabalhos de Denardi Jr. (2013) e Silva (2015), anteciparam diversos ensaios similares aos que este projeto se propõe a desenvolver, entretanto ambos adotaram geradores de corrente contínua como fontes de carga mecânica e se utilizaram de um torquímetro para aferição dos resultados.

Nesta retomada do problema optou-se por reaproveitar a bancado do freio eletromagnético de Pereira (2006) – desenvolvido nesta instituição – e a adoção de um Emulador de Cargas Mecânicas. Configuração que oferece alguns ganhos relevantes comparativamente aos geradores de corrente contínua, tais como: solução mais econômica, facilidade de implementação e custo de manutenção.

Para aferição da velocidade do motor foi utilizado um *encoder* RB6044 da IFM Electronic<sup>®</sup>. O torque foi estimado com base na equação deferida da curva conjugado/velocidade do fabricante e referendada na metodologia proposta por Barbi (1985).

### 2.2 Detalhamento do freio eletromagnético

O freio eletromagnético é um dispositivo eletromecânico que funciona segundo os princípios de correntes induzidas, também conhecidas como correntes de Foucault (PEREIRA, 2006).

A corrente de Foucault se forma quando um metal condutor paramagnético sofre alteração no campo magnético. Essa variação de campo gera tensões induzidas que por sua vez geram as chamadas correntes de Foucault no material metálico (PEREIRA, 2006).

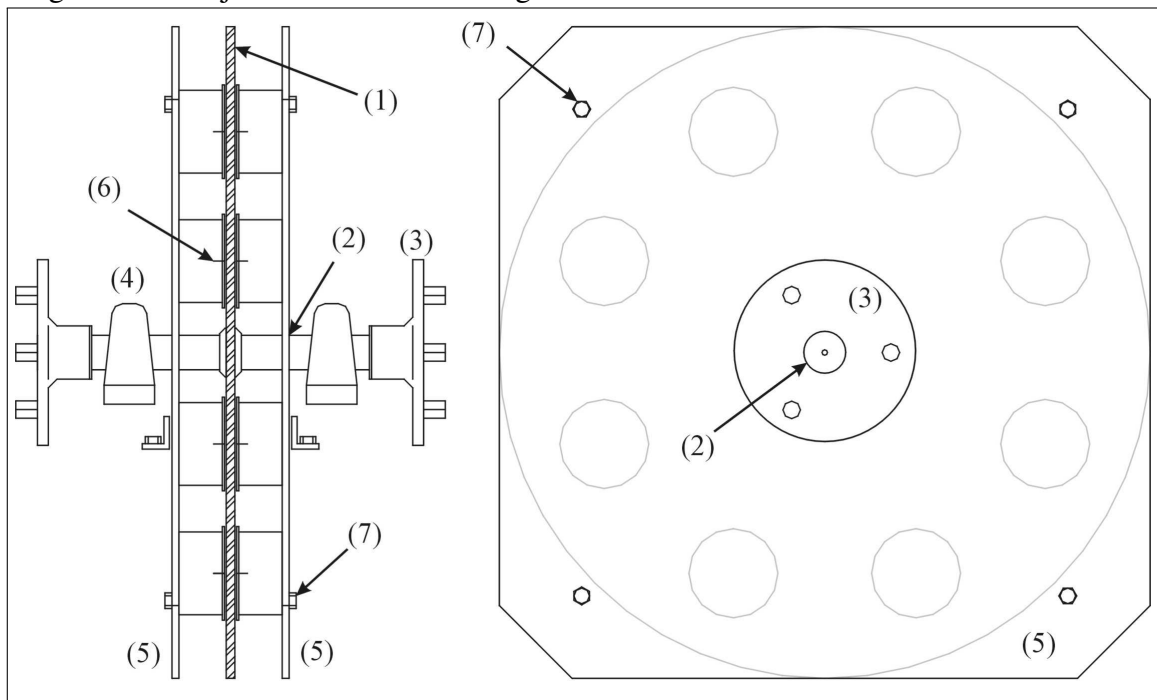
Essas correntes geradas criam um campo magnético contrário ao campo induzido que por consequência, exerce força contrário ao movimento do material. Essa força, por sua vez, reduz a energia cinética do disco acoplado ao eixo do motor, reduzindo ou interrompendo a rotação (PEREIRA, 2006).

A Figura 5 mostra o diagrama do FEACI do Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ) desenvolvido por Pereira (2006), que foi aproveitado pelo Emulador de Cargas Mecânicas proposto.

O conjunto é constituído basicamente por duas partes:

- Rotor, com disco condutor (1), eixo (2), acopladores (3) e unidades de rolamento (4);
- Estator, com duas laterais planas (5), oito pares de núcleos ferromagnéticos (6), parafusos de ajuste do entreferro (7).

Figura 5 – Conjunto do freio eletromagnético



Fonte: (PEREIRA, 2006).

Este dispositivo possui as características mecânicas descritas na Tabela 1, conforme o trabalho de mestrado desenvolvido por Pereira (2006).

Tabela 1 – Dados de projeto do FEACI

Característica	Valor
Raio do disco, $r$ (cm)	30,00
Raio efetivo do disco, $R$ (cm)	22,0
Espessura do disco (placa 5/16 pol), $d$ (cm)	0,8
Diâmetro do núcleo, $S$ (cm)	7,6
Altura do núcleo, $h$ (cm)	4,0
Entreferro médio, $2x$ (cm)	1,0
Fator de eficiência geométrica, $c$ .	0,45
Condutividade do Aço SAE 1020 aprox., $\sigma_{Fe@100^{\circ}C}$ ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ )	$5,8 \cdot 10^6$
Resistividade do Aço SAE 1020 aprox., $\rho_{Fe@100^{\circ}C}$ ( $\Omega m$ )	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Velocidade angular nominal, $\omega_N$ (rad/s)	184,3
Velocidade tangencial sob o pólo, $v$ (m/s)	40,5
Conjugado nominal, $T_{NOM}$ (N.m)	40,1
Conjugado máximo, $1.15T_{NOM}$ (N.m)	46,6
Densidade de fluxo magnético no entreferro, $B$ (T)	0,154
Força de frenagem nominal, $F_B$ (N)	184,0
Força magnetomotriz requerida, $NI$ (A-espiras)	1467,0
Número de espiras por bobina, $n$ (espiras)	900
Fio adotado para as bobinas (AWG)	21
Corrente contínua máxima por bobina, $I_{Bmax,21AWG}$ (A)	1,20
Corrente contínua nominal por bobina, $I_B$ (A)	0,82

Fonte: (PEREIRA, 2006)

As características elétricas das bobinas do FEACI foram tomadas a uma temperatura de 26°C e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados elétricos das bobinas do freio

Terminais	R ( $\Omega$ )	L a 1kHz(mH)	L a 10kHz(mH)	L a 100Hz(mH)	L a 120Hz(mH)
alimentação	12,5	108,63	64,32	258,7	239,2
1 - 2 lado Esquerdo	48,6	438,3	329,1	1395,0	1300,0
3 - 4 lado Esquerdo	48	559,1	287,4	1313	1224,1
1 - 2 lado Direito	47,5	417,4	297,8	1324,5	1234,3
3 - 4 lado Direito	49,3	442,4	317,3	1389,7	1295,7

Fonte: adaptado de Pereira (2006).

Para a temperatura de 68°C a resistência entre os terminais de alimentação do freio foi de 14,3  $\Omega$  e a indutância foi de 246,1 mH.

### 2.3 Ensaios e características do motor *premium*

O motor *premium* da bancada (que substituiu o motor padrão), conforme o catálogo do fabricante, Tabela 3, possui as seguintes características:

Tabela 3 – Dado do motor *Premium*

Características	Valores
Potência nominal (cv/kW)	10/7,5
Rotação nominal (rpm)	1765
Número de polos	4
Tensão de linha $\Delta/Y$ (V)	220/380
Corrente nominal $\Delta/Y$ (A)	25,4/14,7
Conjugado nominal (N.m)	40,6
Rendimento (%)	92
Fator de Serviço	1,25
Classe de Isolação	F
Fator de potência	0,84
Corrente a vazio $\Delta/Y$ (A)	12,0/6,95
Momento de inércia ( $\text{kgm}^2$ )	0,0563
Tempo de rotor bloqueado (s)	13(quente) 23(frio)

Fonte: Weg<sup>®</sup>.

O motor *premium* foi submetido a ensaios de acordo com a norma NBR5383-1:2000 da ABNT (2002), com a temperatura de operação em 63°C. O valor das resistências e indutâncias foram obtidos de teste com o rotor bloqueado e sem carga. A Tabela 4 apresenta os valores de resistência e reatância calculados a partir das equações de Chapman (2013) e Fitzgerald *et al.* (2006) (detalhamento no Anexo B).

Tabela 4 – Dados do motor da bancada

Características	Valores
Tensão entre fases (V)	380
Ligação dos terminais	triângulo
Resistência por fase do estator por fase, $R_s$ ( $\Omega$ )	0,50
Resistência por fase do rotor por fase, $R_r$ ( $\Omega$ )	0,4657
Reatância do estator por fase, $X_s$ ( $\Omega$ )	0,9387
Reatância do estator por fase, $X_s$ ( $\Omega$ )	0,9387
Reatância de magnetização, $X_m$ ( $\Omega$ )	29,8666

Fonte: o autor.

## 2.4 Interação freio eletromagnético motor (sistema freio-motor)

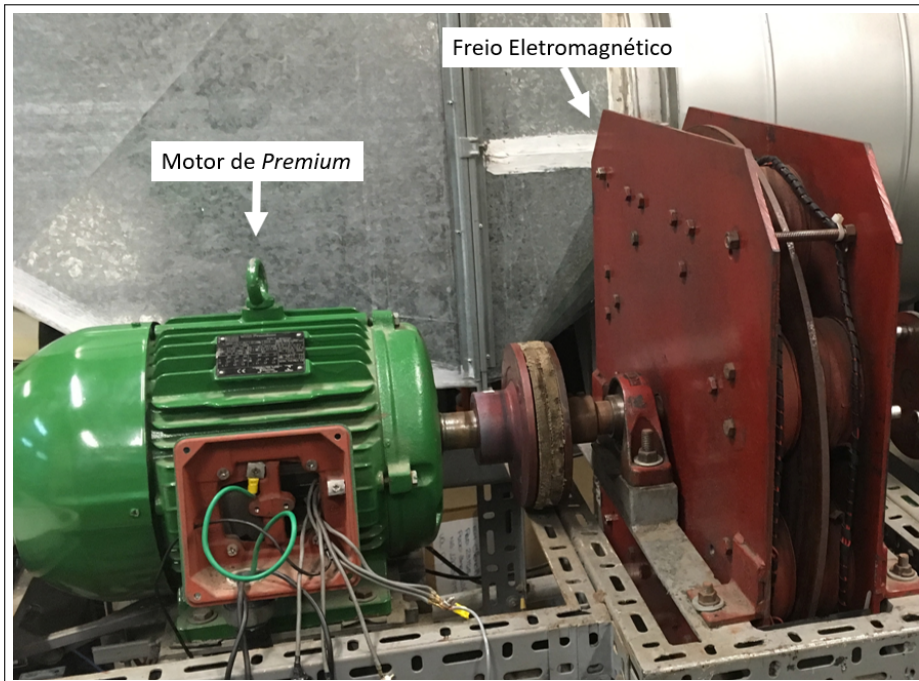
O sistema composto pelo freio eletromagnético e seu acoplamento ao motor (neste trabalho referido como sistema freio-motor) é o principal suporte dos estudos e simulações do projeto de Emulador de Cargas Mecânicas. É constituído por um motor *premium* Weg<sup>®</sup> de 10 cv com um freio-eletromagnético acoplado no seu eixo. O projeto freio eletromagnético foi desenvolvido por Pereira (2006) no LAMOTRIZ da Universidade Federal do Ceará.

Sucintamente o Sistema Emulador de Cargas Mecânicas aplica variações de correntes



elétricas no freio eletromagnético e mede grandezas elétricas, velocidades e temperaturas no motor.

Figura 6 – Bancada de ensaios



Fonte: o autor.

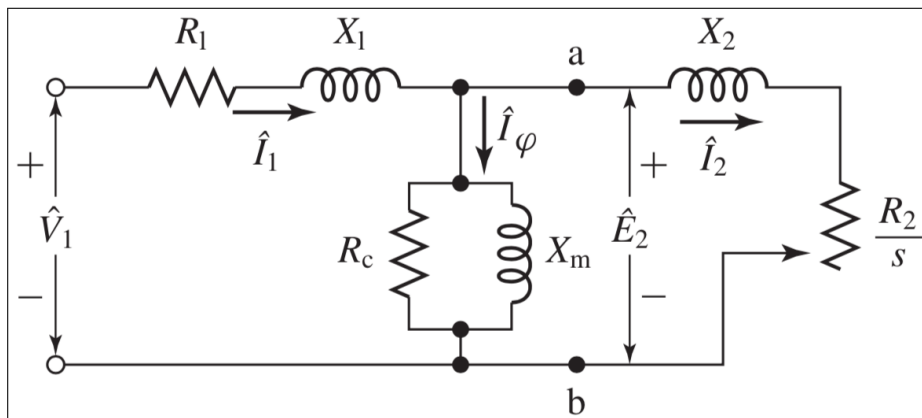
## 2.5 Metodologia de cálculo para a proposta do conjugado mecânico

Para substituir o torquímetro, ausente na bancada, foram adotados dois modelos de cálculo para validar os valores e desempenho do conjugado mecânico: modelo Circuito Equivalente proposto por Fitzgerald *et al.* (2006) e modelo ABC proposto por Barbi (1985).

### 2.5.1 Modelo Circuito Equivalente

O modelo do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásica é uma representação adequada para analisar o funcionamento do motor em regime permanente com cargas equilibradas e tensões senoidais. A Figura 7 representa esse circuito (CHAPMAN, 2013).

Figura 7 – Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico

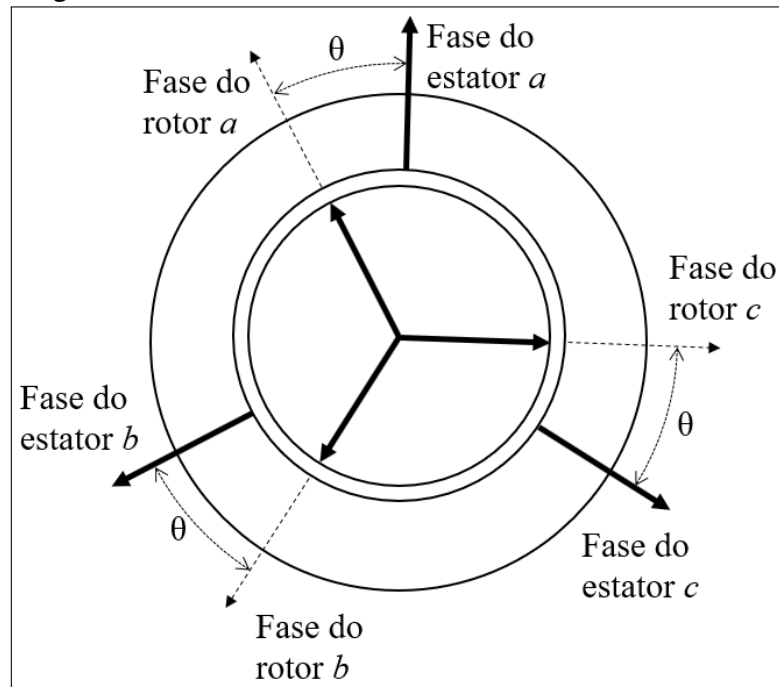


Fonte: (FITZGERALD *et al.*, 2006).

### 2.5.2 Modelo ABC

O modelo ABC é uma modelagem do funcionamento do motor de indução em função do tempo abordando fatores e parâmetros diversos, tais como: correntes do estator e rotor, velocidade do motor, resistências do estator e rotor, indutâncias do estator, rotor, mútuas e próprias e conjugado (BARBI, 1985). A Figura 8 mostra a defasagem angular dos fasores de tensão entre rotor e estator do motor de corrente trifásica.

Figura 8 – Fasores de tensão do Modelo ABC.



Fonte: adaptado de (PEREIRA, 2006)

## 2.6 Principais Tipos de Carregamentos

As cargas mecânicas têm distintas características dependendo do seu uso. Algumas delas sofrem interferência da velocidade de rotação, mudando as curvas do conjugado resistente seguindo a Equação 2.1. Sendo  $T_c$  o conjugado resistente da carga em Nm,  $T_o$  é conjugado da carga para rotação zero em Nm,  $k_c$  é constante que depende da carga,  $n$  é velocidade de rotação do motor e  $x$  é parâmetro dependente da carga, pode assumir os valores -1, 0, 1, 2.

$$T_c = T_o + k_c \cdot n^x \quad (2.1)$$

Conforme o valor do parâmetro  $x$  o conjugado poderá ser constante ou variar de forma linear, parabólica ou hiperbólica com o valor da velocidade de rotação.

### 2.6.1 Carga com conjugado constante

Em usos como: compressores de pistão, portões eletrônicos, talhas e transportadores, o conjugado é constante. Neste caso o valor de  $x = 0$  e dessa forma o valor do conjugado não sofre influência da velocidade de rotação, dependendo apenas de duas constantes, como apresenta a Equação 2.2 (WEG, 2008).

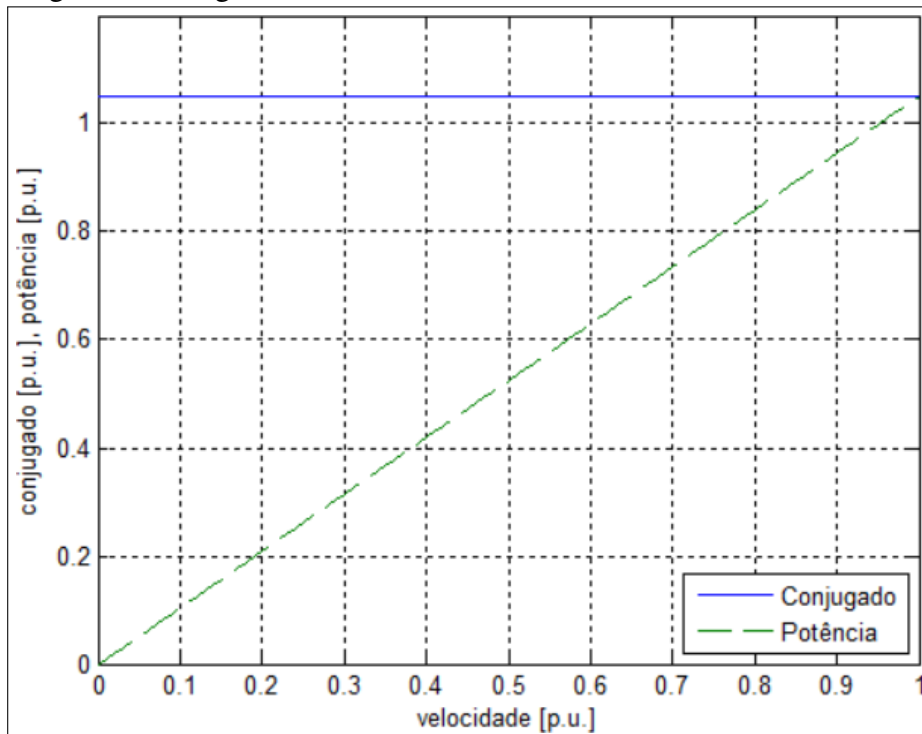
$$T_c = T_o + k_c \quad (2.2)$$

E a potência de carga  $P_c$  varia de forma linear crescente e expressa conforme a Equação 2.3.

$$P_c = (T_o + k_c) \cdot n \quad (2.3)$$

A Figura 9 mostra o conjugado e a potência em função da velocidade para carga constante.

Figura 9 – Carga Constante.



Fonte: adaptado de Weg (2008).

### 2.6.2 Carga com conjugado linear

Encontra-se essa característica em geradores de excitação independente, calandra com atrito viscoso (para calandrar papel), misturadores de líquidos, etc. Esse tipo de carga varia linearmente o torque em função da velocidade de rotação, na Equação 2.4 o valor de  $x = 1$  (HLUCHAN *et al.*, 2013).

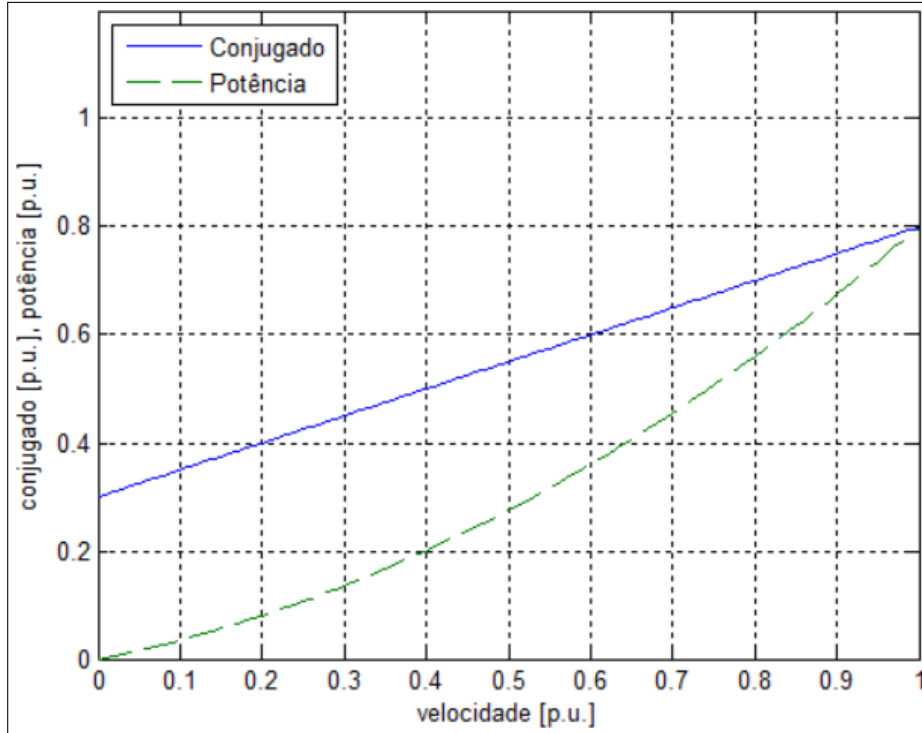
$$T_c = T_o + k_c \cdot n \quad (2.4)$$

Dessa forma a potência de carga  $P$  varia conforme a Equação 2.5.

$$P_c = (T_o \cdot n) + (k_c \cdot n^2) \quad (2.5)$$

É possível perceber a potência com característica parabólica para cargas lineares em função da velocidade do motor na Figura 10.

Figura 10 – Carga Linear.



Fonte: adaptado de Weg (2008).

### 2.6.3 Carga com conjugado parabólico

Como exemplos de cargas com conjugado parabólico: bombas centrífugas, ventiladores e misturadores centrífugos. Com  $x = 2$  o conjugado varia com o quadrado da rotação, em uma parábola, conforme a Equação 2.6 (WEG, 2008).

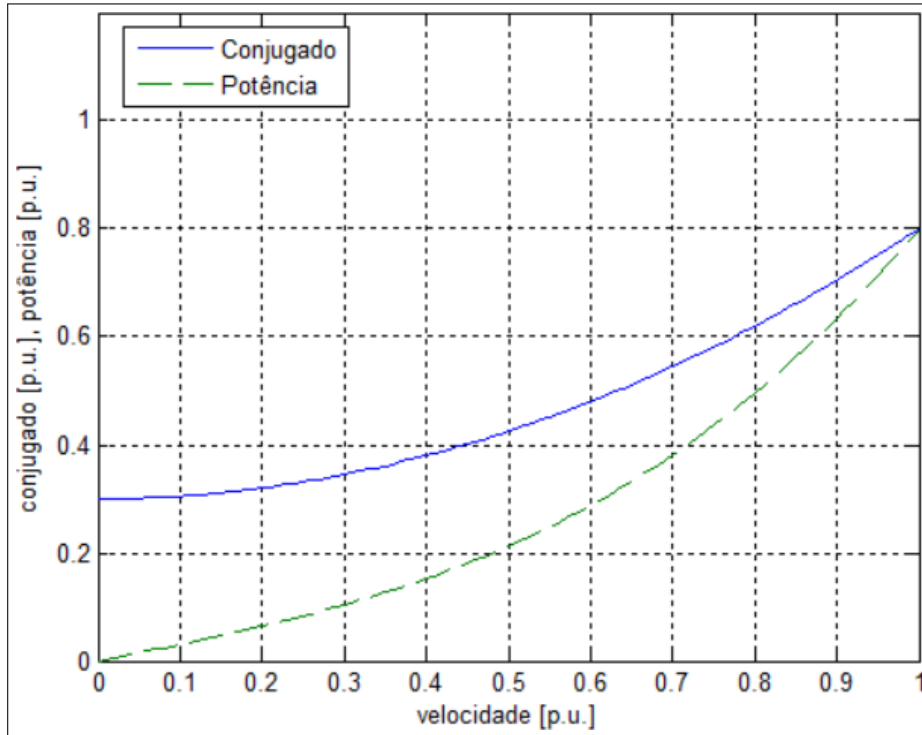
$$T_c = T_o + k_c \cdot n^2 \quad (2.6)$$

A potência tem uma relação com a rotação elevado ao cubo, como a mostra na Equação 2.7.

$$P_c = (T_o \cdot n) + (k_c \cdot n^3) \quad (2.7)$$

A Figura 11 mostra o gráfico do conjugado e da potência em função da velocidade do motor para uma carga parabólica.

Figura 11 – Carga parabólica.



Fonte: adaptado de Weg (2008).

#### 2.6.4 Carga com conjugado hiperbólico

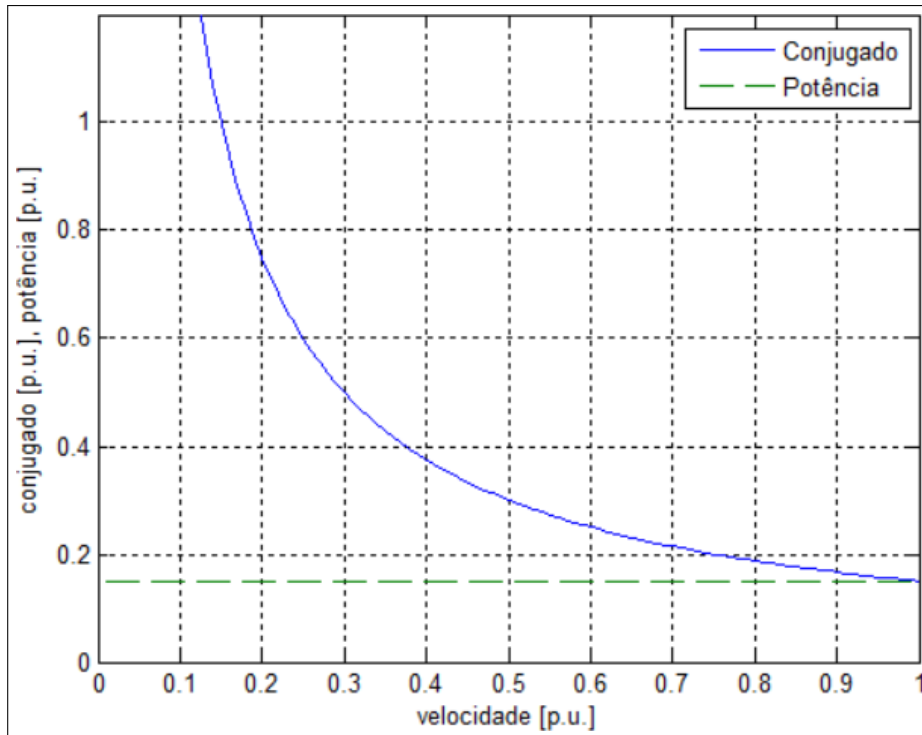
Normalmente encontrado em: bobinadeira de fios, bobinadeira de papel com motor CC, bobinadeira de pano com motor CC, descascador de toras e tornos com motores de dupla velocidade. O conjugado hiperbólico considera  $x = -1$ , como mostra na Equação 2.8. E a potência é uma constante como na Equação 2.9 (WEG, 2008).

$$T_c = \frac{k_c}{n} \quad (2.8)$$

$$P_c = k_c \quad (2.9)$$

A Figura 12 mostra um exemplo de carga hiperbólica com potência constante.

Figura 12 – Carga Hiperbólica.



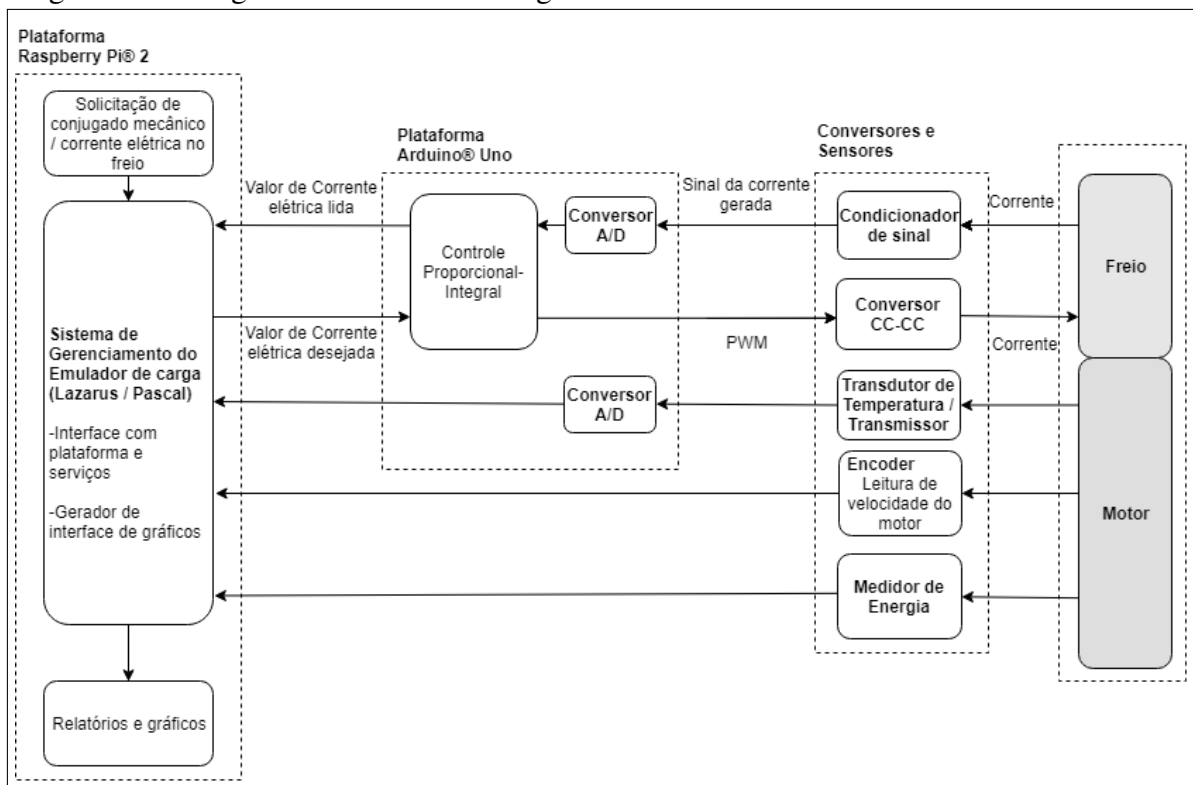
Fonte: adaptado de Weg (2008).

### 3 DETALHAMENTO DO PROJETO EMULADOR DE CARGAS MECÂNICAS

A proposta do Emulador de Cargas Mecânicas (Figura 13) – o núcleo deste trabalho – numa abordagem inicial, é composta por três módulos listados abaixo:

- Módulo de controle, coleta de dados e gerenciamento
  - Item 3.1 Plataforma Raspberry Pi® II – Sistema de Emulador de Cargas (Lazarus®-Delphi®/Pascal®).
- Módulo de monitoramento ativo do freio eletromagnético e motor
  - Item 3.2 Plataforma *Hardware/Software* Arduino® Uno.
- Detalhamento conversores e sensores
  - Item 3.3 Conjunto de conversores e sensores.

Figura 13 – Diagrama Emulador de Cargas Mecânicas



Fonte: o autor.

#### 3.1 Plataforma Raspberry® Pi II – Sistema de Emulador de Cargas (Lazarus®-Delphi®/Pascal®)

Funções:

- Gerenciamento do conjugado mecânico – torque / corrente e velocidade.
- Monitoramento e teste com modelos de cargas constantes, desenvolvidas por este



projeto: cargas quadráticas, lineares e hiperbólicas.

- Coleta e processamento dos dados históricos produzidos pelas simulações e testes realizados pelo sistema freio-motor.
- Simulação, geração de gráficos e relatorias do comportamento do sistema freio-motor durante os experimentos realizados.

### 3.2 Plataforma *Hardware/Software* Arduino Uno

Funções de interação com o sistema freio-motor.

- Realiza o controle Proporcional-integral (PI) da corrente elétrica do freio.
  - Arduino<sup>®</sup> Uno programado para controle de corrente de acionamento do freio com *Pulse Width Modulation* (PWM) em 10kHz. O controle de corrente é proporcional-integral e foi ajustado pelo método *Modulus Optimum* que otimiza as variáveis de controle para que o sistema siga a referência suportando pequenos tempos de atraso (CVEJN, 2011).
- Monitoramento e conversação analógica/digital da corrente elétrica do freio.
- Coleta das temperaturas geradas pelo sistema freio-motor.

#### 3.2.1 Controle Proporcional-Integral

O controle proporcional integral é uma técnica que permite ajustar as divergências registradas durante os processos por meio de realimentação visando aproximar o resultado do valor desejado (vide detalhamento Apêndice C).

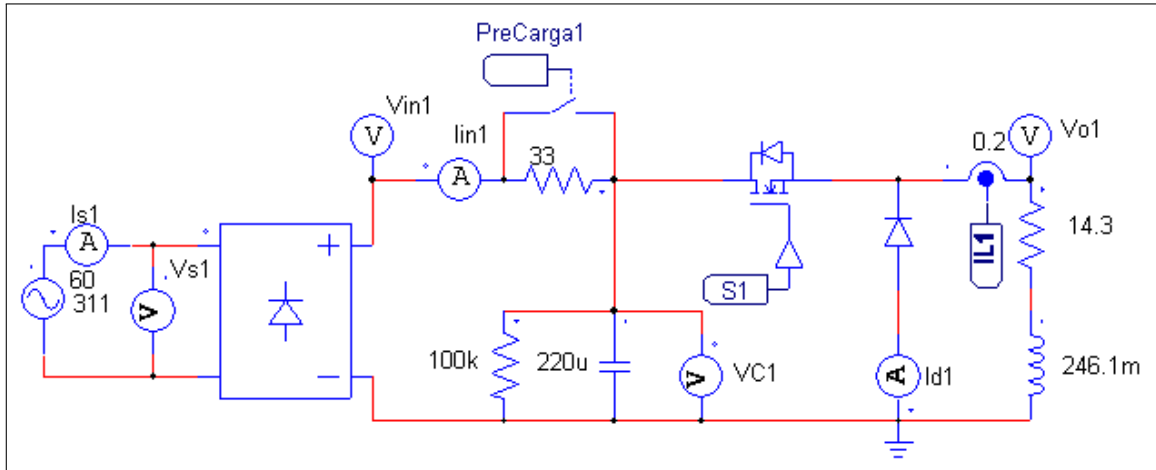
### 3.3 Conversores e Sensores

Mensuragem de todas as grandezas elétricas, temperaturas e cargas mecânicas do sistema freio-motor.

#### 3.3.1 Conversor CC-CC - tipo *Chopper abaixador de tensão*

O conversor utilizado é do tipo *Chopper* que reduz a tensão de saída em relação à tensão de entrada proporcionalmente ao ciclo de trabalho da chave. Como a carga tem uma indutância significativa, a corrente elétrica se mantém com baixa oscilação a cada chaveamento do *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) (HART, 2011; BASCOPÉ; PERIN, 1997).

Figura 14 – Esquema do conversor *Chopper* utilizado



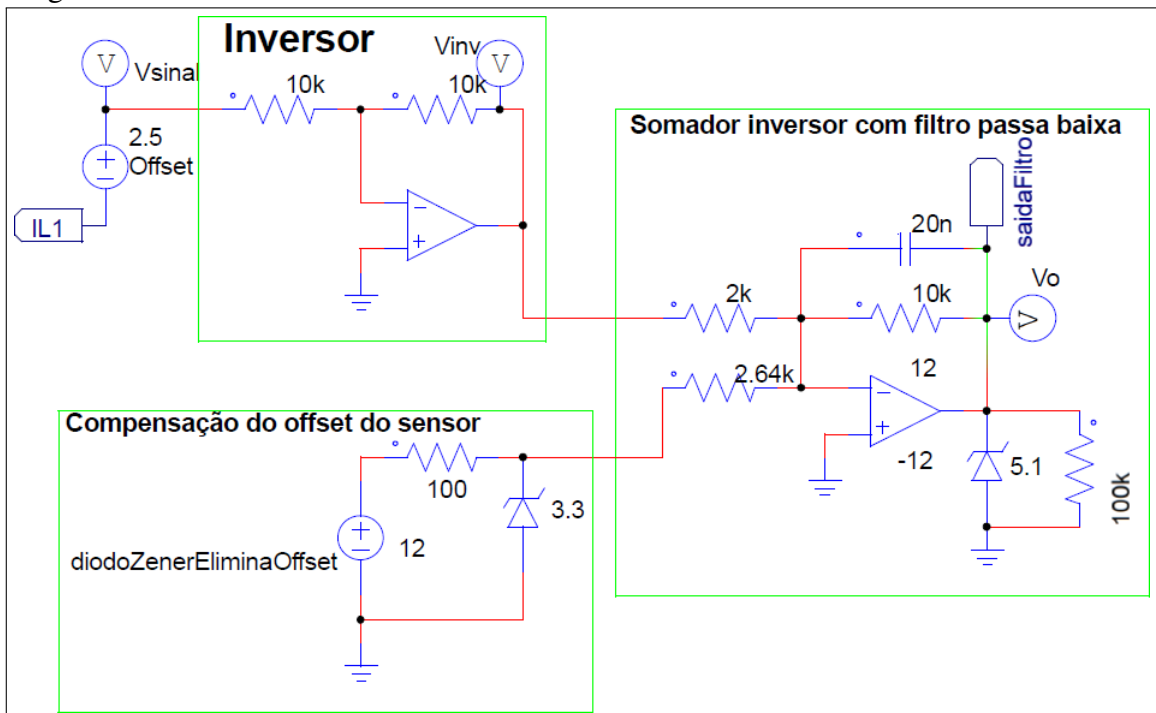
Fonte: o autor.

Nota: Detalhes do circuito de Pré-Carga e *Snubber* no Apêndice D

### 3.3.2 Condicionador do sinal de corrente elétrica com sensor de efeito Hall

O sensor de corrente utilizado é de efeito Hall através da corrente que passa pelo sensor um campo magnético é gerado e convertido em tensão. A Figura 15 mostra um esquema do sinal sendo condicionado.

Figura 15 – Condicionamento do sinal do sensor de corrente



Fonte: o autor.

Inicialmente esse sinal é invertido por circuito inversor com um amplificador opera-

cional. Em seguida o sinal passa por um circuito somador integrador inversor o qual amplifica o sinal para uma escala de 1A para 1V elimina o deslocamento de tensão do sensor, depois a parte integradora faz a filtragem do sinal eliminando as altas frequências corte próximo a 5kHz, como mostra a Equação 3.1, e aplicando um ganho de -5, seguindo a Equação 3.2 (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2005).

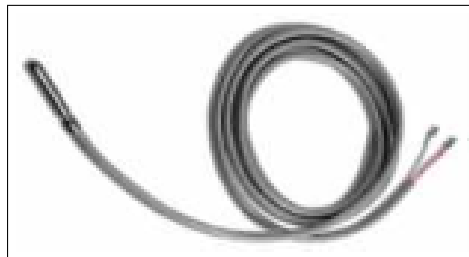
$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{i2} \cdot C_i} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} = 4822,9 \text{ [Hz]} \quad (3.1)$$

$$G_i = -\frac{R_{i2}}{R_{i1}} = -\frac{10 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} = -5 \quad (3.2)$$

### 3.3.3 *Transdutor de temperatura*

A medição é feita por meio de um transdutor de temperatura PT-100 (Figura 16) que altera o seu valor resistivo com a variação de temperatura. A faixa de medição deste sensor vai de 0°C a 600°C.

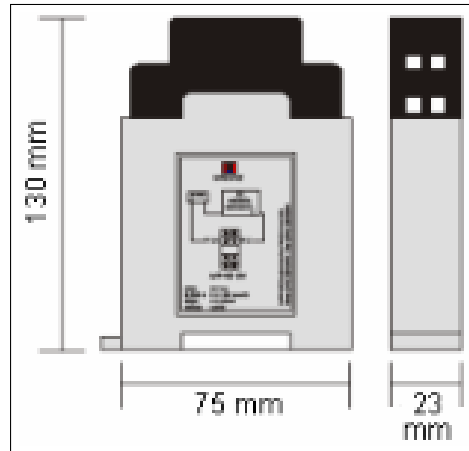
Figura 16 – Transdutor de temperatura PT-100



Fonte: adaptado de (SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006).

O sensor de temperatura PT-100 é conectado a um transmissor, MTT-101 da MARKARE, que condiciona o sinal. Este transmissor funciona com tensão de 12V a 36V gerando um sinal de corrente de 4mA a 20mA. O sinal obtido é transformado em tensão através de resistência para a leitura de uma porta analógica do Arduino® Uno. A Figura 17.

Figura 17 – Transmissor MARKARE MTT-101



Fonte: adaptado de (SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006).

### 3.3.4 Encoder

A velocidade é medida através do transdutor de velocidade (*encoder*) RB6044 da IFM Electronic<sup>®</sup> (Figura 18) que incrementa 5 pulsos por volta. Esse *encoder* incremental opera com a tensão de 10V a 30V e corrente de 150mA. A velocidade máxima de rotação permitida é de 10000rpm. Para prevenir a queima da porta do microcontrolador foi utilizado um optoacoplador (componente que transmite sinal entre dois circuitos através da luz isolando-os eletricamente) conectado entre o RB6044 e a porta de entrada do Raspberry Pi<sup>®</sup> II. A tensão do sinal é condicionado para 3,3V.

Figura 18 – Encoder RB6044



Fonte: (PEREIRA, 2006).

### 3.3.5 Medidor de energia

O medidor de energia PowerLogic<sup>®</sup> PM850, produzido pela Schneider Electric<sup>®</sup>, mede a energia consumida, registra tensões de até 600V, corrente de 5A e potências das três fases com desvio máximo de 0,1%. Detecta distorções harmônicas de até 63<sup>o</sup> ordem. Possui barramento RS485. Figura 19.

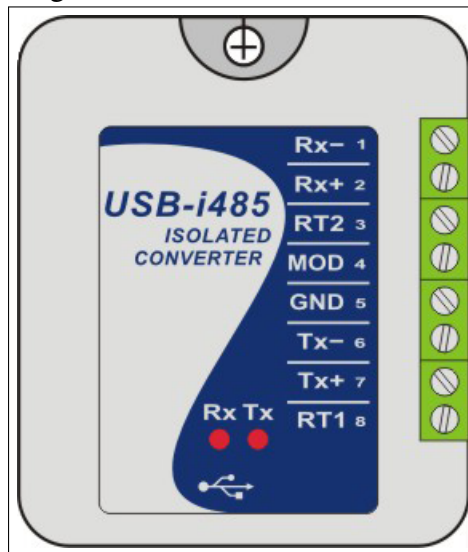
Figura 19 – Medidor de energia PowerLogic<sup>®</sup> PM850



Fonte: (PEREIRA, 2006).

O conversor, da fabricante Novus<sup>®</sup>, converte o barramento RS485 para serial, comunicando-se com o Raspberry Pi<sup>®</sup> II através do USB-i485, além oferecer proteção contra picos, surtos e erros de ligação.

Figura 20 – Conversor USB-i485



Fonte: (PEREIRA, 2006).

### 3.4 Fluxogramas de dados do Emulador de Cargas Mecânicas

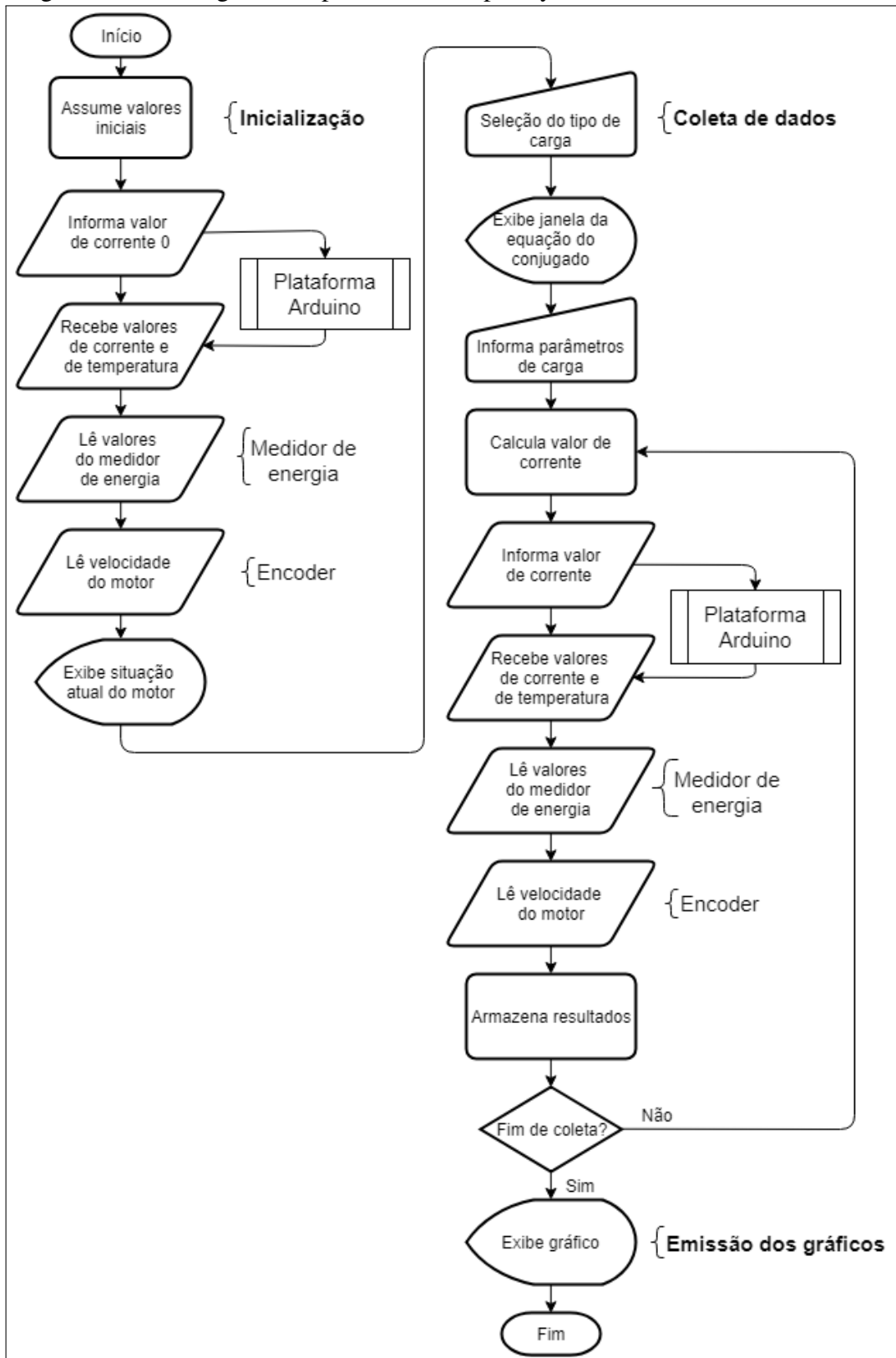
Os dois fluxogramas a seguir, Fluxograma da plataforma Raspberry Pi<sup>®</sup> (Figura 21) e Fluxograma da plataforma Arduino<sup>®</sup> (Figura 22) explicitam o trânsito dos dados pelo sistema controlador do Emulador de Cargas Mecânicas. Detalhando como acontece o processamento, troca e coleta de dados entre as plataformas Raspberry Pi<sup>®</sup>, Arduino<sup>®</sup> e todos os conversores e sensores utilizados na proposta de trabalho.

#### 3.4.1 Fluxograma da plataforma Raspberry Pi

O processamento na plataforma Raspberry Pi<sup>®</sup> tem três etapas:

- Inicialização, quando são assumidos os valores iniciais do teste.
- Coleta de dados para a elaboração do gráfico.
- Emissão dos gráficos após o término da coleta.

Figura 21 – Fluxograma da plataforma Raspberry



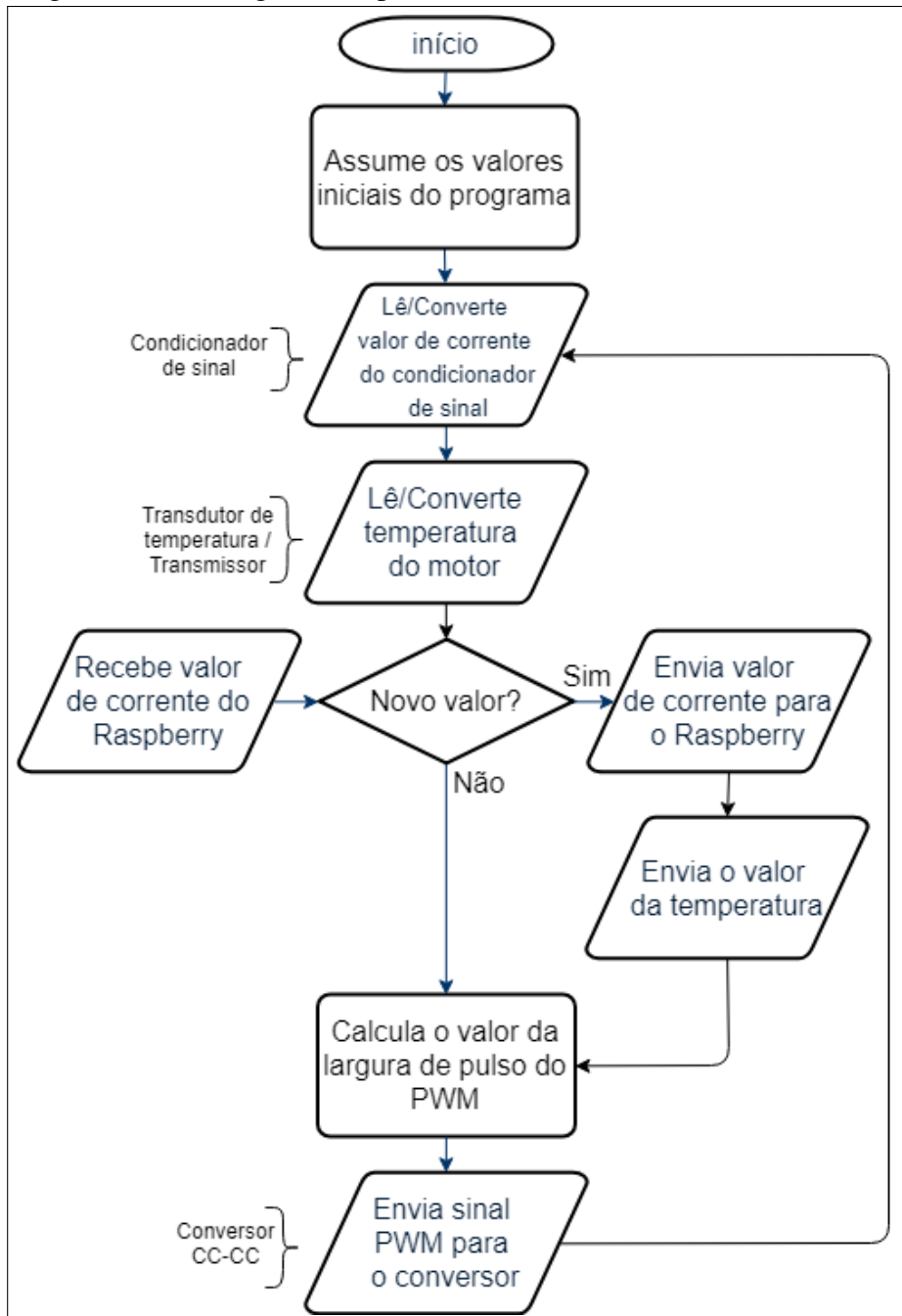
Fonte: o autor.

Nota: Código no Apêndice A

### 3.4.2 Fluxograma da plataforma Arduino

A plataforma Arduino<sup>®</sup> é subsidiária da plataforma Raspberry Pi<sup>®</sup>, e tem como função o controle da corrente de fornecida ao freio eletromagnético e a coleta e conversão da temperatura do motor.

Figura 22 – Fluxograma da plataforma Arduino



Fonte: o autor.

Nota: Código no Apêndice B



### 3.5 Sistema Gráfico do Emulador de Cargas Mecânicas

#### 3.5.1 Ambiente e plataforma de processamento

Para a elaboração da interface gráfica foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado Lazarus<sup>®</sup> (em linguagem Free Pascal<sup>®</sup>), uma solução *open source* que disponibiliza interface gráfica variada e amigável, com blocos de desenvolvimento pré programados (LAZARUS, 2017).

A plataforma Lazarus<sup>®</sup> opera em múltiplas sistemas operacionais, tais como Windows<sup>®</sup>, MacOS<sup>®</sup>, Linux<sup>®</sup> e Raspberry Pi<sup>®</sup>. Para o desenvolvimento do Sistema do Emulador de Cargas Mecânicas foi utilizado o Raspberry Pi<sup>®</sup> (LAZARUS, 2017).

A interação com o sistema Emulador Cargas Mecânicas acontece através de janelas ativas de conversação que permitem a entrada dos dados do ensaio desejado e apresentam os conjuntos de dados resultantes.

Entradas:

- Tipos de carga.
- Valores dos parâmetros dos carregamentos.
- Valor de corrente de acionamento do freio.

Resultados:

- Medições das tensões e das correntes elétricas de cada fase.
- Potências ativa, reativa e aparente.
- Temperatura.
- Velocidade de rotação.
- Conjugado estimado.
- Escorregamento estimado.

#### 3.5.2 Detalhamento das telas de processamentos

Toda interação com o Sistema Emulador Cargas Mecânicas acontece através de telas de conversação ativas que permitem a entrada dos dados do ensaio e oferecem como resultado os dados processados (Figura 23).

Nas telas do sistema as informações foram dispostas em seis blocos, dois de entrada e quatro de saída.

Entradas:

1e - Escolha do tipos de carga (constante, linear, quadrática e hiperbólica).

2e - Equações correspondentes à carga.

Saídas:

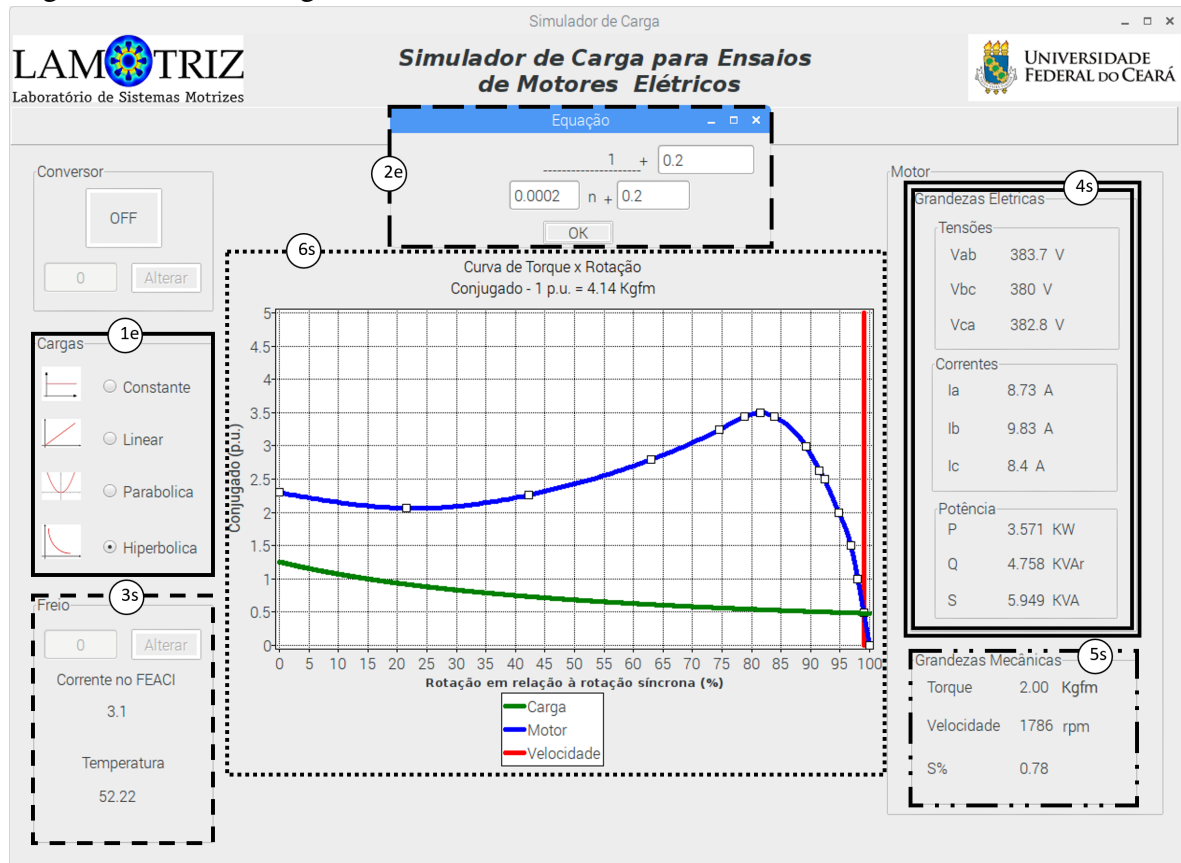
3s - Valor de corrente de acionamento do freio e da temperatura do motor.

4s - Grandezas elétricas (tensões e correntes de cada fase; potências ativa, reativa e aparente).

5s - Grandezas mecânicas (conjugado, velocidade do motor e escorregamento).

6s - Plotagem de gráfico do ensaio.

Figura 23 – Interface gráfica



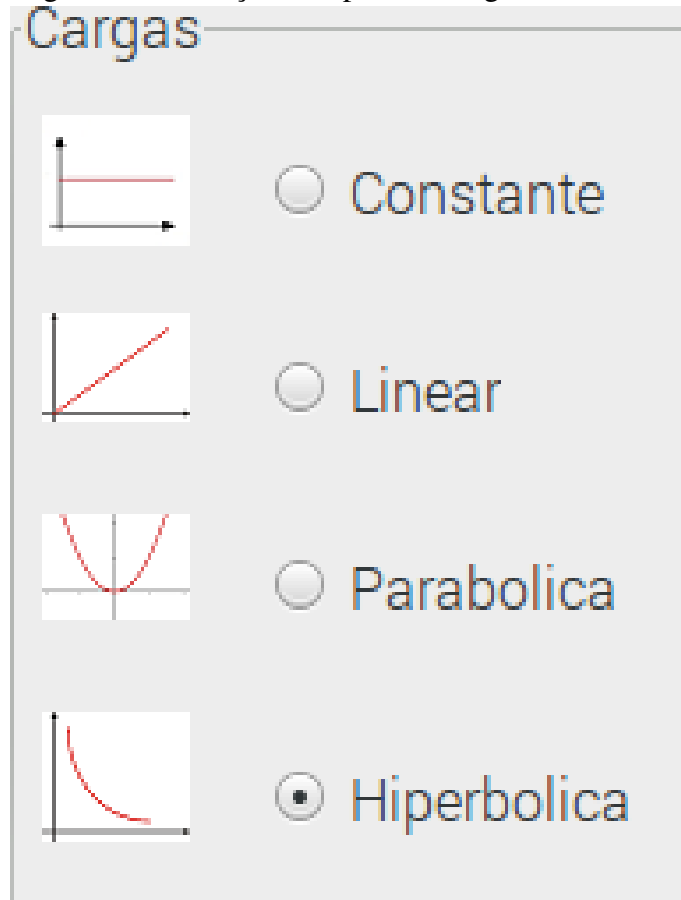
Fonte: o autor.

### 3.5.3 Detalhamento dos blocos de informação

#### 1e - Escolha do tipos de carga

O tipo de carga é uma janela de múltipla escolha com quatro alternativas: constante, linear parabólica ou hiperbólica. Para seleção basta marcar uma das opções, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Seleção de tipo de carregamento

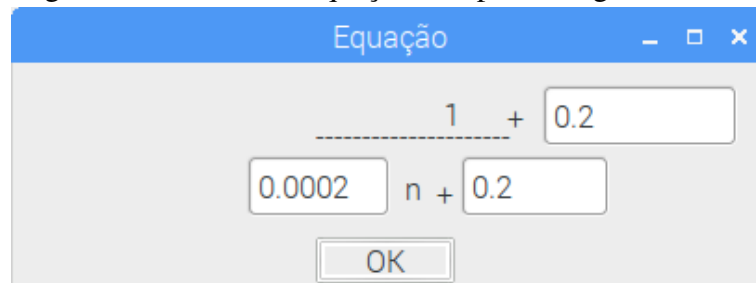


Fonte: o autor.

## 2e - Equações de carregamento

Dependendo da escolha de '1e' a janela apresentará a equação correspondente ao tipo de carga, possibilitando que sejam preenchidos os valores desejados. O carregamento será em unidades de kgfm.

Figura 25 – Janela de equação do tipo de carga



Fonte: o autor.

### 3s - Corrente de acionamento do freio e temperatura do motor

Com base na velocidade do motor e na equação '2e', neste bloco são apresentadas as informações referentes à corrente elétrica aplicada ao freio e à temperatura coletada no motor.

**Importante:** quando necessário é possível escolher o valor de corrente elétrica do ensaio na caixa de texto deste bloco.

Figura 26 – Bloco de corrente e temperatura

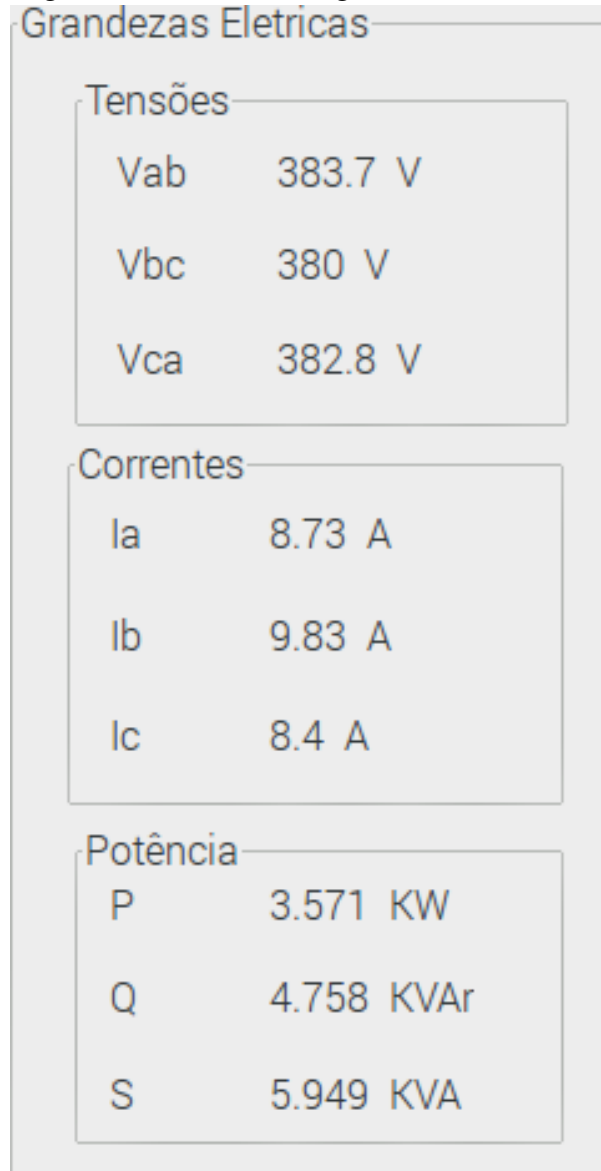
The image shows a software interface window titled "Freio". At the top left, there is a text input field containing the number "0". To its right is a button labeled "Alterar". Below these elements, the text "Corrente no FEACI" is displayed, followed by the numerical value "3.1". Further down, the text "Temperatura" is shown, followed by the numerical value "52.22".

Fonte: o autor.

#### 4s - Grandezas elétricas

Neste bloco de informações são exibidas as leituras das medidas de tensão, corrente e potências elétricas do motor, coletadas pelo multimedidor de energia *PowerLogic*® PM850.

Figura 27 – Medidas de grandezas elétricas



Fonte: o autor.

#### 5s - Grandezas mecânicas

As grandezas: conjugado, escorregamento e velocidade são mostradas no bloco de 'Grandezas Mecânicas' na Figura 28. O torque é estimado a partir da curva do fabricante de conjugado por velocidade e seu valor é apresentado em quilograma força metro (kgfm). Detalhado no Apêndice E.

Figura 28 – Grandezas Mecânicas

Grandezas Mecânicas		
Torque	2.00	Kgfm
Velocidade	1786	rpm
S%	0.78	

Fonte: o autor.

### 6s - Plotagem de gráfico do ensaio

O bloco central da tela exibe um gráfico dinâmico com três curvas plotadas com base na equação solicitada e nos dados coletados e calculados a partir dos sensores do sistema freio-motor.

O eixo das abcissas registra, em porcentual, a relação entre a velocidade do eixo do motor e a velocidade síncrona.

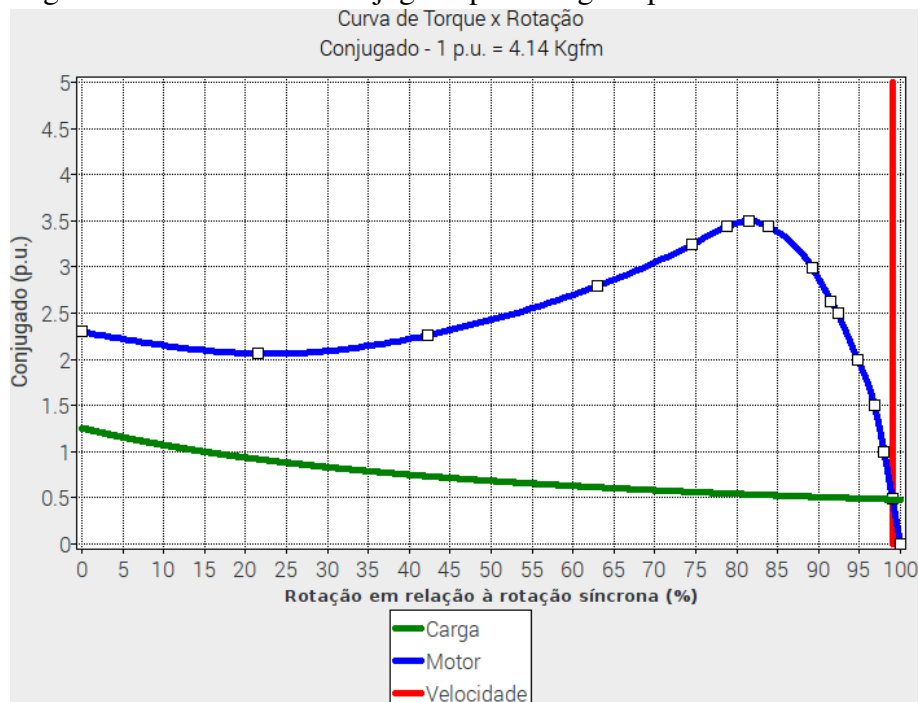
O eixo das ordenadas aponta o torque, em valor p.u.

Linha verde - perfil do tipo de carga selecionado (blocos '1e' e '2e').

Linha azul - perfil do conjugado do motor em função da velocidade.

Linha vermelha - registra a velocidade do motor.

Figura 29 – Gráfico de Conjugado para Carga Hiperbólica



Fonte: o autor.

## 4 ENSAIOS E TESTES REALIZADOS

### 4.1 Ensaio de carga constantes

Devido às características dos ensaios e problemas detectados na configuração da bancada, tais como a ausência de torquímetro e inconsistência na implementação e leitura do *encoder* (medição de velocidades) os esforços mais produtivos foram concentrados nos ensaios de carga constante em regime.

Em consequência foram privilegiados os módulos de aplicação de correntes elétricas constantes no freio e intensificadas as análises das quatro grandezas (corrente elétrica média entre fases, potência ativa, fator de potência e velocidades) coletadas nestes ensaios.

Na Tabela 5 (através da coluna 'corrente elétrica média entre fases') foi acrescentada a coluna de torque conforme as informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5 – Dados reduzidos das variações de corrente do freio

$I_{Freio}$ [A]	$I_{med}$ [A]	Potência [kW]	Fator de potência	Velocidade [rpm]	Torque [kgfm]
0,5	7,16	0,81	0,17	1798,6	1,9869
1,0	7,21	1,04	0,22	1798,3	2,0007
1,5	7,32	1,42	0,29	1796,7	2,0320
2,0	7,62	1,94	0,38	1793,3	2,1247
2,5	8,05	2,61	0,49	1791,6	2,2336
3,0	8,75	3,41	0,59	1788,3	2,4314
3,5	9,74	4,34	0,68	1783,8	2,6965
4,0	10,73	5,18	0,73	1779,7	2,9581
4,5	12,15	6,26	0,79	1775,2	3,3462

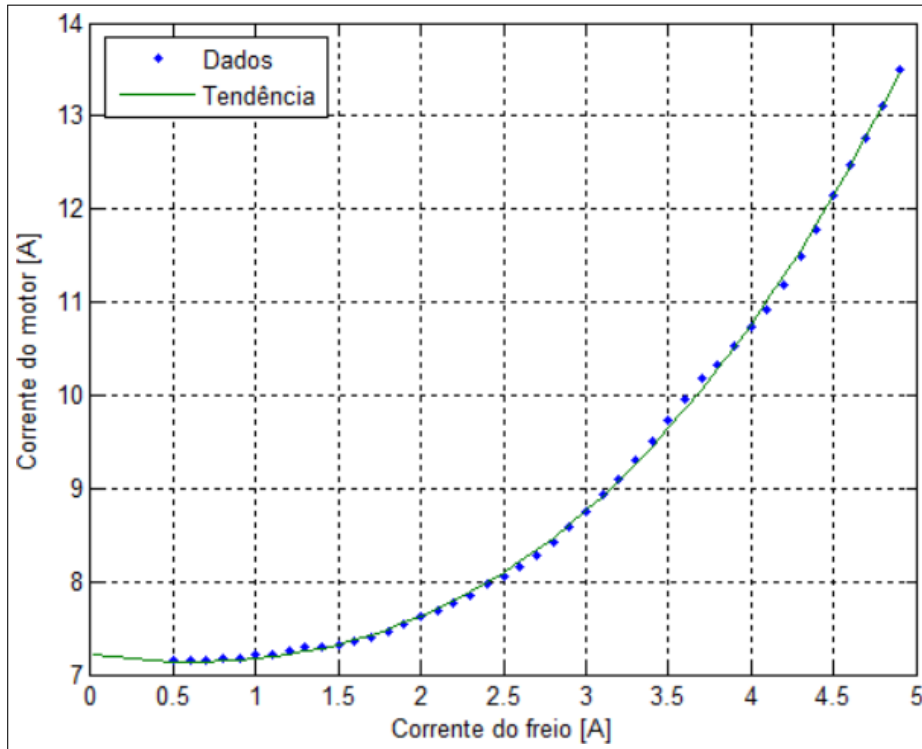
Fonte: o autor.

Nota: Vide Tabela 6 estendida no Apêndice E

Utilizando os dados coletados (Tabela 6 Apêndice E) foram plotados quatro gráficos que no eixo das ordenadas contém os valores coletados nos ensaios e no eixo das abscissas as correntes aplicadas no freio eletromagnético (Figuras 30, 31, 32 e 33).

#### 4.1.1 Correlação entre corrente média consumida pelo motor e a corrente aplicada no freio

Figura 30 – Corrente do Motor pela Corrente do Freio

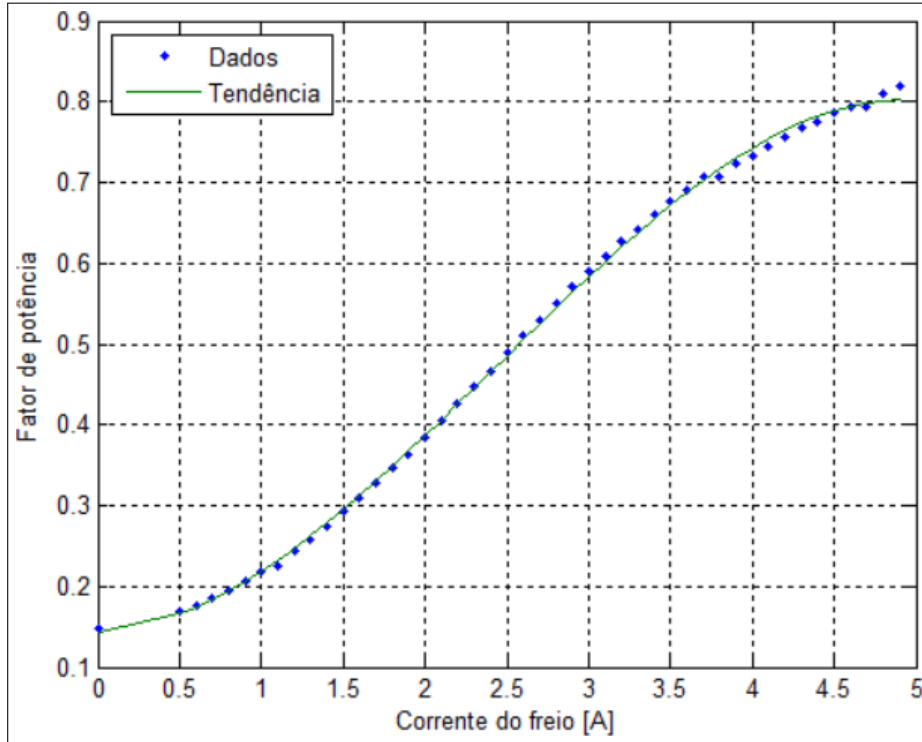


Fonte: o autor.



#### 4.1.2 Correlação do fator de potência e a corrente aplicada no freio

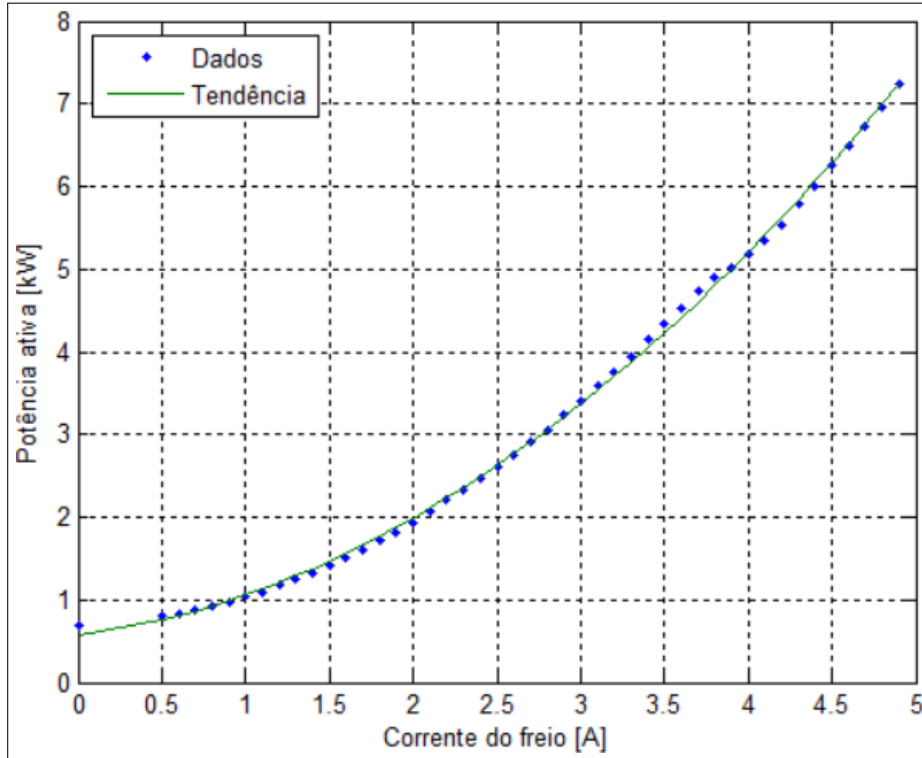
Figura 31 – Fator de Potência pela Corrente do Freio



Fonte: o autor.

#### 4.1.3 Correlação da potência ativa consumida pelo motor e a corrente aplicada no Freio

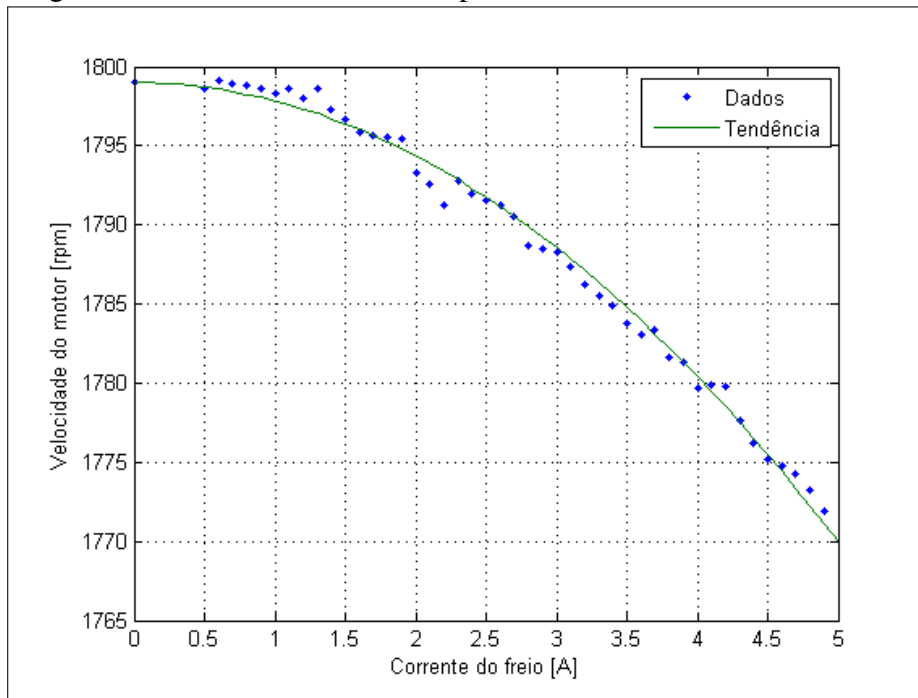
Figura 32 – Potência pela Corrente do freio



Fonte: o autor.

#### 4.1.4 Correlação da velocidade do motor e a corrente aplicada no freio

Figura 33 – Velocidade do motor pela Corrente do Freio



Fonte: o autor.

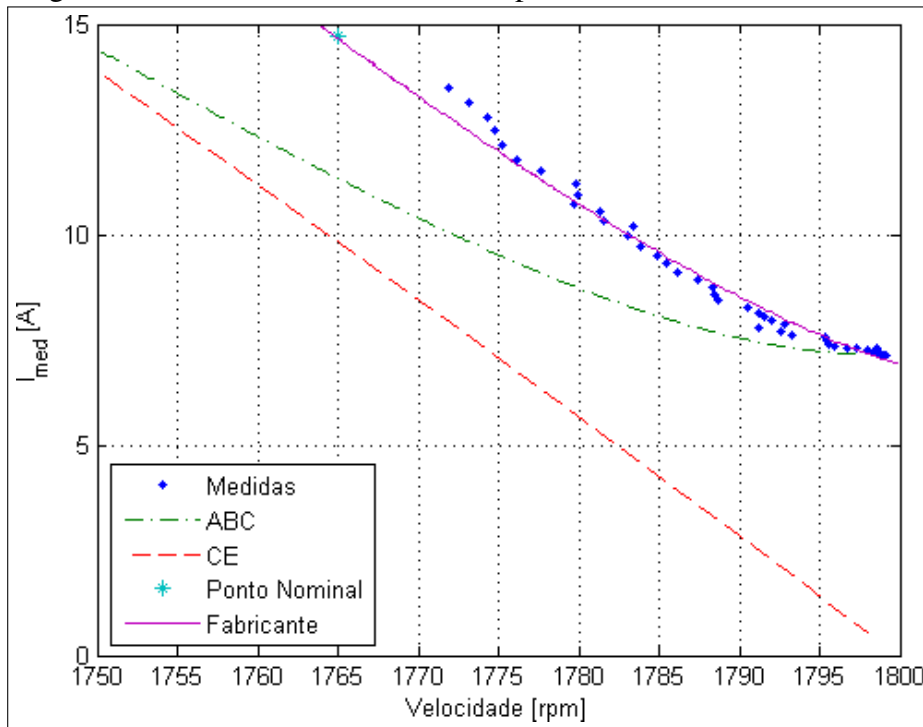
#### 4.2 Comparativo entre modelo de Circuito Equivalente, modelo ABC, dados do fabricante e dados coletados

No gráfico seguinte são comparados os modelos clássicos das metodologias utilizadas nas análises de desempenho de motores com os dados coletados durante os ensaios do projeto Emulador de Cargas Mecânicas.

O gráfico (Figura 34) apresenta a comparação de quatro curvas:

- linha pontilhada - curva da corrente/velocidade do sistema freio-motor coletada durante o ensaio de carga constante
- linha contínua - curva especificada pelo fabricante
- linha tracejada - modelo circuito equivalente proposto por Fitzgerald *et al.* (2006)
- linha traço-ponto - modelo ABC proposto por Barbi (1985)

Figura 34 – Corrente média do motor pela velocidade do motor



Fonte: o autor.

#### Comentários e Conclusões:

- A curva de dados coletados (pontilhada) é irregular, porém mostra uma tendência de aproximação da curva do fabricante (contínua). Portanto pode ser avaliada positivamente considerando os resultados esperados.
- Cotejando a curva de dados coletados (pontilhada) com a curva do modelo ABC (traço-ponto), observa-se uma proximidade nos valores de cargas menores e uma progressiva divergência com valores cargas maiores.
- A curva de dados coletados (pontilhada) em relação ao modelo circuito equivalente (tracejada), apesar de apresentarem o mesmo sentido e tendência, divergem bastante no início e fim da coleta.

### 4.3 Ensaios de cargas variáveis: linear, parabólica e hiperbólica

Além dos detalhados testes com carga constante, descritos acima, também foram realizados testes aplicando-se as outras três modalidades de cargas variáveis: linear, parabólica e hiperbólica. Porém, em virtude dos problemas encontrados nas leituras do *encoder*, os resultados foram apenas parcialmente aproveitáveis.

As três próximas figuras (Figuras 35, 36 e 37) mostram os resultados dos testes com

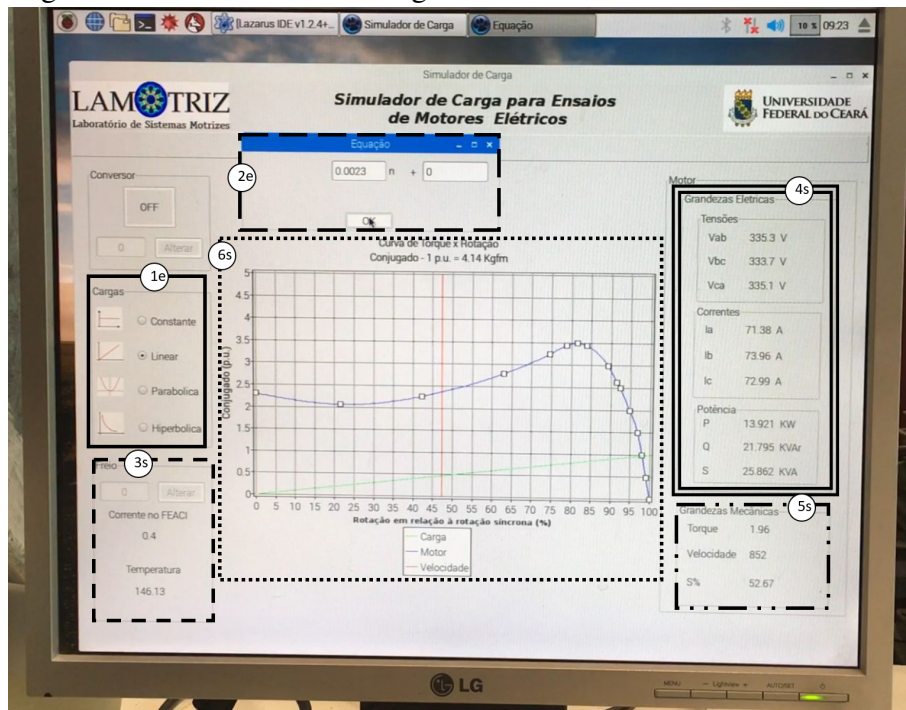
cargas variáveis linear, parabólica e hiperbólica e as inconsistências encontradas.

### 4.3.1 Ensaio com carga Linear

No ensaio foi utilizada a seguinte equação linear:

$$T = (k_c \cdot n) + T_o \quad (4.1)$$

Figura 35 – foto do teste de carga linear



Fonte: o autor.

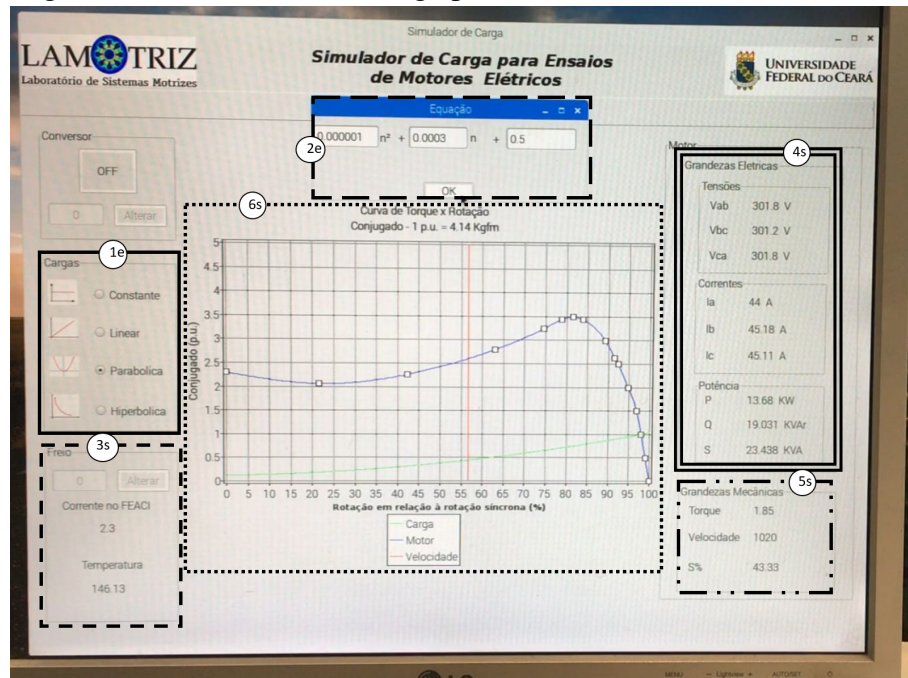
Nota: foto do monitor.

### 4.3.2 Ensaio com carga parabólica

No ensaio foi utilizada a seguinte equação parabólico:

$$T = (k_{c1} \cdot n^2) + (k_{c2} \cdot n) + T_o \quad (4.2)$$

Figura 36 – foto do teste de carga parabólico



Fonte: o autor.

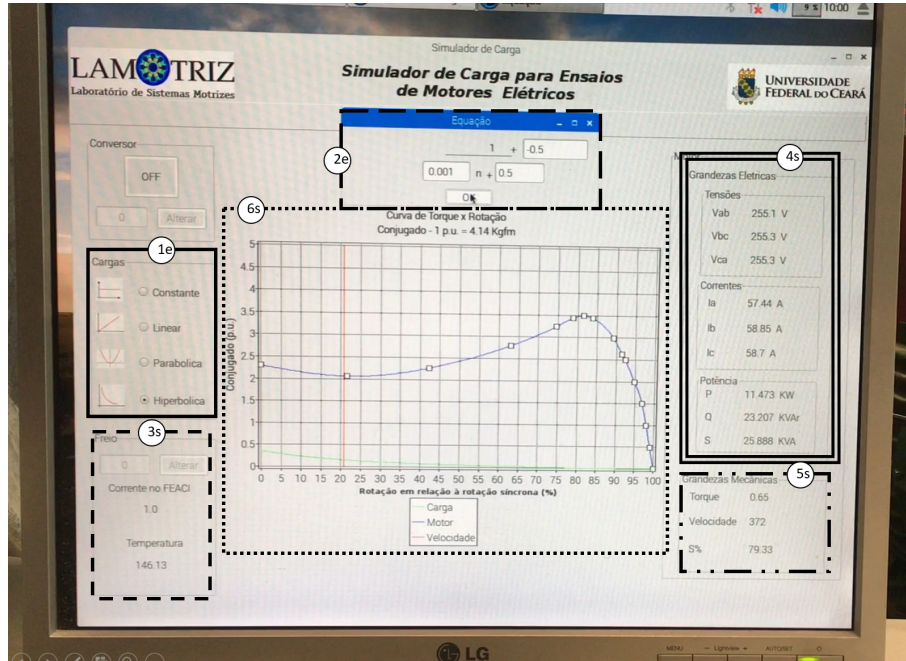
Nota: foto do monitor.

### 4.3.3 Ensaio com carga hiperbólica

No ensaio foi utilizada a seguinte equação parabólico:

$$T = \left( \frac{1}{k_{c1} \cdot n + k_{c2}} \right) + T_o \quad (4.3)$$

Figura 37 – foto do teste de carga hiperbólico



Fonte: o autor.

Nota: foto do monitor.

#### **4.3.4 Avaliação e comentários - incongruência dos testes com cargas variáveis (linear, parabólica e hiperbólica)**

Durante todo o transcorrer dos ensaios com cargas variáveis os dados dos blocos de saída 1e e 4s (vide Seção 3.5) estavam consistentes com os valores esperados nos testes. Entretanto, os blocos de saída 'Corrente de acionamento do freio e temperatura do motor' e 'Grandezas Mecânicas', calculados a partir de leituras do *encoder*, apresentavam resultados inconsistentes. Exibiam valores erráticos com atrasos estimados de quatro segundos.

Para o processo de obtenção dos valores do *encoder* foi utilizado o método de média móvel, Ou seja, acumula-se um conjunto de amostras (foram usados 10 amostras) e, efetuada a coleta, apura-se o valor médio da coleção. A vantagem deste artifício é atenuar os efeitos dos valores discrepantes.

A avaliação final é que as irregularidades encontradas decorriam de duas possíveis causas, uma lógica e outra física, ou a somas das duas.

##### **Hipótese da causa Lógica**

- Defasagem da temporização das rotinas de interrupção do plataforma Raspberry Pi<sup>®</sup> com os tempos de pulsos do dispositivo RB6044.
- Número elevado de amostras para cálculo da média móvel da velocidade do motor.

##### **Hipótese da causa Física**

- Falhas no acoplamento do *encoder* no motor
- Efeito da vibração do sistema freio-motor.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos sobre emulações e simulações de cargas mecânicas não é um tópico incomum no campo da Engenharia Elétrica, em várias situações outros pesquisadores mostraram interesse pelo problema. Silva (2015) da Universidade Federal de Uberlândia e Denardi Jr. (2013) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná visitaram o assunto nos últimos anos. Em ambos os casos foi utilizada uma máquina de corrente contínua como gerador para controlar a carga mecânica aplicada ao motor.

Na retomada do tema pelo projeto Emulador de Cargas Mecânicas, encampado pelo LAMOTRIZ da Universidade Federal do Ceará, optou-se por utilizar como agente mediador um freio eletromagnético capaz de emular e analisar um motor em várias situações de trabalho. Um forte motivador da escolha desta nova abordagem do problema foi a disponibilidade imediata de uma bancada já operacional, configurada pelo projeto de freio eletromagnético Pereira (2006) desenvolvido nesta instituição.

Para coletar e analisar os dados sobre o comportamento das grandezas eletromecânicas do motor sob a ação do freio eletromagnético foi desenvolvido um Sistema de Emulação de Carga que possibilita, para cada ensaio, a definição do tipo de carga desejada (constante, linear, parabólica e hiperbólica) e a entrada dos parâmetros das equações correspondentes.

O Sistema de Emulação de Carga foi desenvolvido em duas plataformas: (a) Raspberry Pi<sup>®</sup> com a função de coletar, monitorar e gerenciar os dados e condições dos ensaios e simulações e (b) Arduino<sup>®</sup> responsável pelos controles e conversões das correntes elétricas e temperaturas do motor.

Para a integração com as plataformas Raspberry Pi<sup>®</sup> e Arduino<sup>®</sup> foi desenvolvido um Sistema de Interface Gráfica que permite o monitoramento dinâmico dos testes e ensaios realizados, através de blocos de informações sobre grandezas eletromecânicas e plotagem de gráficos.

Ao longo do projeto foram desenvolvidos incontáveis testes e ensaios experimentando todas as quatro modalidades de carga, com as variações e situações mais praticadas pelas indústrias.

Os resultados mais consistentes e proveitosos das baterias de testes foram registrados nos ensaios com cargas constantes, nestes conjuntos de ensaios todos os dados exibidos pelo sistema gráfico de monitoramento apresentavam comportamentos e números consistentes e coerentes com aqueles esperados nas propostas de avaliação.

Nos ensaios realizados com cargas variáveis (linear, parabólico e hiperbólico), o sistema gráfico de monitoramento denunciava inconsistência em dois blocos de informações: grandezas mecânicas (torque, velocidade e escorregamento) e corrente do freio/temperatura. As discrepâncias eram causadas por falhas nas leituras das velocidades do motor provocadas, conforme repetidas análises, por defasagem entre os tempos de processamento e atrasos nas leituras do *encoder*.

A bancada utilizada nos ensaios não dispunha de torquímetro, assim, nos resultados dos testes com cargas variáveis não podiam ser medidos com precisão. Para contornar as inconsistências detectadas nas leituras dinâmicas da velocidade foram utilizadas tabelas de amostras de velocidades coletadas durante os testes e, através da conciliação com a documentação oficial do fabricante, foram estimados os torques correspondentes.

Como sugestão para uma eventual retomada futura deste problema será importante incorporar um torquímetro à bancada e - para dupla garantia - desenvolver um módulo exclusivo para a leitura da velocidade, função que poderia ser implementada numa plataforma Arduino® dedicada.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 3. ed. São Paulo, SP: McGraw Hill, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383-1**: Máquinas elétricas girantes parte 1: Motores de indução trifásicos - ensaios. Rio de Janeiro, 2002. 3 p.
- BARBI, I. **Teoria Fundamental do Motor de Indução**. Florianópolis, SC: Editora UFSC, 1985. Disponível em: <<http://ivobarbi.com/novo/wp-content/uploads/2015/07/TeoriaFundamentaldoMotordeInducao.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2015.
- BARBI, I. **Projetos de Fontes Chaveadas**. Florianópolis, SC: Autor, 2001.
- BASCOPE, R. P. T.; PERIN, A. J. **O Transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de potência**. 1. ed. Florianópolis, SC: Sagra Luzzatto, 1997.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos**. 8. ed. São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, 2005.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre, RS: The MacGraw-Hill Companies and AMGH Editora Ltda., 2013.
- CVEJN, J. *PI/PID Controller Design for FOPDT Plants Based on the Modulus Optimum Criterion*. **Carpathian Control Conference (ICCC)**, IEEE, Pardubice, Czech Republic, p. 60–65, 2011.
- DENARDI JR., C. **Sistema de Simulação de Cargas Mecânicas para Motor de Indução Acionado por Inversor de Frequência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2001.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese do ano base 2015**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2017.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Machinas elétricas**. 6. ed. New York, NY, Estados Unidos: The MacGraw-Hill Companies and AMGH Editora Ltda., 2006.
- HADADE NETO, A. **Técnicas Anti-windup em Estruturas de Controle PID, RST e GPC**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- HART, D. W. **Power Electronics**. 1st. ed. New York, NY, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2011.
- HLUCHAN, A.; PEREIRA, F. A.; SILVA, S. F. P. Simulação de cargas mecânicas para estudos de eficiência energética. XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2013. Disponível em: <[http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2013/ceel2013\\_053.pdf](http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2013/ceel2013_053.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2017.

JAHAN, S.; JESPERSEN, E.; MUKHERJEE, S.; KOVACEVIC, M.; ABDREYEVA, B.; BONINI, A.; CALDERON, C.; CAZABAT, C.; HSU, Y.-C.; LENGFELDER, C.; LUONGO, P.; MUKHOPADHYAY, T.; NAYYAR, S.; TAPIA, H.; JAHIC, A.; SENEVIRATNE, D.; HALL, J.; LUCIC, S.; OLDFIELD, J. O.; ORTUBIA, A.; MEND, S.; SHANAHAN, F. J.; THAN, M. W. Human development report 2016. United Nations Development Programme, 2016.

LAZARUS. **Home Page**. 2017. Disponível em: <<https://www.lazarus-ide.org/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS DE ENERGIA. **Portaria Interministerial número 1, 29 de julho de 2017**. Diário Oficial da União, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/Portaria+Interministerial+n+012017.pdf/943cf542-c207-4a8f-88ce-ff8223d949ad>>. Acesso em: 23 out. 2017.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2002.

OGATA. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, 2010.

PEREIRA, A. H. **Freio Eletromagnético Aplicado as Máquinas Elétricas de Indução para Ensaios em Carga Variável**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

RECH, C. **Eletrônica de Potência II - Capítulo 9**. 2009. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/yales/materiais/snubber.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

REZENDE, F. B. de. **Controlador digital de alto desempenho para um inversor senoidal com realimentação pela corrente do capacitor de saída usando um processador digital de sinais de 16 bits e ponto fixo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SCHMIDLIN JÚNIOR, C. R. **Operação do Conjunto Bomba Centrífuga, Motor de Indução Trifásico e Conversor de Frequência Visando a Eficiência no Uso da Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2006.

SEVERNS, R. **Design of Snubbers for Power Circuits**. 1999. Disponível em: <<http://www.cde.com/resources/technical-papers/design.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

SILVA, F. dos Santos e. **Bancada de Simulação de Cargas Mecânicas para Motor de Indução Trifásico Acionado por Conversor de Frequência**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

TRUXAL, J. G. **Automatic Feedback Control System Synthesis**. 1st. ed. New York, NY, Estados Unidos: McGraw Hill, 1955.

WEG. **Modulo1 Comandos e Proteção**. 2008. Disponível em: <[https://docente.ifsc.edu.br/rafael.grebogi/MaterialDidatico/Eletromecanica/EletricidadeIndustrial\(OLD\)/M1-ComandoeProteç~ao.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/rafael.grebogi/MaterialDidatico/Eletromecanica/EletricidadeIndustrial(OLD)/M1-ComandoeProteç~ao.pdf)>. Acesso em: 25 mai. 2017.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS DO SISTEMAS DO RASPBERRY® PI

## Código-fonte 1 – Código do sistema principal do Raspberry® Pi em Delphi®/Pascal®

```
1  unit principal;
2
3  {$mode objfpc}{$H+}
4
5  interface
6
7  uses
8      Classes, SysUtils, FileUtil, TAgGraph, TAsources, TAseries
9          , TAFuncSeries,
10     Forms, Controls, Graphics, Dialogs, ExtCtrls, StdCtrls,
11     Buttons, SdpoSerial,
12     SerialPort, ModBusSerial, PLCtagNumber, unix, baseunix,
13     process;
14
15 type
16     { TFrm_Principal }
17
18     TFrm_Principal = class(TForm)
19         BTN_Velocidade: TButton;
20         Button1: TButton;
21         Chart1: TChart;
22         C1LS1: TLineSeries;
23         C13SP: TCubicSplineSeries;
24         C1LS2Vel: TLineSeries;
25         Edt_SetPoint: TEdit;
26         Edt_freq: TEdit;
27         GB_Motor: TGroupBox;
28         GB_Power_Meter: TGroupBox;
```

```
27 GB_Velocidade: TGroupBox;
28 GB_Conversor: TGroupBox;
29 GB_Carga: TGroupBox;
30 GB_Freio: TGroupBox;
31 GB_Tensoes: TGroupBox;
32 GB_Correntes: TGroupBox;
33 GB_Potencia: TGroupBox;
34 IMG_Logo_Lamotriz: TImage;
35 IMG_Logo_UFC: TImage;
36 IMG_Cte: TImage;
37 IIMG_Linear: TImage;
38 IIMG_Parabolica: TImage;
39 IMG_Hiperbolica: TImage;
40 Label1: TLabel;
41 Label10: TLabel;
42 Label11: TLabel;
43 Label12: TLabel;
44 Label13: TLabel;
45 LB_Temp: TLabel;
46 Label2: TLabel;
47 Label3: TLabel;
48 Label4: TLabel;
49 Label5: TLabel;
50 Label6: TLabel;
51 Label7: TLabel;
52 Label8: TLabel;
53 Label9: TLabel;
54 LB_IA_Valor: TLabel;
55 LB_IB_Valor: TLabel;
56 LB_IC_Valor: TLabel;
57 LB_Ativa: TLabel;
58 LB_Reativa: TLabel;
```

```
59 LB_Aparente: TLabel;  
60 LB_Torque: TLabel;  
61 LB_Velocidade: TLabel;  
62 LB_Escorregamento: TLabel;  
63 LB_VA_Valor: TLabel;  
64 LB_VB_Valor: TLabel;  
65 LB_VC_Valor: TLabel;  
66 ListChartSource1: TListChartSource;  
67 Panel1: TPanel;  
68 Source_Vel: TListChartSource;  
69 Source_Txn: TListChartSource;  
70 LN_If: TLabel;  
71 LB_If: TLabel;  
72 LB_Titulo: TLabel;  
73 ModBusRTUDriver: TModBusRTUDriver;  
74 PLCTag: TPLCTagNumber;  
75 RB_Cte: TRadioButton;  
76 RB_Linear: TRadioButton;  
77 RB_Parabolica: TRadioButton;  
78 RB_Hiperbolica: TRadioButton;  
79 Serial232: TSdpoSerial;  
80 Serial485: TSerialPortDriver;  
81 TB_On_Off_CFW: TToggleBox;  
82 TimerPM: TTimer;  
83 Timer_W: TTimer;  
84  
85 procedure BTN_VelocidadeClick(Sender: TObject);  
86 procedure Button1Click(Sender: TObject);  
87 procedure FormActivate(Sender: TObject);  
88 procedure FormClose(Sender: TObject; var CloseAction:  
      TCloseAction);  
89 procedure FormCreate(Sender: TObject);
```

```
90
91     procedure RB_CteClick(Sender: TObject);
92     procedure RB_HiperbolicaClick(Sender: TObject);
93     procedure RB_LinearClick(Sender: TObject);
94     procedure RB_ParabolicaClick(Sender: TObject);
95     procedure Serial232RxData(Sender: TObject);
96     procedure TB_On_Off_CFWChange(Sender: TObject);
97     procedure TimerPMTimer(Sender: TObject);
98     procedure Timer_WTimer(Sender: TObject);
99
100 private
101     { private declarations }
102     memoria: array [1..9] of word;
103     PM: array [1..12] of double;
104     sincrona, temperatura: double;
105     recebe, velocidade: string;
106     arq: TextFile;
107
108 public
109     carga, cont_mm: word;
110     { public declarations }
111 end;
112
113
114 var
115     Frm_Principal: TFrm_Principal;
116     grc: longint;
117     aprocess: TProcess;
118     curva: array [1..2, 1..16] of double;
119
120     mm: array [1..10] of double;
121     t_i, t_temp, t_ref, cont_t, serial_info: word;
```



```
122     ifreio ,torqa ,torque ,a,b,c,d:double;
123 implementation
124
125 {$R *.lfm}
126 uses carga;
127 { TFrm_Principal }
128
129 procedure TFrm_Principal.TB_On_Off_CFWChange(Sender :
    TObject);
130 var
131     filedesc ,grc1:longint;
132     pino:PChar;
133 begin
134     if TB_On_Off_CFW.Checked=true then
135     begin
136         Edt_freq.Enabled:=true;
137         BTN_Velocidade.Enabled:=true;
138         TB_On_Off_CFW.Caption:= ON ;
139
140         //Liga inversor
141         filedesc:=fpopen( /sys/class/gpio/gpio20/value ,
            O_WrOnly);
142         pino:= 1 ;
143         grc1:=fpwrite(filedesc ,pino[0] ,1);
144         grc1:=fpclose(filedesc);
145
146     end
147     else
148     begin
149         Edt_freq.Enabled:=false;
150         BTN_Velocidade.Enabled:=false;
151         TB_On_Off_CFW.Caption:= OFF ;
```

```
152 //Desliga Inversor
153     filedesc:=fpopen( /sys/class/gpio/gpio20/value ,
154         0_WrOnly);
155     pino:= 0 ;
156     grc1:=fpwrite(filedesc ,pino [0] ,1);
157     grc1:=fpclose(filedesc);
158
159 end;
160
161 procedure TFrm_Principal.TimerPMTimer(Sender: TObject);
162 var
163     i:word;
164     vel,s,temp:double;
165 begin
166     vel:=0;
167     for i:=1 to 9 do
168     begin
169         PLCTag.MemAddress:=memoria[i];
170         // sleep(100);
171         PLCTag.Read;
172         // sleep(25);
173         PM[i]:=PLCTag.Value;
174     end;
175     LB_IA_Valor.Caption:=(floattostr(PM[1]/100)+ A );
176     LB_IB_Valor.Caption:=(floattostr(PM[2]/100)+ A );
177     LB_IC_Valor.Caption:=(floattostr(PM[3]/100)+ A );
178
179     LB_VA_Valor.Caption:=(floattostr(PM[4]/10)+ V );
180     LB_VB_Valor.Caption:=(floattostr(PM[5]/10)+ V );
181     LB_VC_Valor.Caption:=(floattostr(PM[6]/10)+ V );
182
```

```

183 LB_Ativa.Caption:=(floattostr(PM[7]*0.001)+ KW );
184 LB_Reativa.caption:=(floattostr(PM[8]*0.001)+ KVA );
185 LB_Aparente.Caption:=(floattostr(PM[9]*0.001)+ KVA );
186
187
188 // LB_Torque.Caption:=floattostr(sqrt((PM[7]*PM
189 [7]*0.0000000001)+(PM[8]*PM[8]*0.000001)));
190
191 //exibindo Velocidade e escorregamento
192 AssignFile(arq, /home/pi/Documents/TCC/velocidade/vel1.
193 txt );
194 Reset(arq);
195 Read(arq, velocidade);
196 CloseFile(arq);
197 vel:=strtofloatdef(velocidade,1798);
198 //Calculo do torque
199 case carga of
200 0: //constante
201 begin
202 end;
203 1: //Hiperbolica
204 begin
205 torque:=(1/(a*vel+b)) + c;
206 LB_Torque.Caption:= formatfloat( ###,###,##0.00 ,
207 torque);
208 if torque<>torqa then
209 begin
210 torque:=torque;
211 if torque=0 then
212 ifreio:=0
213 else

```

```
212         begin
213             ifreio := ((0.75*torque*torque+1.395*torque
214                 -1.453)/(torque-0.611));
215             ifreio := 218.5386*ifreio - 87.4154 ;
216         end;
217         Serial232.WriteData(floattostr(ifreio));
218     end;
219 2:           //Linear
220     begin
221
222         torque := a*vel+b;
223         LB_Torque.Caption := formatfloat( ###,###,##0.00 ,
224             torque);
225         if torque <> torqa then
226         begin
227             torqa := torque;
228             if torque = 0 then
229                 ifreio := 0
230             else
231                 begin
232                     ifreio := ((0.75*torque*torque+1.395*torque
233                         -1.453)/(torque-0.611));
234                     ifreio := 218.5386*ifreio - 87.4154 ;
235                 end;
236                 Serial232.WriteData(floattostr(ifreio));
237             end;
238         end;
239     end;
240 3:           //Parabolica
241     begin
242         torque := a*vel*vel+b*vel+c;
```

```
240     LB_Torque.Caption:= formatfloat( ###,###,##0.00 ,
        torque);
241     if torque<>torqa then
242     begin
243         torqa:=torque;
244         if torque=0 then
245             ifreio:=0
246         else
247             begin
248                 ifreio:=((0.75*torque*torque+1.395*torque
                    -1.453)/(torque-0.611));
249                 ifreio:=218.5386*ifreio-87.4154 ;
250             end;
251         Serial232.WriteData(floattostr(ifreio));
252     end;
253 end;
254
255     end;
256
257 //Calculo de If
258 cont_t:=cont_t+1;
259 case cont_t of
260 1:
261 begin
262     Timer_W.Enabled:=false;
263     Serial232.WriteData( 2 );
264     serial_info:=2;
265 end;
266 2:
267 begin
268     Timer_W.Enabled:=false;
269     Serial232.WriteData( 3 );
```

```
270         serial_info:=3;
271     end;
272     5:
273     begin
274         Timer_W.Enabled:=false;
275         Serial232.WriteData( 1 );
276         serial_info:=1;
277     end;
278     else
279         if ((cont_t>0) and(cont_t<5) )then
280             cont_t:=cont_t+1
281         else
282             cont_t:=0;
283         end;
284
285         s:=(1800-vel)/18;
286         vel:=vel/18;
287         LB_Velocidade.Caption:=velocidade;
288         Source_Vel.Clear;
289         C1LS2Vel.Clear;
290         Source_Vel.Add(vel,0);
291         Source_Vel.Add(vel,5);
292         C1LS2Vel.Source:=Source_Vel;
293         LB_Escorregamento.Caption:=formatfloat(
294             ###,###,##0.00 ,s);
295
296
297     procedure TFrm_Principal.Timer_WTimer(Sender: TObject);
298     begin
299
300     end;
```

```
301
302
303 procedure TFrm_Principal.FormCreate(Sender: TObject);
304 var
305     filedesc: Longint;
306     pino: PChar;
307     i: word;
308 begin
309     //Execucao do script python que l a velocidade
310     aprocess:=TProcess.Create(self);
311     aprocess.Executable:=( /home/pi/Documents/TCC/velocidade.
        py );
312     aprocess.Execute;
313     //LB_Torque.Caption:=inttostr(aprocess.ProcessID);
314     aprocess.Free;
315
316 //Configuracao comunicacao com Arduino
317     Serial232.BaudRate:=(br_9600);
318     Serial232.DataBits:=db8bits;
319     Serial232.Device:= /dev/ttyACM0 ;
320     Serial232.Active:=true;
321
322 //Comunicacao 485 parametros
323     PLCTag.AutoRead:=false;
324     PLCTag.AutoWrite:=false;
325     PLCTag.PLCStation:=10;
326     PLCTag.MemReadFunction:=3;
327     PLCTag.MemWriteFunction:=16;
328     Serial485.BaudRate:=br19200;
329     Serial485.DataBits:=db8;
330     Serial485.COMPort:= ttyUSB0 ;
331     Serial485.Active:=true;
```

```
332
333 //Configurar gpio 20 pino 38 como saida
334 filedesc:=fpopen( /sys/class/gpio/export , O_WrOnly);
335 pino:= 20 ;
336 grc:=fpwrite(filedesc , pino[0] , 2);
337 grc:=fpclose(filedesc);
338 pino:= out ;
339 filedesc:=fpopen( /sys/class/gpio/gpio20/direction ,
    O_WrOnly);
340 grc:=fpwrite(filedesc , pino[0] , 3);
341 grc:=fpclose(filedesc);
342
343 //Carrega enderecos de memoria do Powermeter
344 memoria [1]:=1099;
345 memoria [2]:=1100;
346 memoria [3]:=1101;
347 memoria [4]:=1120;
348 memoria [5]:=1121;
349 memoria [6]:=1122;
350 memoria [7]:=1142;
351 memoria [8]:=1146;
352 memoria [9]:=1150;
353
354 recebe:= ;
355
356 curva [1,1]:=0;
357 curva [1,2]:=21.459854;
358 curva [1,3]:=42.262774;
359 curva [1,4]:=62.992701;
360 curva [1,5]:=74.525547;
361 curva [1,6]:=78.832117;
362 curva [1,7]:=81.532847;
```



```
363     curva [1 , 8] :=83.868613;
364     curva [1 , 9] :=89.197080;
365     curva [1 , 10] :=91.532847;
366     curva [1 , 11] :=92.335766;
367     curva [1 , 12] :=94.817518;
368     curva [1 , 13] :=96.861314;
369     curva [1 , 14] :=98;
370     curva [1 , 15] :=99;
371     curva [1 , 16] :=100;
372
373     curva [2 , 1] :=2.2969697;
374     curva [2 , 2] :=2.0606061;
375     curva [2 , 3] :=2.2606061;
376     curva [2 , 4] :=2.7939394;
377     curva [2 , 5] :=3.2424242;
378     curva [2 , 6] :=3.4363636;
379     curva [2 , 7] :=3.5;
380     curva [2 , 8] :=3.4363636;
381     curva [2 , 9] :=2.9939394;
382     curva [2 , 10] :=2.6303030;
383     curva [2 , 11] :=2.4969697;
384     curva [2 , 12] :=1.9939394;
385     curva [2 , 13] :=1.4969697;
386     curva [2 , 14] :=1;
387     curva [2 , 15] :=0.4969697;
388     curva [2 , 16] :=0;
389     for i:=1 to 16 do
390         source_Txn.Add(curva [1 , i] , curva [2 , i]);
391     C13SP.Source:=Source_Txn;
392     PM [2] :=0;
393
394
```

```
395 end;
396
397 procedure TFrm_Principal.RB_CteClick(Sender: TObject);
398 begin
399     carga:=0;
400     Edt_SetPoint.Enabled:=true;
401     Button1.Enabled:=true;
402     LN_if.Enabled:=true;
403
404 end;
405
406 procedure TFrm_Principal.RB_HiperbolicaClick(Sender:
407     TObject);
408 begin
409     carga:=1;
410     Edt_SetPoint.Enabled:=false;
411     Button1.Enabled:=false;
412     LN_if.Enabled:=true;
413
414     Frm_Eq.Edit1.Enabled:=false;
415     Frm_Eq.Edit1.Visible:=false;
416     Frm_Eq.Edit2.Enabled:=false;
417     Frm_Eq.Edit2.Visible:=false;
418     Frm_Eq.Edit3.Enabled:=true;
419     Frm_Eq.Edit3.Visible:=true;
420     Frm_Eq.Edit4.Enabled:=true;
421     Frm_Eq.Edit4.Visible:=true;
422     Frm_Eq.Edit5.Enabled:=true;
423     Frm_Eq.Edit5.Visible:=true;
424
425     Frm_Eq.Label1.Enabled:=false;
426     Frm_Eq.Label1.Visible:=false;
```

```
426   Frm_Eq.Label2.Enabled:=true;
427   Frm_Eq.Label2.Visible:=true;
428   Frm_Eq.Label2.Caption:= 1 ;
429   Frm_Eq.Label3.Enabled:=true;
430   Frm_Eq.Label3.Visible:=true;
431   Frm_Eq.Label4.Enabled:=true;
432   Frm_Eq.Label4.Visible:=true;
433   Frm_Eq.Label5.Enabled:=false;
434   Frm_Eq.Label5.Visible:=false;
435   Frm_Eq.Label7.Enabled:=true;
436   Frm_Eq.Label7.Visible:=true;
437   Frm_Eq.Show;
438 end;
439
440 procedure TFrm_Principal.RB_LinearClick(Sender: TObject);
441 begin
442   carga:=2;
443   Edt_SetPoint.Enabled:=false;
444   Button1.Enabled:=false;
445   LN_if.Enabled:=true;
446
447   Frm_Eq.Edit1.Enabled:=false;
448   Frm_Eq.Edit1.Visible:=false;
449   Frm_Eq.Edit2.Enabled:=true;
450   Frm_Eq.Edit2.Visible:=true;
451   Frm_Eq.Edit3.Enabled:=true;
452   Frm_Eq.Edit3.Visible:=true;
453   Frm_Eq.Edit4.Enabled:=false;
454   Frm_Eq.Edit4.Visible:=false;
455   Frm_Eq.Edit5.Enabled:=false;
456   Frm_Eq.Edit5.Visible:=false;
457
```

```
458
459     Frm_Eq.Label1.Enabled:=false;
460     Frm_Eq.Label1.Visible:=false;
461     Frm_Eq.Label2.Enabled:=true;
462     Frm_Eq.Label2.Visible:=true;
463     Frm_Eq.Label2.Caption:= n ;
464     Frm_Eq.Label3.Enabled:=false;
465     Frm_Eq.Label3.Visible:=false;
466     Frm_Eq.Label4.Enabled:=false;
467     Frm_Eq.Label4.Visible:=false;
468     Frm_Eq.Label5.Enabled:=false;
469     Frm_Eq.Label5.Visible:=false;
470     Frm_Eq.Label7.Enabled:=false;
471     Frm_Eq.Label7.Visible:=false;
472     Frm_Eq.Show;
473 end;
474
475 procedure TFrm_Principal.RB_ParabolicaClick(Sender: TObject
476 );
477 begin
478     carga:=3;
479     Edt_SetPoint.Enabled:=false;
480     Button1.Enabled:=false;
481     LN_if.Enabled:=true;
482     Frm_Eq.Edit1.Enabled:=true;
483     Frm_Eq.Edit1.Visible:=true;
484     Frm_Eq.Edit2.Enabled:=true;
485     Frm_Eq.Edit2.Visible:=true;
486     Frm_Eq.Edit3.Enabled:=true;
487     Frm_Eq.Edit3.Visible:=true;
488     Frm_Eq.Edit4.Enabled:=false;
489     Frm_Eq.Edit4.Visible:=false;
```

```
489     Frm_Eq.Edit5.Enabled:=false;
490     Frm_Eq.Edit5.Visible:=false;
491
492     Frm_Eq.Label1.Enabled:=true;
493     Frm_Eq.Label1.Visible:=true;
494     Frm_Eq.Label2.Enabled:=true;
495     Frm_Eq.Label2.Visible:=true;
496     Frm_Eq.Label2.Caption:= n ;
497     Frm_Eq.Label3.Enabled:=false;
498     Frm_Eq.Label3.Visible:=false;
499     Frm_Eq.Label4.Enabled:=false;
500     Frm_Eq.Label4.Visible:=false;
501     Frm_Eq.Label5.Enabled:=true;
502     Frm_Eq.Label5.Visible:=true;
503     Frm_Eq.Label7.Enabled:=false;
504     Frm_Eq.Label7.Visible:=false;
505     Frm_Eq.Show;
506 end;
507
508 procedure TFrm_Principal.Serial232RxData(Sender: TObject);
509 var
510     temp:string;
511     i:word;
512 begin
513     sleep(50);
514     temp:=serial232.ReadData;
515     recebe:=(recebe+temp);
516     i:=length(temp);
517     if (recebe[1]=    ) and (i>1) and (recebe[i]=    ) then
518     begin
519         recebe:=trim(recebe);
520
```

```
521     case serial_info of
522     1:
523         begin
524             temperatura:=strtofloatdef(recebe,1000);
525             temperatura:=temperatura*0.2408-94.6693;
526             LB_Temp.Caption:=formatfloat( ###,###,##0.00 ,
                    temperatura);
527
528
529         end;
530     2:
531         begin
532             if recebe= 0 then
533                 LN_if.Caption:= 0
534             else
535                 LN_if.Caption:=formatfloat( ###,###,##0.0
                    ,0.00458*strtofloatdef(recebe,-3)+0.3999 );
536             end;
537     3:
538         begin
539             sleep(1);
540             //LN_if.Caption:=recebe;
541         end;
542     end;
543
544     recebe:=  ;
545     Timer_W.Enabled:=true;
546 end;
547
548
549 end;
```

```
551
552 procedure TFrm_Principal.FormClose(Sender: TObject;
553     var CloseAction: TCloseAction);
554     var
555         filedesc: Longint;
556         pino: PChar;
557 begin
558     //Liberar pinos
559     filedesc:=fpopen( /sys/class/gpio/unexport ,0_WrOnly);
560     pino:= 20 ;
561     grc:=fpwrite(filedesc,pino[0],2);
562     grc:=fpclose(filedesc);
563 end;
564
565 procedure TFrm_Principal.BTN_VelocidadeClick(Sender:
566     TObject);
567     var
568         temp: word;
569 begin
570     Serial232.WriteData((Edt_freq.Text));
571 end;
572     //Carga constante
573 procedure TFrm_Principal.Button1Click(Sender: TObject);
574 begin
575     Timer_W.Enabled:=false;
576     if Edt_SetPoint.Text= 0 then
577         ifreio:=0
578     else
579         ifreio:=218.5386*strtofloat(Edt_SetPoint.Text)
580             -87.4154 ;
581     Serial232.WriteData(floattostr(ifreio));
582 end;
```

```
581  
582 procedure TFrm_Principal.FormActivate(Sender: TObject);  
583 begin  
584     Frm_Eq.Close;  
585 end;  
586  
587 end.
```



## Código-fonte 2 – Código de cargas do Raspberry® Pi em Delphi®/Pascal®

```
1  unit carga;
2
3  {$mode objfpc}{$H+}
4
5  interface
6
7  uses
8      Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls, Graphics,
9          Dialogs, StdCtrls;
10
11  type
12      { TFrm_Eq }
13
14      TFrm_Eq = class(TForm)
15          Button1: TButton;
16          Edit1: TEdit;
17          Edit2: TEdit;
18          Edit3: TEdit;
19          Edit4: TEdit;
20          Edit5: TEdit;
21          Label1: TLabel;
22          Label2: TLabel;
23          Label3: TLabel;
24          Label4: TLabel;
25          Label5: TLabel;
26          Label6: TLabel;
27          Label7: TLabel;
28          procedure Button1Click(Sender: TObject);
29
30  private
```

```
31     { private declarations }
32 public
33     { public declarations }
34 end;
35
36 var
37     Frm_Eq: TFrm_Eq;
38
39 implementation
40
41 {$R *.lfm}
42 uses principal;
43 { TFrm_Eq }
44
45 procedure TFrm_Eq.Button1Click(Sender: TObject);
46 var
47     n:word;
48     t:double;
49 begin
50     //Frm_Eq.Close;
51     t:=0;
52     case frm_principal.carga of
53     1:
54     begin // Hiperbolica
55         Frm_principal.C1LS1.Clear;
56         Frm_Principal.ListChartSource1.Clear;
57         for n:=0 to 1800 do
58         begin
59             a:= strtofloat(edit4.Text);
60             b:= strtofloat(edit5.Text);
61             c:= strtofloat(edit3.Text);
62             t:=(1/(strtofloat(edit4.Text)*n+strtofloat(
```

```
        edit5.Text)))+strtofloat(edit3.Text);
63     Frm_Principal.ListChartSource1.Add((n/18),(t
        /4.14));
64     end;
65 end;
66 2:
67 begin // Linear
68     Frm_principal.C1LS1.Clear;
69     Frm_Principal.ListChartSource1.Clear;
70     for n:=0 to 1800 do
71     begin
72         a:=strtofloat(edit2.Text);
73         b:=strtofloat(edit3.Text);
74         t:=a*n+b;
75         Frm_Principal.ListChartSource1.Add((n/18),(t
        /4.14));
76     end;
77 end;
78 3:
79     begin
80     Frm_principal.C1LS1.Clear;
81     Frm_Principal.ListChartSource1.Clear;
82     for n:=0 to 1800 do
83     begin
84         a:= strtofloat(edit1.Text);
85         b:= strtofloat(edit2.Text);
86         c:= strtofloat(edit3.Text);
87         t:=(strtofloat(Edit1.Text)*n*n+strtofloat(edit2
        .Text)*n+strtofloat(edit3.Text));
88         Frm_Principal.ListChartSource1.Add((n/18),(t
        /4.14));
89     end;
```

```
90         end;  
91     end;  
92     Frm_principal.C1LS1.Source:=Frm_Principal.  
        ListChartSource1;  
93 end;  
94  
95  
96 end.
```

## APÊNDICE B – CÓDIGOS DO ARDUINO® DE CONTROLE DE CORRENTE DO FREIO

Código-fonte 3 – Código do Arduino® Uno para controle de corrente do freio em C

```

1 // Controle do Freio com anti-windup
2 // Define pinos
3 const int analogOutPin = 9;      // Saida PWM Freio
   Eletromagnetico
4 const int RefVelM = 5;           // PWM para velociade do
   motor no inversor
5 const int analogInPin = 5;       // Sensor de corrente
6 const int tempPin = 0;           // Sensor de temperatura
7
8 // Define varius prescaler Conversores AD
9 const unsigned char PS_16 = (1 << ADPS2);
10 const unsigned char PS_32 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS0);
11 const unsigned char PS_64 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1);
12 const unsigned char PS_128 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) |
   (1 << ADPS0);
13
14 unsigned int top, k = 0;
15 volatile boolean transm;
16 unsigned int frequency = 10000;  // Frequencia do PWM
17 uint8_t prescaler = _BV(CS10);    // Prescaler igual a 1.
18
19 int ref1, ref, yk, uk, uk1, ek, ek1, wk, wk1, ukaux;
20 // Constantes do controlador uk = uk1 + err*Const + err1*
   Const1;
21
22 int KpB = 21;    // Ganho proporcional com a notacao Q
   10.2994 * (2^-1)

```

```
23 int Kw = 127;    // Ganho da parcela integradora com a
    notacao Q -0.9942 * (2^7)
24
25 int temp;       // Temperatura
26
27 void setup() {
28     Serial.begin(9600);
29     Serial.setTimeout(8);
30
31     TIMSK1 |= (1 << TOIE1);           // Habilita a
    interrupcao do TIMER1
32
33     ref = 0;
34     ADCSRA &= ~PS_128; // Limpa o bit de prescaler do
    conversor AD.
35
36     // Ajuste do prescaler do conversor AD.
37     // PS_16, PS_32, PS_64 or PS_128
38     ADCSRA |= PS_32; // Ajusta o registrador do conversor
    do prescaler para 32
39
40     // Frequencia do PWM
41     top = F_CPU / frequency / 2 - 1; // Calcula o valor
    maximo do PWM
42     if (top > 65535)                 // Se nao estiver
    couber prescaler 1,
43     {                                 // usa prescaler 256
    (122Hz e inferiores @16MHz).
44     prescaler = _BV(CS12);           // Define prescaler
    256.
45     top = top / 256 - 1;             // Calcula o valor
    maximo do PWM com prescaler 256.
```

```

46 }
47
48 ICR1 = top; // Define o valor
           // maximo do PWM no registrador
49 if (TCNT1 > top) TCNT1 = top; // Define o registrador
           // contador com o maximo.
50 TCCR1B = _BV(WGM13) | prescaler; // Ajusta PWM, fase e
           // frequencia corrigidos (top=ICR1) e prescaler.
51 TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1) | _BV(COM1B0); //
           // Invertido/nao-invertido modo (AC).
52
53 // Define pinos de Saida.
54 pinMode(13, OUTPUT); // Pino para aviso de
           // interrupcao
55 pinMode(analogOutPin, OUTPUT); // Pino de saida do PWM
56 pinMode(RefVelM, OUTPUT);
57
58 TCCR0B = TCCR0B & 0b11111000 | 0x03; // prescale 1 8 64
           // 256 1024
59 }
60
61 int ykt, refIt, ukt, auxT, tempt;
62 int refr = ref;
63 void loop()
64 {
65     if (Serial.available() > 0)
66     {
67         refr = Serial.parseInt();
68
69         if (refr >= 2000) analogWrite(RefVelM, refr-2000); //
           // Referencia de velocidade do motor

```

```

70     else if (refr < 0||refr>1023) ref1 = refr; //
        Referencia do freio e a anterior
71     else ref1 = refr; //
        Referencia do freio
72     ref1t = ref1;
73     tempt = temp;
74 //     ykt = yk;
75 //     ukt = ukaux;
76
77     Serial.print(" ");
78     Serial.print(ref1t);
79     Serial.print(" ");
80     Serial.print(tempt);
81 //     Serial.print(" ");
82 //     Serial.print(ukt);
83     Serial.print(" ");
84 }
85 }
86
87 ISR(TIMER1_OVF_vect) //interrupcao do TIMER1
88 {
89     digitalWrite(13,1); // indica que iniciou a interrupcao
90     // ref = analogRead(analogInPinRef); // A0 Referencia
91     ref = ref1;
92     yk = analogRead(analogInPin); // porta A5 sensor de
        corrente
93     ek = ref - yk;
94     // Anti-Windup
95     wk = (64 - Kw) * uk1 + Kw * wk1 + 32;
96     wk = wk >> 6;
97     // Equacao das Diferencas
98     // Backward

```



```
99   uk = wk * 2 + KpB * ek + 1;
100   uk = uk >> 1;
101   // Limitador de saida
102   if (uk > 250) uk = 250;
103   else if (uk < 0) uk = 0;
104
105   temp = analogRead(tempPin);
106
107   // Atualizacao do erro anterior e do sinal de controle
108   anterior
109   uk1 = uk;
110   ek1 = ek;
111   wk1 = wk;
112   if(ref==0||ref1==0) uk=0;
113   OCR1A = uk; // Valor do PWM no registrador do pino 9.
114               100%=799
115   ukaux = uk;
116   digitalWrite(13,0); // indica que terminou a interrupcao
117 }
```

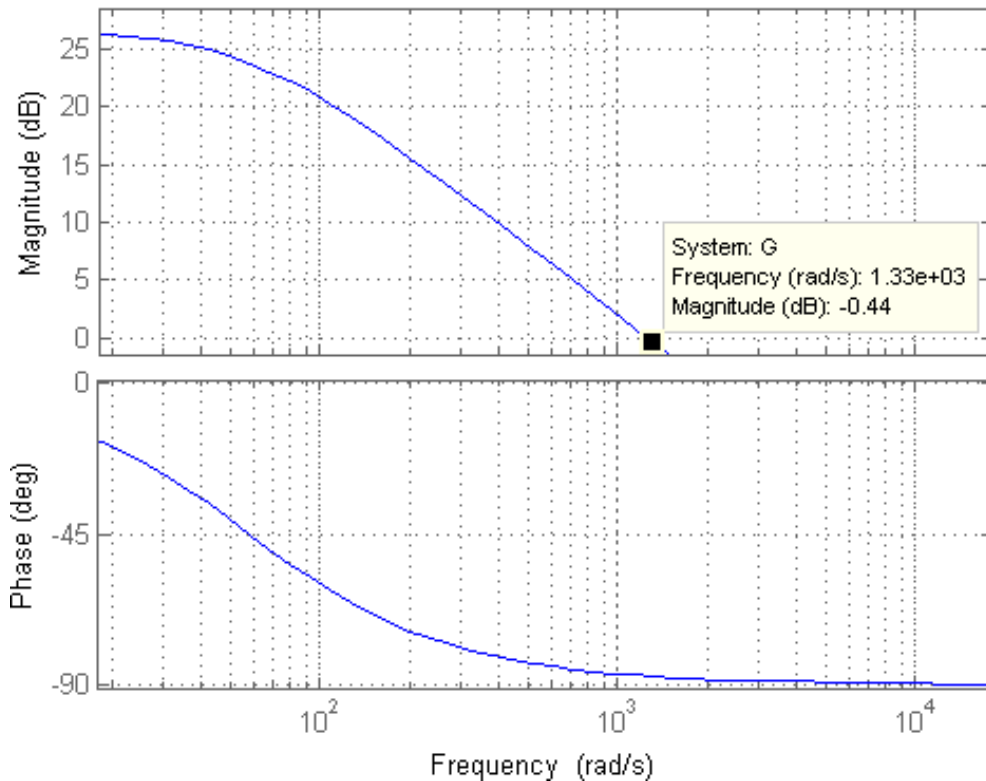
## APÊNDICE C – DETALHAMENTO DO CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL

O controlador PI utilizado para regulação da corrente elétrica de acionamento do freio eletromagnético é baseado na técnica de sintonia por amplitude ótima chamado *Modulus Optimum*. Esse método demonstrado por Cvejn (2011) leva em consideração a função de transferência simplificada do conversor  $G$ , sendo  $K$  ganho estático do sistema,  $T_1$  constante de tempo e  $\tau$  tempo morto, utiliza-se uma função de transferência do conversor com  $V_D$  a tensão do dreno do IGBT,  $L$  a indutância do conjunto das bobinas e  $R$  a resistência das bobinas e o tempo morto é desprezado por ser muito pequeno.

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_1 \cdot s + 1} = \frac{\frac{V_D}{R}}{\frac{L}{R} \cdot s + 1} \quad (\text{C.1})$$

A função de transferência expressa pela Equação C.1, ao ser representada pelo diagrama de Bode na Figura 38, apresenta um sistema estável com frequência de corte de 58,1 rad/s (NISE, 2002).

Figura 38 – Diagrama de Bode do conversor *Chopper* em malha aberta  
Bode Diagram



Fonte: o autor.

Como existe um tempo morto  $T_e$  entre cada ciclo de processamento, de 1 a 2 períodos do ciclo, é importante considerar esse fator atraso  $F_a$  no sistema como sendo um polo integrador, através da aproximante de Padé com grau zero no numerador e grau um no denominador. Logo evita-se fase não mínima do zero. Essa aproximação é possível, pois  $T_1 \gg T_e$  (TRUXAL, 1955).

$$T_e = 1,5 \cdot \frac{1}{f_{chav}} \quad (C.2)$$

$$F_a = \frac{1}{T_e \cdot s + 1} \quad (C.3)$$

E acrescentando-se o fator de atraso e os ganhos do modulador e do conversor analógico-digital,  $K_m = 1023/5$  e  $K_{ad} = 1/799$  respectivamente, à função de transferência do sistema ficará:

$$G_p = G \cdot K_{ad} \cdot K_m \cdot F_a \quad (C.4)$$

A partir da equação do sistema pode-se fazer o controlador proporcional-integral (PI) com uma função de transferência de 1ª ordem o qual é expresso pela Equação C.5. Sendo  $K_c$  o ganho proporcional do controlador e  $T_I$  o tempo de integração do controlador (OGATA, 2010).

$$G_c(s) = K_c \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_I \cdot s} \right) \quad (C.5)$$

Para o ajuste desses parâmetros o ganho proporcional do controlador será a razão da constante de tempo da planta  $T_1$  pelo dobro do ganho estático do sistema  $k$  (com os ganhos do conversor analógico-digital e da moduladora  $K \cdot K_{ad} \cdot K_m$ ), vezes o tempo morto do ciclo de processamento  $T_e$  e a constante de tempo do controlador será igual à constante de tempo da planta e  $\tau$  igual ao tempo do ciclo processamento, conforme expressa pela Equação C.6 (CVEJN, 2011).

$$K_c = \frac{T_1}{2 \cdot k \cdot \tau} \quad , \quad T_1 = T_I \quad , \quad \tau = T_e \quad , \quad k = K \cdot K_{ad} \cdot K_m \quad (C.6)$$

Substituindo-se os valores do controlador tem-se  $G_c(s)$  na Equação C.7.

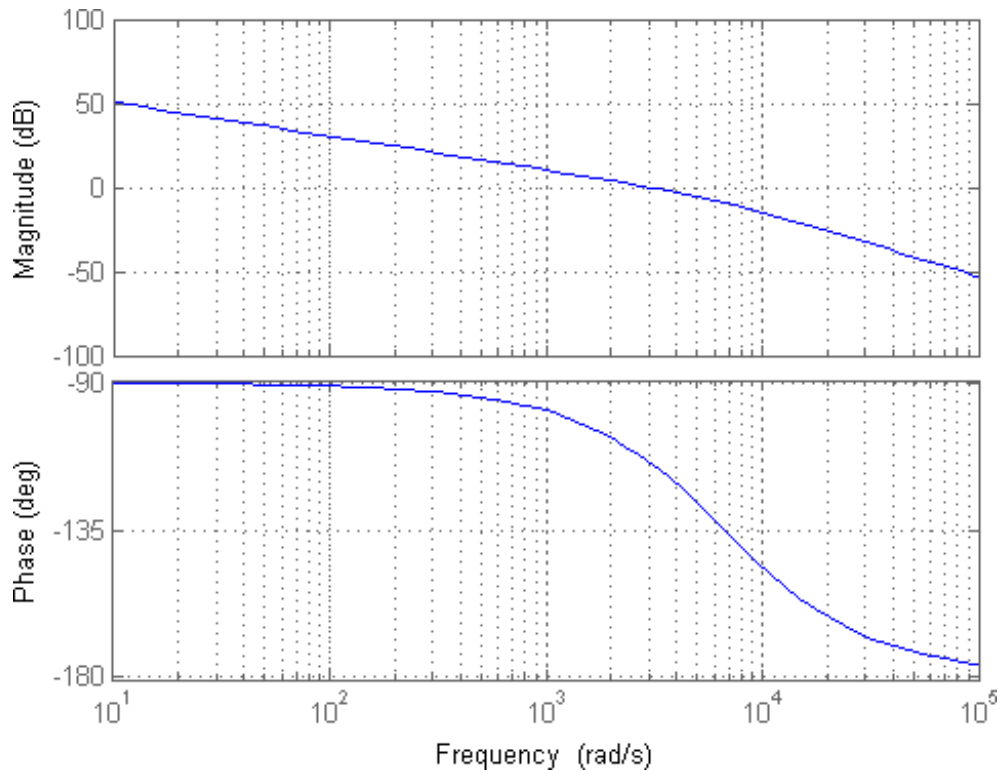
$$G_c(s) = \frac{T_1}{2 \cdot K \cdot K_{ad} \cdot K_m \cdot T_e} \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_1 \cdot s} \right) = 10,2966 \cdot \left( 1 + \frac{1}{0,0172 \cdot s} \right) \quad (C.7)$$

Assim a função de transferência em malha aberta  $G_{ma}$  é expressa pela Equação C.8.

$$G_{ma}(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) = \frac{3333,333}{s \cdot (s \cdot 150 \cdot 10^{-6} + 1)} \quad (C.8)$$

Dessa maneira a Figura 39 mostra o diagrama de bode da malha aberta. Com margem de ganho é infinita e a margem de fase é  $65,5^\circ$  (DORF; BISHOP, 2001).

Figura 39 – Diagrama de Bode do conversor com o controlador em malha aberta



Fonte: o autor.

Fechando-se a malha da função de transferência da planta com o controlador, a Equação C.9 expressa a função de transferência em malha fechada  $G_{mf}$ .

$$G_{mf}(s) = \frac{G_{ma}}{1 + G_{ma}} = \frac{22,222 \cdot 10^6}{s^2 + 6666,7 \cdot s + 22,222 \cdot 10^6} \quad (C.9)$$

Como o controlador digital funciona em tempo discreto, é necessário fazer a discretização da Equação C.7 pelo tempo do chaveamento do ciclo de trabalho. Através da transformada  $z$  do controlador na Equação C.10 a equação das diferenças é representada pela Equação C.11.

$$G_c(z) = 10,2966 \cdot \left( \frac{z - 0,9942}{z - 1} \right) = \left( \frac{10,2966 \cdot z - 10,2368}{z - 1} \right) \quad (C.10)$$

$$u(k) = u(k-1) + 10,2966 \cdot e(k) - 10,2368 \cdot e(k-1) \quad (\text{C.11})$$

Para evitar problemas de *windup* com a saturação do sinal de controle, utiliza-se métodos de *anti-windup* que lida com a saturação sem a necessidade de reajustes do controlador. O método reduz o efeito da parte integradora do controlador fazendo com que o sistema reduza as oscilações e se estabilize mais rapidamente seguindo a referência (HADADE NETO, 2015).

A Equação C.12 é a parte integradora do sinal de controle  $w(k)$  que atua com amostra anterior do sinal de controle  $u(k-1)$  e da parcela integradora anterior  $w(k-1)$ . Logo a Equação C.13 recebe o erro atual  $e(k)$  e a parcela integradora.

$$w(k) = \left(1 - \frac{10,2368}{10,2966}\right) \cdot u(k-1) + \frac{10,2368}{10,2966} \cdot w(k-1) \quad (\text{C.12})$$

$$u(k) = 10,2966 \cdot e(k) + w(k) \quad (\text{C.13})$$

A fim de aumentar a precisão nos cálculos sem que haja ponto flutuante, a notação Q. Basicamente esse método consiste em multiplicar uma constante e depois deslocar os bits da equação para um inteiro, isso aumenta a precisão sem muita perda de processamento (REZENDE, 2008).

No caso das variáveis da Equação C.12,  $u(k-1)$  e  $w(k-1)$ , terão os valores máximos de 240, nessa equação o valor máximo da notação Q que pode ser utilizado é 7 ( $2^Q = 128$ ). Como as variáveis do sinal de controle e da parcela integral são números inteiros de 16 bits, deve-se garantir que essas variáveis tenham valores entre -32768 e 32767. Pela mesma razão a Equação C.11 tem o valor da notação Q igual a 2.

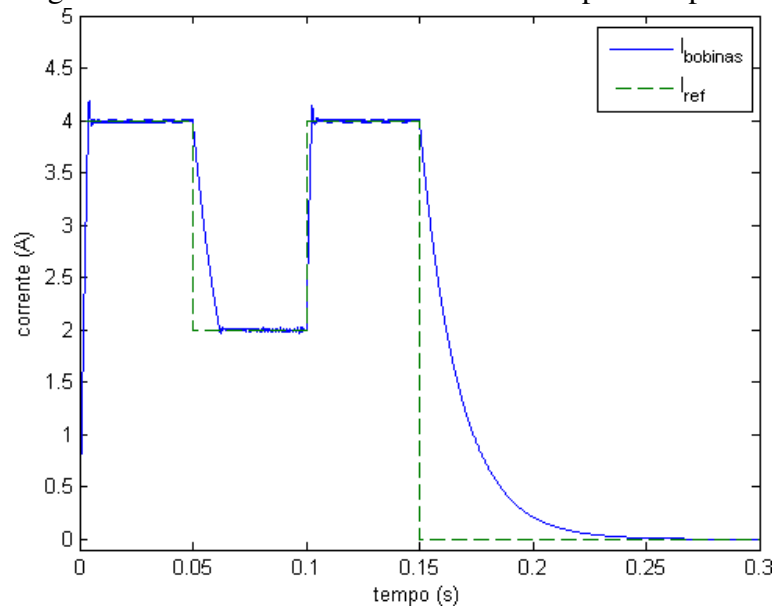
As Equações C.14 e C.15 são mostradas a seguir com os valores da notação Q a serem implementados.

$$w(k) = (128 - 127) \cdot u(k-1) + 127 \cdot w(k-1) + 64 \quad (\text{C.14})$$

$$u(k) = 21 \cdot e(k) + 2 \cdot w(k) + 1 \quad (\text{C.15})$$

A Figura 40 mostra o gráfico da simulação do conversor controlando a corrente nas bobinas do freio eletromagnético.

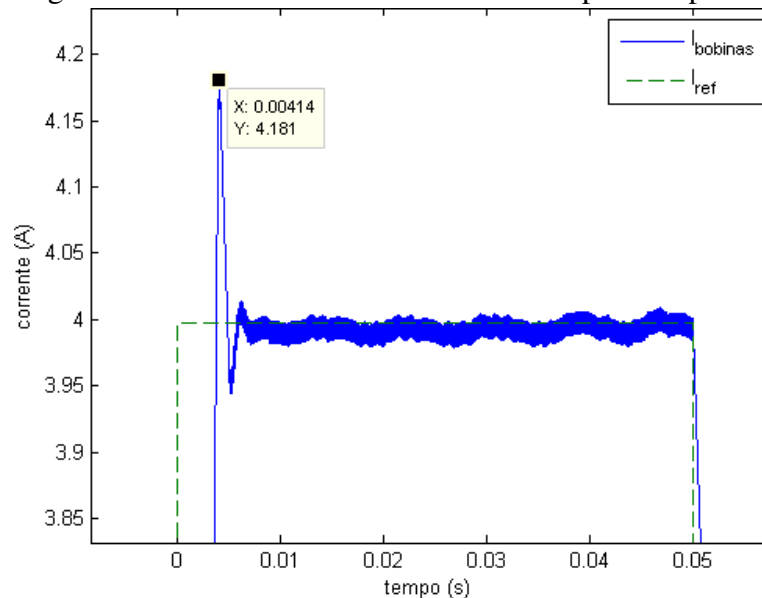
Figura 40 – Corrente nas Bobinas do Freio por Tempo



Fonte: o autor.

A Figura 41 é uma ampliação do primeiro degrau de carga da Figura 41. Nela é possível verificar que o método de ajuste de controle *Modulus Optimum* de (CVEJN, 2011) foi bem projetado para componentes ideais. O tempo de subida é de 3,81 ms, o sobressinal, de 4,5%, de 4,13 ms e o assentamento é de 4,55 ms.

Figura 41 – Corrente nas Bobinas do Freio por Tempo



Fonte: o autor.

O controle não acelera a redução do valor de corrente durante a descida do valor da referência, pois o valor da corrente na descida acompanha a curva de descarregamento da indutância das bobinas do freio.

## APÊNDICE D – CONVERSOR CC-CC - CIRCUITO DE PRÉ-CARGA E *SNUBBER*

### D.2 Circuito de Pré-Carga

Ao ligar o conversor na rede, o capacitor de retificação está normalmente descarregado. Caso o esse capacitor seja submetido de 311V, a corrente que passa por ele pode causar sobreaquecimento podendo levar à redução da vida útil de maneira prematura.

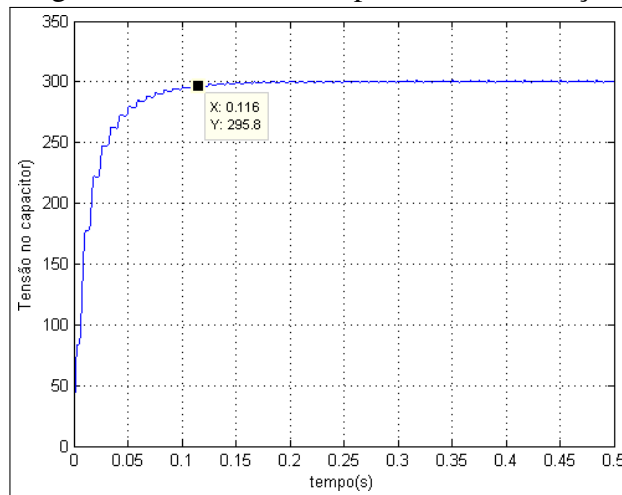
Para reduzir essa corrente faz-se o uso de um circuito de pré-carga que faz o carregamento inicial do capacitor seja mais lento com o uso de um resistor de potência. Esse resistor atenua a corrente de carregamento enquanto o circuito temporiza um relé que direciona a corrente a passar por esse resistor. A Equação D.1 mostra a corrente no capacitor no caso mais extremo.

$$I_{cmax} = \frac{V_p}{R_{pre}} = \frac{311}{33} = 9,42 \text{ [A]} \quad (\text{D.1})$$

Após o tempo de acionamento do circuito de pré-carga, o capacitor está carregado e o relé faz um *bypass* pelo resistor o que permite que o circuito funcione com mais eficiência.

Observando a Figura 42 nota-se que o capacitor está praticamente carregado a partir dos 0,116 segundos.

Figura 42 – Tensão do capacitor de retificação



Fonte: o autor.

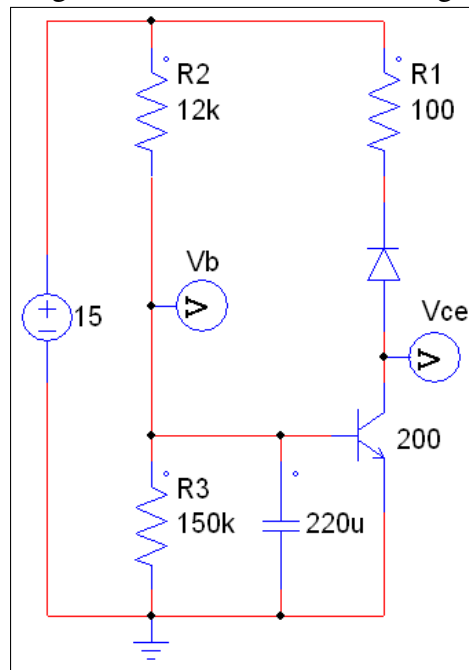
Logo deve-se dimensionar a temporização do circuito do relé para um tempo superior a 0,116 segundo. Partindo da Equação D.2 de carregamento do capacitor, no qual  $V_c$  é a tensão no capacitor e a constante de tempo  $\tau_{temp}$  é o produto da resistência pela capacitância  $R_{temp} \cdot C_{temp}$ , a temporização é calculada basicamente pelo resistor de base que está conectado à fonte de 15V de 12k $\Omega$  e pelo capacitor de 220 $\mu$ F, mostrado na Equação D.3 (ALEXANDER; SADIKU, 2008).

$$V_c(t) = V_c(\infty) + [V_c(0) - V_c(\infty)] \cdot e^{-t/\tau_{temp}} \quad (D.2)$$

$$t = -R_{temp} \cdot C_{temp} \cdot \ln \left( 1 - \frac{V_{be}}{V_{cc}} \right) = -12 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left( 1 - \frac{0,7}{15} \right) = 0,126 \text{ [s]} \quad (D.3)$$

A Figura 43 ilustra o esquema do circuito de pré-carga. Assim que a fonte é ligada, o capacitor começa a carregar com a corrente que passa pelo resistor da base, quando o capacitor supera a tensão de base-emissor do transistor (0,7V) o transistor é acionado fazendo com que haja corrente passando pelo coletor. Isso faz acionar o relé que estará ligado aos terminais do diodo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2005).

Figura 43 – Circuito de Pré-Carga



Fonte: o autor.

### D.3 Snubber

O *snubber* é um circuito que suprime ou atenua picos de tensão ou corrente elétrica, amortecendo as interferências eletromagnéticas e reduzindo perdas com comutação da chave. Por consequência, a redução do dissipador da chave (SEVERNS, 1999).

Na topologia Resistor, capacitor e diodo (RCD) o capacitor é responsável por absorver a energia das reatâncias parasitas e a variação da tensão durante o bloqueio da chave.



O resistor é dissipar a energia do capacitor e o diodo evita que a corrente passe pelo resistor enquanto a chave é bloqueada (RECH, 2009).

Baseado nos cálculos de (RECH, 2009) pode-se dimensionar o capacitor do *snubber* através da multiplicação da corrente máxima desejada pelo inverso da variação da tensão na chave pelo tempo, como a Equação D.4.

$$C_{sn} = I_{e,IGBT} \cdot \frac{dt}{dV_{ce,IGBT}} = 5 \cdot \frac{26 \cdot 10^{-9}}{311} = 418 \cdot 10^{-12} \text{ [F]} \quad (\text{D.4})$$

E para determinar o valor do resistor do *snubber* RCD e sua potência pode-se utilizar a Equação D.5 e a Equação D.6, respectivamente. Sendo  $t_{on}$  o tempo de subida do IGBT e  $F_s$  a frequência de chaveamento (BARBI, 2001).

$$R_{sn} = \frac{t_{on}}{3 \cdot C_{sn}} = \frac{8 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 418 \cdot 10^{-12}} = 6,379 \text{ } [\Omega] \quad (\text{D.5})$$

$$P_{Rsn} = C_{sn} \cdot V_{ce,IGBT}^2 \cdot \frac{F_s}{2} = 418 \cdot 10^{-12} \cdot 311^2 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{2} = 0,20215 \text{ [W]} \quad (\text{D.6})$$

## APÊNDICE E – DOCUMENTAÇÃO SUPLEMENTAR DO CÁLCULO DAS CARGAS MECÂNICAS

### E.1 Tabela de grandezas eletromecânicas coletadas do sistema freio-motor com torque informado pelo fabricante

A Tabela 6 foi composta pela aplicação de uma corrente elétrica (variando de 0 até 4,9 [A]) no freio eletromagnético. Com base nas variações da corrente elétrica do freio foram coletadas quatro colunas de grandezas eletromecânicas.

- Corrente elétricas média entre fases.
- Potência ativa
- Fator de potência.
- Velocidade.

A quinta coluna – Torque – foi coletada da documentação oficial do motor Weg<sup>®</sup> *premium* (usado na bancada) disponibilizada pela empresa, Como argumento de correlação utilizou-se a coluna ‘Corrente elétricas média entre fases’.

Tabela 6 – Dados estendidos das variações de corrente do freio com torque do fabricante

$I_{Freio}$ [A]	$I_{med}$ [A]	Potência [kW]	Fator de potência	Velocidade [rpm]	Torque [kgfm]
0,0	7,146667	0,701	0,147548	1799,9	1,9819
0,5	7,163333	0,805	0,168834	1798,6	1,9869
0,6	7,146667	0,838	0,176607	1799,1	1,9819
0,7	7,143333	0,875	0,184560	1798,9	1,9808
0,8	7,173333	0,926	0,194374	1798,8	1,9899
0,9	7,176667	0,980	0,205580	1798,6	1,9909
1,0	7,210000	1,043	0,217700	1798,3	2,0007
1,1	7,206667	1,098	0,225462	1798,6	1,9998
1,2	7,256667	1,175	0,243372	1798,0	2,0143
1,3	7,290000	1,256	0,259022	1798,6	2,0240
1,4	7,300000	1,330	0,273775	1798,3	2,0270
1,5	7,316667	1,420	0,292301	1796,7	2,0320
1,6	7,366667	1,513	0,309914	1795,9	2,0475
1,7	7,403333	1,609	0,327632	1795,6	2,0590
1,8	7,460000	1,714	0,346193	1795,5	2,0768
1,9	7,546667	1,822	0,36331	1795,4	2,1033
2,0	7,616667	1,939	0,383429	1793,3	2,1247
2,1	7,690000	2,067	0,404106	1792,6	2,1491
2,2	7,776667	2,200	0,426605	1791,2	2,1787
2,3	7,853333	2,331	0,447581	1792,8	2,1991
2,4	7,963333	2,465	0,467121	1792,0	2,2150
2,5	8,046667	2,605	0,488926	1791,6	2,2336
2,6	8,153333	2,750	0,509637	1791,2	2,2782
2,7	8,283333	2,908	0,530367	1790,5	2,3243
2,8	8,423333	3,058	0,549407	1788,7	2,3540
2,9	8,580000	3,236	0,570622	1788,5	2,3921
3,0	8,750000	3,410	0,589252	1788,3	2,4314
3,1	8,930000	3,594	0,609256	1787,4	2,5054
3,2	9,103333	3,764	0,626602	1786,2	2,5395
3,3	9,303333	3,941	0,640605	1785,5	2,5712
3,4	9,516667	4,142	0,659344	1784,9	2,6379
3,5	9,736667	4,340	0,675697	1783,8	2,6965
3,6	9,966667	4,537	0,689514	1783,1	2,7406
3,7	10,18667	4,733	0,706207	1783,4	2,8056
3,8	10,33333	4,894	0,706001	1781,6	2,8466
3,9	10,53333	5,016	0,723810	1781,3	2,9034
4,0	10,72667	5,177	0,733806	1779,7	2,9581
4,1	10,92333	5,334	0,744141	1779,9	3,0137
4,2	11,18667	5,542	0,755247	1779,8	3,0882
4,3	11,49667	5,778	0,766923	1777,6	3,1760
4,4	11,78000	5,998	0,775637	1776,2	3,2554
4,5	12,14667	6,262	0,786980	1775,2	3,3462
4,6	12,46667	6,498	0,794668	1774,8	3,4330
4,7	12,77000	6,727	0,793465	1774,3	3,5022
4,8	13,11667	6,969	0,810349	1773,2	3,5956
4,9	13,49667	7,238	0,819613	1771,9	3,6863

Fonte: o autor.

## E.2 Equações desenvolvidas a partir da Tabela 6

### E.2.1 Regressão quadrática

Tabela 6, colunas corrente de freio e torque.

$$P = 0,2258 \cdot I_{Freio}^2 + 0,2536 \cdot I_{Freio} + 0,5773 \quad (E.1)$$

Tabela 6, colunas corrente de freio e torque.

$$I_{Freio} = -1,5754 \cdot T^2 + 10,9899 \cdot T - 14,5407 \quad (E.2)$$

### E.2.2 Regressão cúbica

Tabela 6, colunas corrente de freio e corrente média.

$$I_{med} = 0,0309 \cdot I_{Freio}^3 + 0,1545 \cdot I_{Freio}^2 - 0,2253 \cdot I_{Freio} + 7,2118 \quad (E.3)$$

Tabela 6, colunas corrente de freio e fator de potência.

$$FP = -0,0108 \cdot I_{Freio}^3 + 0,0793 \cdot I_{Freio}^2 + 0,0060 \cdot I_{Freio} + 0,1441 \quad (E.4)$$

Tabela 6, colunas corrente de freio e velocidade.

$$n = 0,0001 \cdot I_{Freio}^3 - 0,0017 \cdot I_{Freio}^2 + 0,0002 \cdot I_{Freio} + 1,7997 \quad (E.5)$$

# ANEXO A – PORTARIA INTERMINISTERIAL NÚMERO 1



50

ISSN 1677-7042

Diário Oficial da União - Seção 1

Nº 167, quarta-feira, 30 de agosto de 2017

## Ministério de Minas e Energia

### GABINETE DO MINISTRO

#### PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017

OS MINISTROS DE ESTADO DE MINAS E ENERGIA, DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, E DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, no uso das atribuições que lhes confere o art. 87, parágrafo único, incisos II e IV, da Constituição, tendo em vista o disposto no art. 2º da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, nos arts. 1º e 3º, caput e inciso III, do Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, no art. 2º do Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002, na Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 553, de 8 de dezembro de 2005, o que consta nos Processos nº 48000.0011808/2016-14 e nº 999118.000001/2017-61, e considerando que

compete ao Poder Executivo estabelecer os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia;

cabem ao Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE elaborar Regulamentação Específica para cada tipo de aparelho e máquina consumidora de energia, bem como o Programa de Metas com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados para cada equipamento regulamentado;

as contribuições da sociedade com respeito ao Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo foram recebidas por meio de Consulta Pública eletrônica e Audiência Pública presencial;

a Regulamentação Específica de Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo e os níveis mínimos de eficiência energética estão contemplados no Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002, e na Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 553, de 8 de dezembro de 2005; e

o Programa de Metas deve ser estabelecido por meio de Portaria Interministerial, resolvem:

Art. 1º Aprovar o Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo, na forma constante do Anexo à presente Portaria.

Art. 2º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.

FERNANDO COELHO FILHO  
Ministro de Estado de Minas e Energia

GILBERTO KASSAB  
Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia,  
Inovações e Comunicações

MARCOS PEREIRA  
Ministro de Estado da Indústria, Comércio  
Exterior e Serviços

#### ANEXO

#### PROGRAMA DE METAS PARA MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO ROTOR GAIOLA DE ESQUILO

Art. 1º Este Programa de Metas complementa a Regulamentação Específica de Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo, atendendo ao disposto no art. 2º, § 2º, da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001.

Art. 2º A caracterização do produto objeto desta Portaria é apresentada nos arts. 1º e 2º do Anexo I do Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002, com as atualizações descritas no Item 1 - Objeto do Anexo da Portaria Inmetro nº 488, de 8 de dezembro de 2010, e com a seguinte complementação com relação à potência nominal que deverá ser igual ou superior a 0,12 kW (0,16 cv) e até 370 kW (500 cv) em dois polos, quatro polos, seis polos e oito polos.

Parágrafo único. Os motores reconicionados e que são comercializados no País estão sujeitos aos níveis mínimos de eficiência energética estabelecidos no art. 3º.

Art. 3º Fica estabelecido que os níveis mínimos de eficiência energética a serem atendidos pelos Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo, a que se refere o art. 2º deste Anexo, são os definidos na TABELA 1 - RENDIMENTOS NOMINAIS MÍNIMOS, apresentada a seguir.

Parágrafo único. Os valores constantes desta regulamentação estarão sujeitos às tolerâncias descritas na norma ABNT NBR 17.094-1/ 2013.

TABELA 1 - RENDIMENTOS NOMINAIS MÍNIMOS

Potência Nominal kW	cv	Velocidade Síncrona (rpm)			
		3600 2 Polos	1800 4 Polos	1200 6 Polos	900 8 Polos
0,12	0,16	62,0	66,0	64,0	59,5
0,18	0,25	65,5	69,5	67,5	64,0
0,25	0,33	69,5	73,4	69,0	68,0
0,37	0,50	73,4	78,2	75,3	72,0
0,55	0,75	76,8	79,0	79,5	74,0
0,75	1	80,5	83,5 <sup>a</sup>	82,5	75,5
1,1	1,5	84,0	86,5 <sup>b</sup>	87,5 <sup>c</sup>	78,5
1,5	2	85,5	86,5	88,5 <sup>d</sup>	84,0
2,2	3	86,5	89,5 <sup>e</sup>	89,5 <sup>f</sup>	85,5
3	4	88,5	89,5	89,5	86,5
3,7	5	88,5	89,5	89,5	86,5
4,4	6	88,5	89,5	89,5	86,5
5,5	7,5	89,5	91,7 <sup>g</sup>	91,0	86,5
7,5	10	90,2	91,7	91,0	89,5

Este documento pode ser verificado no endereço eletrônico <http://www.in.gov.br/autenticidade.html>, pelo código 00012017083000050

9,2	12,5	91,0	92,4	91,7	89,5
11	15	91,0	92,4	91,7	89,5
15	20	91,0	93,0	91,7	90,2
18,5	25	91,7	93,6	93,0	90,2
22	30	91,7	93,6	93,0	91,7
30	40	92,4	94,1	94,1	91,7
37	50	93,0	94,5	94,1	92,4
45	60	93,6	95,0	94,5	92,4
55	75	93,6	95,4	94,5	93,6
75	100	94,1	95,4	95,0	93,6
90	125	95,0	95,4	95,0	94,1
110	150	95,0	95,8	95,8	94,1
132	175	95,4	96,2	95,8	94,5
150	200	95,4	96,2	95,8	94,5
185	250	95,8	96,2	95,8	95,0
220	300	95,8	96,2	95,8	95,0
260	350	95,8	96,2	95,8	95,0
300	400	95,8	96,2	95,8	95,0
330	450	95,8	96,2	95,8	95,0
370	500	95,8	96,2	95,8	95,0

<sup>a</sup> Para motores na categoria 80, o valor mínimo de rendimento é 83%.  
<sup>b</sup> Para motores na categoria 80, o valor mínimo de rendimento é 84%.  
<sup>c</sup> Para motores na categoria 90, o valor mínimo de rendimento é 85,5%.  
<sup>d</sup> Para motores na categoria 100, o valor mínimo de rendimento é 86,5%.  
<sup>e</sup> Para motores na categoria 90, o valor mínimo de rendimento é 87,5%.  
<sup>f</sup> Para motores na categoria 100, o valor mínimo de rendimento é 87%.  
<sup>g</sup> Para motores na categoria 112, o valor mínimo de rendimento é 91%.

Art. 4º A data limite para fabricação no País ou importação dos motores objeto da regulamentação aqui tratada que não atendam ao disposto no art. 3º deste Anexo, será de dois anos, a contar da data da publicação desta Portaria.

Parágrafo único. Para os motores importados, os conhecimentos de embarque deverão ser emitidos até a data limite fixada no caput.

Art. 5º A data limite para comercialização no País dos motores referidos no art. 4º será de dois anos e seis meses a contar da data de publicação desta Portaria.

Art. 6º A data limite para fabricação no País ou importação de máquinas motrizes de uso final, cujos motores componentes sejam objeto desta regulamentação, que não atendam ao disposto no art. 3º deste Anexo será de três anos a contar da data de publicação desta Portaria.

Parágrafo único. Para as máquinas motrizes de uso final para as quais o atendimento a esta regulamentação implicar em modificações onerosas, financeiramente, tecnicamente ou operacionalmente, a serem devidamente justificadas, comprovadas e aceitas pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, ou ao órgão por ele indicado, o prazo definido no caput será estendido por mais seis meses.

Art. 7º A data limite para comercialização no País de máquinas motrizes de uso final referidas no art. 6º será de três anos e seis meses a contar da data de publicação desta Portaria.

Parágrafo único. Para as máquinas motrizes de uso final para as quais o atendimento a esta regulamentação implicar em modificações onerosas, financeiramente, tecnicamente ou operacionalmente, a serem devidamente justificadas, comprovadas e aceitas pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, ou ao órgão por ele indicado, o prazo definido no caput será estendido por mais seis meses.

Art. 8º O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro será o responsável pela fiscalização, acompanhamento e avaliação do cumprimento do disposto nesta Portaria, cabendo-lhe reportar ao Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE as não conformidades verificadas.

Parágrafo único. Com relação aos motores reconicionados, a fiscalização fica condicionada à análise do desenvolvimento de uma medida regulatória por parte do Inmetro.

Art. 9º O Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE, instituído pelo Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, será o responsável pelo acompanhamento e a avaliação das ações governamentais de suporte à implantação deste Programa de Metas, por intermédio do Comitê Técnico de Motores, cabendo-lhe elaborar relatórios periodicamente que subsidiem a verificação da viabilidade de atendimento desta Portaria, bem como propor ações complementares no sentido de compatibilizar o prazo de atendimento ao andamento das ações governamentais.

Art. 10. Até as datas estabelecidas nos arts. 4º, 5º, 6º e 7º, os motores caracterizados no art. 2º deste Anexo ficam sujeitos aos valores de rendimentos nominais mínimos estabelecidos pela Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 553, de 8 de dezembro de 2005, com a caracterização apresentada nos arts. 1º e 2º, do Anexo I, do Decreto nº 4.508, de 2002, e na Portaria Inmetro nº 488, de 8 de dezembro de 2010.

#### PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 2, DE 29 DE JUNHO DE 2017

OS MINISTROS DE ESTADO DE MINAS E ENERGIA, DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, E DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS, no uso das atribuições que lhes confere o art. 87, parágrafo único, incisos II e IV, da Constituição, tendo em vista o disposto no art. 2º da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, nos arts. 1º e 3º, caput e inciso II, do Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, no art. 2º do Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002, o que consta nos Processos nº 48000.0011805/2012-48 e nº 999118.000002/2017-14, e considerando que

compete ao Poder Executivo estabelecer níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia, fabricados ou comercializados no País, com base em indicadores técnicos pertinentes;

cabem ao Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE, instituído pelo Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, elaborar Regulamentação Específica para cada tipo de aparelho e máquina consumidora de energia, bem como estabelecer Programa de Metas com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados para cada equipamento regulamentado; e

as contribuições da sociedade com respeito à Regulamentação Específica de Ventiladores de Teto, recebidas por meio de Consulta Pública Eletrônica, Audiência Pública Presencial e Consulta Pública Internacional na Organização Mundial do Comércio - OMC, resolvem:

Art. 1º Aprovar a Regulamentação Específica de Ventiladores de Teto na forma constante dos Anexos I e II à presente Portaria.

Art. 2º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.

FERNANDO COELHO FILHO  
Ministro de Estado de Minas e Energia

GILBERTO KASSAB  
Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia,  
Inovações e Comunicações

MARCOS PEREIRA  
Ministro de Estado da Indústria, Comércio  
Exterior e Serviços

#### ANEXO I

#### REGULAMENTAÇÃO ESPECÍFICA QUE DEFINE OS NÍVEIS MÍNIMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VENTILADORES DE TETO

##### Capítulo I

##### CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

Art. 1º Os equipamentos objeto desta Regulamentação correspondem aos Ventiladores de Teto, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no País.

Parágrafo único. Os Ventiladores de Teto abrangidos por esta Portaria possuem as seguintes características:

I - Ventiladores de Teto são dispositivos mecânicos a serem fixados ao teto, operados por motor elétrico monofásico alimentado em tensão de 127V ou 220V. Esses equipamentos são utilizados para converter energia mecânica de rotação em aumento de pressão do ar através de hélices. Podem ser controlados através de interfaces agregadas diretamente à estrutura de ventilação ou remotamente, com ou sem fios; e

II - Os Ventiladores de Teto utilizam hélices de diâmetro máximo de 152,4 cm, cuja finalidade é a ventilação de ambientes domésticos ou comerciais.

Art. 2º O Anexo II apresenta definições adicionais que contribuem para a caracterização dos Ventiladores de Teto.

Parágrafo único. O Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE, instituído pelo Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, poderá, com apoio do Comitê Técnico Ventilação Doméstica, elaborar documentos complementares que se fizerem necessários para caracterizar os Ventiladores de Teto objeto desta Regulamentação.

##### NÍVEIS MÍNIMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Art. 3º O indicador de eficiência energética a ser utilizado é definido como a razão entre a vazão do fluxo de ar, medido em (m³/s), e a potência elétrica consumida, medida em watt (W).

Parágrafo único. Para a obtenção do nível de eficiência energética de um modelo de Ventilador de Teto, serão considerados os valores medidos de acordo com o Método de Ensaio adotado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro, por meio do Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE. Os níveis mínimos de eficiência energética a serem atendidos nos ensaios estão definidos na Tabela 1.

TABELA 1: NÍVEIS MÍNIMOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA VENTILADORES DE TETO [(M³/S)/W]

Baixa	Velocidade		Alta
	Média	0,016	
0,013		0,016	0,016

##### Capítulo III

##### EMBALAGEM DO PRODUTO

Art. 4º A embalagem de identificação dos Ventiladores de Teto deve conter explicitamente visível o Nível de Eficiência Energética [(m³/s)/W], podendo o cumprimento deste requisito se dar por meio da própria Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE.

Parágrafo único. Não será aceita, nas embalagens dos produtos, declaração de nível de eficiência energética inferior aos definidos na Tabela 1.

##### Capítulo IV

##### AVALIÇÃO DA CONFORMIDADE E LABORATÓRIOS

Art. 5º O mecanismo de avaliação da conformidade para verificação dos níveis mínimos de eficiência energética dos Ventiladores de Teto, caracterizados em conformidade com o Capítulo I desta Regulamentação, com foco no desempenho do produto e evidenciado pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE, no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE, será o estabelecido pelo Inmetro.

Documento assinado digitalmente conforme MP nº 2.200-2 de 24/08/2001, que instituiu a Infraestrutura de Chaves Públicas Brasileira - ICP-Brasil.

## ANEXO B – ENSAIOS E CARACTERÍSTICAS DO MOTOR *PREMIUM*

### B.1 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio é feito com o rotor sem carga sendo possível calcular as perdas rotacionais  $P_{rot}$ , a impedância com o motor a vazio  $Z_{vz}$ , a resistência  $R_{vz}$  e a reatância  $X_{vz}$  (FITZGERALD *et al.*, 2006). A Equação B.1 mostra o valor das perdas rotacionais, que é tomado pela diferença entre a potências a vazio  $P_{vz}$  e as perdas no cobre que é formada pelo produto do quadrado da corrente do estator em vazio  $I_{1,vz}^2$  e a resistência do estator  $R_1$ .

$$P_{rot} = P_{vz} - 3 \cdot I_{1,vz}^2 \cdot R_1 \quad (B.1)$$

Logo o valor das perdas no núcleo  $P_{nucleo}$  é uma parcela das perdas rotacionais, composta também pela perda de atrito e ventilação  $P_{av}$  e por perdas diversas  $P_{diversas}$ , como representado pela Equação B.2.

$$P_{nucleo} = P_{rot} - P_{av} - P_{diversas} \quad (B.2)$$

A reatância aparente  $X_{vz}$  medida no estator no ensaio a vazio é aproximadamente  $X_1 + X_m$ , que é a a reatância própria do estator  $X_{11}$  (FITZGERALD *et al.*, 2006).

$$X_{vz} \approx X_{11} = X_1 + X_m \quad (B.3)$$

Obtendo-se o valor da potência reativa do ensaio a vazio  $Q_{vz}$  e a corrente a vazio do estator  $I_{1,vz}^2$  tem-se a reatância aparente a vazio  $X_{vz}$  (FITZGERALD *et al.*, 2006).

$$X_{vz} = \frac{Q_{vz}}{3 \cdot I_{1,vz}^2} \quad (B.4)$$

### B.2 Ensaio com o rotor bloqueado

Segundo Chapman (2013), a frequência na qual o ensaio com rotor bloqueado é feita a 25% da frequência nominal do motor, ou seja, para 60Hz de frequência nominal, a frequência de ensaio seria 15Hz. Dessa forma o valor de resistência do rotor será mais bem estimado. Porém, a menor frequência possível do inversor utilizado foi de 16Hz.

Com o rotor bloqueado, ajusta-se o valor de tensão até alcançar a valor de corrente nominal. Assim, toma-se as medidas de potência ativa, frequência, tensão e corrente, determina-se a fator de potência  $FP$ , que é o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente  $\alpha$ , através da razão potência ativa do rotor bloqueado com frequência de 16Hz  $P_{bl,16Hz}$  pelo produto

da tensão do ensaio do rotor bloqueado  $V_{bl,16Hz}$  e a corrente do ensaio, que é a corrente nominal do motor  $I_n$  (FITZGERALD *et al.*, 2006).

$$FP = \cos\alpha = \frac{P_{bl,16Hz}}{V_{bl,16Hz} \cdot I_n} \quad (\text{B.5})$$

A resistência do rotor bloqueado  $R_{bl}$  é a razão de  $P_{bl,16Hz}$  por  $I_n^2$ , que por sua vez é a soma da resistência do estator com a do rotor.

$$R_{bl} = \frac{P_{bl,16Hz}}{I_n^2} = R_1 + R_2 \quad (\text{B.6})$$

O módulo da impedância é obtida pela razão de  $V_{bl,16Hz}$  pela corrente nominal.

$$|Z_{bl,16Hz}| = \frac{V_{bl,16Hz}}{I_n} \quad (\text{B.7})$$

Logo na forma fasorial pode-se determinar a resistência do rotor bloqueado  $R_{bl}$  e a reatância do rotor bloqueado para a frequência de ensaio  $X_{bl,16Hz}$ .

$$Z_{bl,16Hz} = R_{bl} + j \cdot X_{bl,16Hz} = |Z_{bl,16Hz}| \cdot \cos\alpha + j \cdot |Z_{bl,16Hz}| \cdot \sin\alpha \quad (\text{B.8})$$

Como a reatância varia com a frequência, deve-se fazer uma equivalência para a frequência nominal da reatância do rotor bloqueado  $X_{bl}$  (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD *et al.*, 2006).

$$X_{bl} = \frac{60}{16} \cdot X_{bl,16Hz} \quad (\text{B.9})$$

O motor de classe A tem a reatância do estator  $X_1$  e do rotor  $X_2$  iguais, logo (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD *et al.*, 2006).

$$X_1 = \frac{X_{bl}}{2} \quad (\text{B.10})$$

$$X_2 = X_1 \quad (\text{B.11})$$

O valor da reatância de magnetização  $X_m$  é a diferença entre as reatâncias a vazio e a reatância do estator.

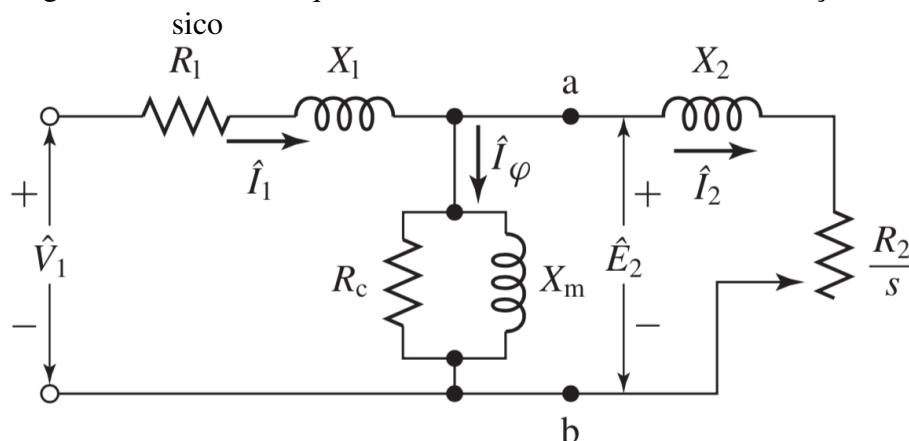
$$X_m = X_{vz} - X_1 \quad (\text{B.12})$$

## ANEXO C – MODELOS PARA ESTIMATIVA DE CONJUGADO MECÂNICO

### C.1 Modelo Circuito Equivalente

O modelo do circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásica é uma representação adequada para analisar o funcionamento do motor em regime permanente com cargas equilibradas e tensões senoidais. A Figura 44 representa esse circuito (CHAPMAN, 2013).

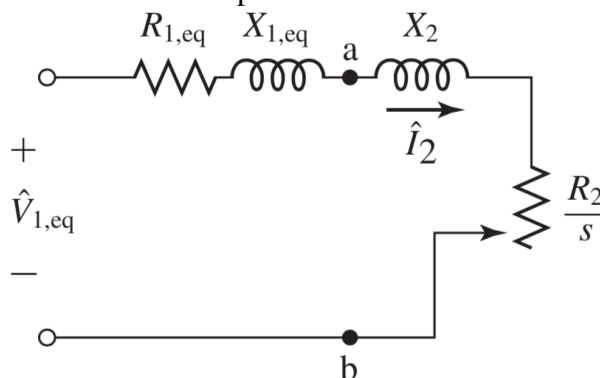
Figura 44 – Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico



Fonte: (FITZGERALD *et al.*, 2006).

Esse circuito possibilita a análise de velocidade, variação da corrente, perdas em função ao conjugado de carga, conjugado de partida e conjugado máximo. A partir desse circuito equivalente pode-se aplicar o teorema de Thévenin nos terminais do rotor para simplificar as equações de tensão, impedância e conjugado mecânico (FITZGERALD *et al.*, 2006). A Figura 45 mostra essa simplificação.

Figura 45 – Circuito equivalente monofásico do motor de indução trifásico, simplificado pelo teorema de Thévenin.



Fonte: (FITZGERALD *et al.*, 2006)



A Equação C.1 representa a impedância de dispersão equivalente referenciada do rotor  $Z_{1,eq}$  pelo teorema de Thévenin.

$$Z_{1,eq} = \frac{jX_m \cdot (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (C.1)$$

A Equação C.2 é a tensão da fonte equivalente  $V_{1,eq}$  pelo teorema de Thévenin nos terminais do rotor.

$$V_{1,eq} = V_1 \cdot \left[ \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right] \quad (C.2)$$

O conjugado mecânico  $T_{mec}$  representado pela Equação C.3 é a razão da potência mecânica do rotor  $P_{mec}$  pela velocidade angular do rotor  $\omega_m$ .

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} = \frac{1}{\omega_s \cdot (1-s)} \cdot \left[ \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \left( \frac{R_2}{1} \right)}{\left( R_{1,eq} + \frac{R_2}{1} \right)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right] \quad (C.3)$$

## C.2 Modelo ABC

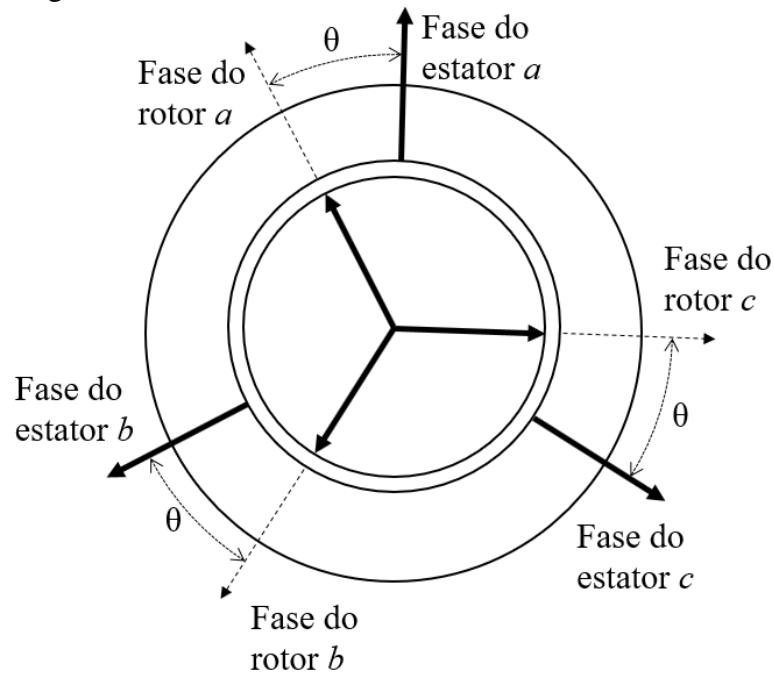
O modelo ABC é uma modelagem do funcionamento do motor de indução em função do tempo abordando corrente do estator e rotor, velocidade do motor, resistência do estator e rotor, indutância do estator e rotor mútuas e próprias e conjugado (BARBI, 1985). A Figura 46 mostra a defasagem angular dos fasores de tensão entre rotor e estator do motor de corrente trifásica.

Sendo  $R_1$  o valor da resistência do estator, e por sua vez a  $RR_1$  a matriz com os valores de sua resistência na Equação C.4. Da mesma forma na Equação C.5 para a resistência do rotor  $R_2$  a sua matriz é representada por  $RR_2$ .

$$RR_1 = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

$$RR_2 = \begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

Figura 46 – Fasores de tensão do Modelo ABC.



Fonte: adaptado de (PEREIRA, 2006)

Para as indutâncias do motor tem-se que a matriz de indutâncias do estator  $LL_1$  na Equação C.6 é composta pela indutância própria do estator  $L_1$  e a indutância mútua entre os enrolamentos do estator  $M_1$  e para a matriz de indutâncias do rotor  $LL_2$  na Equação C.7, tem-se  $L_2$  para as indutâncias próprias do rotor e  $M_2$  para as indutâncias mútuas entre os enrolamentos do rotor. A matriz de indutância mútua entre o estator e o rotor  $LL_{12}$  na Equação C.8 varia com o valor da indutância mútua entre o rotor e o estator através deslocamento angular  $\theta$  (FITZGERALD *et al.*, 2006).

$$LL_1 = \begin{bmatrix} L_1 & M_1 & M_1 \\ M_1 & L_1 & M_1 \\ M_1 & M_1 & L_1 \end{bmatrix} \quad (C.6)$$

$$LL_2 = \begin{bmatrix} L_2 & M_2 & M_2 \\ M_2 & L_2 & M_2 \\ M_2 & M_2 & L_2 \end{bmatrix} \quad (C.7)$$

$$LL_{12}(\theta) = M_{12} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

Com as equações anteriores podem ser determinadas as tensões do estator na Equação C.9 e do rotor na Equação C.10 sendo  $i_{i1}$  a corrente do estator e  $i_{i2}$  a corrente do rotor (PEREIRA, 2006).

$$v_{v1} = RR_1 \cdot i_{i1} + \frac{d}{dt} \cdot (LL_1 \cdot i_{i1} + LL_{12}(\theta) \cdot i_{i2}) \quad (\text{C.9})$$

$$v_{v2} = RR_2 \cdot i_{i2} + \frac{d}{dt} \cdot (LL_2 \cdot i_{i2} + LL_{12}(\theta)^t \cdot i_{i1}) \quad (\text{C.10})$$

Sendo a Equação C.11 a equação do conjugado eletromagnético  $T$ , subtraem-se os conjugados de momento de inércia do disco,  $J$ , pela aceleração e o de atrito viscoso,  $B$ , resultando na Equação C.12 (PEREIRA, 2006).

$$T = i_{i1}^t \cdot \frac{\partial (LL_{12}(\theta))}{\partial t} \cdot i_{i2} \quad (\text{C.11})$$

$$T_{mec} = T - \left( J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m \right) \quad (\text{C.12})$$

## ANEXO D – FICHA TÉCNICA DO MOTOR

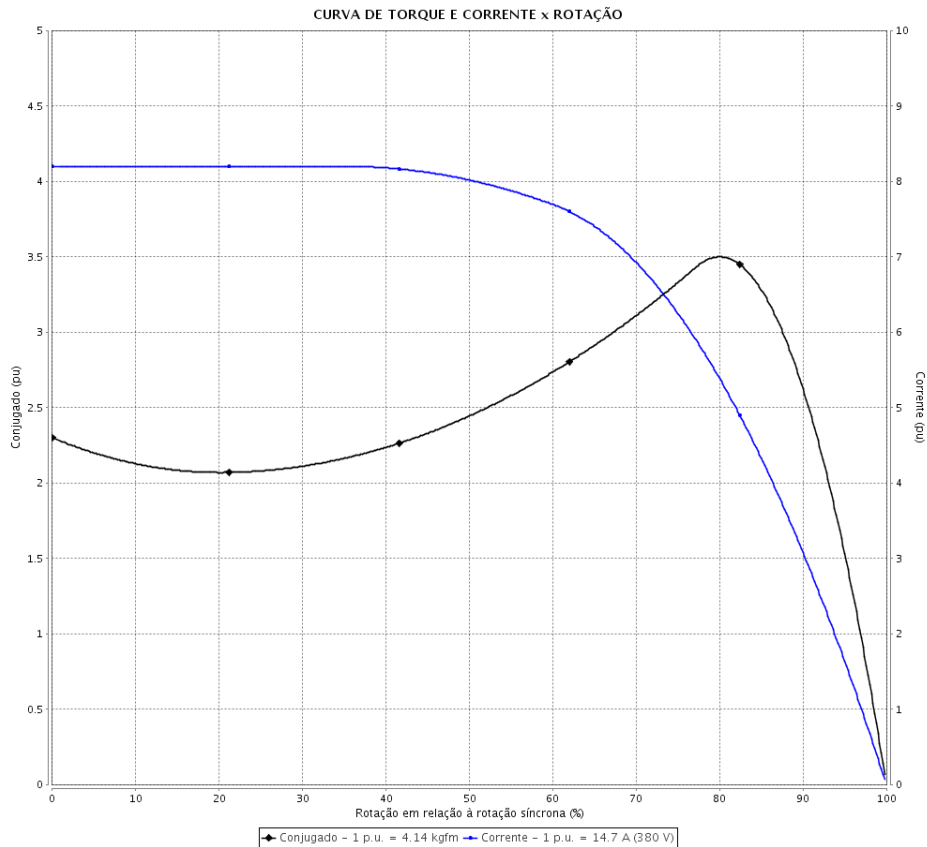
### CURVA DE TORQUE E CORRENTE x ROTAÇÃO

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola



Cliente :  
Referencia do cliente :

Linha do produto : W22 IR3 Premium Trifásico      Código do produto : 11417441



Desempenho : 220/380 V 60 Hz 4P				
Corrente nominal : 25.4/14.7 A Ip/In : 8.2 Conjugado nominal : 4.14 kgfm Conjugado de partida : 229 % Conjugado máximo : 350 % Rotação nominal : 1765 rpm	Momento de inércia (J) : 0.0563 kgm <sup>2</sup> Regime de serviço : S1 Classe de isolamento : F Fator de serviço : 1.25 Elevação de temperatura : 80 K Categoria : N			
Tempo de rotor bloqueado : 23s (frio) 13s (quente)				
Rev.	Resumo das modificações	Executado	Verificado	Data
Executor				
Verificador			Página	Revisão
Data	21/04/2017		2 / 5	