

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

**Bruno Ferreira Fontana**

**Relatório de Projeto de Fim de Curso**

**Validação de um Método Indireto de  
Estimação da Velocidade Angular de Motores  
de Corrente Contínua sem Escovas Acoplados  
de Compressores Herméticos**

Florianópolis

18 de fevereiro de 2018

Bruno Ferreira Fontana

Validação de um Método Indireto de  
Estimação da Velocidade Angular de Motores  
de Corrente Contínua sem Escovas Acoplados  
de Compressores Herméticos

Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para aprovação na disciplina **DAS 5511: Projeto de Fim de Curso** do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.  
Orientador(es): Prof. Hector Bessa Silveira

Florianópolis

18 de fevereiro de 2018

**Bruno Ferreira Fontana**

# **Validação de um Método Indireto de Estimação da Velocidade Angular de Motores de Corrente Contínua sem Escovas Acoplados de Compressores Herméticos**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511: Projeto de Fim de Curso e **APROVADA** na sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação.

Florianópolis,            de    de

## **Banca Examinadora:**

Fernando Shiessl de Souza  
Orientador na Empresa  
Whirlpool - Unidade Embraco

Carlos Alberto Flesch  
Orientador no Local de Trabalho  
LabMetro, UFSC

Hector Bessa Silveira  
Orientador no Curso  
Universidade Federal de Santa Catarina

Henrique Simas  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Angelo Frigeri Araujo  
Debatedor  
Universidade Federal de Santa Catarina

William de Medeiros Galvani  
Debatedor  
Universidade Federal de Santa Catarina

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais Roberto Aldoir Fontana e Marifátima Ferreira Fontana, pelo apoio, carinho e paciência depositados não somente durante a graduação, como em todo a minha vida.

Aos meus irmãos Beatriz Ferreira Fontana e Breno Ferreira Fontana, pelo carinho e apoio.

A minha namorada Lara Comin Salvaro, pela parceria, apoio nos momentos de dificuldade, sempre renovando minhas forças.

A minha família como um todo, pelo apoio e confiança depositados em mim.

Ao Professor Carlos Alberto Flesch, pela experiência e suporte como meu orientador no Labmetro.

Ao colega e tutor Cícero Borba Walendowsky, pelo compartilhamento de conhecimento e auxílio em diversas etapas do trabalho.

Aos colegas de laboratório, Guilherme, Bernardo, William e Ahryman, pelo compartilhamento de informações e momentos de descontração.

Aos demais colegas de LIAE, pelo compartilhamento de conhecimentos e pelos momentos de boas conversas durante os intervalos para o café.

Aos meus professores e demais integrantes do Departamento de Automação, que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

Aos meus colegas de graduação, que me proporcionaram experiências e aprendizados que levarei para toda a vida.

Ao professor e meu orientador Hector Bessa Silveira, pelos ensinamentos transmitidos durante este trabalho.

A Embraco, pela oportunidade e suporte financeiro disponibilizados.

Aos demais integrantes do Labmetro, da Fundação Certi, da Embraco e da UFSC, que direta ou indiretamente fizeram parte da minha trajetória acadêmica.

Meu muito obrigado.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar. Mas  
o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*  
*(Madre Teresa de Calcutá)*

# Resumo

Os refrigeradores domésticos são uma das máquinas de refrigeração com maior alcance mundial. Dentre os diversos elementos que compõem um refrigerador, o presente trabalho trata do compressor hermético. Esse elemento é responsável por fazer circular o fluido refrigerante pelo sistema e está intimamente ligado às pressões de evaporação e condensação do refrigerador. Tais pressões são as grandezas físicas principais no que diz respeito ao funcionamento dos ciclos térmicos durante a utilização do refrigerador. A medição e monitoramento dessas pressões está geralmente presente apenas nas etapas de produção e testes em fábrica dos compressores, sendo dificilmente encontrada nos produtos finais. O motivo é que são necessários sistemas relativamente caros e complexos para o monitoramento de tais grandezas. Estes sistemas necessitam de transdutores específicos e exigem adequações físicas ao sistema de refrigeração. Com a tecnologia atualmente utilizadas, os custos envolvidos acabam por inviabilizar o monitoramento das pressões de evaporação e condensação em refrigeradores comerciais. A medição de tais grandezas abriria caminho para implementação de compressores mais “inteligentes” e, por sua vez, uma nova geração de refrigeradores comerciais. Desenvolver métodos de estimação destas grandezas sem incorporar custos significativos vem sendo um desafio. As pesquisas que motivaram essa monografia vislumbraram uma forma de relacionar torque e velocidade angular, que são grandezas do motor elétrico presente no compressor, para estimar as pressões de interesse. O objetivo do presente trabalho é analisar a viabilidade, precisão e confiabilidade de um método específico de estimação de baixo custo, da velocidade angular instantânea de motores elétricos de corrente contínua sem escovas acoplados e presentes em compressores herméticos de refrigeradores comerciais. Espera-se assim contribuir para a implementação de sistemas de monitoramento das pressões de evaporação e condensação em gerações futuras de refrigeradores comerciais. A estimativa da velocidade angular instantânea será realizada através de um método indireto recentemente desenvolvido no Laboratório de Instrumentação e Automação (LIAE) do Labmetro da UFSC. Tal método é não-invasivo e estima a velocidade angular com base na de tensão e corrente do compressor. Neste trabalho é realizada uma comparação experimental entre o referido método indireto e a utilização direta de *encoders*, seguida de uma análise detalhada da viabilidade, precisão e confiabilidade do método indireto como técnica de estimação da velocidade angular instantânea nos motores elétricos em questão.

**Palavras-chave:** Compressores herméticos. Motor de corrente contínua sem escovas. Velocidade angular instantânea. Estimador de estado.

# Abstract

Domestic refrigerators are one of the cooling machines with biggest global reach. Among the several elements that compose a refrigerator, the present work deals with hermetic compressor. This element is responsible for made the cooling fluid circulate through the system and it is intimately connected with the evaporation and condensing pressures of the refrigerator. Such pressures are the main physical quantities on the subject of thermal cycle working during the refrigerator's operation. The measurement and monitoring of this pressures are usually present only in the stages of production and testing at fabric, hardly been founded in the commercial product. The reason is because are necessary systems relatively expensive and complex for monitoring these quantities. This systems needs specific transducers that involve an adaptation in the actual system configuration. With the technology currently used, the costs make it impossible to monitor the evaporation and condensation pressures in commercial refrigerators. Measuring such quantities would pave the way for more "smart" compressors, and in turn, a new generation of commercial refrigerators. Developed a methods to estimate these quantities without increase costs has been a challenge. The study that motivated this monograph found a way to relate torque and angular speed, which are physical quantities of the motor coupled to the compressor, for obtain the main pressures. The objective of the present work is to analyze the feasibility, accuracy and reliability of a specific low cost estimation method, of the instantaneous angular velocity of brushless direct current motors coupled and present in hermetic compressors of commercial refrigerators. Expected contribute for the implementation of monitoring systems for the evaporation and condensation pressures in future generations of commercial refrigerators. The estimation of instantaneous angular velocity will be performed through an indirect method recently developed in the Instrumentation and Automation Laboratory (LIAE) of Labmetro of UFSC. Such method is non-invasive and estimates the angular velocity based on the compressor voltage and current. This work realized an experimental comparison between this indirect method and the direct use of encoders, followed by a detailed analysis of the viability, accuracy and reliability of the indirect method as a technique to estimate instantaneous angular velocity in the electric motors in question.

**Keywords:** Hermetic compressors. Brushless Direct Currents Motors. Instantaneous angular velocity. State estimator.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Compressor hermético fornecido pela empresa parceira para realização dos experimentos. . . . .	22
Figura 2 – Esquemático de um sistema de refrigeração e seus principais componentes.	23
Figura 3 – Câmara de compressão com seus quatro estágios e pistão com mecanismo de biela-manivela . . . . .	24
Figura 4 – Mecanismo biela manivela que acopla o eixo do rotor ao pistão do compressor	24
Figura 5 – Vista superior do mecanismo biela manivela que acopla o eixo do rotor ao pistão do compressor . . . . .	25
Figura 6 – Motor <i>BLDC</i> utilizado . . . . .	26
Figura 7 – Modelagem elétrica de uma fase do motor <i>BLDC</i> . . . . .	27
Figura 8 – Modelagem elétrica do motor <i>BLDC</i> . . . . .	27
Figura 9 – Circuito simplificado do inversor de frequência . . . . .	30
Figura 10 – Inversor de frequência utilizado para acionar o compressor . . . . .	30
Figura 11 – Representação esquemática do circuito de medição do termopar . . . . .	31
Figura 12 – <i>Encoder</i> HEDS-9100 e disco perfurado . . . . .	32
Figura 13 – <i>Power Analyzer PZ4000</i> . . . . .	34
Figura 14 – Módulo de aquisição para medição dos termopares - ADAM 4018+ . . . . .	34
Figura 15 – Vistas dos cabeçote do compressor acoplado ao motor . . . . .	38
Figura 16 – Representação da peça usada para resolver a excentricidade . . . . .	38
Figura 17 – Montagem da estrutura de acoplamento entre o cabeçote e o eixo do <i>encoder</i>	39
Figura 18 – Vista superior do <i>encoder</i> acoplado ao cabeçote. . . . .	39
Figura 19 – Proteção para isolar o <i>encoder</i> . . . . .	40
Figura 20 – Compressor sem a parte superior da carcaça devido ao acréscimo do <i>encoder</i> .	40
Figura 21 – Proteção feita para evitar contato entre a parte interna do compressor com o exterior. . . . .	40
Figura 22 – Estator do motor <i>BLDC</i> utilizado . . . . .	41
Figura 23 – Junção do termopar tipo T utilizado no trabalho. . . . .	42
Figura 24 – Aspecto final da junção do termopar . . . . .	42
Figura 25 – Termopares instalados nas bobinas do estator do motor <i>BLDC</i> . . . . .	43
Figura 26 – Manômetro analógico e válvula reguladora de vazão . . . . .	44
Figura 27 – Representação esquemática do fluxo de informações entre os equipamentos	47
Figura 28 – Diagrama em <i>LabView</i> que faz a comunicação entre computador e inversor de frequência . . . . .	49

Figura 29 – Diagrama em <i>LabView</i> que faz a comunicação entre computador e o módulo de aquisição <i>ADAM-4018+</i> . . . . .	50
Figura 30 – Diagrama em <i>LabView</i> que faz a comunicação entre computador e o <i>PZ4000</i>	51
Figura 31 – Arquivo de texto criado para cada experimento . . . . .	52
Figura 32 – Painel de controle supervisorio em <i>LabView</i> para acionamento e aquisição dos dados . . . . .	53
Figura 33 – Back EMF calculada para cada uma das três fases do motor <i>BLDC</i> acoplado ao compressor hermético . . . . .	56
Figura 34 – Back EMF calculada para cada uma das três fases do motor <i>BLDC</i> acoplado ao compressor hermético . . . . .	57
Figura 35 – Histograma . . . . .	59
Figura 36 – Módulo da Back EMF com destaque para o patamar de tensão . . . . .	60
Figura 37 – Back EMF com divisões determinadas através da Integral do Patamar .	61
Figura 38 – Histograma . . . . .	62
Figura 39 – Histograma . . . . .	63
Figura 40 – Efeito de diferentes valores de indutância . . . . .	64
Figura 41 – Efeito de diferentes valores de resistência . . . . .	66
Figura 42 – Discretização do sinal do <i>encoder</i> . . . . .	68
Figura 43 – Curva de erro do <i>encoder</i> para diferentes velocidades angulares . . . . .	69
Figura 44 – Velocidade angular dentro de uma volta do rotor calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto . . . . .	71
Figura 45 – Diferença percentual entre a velocidade angular de referência e a velocidade angular do método indireto . . . . .	72
Figura 46 – Efeito do filtro em cada uma das respostas isoladamente . . . . .	73
Figura 47 – Velocidade angular dentro de uma volta do rotor calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto filtradas e a diferença entre elas . . . . .	74
Figura 48 – Curva média das 21 velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto com o envelope de 2 desvio padrão para mais e para menos . . . . .	76
Figura 49 – Curva média das velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto e a diferença entre elas . . . . .	77
Figura 50 – Curva média das velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto filtradas e a diferença entre elas . . . . .	78
Figura 51 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto, com pressão de descarga constante . . . . .	80
Figura 52 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 3600 RPM	82
Figura 53 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 2600 RPM	83

Figura 54 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 2200 RPM	83
Figura 55 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 1600 RPM	84
Figura 56 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto para pressão de descarga de 4 bar . . . . .	85
Figura 57 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto para pressão de descarga de 5 bar . . . . .	85
Figura 58 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto para pressão de descarga de 6 bar . . . . .	86
Figura 59 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 4 bar .	87
Figura 60 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 5 bar .	88
Figura 61 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 6 bar .	88
Figura 62 – Velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto com reamostragem digital para 1.25 MHz e filtro, e a diferença entre elas	91
Figura 63 – Velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto com reamostragem digital para 625 kHz e filtro, e a diferença entre elas .	92
Figura 64 – Velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto com reamostragem digital para 312.5 kHz e filtro, e a diferença entre elas	93
Figura 65 – Velocidades angulares calculadas a partir do <i>encoder</i> e do método indireto com reamostragem digital para 156.25 kHz e filtro, e a diferença entre elas	94
Figura 66 – Velocidade angular média para a condição de 1600 RPM e 4 bar na descarga	99
Figura 67 – Velocidade angular média para a condição de 1600 RPM e 5 bar na descarga	100
Figura 68 – Velocidade angular média para a condição de 1600 RPM e 6 bar na descarga	101
Figura 69 – Velocidade angular média para a condição de 2200 RPM e 5 bar na descarga	102
Figura 70 – Velocidade angular média para a condição de 2200 RPM e 6 bar na descarga	103
Figura 71 – Velocidade angular média para a condição de 2600 RPM e 4 bar na descarga	104
Figura 72 – Velocidade angular média para a condição de 2600 RPM e 5 bar na descarga	105
Figura 73 – Velocidade angular média para a condição de 3600 RPM e 4 bar na descarga	106
Figura 74 – Velocidade angular média para a condição de 3600 RPM e 5 bar na descarga	107

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Diferença em pulsos do <i>encoder</i> e em graus . . . . .	58
Tabela 2 – Diferença em pulsos do <i>encoder</i> e em graus utilizando os cruzamentos reais e utilizando a integral do patamar . . . . .	62
Tabela 3 – Valor de velocidade médio calculado para diferentes condições de velocidades testadas . . . . .	81
Tabela 4 – Amplitudes da curva de velocidade angular para diferentes condições de velocidades testadas . . . . .	82
Tabela 5 – Valor de velocidade média calculado para diferentes condições de pressão de descarga testadas . . . . .	86
Tabela 6 – Amplitudes da curva de velocidade angular para diferentes condições de pressão de descarga testadas . . . . .	87

# Lista de Siglas

$\sigma$	Desvio padrão
<i>Back EMF</i>	<i>Back Electro-Motive Force</i>
<i>BLDC</i>	<i>Brushless Direct Current</i>
<i>f<sub>cem</sub></i>	<i>Força Contra Eletromotriz</i>
<i>LabView</i>	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
<i>PMSM</i>	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>VI</i>	<i>Virtual Instruments</i>
LabMetro	Laboratório de Metrologia e Automatização
LIAE	Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios
PFC	Projeto de Fim de Curso
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação	18
1.2	Obejetivo Geral	19
1.3	Objetivos Específicos	19
1.4	Organização do Documento	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	Compressor Hermético e Sistema de Refrigeração	22
2.2	Motor de Corrente Contínua Sem Escovas (Brushless Direct Current - BLDC)	25
2.3	Acionamento do Compressor	29
2.4	Termopares Para Aquisição da Temperatura das Bobinas do Motor	31
2.5	Encoder Incremental Para Medição Direta da Velocidade Angular do Motor	32
2.6	Bancada para Realização dos Experimentos e Aquisição dos Sinais de Interesse	33
2.7	Conceitos Gerais e Termos Associados a Fundamentos da Metrologia	35
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO DO COMPRESSOR HERMÉTICO</b>	<b>37</b>
3.1	Instalação do Encoder Incremental HEDS 9100	37
3.2	Instalação dos Termopares nas Bobinas do Motor	41
3.3	Instalação de Manômetro e Válvula de Vazão na Descarga do Compressor	44
3.4	Considerações Finais	45
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DE REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS</b>	<b>47</b>
4.1	Montagem da Bancada Para os Experimentos	47
4.2	Software em LabView Para Acionamento do Compressor e Aquisição e Armazenamento dos Dados Medidos	49
4.3	Experimentos Realizados	52
4.4	Considerações Finais	54
<b>5</b>	<b>MÉTODO INDIRETO DE ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA</b>	<b>55</b>

---

<b>5.1</b>	<b>Método da Integral do Patamar Para Estimar a Velocidade Angular Instantânea</b> . . . . .	<b>55</b>
5.1.1	Indutância e Resistência do Motor <i>BLDC</i> . . . . .	63
<b>5.2</b>	<b>Considerações Finais</b> . . . . .	<b>66</b>
<b>6</b>	<b>VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO INDIRETO</b> . . . . .	<b>67</b>
<b>6.1</b>	<b>Encoder Incremental</b> . . . . .	<b>67</b>
<b>6.2</b>	<b>Comparação Entre as Velocidades Angulares Obtidas com o Método Indireto e com o Método Direto</b> . . . . .	<b>69</b>
6.2.1	Comparação Entre os Resultados Para Uma Única Medição . . . . .	70
6.2.2	Comparação Entre os Resultados Para Todas as Medições de Uma Única Condição	75
6.2.3	Comparação Entre os Resultados Para Diferentes Condições de Velocidade Angular Média . . . . .	79
6.2.4	Comparação Entre os Resultados Para Diferentes Condições de Pressão de Descarga . . . . .	84
<b>6.3</b>	<b>Análise da Frequência de Aquisição Mínima Necessária Para o Funcionamento do Método da Integral do Patamar</b> . . . . .	<b>89</b>
<b>6.4</b>	<b>Considerações Finais</b> . . . . .	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DA VIABILIDADE DO MÉTODO INDIRETO</b> . . . . .	<b>97</b>
<b>7.1</b>	<b>Validação do Método Indireto para Estimação da Velocidade Angular</b>	<b>97</b>
<b>7.2</b>	<b>Considerações Finais</b> . . . . .	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>111</b>



# 1 Introdução

Refrigeradores são considerados eletrodomésticos de extrema importância e estão presentes na maioria das casas brasileiras e ao redor do mundo. Isto mostra o quanto a sociedade é dependente de tal sistema de refrigeração, cuja função primordial é assegurar a conservação dos alimentos. Para reforçar sua importância prática e social, segundo o artigo 1º, parágrafo único da Lei 8.009/90, o refrigerador é um bem de família impenhorável.

Como em qualquer bem de consumo, os refrigeradores devem equilibrar um compromisso entre alta eficiência e baixo custo. Esta tarefa impõe obstáculos que as empresas buscam superar dia após dia. Tais desafios se resumem em fabricar um eletrodoméstico o mais barato possível sem abrir mão de qualidade, segurança e desempenho. Esta premissa se aplica a cada um dos variados dispositivos que compõem o refrigerador, sendo um dos principais o compressor hermético, foco de estudo do presente trabalho.

O compressor é o coração do sistema de refrigeração, e estão presentes não apenas em geladeiras, como também em freezers, frigobares, ar condicionados, etc. Os compressores do tipo hermético possuem a câmara de compressão e o motor elétrico, ambos alocados dentro de um invólucro selado, daí a origem do nome hermético. Tal característica traz vantagens como, por exemplo, baixíssima incidência de vazamentos e tamanho reduzido do compressor. Entretanto, também traz inúmeras dificuldades do ponto de vista de instrumentação e controle. Estas desvantagens estão presentes visto que grandezas físicas importantes como, velocidade do eixo do motor e pressão na câmara do compressor, são internas ao invólucro.

No interior dos compressores herméticos encontra-se o motor, responsável por entregar a potência necessária para o ciclo de compressão. Entre os tipos de motores mais utilizados temos: motor de indução, motor sem escovas síncrono de ímãs permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM*) e os de corrente contínua sem escovas (*Brushless Direct Current - BLDC*). O motor do tipo *BLDC* é o utilizado no compressor de estudo, sendo o mesmo alimentado por um conversor eletrônico que efetua o controle da sua frequência rotacional.

Com o objetivo de estudar o compressor hermético, um componente essencial de qualquer sistema de refrigeração convencional, foi realizado um projeto em parceria com uma grande fabricante de compressores<sup>1</sup> e o Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio (LIAE). O LIAE faz parte do Laboratório de Metrologia e Automação (Lab-Metro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Foi o surgimento desse projeto sobre a estimação de fenômenos internos ao invólucro do compressor hermético, que trouxe

---

<sup>1</sup> Empresa multinacional cujo nome não será apresentado por questões de confidencialidade.

a oportunidade do desenvolvimento do presente Projeto de Fim de Curso (PFC).

## 1.1 Motivação

Os refrigeradores precisam executar diversos processos termodinâmicos e, para isso, são projetados para funcionar de acordo com as condições típicas de trabalhos e normas regulamentadoras. O fator custo é primordial e, portanto, é preciso optar por instalações simplificadas de alguns componentes do sistema como, por exemplo, dispositivos de expansão com geometria fixa, quando o ideal seria geometria variável. No caso dos compressores já se utiliza tecnologias mais refinadas, como é o caso dos compressores de capacidade variável, os quais podem trabalhar em mais de uma condição de carga. Para realizar essa adequação a diferentes cargas, deve-se atuar sobre a velocidade angular média do motor.

Para que seja possível empregar um controle ativo eficiente, é necessário monitorar as pressões do fluido refrigerante ao longo dos ciclos de funcionamento. Essas pressões podem ser resumidas em pressão de evaporação e pressão de condensação. Em laboratório, tais pressões são extensamente monitoradas, mas o intuito é apenas de validação dos compressores para as diversas condições de uso. Esses monitoramentos exigem bancadas por vezes complexas, que utilizam transdutores de pressão. A medição dessas grandezas (pressões de evaporação e condensação) não é realizada no produto final, uma vez que a relação custo benefício não a viabiliza com os métodos existentes atualmente. Caso fosse possível viabilizar tais medições nos produtos finais, abriria-se portas para novas gerações de refrigeradores mais eficientes, com melhores estratégias de controle e diagnósticos precisos das suas condições de uso.

O LIAE vem desenvolvendo estudos na busca de viabilizar as referidas medições no produto final. Tais estudos originaram um trabalho de doutorado e algumas outras ramificações, que por sua vez deram origem a trabalhos de mestrado e PFC. Uma das ramificações busca estimar a velocidade angular instantânea do motor presente no compressor, tal grandeza tem relação com as pressões mencionadas e, por si só, pode ser fonte de outras melhorias para o sistema de refrigeração. Uma solução que mescla equações analíticas e métodos numéricos foi desenvolvida em [1] e [2] para estimar indiretamente a velocidade angular. Essa solução é considerada um método indireto de estimação da velocidade angular pois, não é necessário a aquisição de nenhuma grandeza mecânica como deslocamento angular, a estimação é feita a partir de tensão e corrente apenas. Tal método indireto de estimação não-invasiva e de custo relativamente baixo precisa ser validada experimentalmente afim de se analisar sua precisão e confiabilidade. Esse é o tema central do presente trabalho.

No âmbito do LIAE, o presente trabalho colaborou em dar suporte a tese de doutorado do aluno Cícero Borba [1] e a possibilitar novas tratativas com a empresa parceira no prosseguimento das pesquisas e na implementação prática do método.

## 1.2 Obejetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é validar experimentalmente e analisar a viabilidade do método indireto mencionado acima de estimação da velocidade angular de um motor *BLDC*, o qual faz parte do compressor hermético aqui considerado. Por ser um método considerado inédito na literatura, não existe até o momento nenhum estudo quantitativo ou qualitativo sobre a precisão e confiabilidade de estimação.

Para se atingir tal objetivo, será feita uma comparação experimental da estimativa fornecida pelo referido método indireto com a medição de referência obtida por um *encoder* incremental de 500 pulsos. Serão aplicadas ferramentas estatísticas em tal comparação para se obter maior confiabilidade na análise dos resultados obtidos. Isto possibilitará avaliar a viabilidade de se utilizar método indireto para estimar a velocidade angular instantânea em gerações futuras de refrigeradores comerciais.

Para alcançar esse objetivo geral, são propostos alguns objetivos específicos.

## 1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Escolher equipamentos e transdutores necessários para realização dos experimentos e aquisição das variáveis de interesse;
- Instrumentar o compressor hermético disponibilizado pela empresa, para realização dos experimentos;
- Montar uma bancada temporária para realização dos experimentos e determinar as condições de contorno desejadas;
- Analisar dos resultados obtidos de velocidade angular instantânea, realizando comparações entre os resultados oriundos do método indireto e os valores de referência obtidos pelo *encoder*;
- Analisar as incertezas estatísticas de tal comparação;
- Avaliar a viabilidade e confiabilidade do método indireto de estimação da velocidade angular instantânea.

## 1.4 Organização do Documento

Esta monografia está dividida da seguinte forma.

O Capítulo 2 tratará a fundamentação teórica do compressor hermético, do motor, dos equipamentos e transdutores utilizados e de alguns aspectos metrológicos que serão essenciais para algumas análises.

O Capítulo 3 abordará a instrumentação do compressor hermético para aquisição das variáveis de interesse. Essa instrumentação engloba a instalação principalmente do *encoder* incremental, e também de transdutores secundários, como termopares.

O Capítulo 4 apresentará a montagem da bancada para os experimentos e também descreverá as condições de contorno escolhidas para tentar emular situações reais de uso do compressor.

O Capítulo 5 tratará o método indireto de estimação da velocidade angular. Será dado uma breve explicação dos principais aspectos envolvidos e da sua implementação na plataforma escolhida.

O Capítulo 6 apresentará uma comparação experimental entre o método indireto e a utilização do *encoder*. Contando com análises estatísticas, quantitativas e qualitativas sobre essa comparação.

O Capítulo 7 fará uma análise quanto a viabilidade e confiabilidade do método indireto, comprovando que os resultados foram satisfatórios e atestando a viabilidade do método indireto.

## 2 Fundamentação Teórica

O compressor hermético que será tratado no presente trabalho é composto pela câmara de compressão e um motor elétrico. Esses dois mecanismos estão acoplados e encapsulados no interior de uma carcaça selada. As dinâmicas do motor regem boa parte das características do processo de compressão, dessa forma se torna importante o acompanhamento dos fenômenos característicos do motor. Para o presente trabalho destaca-se a importância do cálculo da velocidade angular instantânea do eixo rotor do motor.

O cálculo de velocidade angular, em motores acoplados a compressores herméticos, não é uma novidade. Este trabalho, porém, irá estudar uma nova maneira para estimar essa grandeza. O LIAE tem desenvolvido um método indireto para calcular a velocidade angular do eixo rotor do motor *BLDC* (Walendowsky; Monteiro[1, 3]). Esse método utiliza apenas variáveis elétricas do motor, e dispensa a necessidade de transdutores mecânicos e de adequações na estrutura física do compressor. O objetivo deste trabalho é avaliar a confiabilidade das respostas de velocidade angular desse método indireto desenvolvido e buscar, por meio de estudos e análises, a validação dessa nova forma de medição de velocidade angular para um motor *BLDC*.

Para que o leitor possa compreender os tópicos que serão abordados no decorrer deste trabalho, serão apresentadas algumas explicações preliminares, que darão suporte ao conhecimento que virá. Na Seção 2.1, serão fornecidos os conhecimentos necessários acerca dos compressores herméticos, com maior enfoque no compressor utilizado neste trabalho. Na Seção 2.2, serão apresentados as informações sobre o motor elétrico que compõe esse modelo de compressor hermético. Esses dois equipamentos formam juntos o objeto de estudo deste trabalho, e a partir do conhecimento de ambos o leitor estará ciente dos requisitos e desafios que o método indireto de velocidade angular se propõe a resolver.

Na Seção 2.3 será esclarecido aspectos relativos ao acionamento e controle do compressor hermético, tal atividade impacta diretamente na montagem da bancada experimental e no funcionamento do método. Nas Seções 2.4 e 2.5 são apresentados dois componentes fundamentais para realização desse estudo, o termopar e o *encoder* incremental. O termopar fornece uma informação adicional de temperatura das bobinas do motor, que será essencial para a compensação térmica do valor de resistência das bobinas, enquanto o *encoder* é o transdutor tratado como referência para validação dos resultados obtidos de velocidade angular.

Na Seção 2.6 será apresentada a montagem da bancada para realização dos experimentos, sendo está capaz de adquirir todas as variáveis julgadas necessárias para esse estudo:

tensões e correntes de alimentação do compressor, pulsos do *encoder* e temperatura em tempo real das bobinas do estator do motor. Por fim, a Seção 2.7 apresentará alguns conceitos de metrologia que serão utilizados no decorrer do trabalho, em especial no momento de analisar os resultados.

## 2.1 Compressor Hermético e Sistema de Refrigeração

Os compressores herméticos são o “coração” do sistema de refrigeração. Além da importância, sua função também se assemelha à metáfora, pois ele deve bombear o fluido refrigerante no interior do sistema.

Segundo Stoecker e Jabardo[4], existem vários tipos de compressores: parafuso, paletas, centrífugos e alternativos. Os compressores alternativos são construídos em diferentes tipos, como o aberto, semi-hermético e hermético. Os compressores semi-herméticos e herméticos alojam em sua carcaça tanto o compressor propriamente dito quanto o motor de acionamento. Os ditos herméticos recebem esse nome devido ao fato da carcaça só apresentar acesso à entrada e saída do fluido refrigerante e das conexões elétricas do motor.

Figura 1 – Compressor hermético fornecido pela empresa parceira para realização dos experimentos.



Fonte: Acervo particular do autor.

Neste trabalho será utilizado um compressor de deslocamento positivo<sup>1</sup>, capacidade variável<sup>2</sup>, alternativo, hermético, monocilíndrico, acionado por motor elétrico rotativo e mecanismo tipo biela-manivela, com fluido refrigerante R600a (Isobutano), Walendowsky[1], ilustrado na Figura 1. Algumas das características citadas serão melhor explicadas no decorrer da seção. Esse tipo de compressor possui a liberdade de atuar em diferentes regimes de

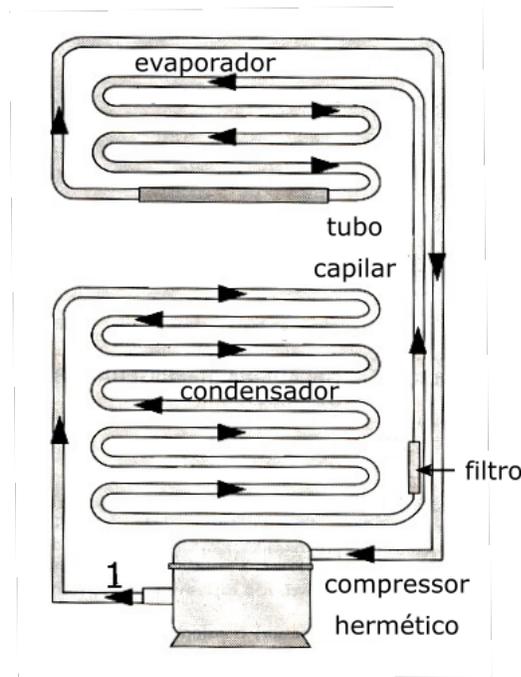
<sup>1</sup> Possui a característica de deslocar sempre o mesmo volume de fluido para uma dada velocidade.

<sup>2</sup> Diferentemente dos compressores mais simples, onde a capacidade de refrigeração é alterada ligando-se e desligando-se o compressor em períodos adequados, um compressor de capacidade variável consegue executar tal função atuando na frequência rotacional do motor, para isso se faz necessário um acionamento com inversor de frequência.

carga devido a sua capacidade variável. Tal equipamento foi fornecido ao LIAE pela empresa parceira para a realização dos experimentos.

Em um sistema de refrigeração doméstico tradicional como, por exemplo, em uma geladeira, o compressor é responsável por fazer circular todo o fluido refrigerante pelo conjunto. A Figura 2 ilustra de forma simplificada os componentes de um sistema de refrigeração e o fluxo seguido pelo fluido.

Figura 2 – Esquemático de um sistema de refrigeração e seus principais componentes.



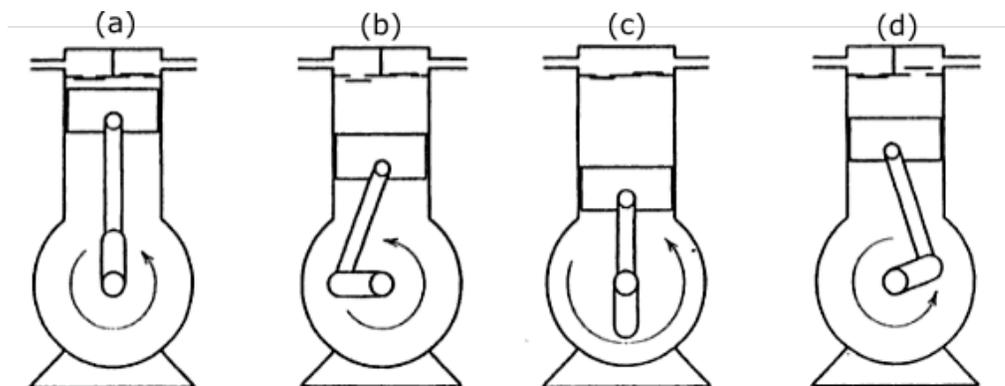
Fonte: Adaptado do repositório digital do Instituto de Física da UFRGS.

Começando no ponto 1, o fluido sai do compressor em alta pressão e temperatura, ainda no estado gasoso e então percorre o condensador. Neste componente o fluido condensa ao trocar calor com o exterior da geladeira. Em seguida, o fluido passa pelo filtro, e no tubo capilar é conferida uma redução de pressão por meio da diminuição da área de passagem. Já no evaporador, o fluido sofre evaporação, retirando calor do interior da geladeira. Por fim, o fluido retorna ao compressor, onde é novamente impelido ao condensador, e assim sucessivamente.

Neste processo, o compressor realiza a tarefa de succionar o fluido oriundo do evaporador, em baixa pressão, e fazer a descarga desse fluido para o condensador, em alta pressão. A Figura 3 apresenta um esquemático da câmara de compressão e ajudará a explicar o funcionamento do compressor. Por ser um compressor de deslocamento positivo que utiliza um pistão acoplado ao mecanismo de biela manivela, este compressor é dito alternativo, e por possuir apenas um cilindro, é classificado como monocilíndrico.

Partindo da esquerda para a direita, são apresentados os quatro momentos principais de funcionamento do compressor. Na posição 'a' o pistão se localiza completamente avançado na câmara de compressão e as duas válvulas estão fechadas. Na posição 'b' o pistão começa a recuar, fazendo com que diminua a pressão dentro da câmara. Ao atingir um valor de pressão ligeiramente menor que a pressão da linha de sucção (vinda do evaporador), a válvula de sucção se abre. Na posição 'c' o pistão está totalmente recuado, e a câmara foi totalmente preenchida com o fluido. Dessa forma a pressão volta a ser a mesma da linha de sucção e a válvula se fecha. Na posição 'd' o pistão começa a avançar e assim aumenta a pressão do fluido dentro da câmara. Ao atingir um valor de pressão ligeiramente maior que a pressão da linha de descarga (no condensador), a válvula se abre, enviando o fluido em direção ao condensador.

Figura 3 – Câmara de compressão com seus quatro estágios e pistão com mecanismo de biela-manivela



Fonte: Tese Cícero Walendowsky [1]

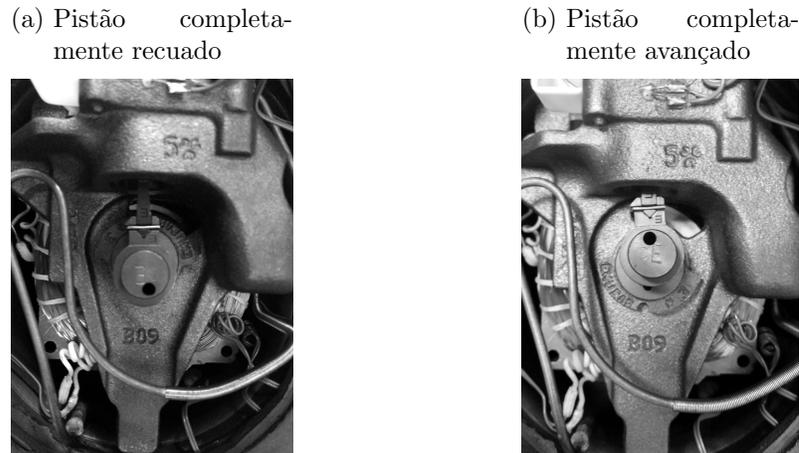
O mecanismo de biela manivela presente no compressor utilizado é exibido nas figuras abaixo. Esse tipo de mecanismo é um dos fatores dificultantes quanto à instrumentação do compressor. Esse assunto será tratado no decorrer do trabalho.

Figura 4 – Mecanismo biela manivela que acopla o eixo do rotor ao pistão do compressor



Fonte: Acervo particular do autor

Figura 5 – Vista superior do mecanismo biela manivela que acopla o eixo do rotor ao pistão do compressor



Fonte: Acervo particular do Autor

A diferença de pressão entre o fluido que entra, e o fluido que sai do compressor, indica que foi realizado trabalho sobre o fluido. Para realizar esse trabalho é preciso uma fonte que forneça a energia ao compressor. Na próxima seção, é apresentado o motor elétrico que fornece tal energia. Especificamente para o compressor desse trabalho, um motor de corrente contínua sem escovas (*BLDC*).

## 2.2 Motor de Corrente Contínua Sem Escovas (*Brushless Direct Current - BLDC*)

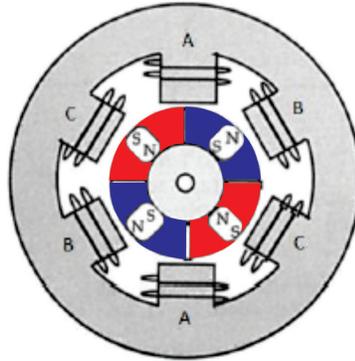
Esta seção tem como objetivo descrever as principais características do motor do tipo *BLDC* utilizado neste trabalho. As informações que serão apresentadas são uma breve revisão da literatura no que diz respeito a esse tipo de equipamento, com maior destaque para o trabalho realizado no LIAE do aluno Monteiro[3], entre outros ([5], [6], [7], [8], [9] e [10]).

O motor de corrente contínua sem escovas (*BLDC*) adotado no compressor em estudo é trifásico, com duas bobinas em série por fase, e rotor interno com imãs permanentes. Formando assim dois pares de polos magnéticos. Devido a esta configuração, meia revolução do rotor posiciona os imãs permanentes orientados tal qual a posição inicial. Em outras palavras, uma volta mecânica do eixo equivale a duas voltas eletromagnéticas. O esquemático de tal motor pode ser visto na Figura 6.

A ligação das bobinas do motor é do tipo estrela (ou Y), que é configurada de forma

que os três enrolamento possuam um ponto central, o qual é chamado de ponto neutro do motor. Nessa forma de ligação a corrente tipicamente percorre duas fases do motor por vez, enquanto a outra fica desativada.

Figura 6 – Motor *BLDC* utilizado



Fonte: Dissertação Carlos Monteiro [3]

No momento em que a corrente elétrica passa a circular pelo estator, o rotor passa a girar e realizar trabalho. O movimento relativo entre o rotor, com seus ímãs, perante o estator, com suas bobinas eletrizadas, faz com que esses condutores cortem continuamente o campo magnético gerado pelos ímãs. Essa interação induz uma tensão elétrica nas bobinas do estator. Essa tensão por sua vez, tem carácter contrário a tensão geradora, e induz uma corrente no sentido oposto ao aplicado nas bobinas. Na literatura essa tensão gerada pela variação do fluxo magnético sentido por um condutor, recebe alguns nomes: tensão induzida, força contra eletromotriz ( $f_{cem}$ ) e no inglês *Back Electro-Motive Force* (*Back EMF*). A *Back EMF*, pode ser explicada pela Lei de Faraday:

$$BEMF = -N_e \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.1)$$

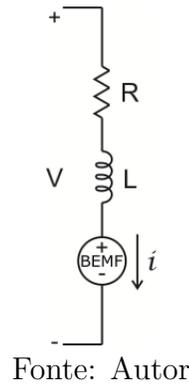
onde:

$BEMF$ : *Back Electro-Motive Force*;

$N_e$ : Número de espiras;

$\varphi$ : Fluxo magnético.

Cada uma das fases do motor consiste em fios de cobre enrolados em forma de bobinas. Por não serem fios ideais é inevitável a formação de efeitos resistivos e indutivos em série com a *Back EMF* (Hanselman[6]). A Figura 7 ilustra a modelagem de cada fase desse motor.

Figura 7 – Modelagem elétrica de uma fase do motor *BLDC*

Com base na Figura 7 e por meio da lei das malhas chegamos que:

$$V = Ri_f + L \frac{di_f}{dt} + BEMF_f, \quad (2.2)$$

onde:

$V$ : Tensão de fase;

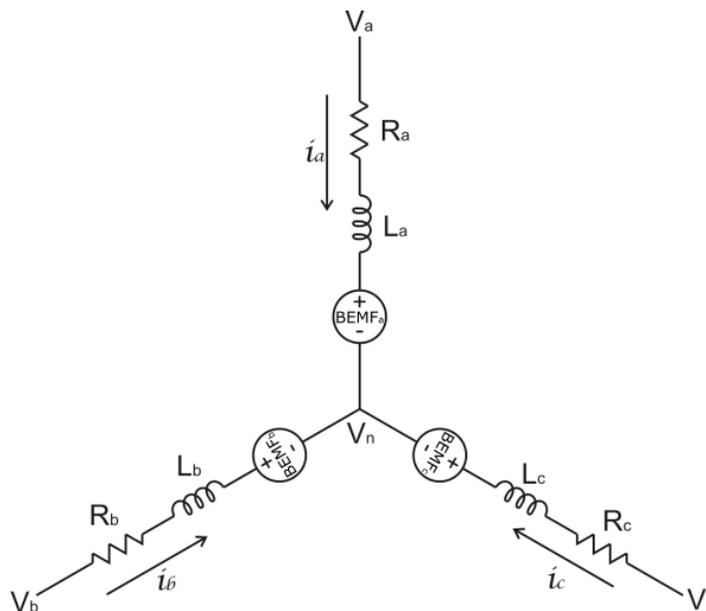
$R$ : Resistência de fase;

$L$ : Indutância de fase;

$i_f$ : Corrente de fase;

$BEMF_f$ : *Back EMF* de fase.

Por ser um motor trifásico, é preciso expandir a modelagem para as três fases do motor. O resultado é a Figura 8.

Figura 8 – Modelagem elétrica do motor *BLDC*

Após algumas manipulações em 2.2, pode-se mostrar que:

$$V_n + BEMF_a = V_a - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt}, \quad (2.3)$$

$$V_n + BEMF_b = V_b - R_b i_b - L_b \frac{di_b}{dt}, \quad (2.4)$$

$$V_n + BEMF_c = V_c - R_c i_c - L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (2.5)$$

onde:

$V_n$ : Tensão de neutro;

$BEMF_{a,b,c}$ : *Back EMF* na fase;

$V_{a,b,c}$ : Tensão na fase;

$R_{a,b,c}$ : Resistência na fase;

$L_{a,b,c}$ : Indutância na fase;

$i_{a,b,c}$ : Corrente na fase.

Entre as grandezas apresentadas nessa modelagem trifásica, podem ser consideradas conhecidas todas as grandezas com exceção das *Back EMF* de cada fase e da tensão de neutro. Mais adiante será tratado com mais detalhes sobre isso, o importante é encontrar uma equação que possibilite calcular a *Back EMF* de cada fase continuamente.

Seguindo com a manipulação das equações, segundo Shao[9] e Singh e Singh[10], para um sistema balanceado temos que:

$$BEMF_a + BEMF_b + BEMF_c = 0. \quad (2.6)$$

Portanto, substituindo as equações (2.3), (2.4) e (2.5) em (2.6) e isolando  $V_n$ , chegamos em:

$$V_n = \frac{V_a + V_b + V_c - R(i_a + i_b + i_c) - L\left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt}\right)}{3}. \quad (2.7)$$

Aplicando a Lei dos nós de Kirchoff no circuito da Figura 8, obtemos que:

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (2.8)$$

Consequentemente:

$$\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} = 0. \quad (2.9)$$

Substituindo as equações (2.8) e (2.9) em (2.7), temos que:

$$V_n = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}. \quad (2.10)$$

Por fim, substituindo 2.10 em (2.3) - (2.5), conclui-se que:

$$BEMF_a = V_a - Ri_a - L \frac{di_a}{dt} - \frac{V_a + V_b + V_c}{3}, \quad (2.11)$$

$$BEMF_b = V_b - Ri_b - L \frac{di_b}{dt} - \frac{V_a + V_b + V_c}{3}, \quad (2.12)$$

$$BEMF_c = V_c - Ri_c - L \frac{di_c}{dt} - \frac{V_a + V_b + V_c}{3}. \quad (2.13)$$

Existem muitos trabalhos na literatura que requerem unicamente a avaliação da *Back EMF* nos momentos em que a fase não acionada muda de polaridade ([11], [12], [13] e [14]), contudo para o implementação do método indireto que calcula a velocidade angular, se fez necessário conhecer a *Back EMF* de forma contínua durante o acionamento do motor.

As equações finais mostram que a  $BEMF_j$  na fase  $j$ , sendo  $j = a, b, c$  dependem: da tensão de alimentação  $V_j$  na fase  $j$ , que pode ser medida; da corrente de alimentação  $i_j$  na fase  $j$ , que pode ser medida; da derivada da corrente  $di_j/dt$  na fase  $j$ , que pode ser calculada; e dos parâmetros internos do motor (resistência  $R$  e indutância  $L$ ), que assumindo um motor balanceado, é igual para todas as fases.

Na próxima seção, será tratado sobre o acionamento do motor, explicando como é feito e o porquê da sua importância para a sequência do trabalho.

## 2.3 Acionamento do Compressor

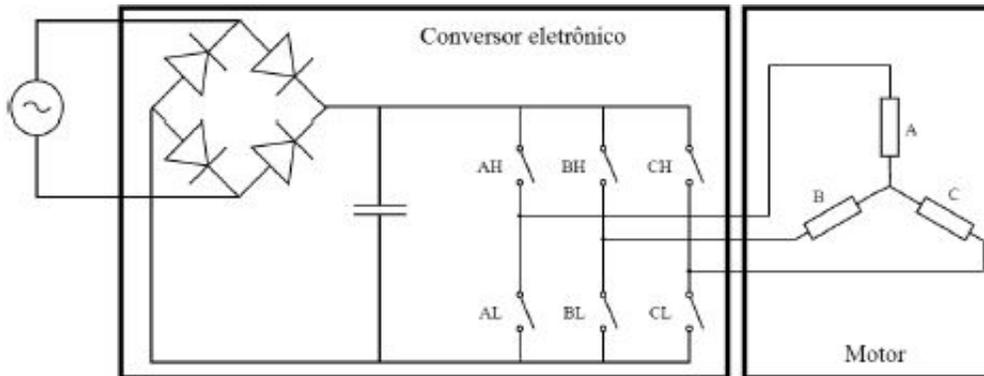
O acionamento do compressor, mais corretamente, o acionamento do motor *BLDC* que supre o compressor, é feito utilizando-se um inversor de frequência cedido pela própria empresa parceira. Esta seção apresentará os principais aspectos do inversor utilizado e muito do que está exposto é oriundo de engenharia reversa realizada pelos integrantes do LIAE.

O funcionamento do inversor pode ser dividido em duas etapas: a primeira etapa é responsável por retificar a tensão alternada de entrada, e a segunda etapa é composta por chaves que são responsáveis por energizar as fases do motor. Essas chaves são acionadas de tal forma que apenas duas estejam ligadas por vez, garantindo assim que uma das fases do motor não receba corrente. A Figura 9 mostra o circuito de acionamento básico.

O circuito de acionamento também é responsável por possibilitar que o motor aplique um torque variável. Para fazer isso o inversor atua no controle da velocidade angular média, utilizando modulação por largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*).

Para realizar o controle *PWM*, substituí-se as chaves normais apresentadas na Figura 9, por transdutores chaveados. A frequência de chaveamento utilizada pelo inversor disponível é de 5 kHz, e esse valor não pode ser alterado, é padrão do equipamento.

Figura 9 – Circuito simplificado do inversor de frequência



Fonte: Dissertação Carlos Monteiro [3]

O inversor de frequência possui comunicação serial RS-232. A empresa parceira também forneceu um programa na plataforma *LabView* que realiza a comunicação e acionamento deste inversor.

Devido as características do compressor utilizado, o inversor cedido é capaz de atuar apenas entre as rotações de 1600 RPM até 4500 RPM. Por razões de segurança o inversor não aciona o compressor se escolhida velocidades menores que 1600 RPM. E se o compressor ultrapassar os 4500 RPM o inversor também possui rotinas de segurança que desligam o equipamento. Tais características se tornam também uma das condições de contorno para a realização dos experimentos.

Figura 10 – Inversor de frequência utilizado para acionar o compressor



Fonte: Acervo particular do autor

O fato do inversor utilizar *PWM* como estratégia de acionamento, impacta nos sinais de alimentação (tensão e corrente) enviado ao motor. Um dos objetivos é a aquisição desses sinais, portanto a frequência de chaveamento do *PWM* se torna uma variável importante a ser considerada.

Nas duas seções subsequentes serão apresentados os dois transdutores que foram instalados no compressor. Na seção 2.4 será tratado sobre o termopar, transdutor de temperatura utilizado para aquisição das temperaturas de operação nas bobinas do motor. Na seção 2.5 será tratado sobre o *encoder*, transdutor escolhido para ser a referência de velocidade angular a ser seguida.

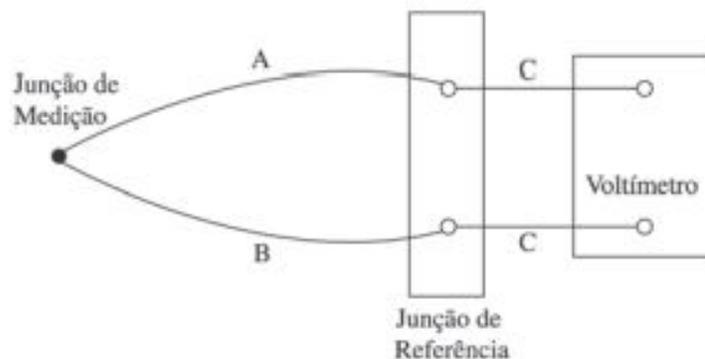
## 2.4 Termopares Para Aquisição da Temperatura das Bobinas do Motor

Um dos instrumentos de medição que optou-se por utilizar foram os termopares. O objetivo era ter em tempo real a informação de temperatura das seis bobinas do motor *BLDC*. Essa informação se torná relevante pois a resistência dos enrolamentos das bobinas do motor sofre variações com a temperatura. Como uma das variáveis necessárias para o cálculo da *Back EMF* é o valor da resistência (2.11, 2.12 e 2.13), ao ter a informação de temperatura, essas variações podem ser compensadas. Os detalhes da instalação serão apresentados no decorrer do trabalho.

Devido a sua simplicidade, confiabilidade e por não necessitarem de um circuito de alimentação, os termopares são os sensores de temperatura mais utilizados (Moreira[15]).

O termopar se utiliza do efeito de *Seebeck*, que é a aparição de uma tensão de circuito aberto quando existir diferença de temperatura entre duas junções de metais condutores. Usualmente temos uma junção de medição e uma junção de referência. Na junção de referência é onde se mede a tensão que representa a diferença de temperatura entre as duas junções. A Figura 11 ilustra essa configuração.

Figura 11 – Representação esquemática do circuito de medição do termopar



Fonte: Adaptado de Moreira[15]

Os termopares escolhidos para a instalação foram do tipo T. Essa classe de termopar é composta por uma junção de cobre e constantan, e possuem faixa de medição entre  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$

e 350 °C. Esse par termoeétrico tolera a existência de umidade, possuindo alta resistência a corrosão em atmosferas úmidas (Moreira[15] e Nishinari[16]). Para a aplicação neste trabalho, as temperaturas esperadas devem variar entre 20 °C e 150 °C. Para tal faixa esse termopar apresenta erro de 0.75 % (Moreira[15]).

Optou-se por utilizar esse transdutor de temperatura devido a sua versatilidade e simplicidade. Na próxima seção será apresentado o transdutor responsável por medir a velocidade angular do motor, um *encoder* incremental acoplado ao rotor do motor.

## 2.5 *Encoder* Incremental Para Medição Direta da Velocidade Angular do Motor

O objetivo principal deste trabalho é ser capaz de validar os resultados de velocidade angular do motor calculados a partir do método indireto. Como ferramenta para ser o valor de comparação, optou-se por utilizar um *encoder* incremental. Dessa forma pode-se aferir um perfil de velocidade angular obtida diretamente pela contagem de pulsos do *encoder*. Tinha-se disponível para essa tarefa um *encoder* incremental HEDS 9100, com um disco perfurado de 500 pulsos por revolução, representados pela Figura 12.

Figura 12 – *Encoder* HEDS-9100 e disco perfurado

(a) *Encoder* HEDS-9100



(b) Exemplo de disco perfurado



Fonte: Acervo particular do Autor

Esse *encoder* é do tipo óptico e possui dois canais de leitura, sendo portanto virtualmente capaz de identificar 2000 pulsos por volta, todavia foi utilizado apenas o canal A, e limitado a resolução em 500 pulsos. O motivo dessa escolha é a necessidade de aquisição simultânea do sinal do *encoder* e dos sinais de corrente e tensão de alimentação do compressor. O número de canais de aquisição simultânea disponíveis era escasso, e além disso, para esse primeiro passo julgou-se suficiente a resolução de 0,72° disponibilizada por apenas um canal do *encoder*.

Outra especificação importante é que a frequência de corte de funcionamento do *encoder* escolhido é de 100 kHz. A velocidade máxima possível do conjunto inversor com-

pressor é de 4500 RPM, dessa forma é possível calcular a frequência máxima de pulsos à qual o *encoder* será submetido. A equação abaixo demonstra o cálculo da frequência de pulsos:

$$f_e = \frac{v \cdot N}{60}, \quad (2.14)$$

onde:

$f_e$ : Frequência dos pulsos;

$v$ : Velocidade do motor (RPM);

$N$ : Número de pulsos por volta.

É preciso que a relação  $f_e < f_c$  seja satisfeita, sendo  $f_c$  a frequência de corte. Com a velocidade máxima de 4500 RPM, a  $f_{emax} = 37.5$  kHz, satisfazendo a relação citada e garantindo a adequação do transdutor. Outras informações e demais especificações técnicas sobre o *encoder* em questão podem ser encontradas no catálogo do produto [17].

Na seção seguinte será apresentada a bancada desenvolvida para a realização dos experimentos. A montagem da bancada é uma etapa essencial para o seguimento do trabalho, pois será responsável por adquirir os dados experimentais para realização dos estudos acerca da velocidade angular do motor.

## 2.6 Bancada para Realização dos Experimentos e Aquisição dos Sinais de Interesse

Para realizar os experimentos com o compressor hermético foi preciso montar uma bancada com os equipamentos necessários para acionamento e aquisição dos sinais. Essa bancada nada mais é do que o agrupamento em um local controlado dos instrumentos disponíveis no laboratório. Cada instrumento realizando uma tarefa específica.

O componente principal é o compressor hermético. Para acioná-lo é necessário um inversor de frequência conectado a um computador e com isso é possível controlar a velocidade média do motor.

Os sinais de aquisição que se buscam são: as três tensões de alimentação do compressor, as três correntes de alimentação do compressor, o sinal do *encoder* e as seis temperaturas das bobinas do motor. Para aquisição das tensões, correntes e pulsos do *encoder*, é preciso um equipamento que possua uma frequência de aquisição elevada, canais simultâneos de aquisição, no mínimo três voltímetros (um por fase) capazes de medir picos de até 350 V, no mínimo três amperímetros (um por fase) capazes de medir picos de até 5 A e mais um voltímetros para medir o *encoder*.

Tendo estes requisitos em mente, optou-se por utilizar um equipamento disponível no LIAE, o *Power Analyzer PZ4000*, da fabricante *YOKOGAWA*. Este equipamento possui quatro voltímetros e quatro amperímetros capazes de realizar as medições simultâneas numa

taxa de aquisição de  $2,5 \text{ MS/s}$  e com 12 bits de resolução. Maiores detalhes sobre o equipamento podem ser encontrados no manual de usuário [18].

Também é preciso realizar a aquisição das temperaturas dos termopares. Na realidade o sinal medido na junção de referência do termopar é um diferencial de tensão, que está relacionado com o gradiente de temperatura entre as junções, ou seja, a menos que a junção de medição esteja exatamente a  $0^\circ\text{C}$ , o termopar não mede temperatura absoluta. Existem módulos especiais para aquisição de termopares que já realizam essa compensação. O módulo utilizado foi o *ADAM-4018+* da *Advanced Communication Devices*. Este equipamento é capaz de converter os diferenciais de tensão gerados pelos termopares, em temperatura absoluta. Esse módulo possui 8 canais, com 16 bits de resolução e frequência máxima de aquisição de 10 Hz. Novamente para maiores detalhes vide manual do equipamento [19].

Com esses equipamentos em mãos, bastou posicioná-los adequadamente e realizar a correta ligação entre as partes para que fosse possível executar os experimentos.

Figura 13 – *Power Analyzer PZ4000*



Fonte: Adaptado do catálogo do produto *PZ4000*

Figura 14 – Módulo de aquisição para medição dos termopares - ADAM 4018+



Fonte: Acervo particular do autor

No decorrer deste trabalho será dado maiores informações e detalhes sobre a montagem da bancada. No momento a intenção foi apenas de apresentar ao leitor os equipamentos utilizados. Na próxima seção será apresentado alguns conceitos de metrologia relevantes aos estudos propostos.

## 2.7 Conceitos Gerais e Termos Associados a Fundamentos da Metrologia

Termos e conceitos metrológicos irão estar presente em grande parte deste trabalho, com maior destaque para os capítulos que irão tratar das análises dos resultados. É por esse motivo que se faz necessário equalizar o conhecimento do leitor acerca desses assuntos, para que todos possam gozar do conhecimento básico necessário para acompanhamento das atividades. As informações e conceitos apresentados aqui foram retiradas do Vocabulário Internacional de Metrologia [20] e do livro de Fundamentos de Metrologia [21].

O primeiro é o termo grandeza, que é por definição uma propriedade que possa ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e uma referência, por exemplo, a tensão elétrica, a corrente elétrica e a velocidade angular.

Como o objetivo desse trabalho é avaliar os resultados de medição da grandeza velocidade angular, obtidos através de um procedimento de medição inédito, era preciso conhecer o valor de referência a ser comparado. Sendo assim, tem-se um procedimento de medição de referência, que é justamente um procedimento de medição que fornecerá os resultados de medição para avaliação de outros resultados. Essa é a função do *encoder* incremental, e para o escopo desse trabalho, concordou-se em atribuir aos resultados do *encoder* como sendo o valor verdadeiro da grandeza velocidade angular.

Para analisar os resultados, é preciso conhecer alguns termos importantes que caracterizam algumas qualidades de um sistema de medição. Começando pelo termo exatidão, um parâmetro qualitativo que ilustra a presença de mais ou menos erro entre a valor medido e o valor de referência. Outro termo é a precisão, que indica a capacidade do sistema de medição de repetir os resultados, ou seja, o sistema pode errar em 100 unidades o valor de referência, mas se ele errar sempre em 100 unidades, medição após medição, diz se que esse sistema de medição possui uma ótima precisão.

Além disso ainda temos o erro de medição, que é a diferença entre o valor medido e o valor de referência. O erro de medição pode ser dividido em duas parcelas, os erros sistemáticos e os erros aleatórios. Os erros sistemáticos representam o valor médio do erro de medição, já os erros aleatórios são a parcela imprevisível do erro, responsável pelas variações encontradas em diversas medições repetidas.

Para se obter o erro de medição, é preciso avaliar diversas fontes de incertezas, essas incertezas juntas é que formarão o erro de medição. Porém é preciso ratificar que o presente trabalho não se propõem a realizar um estudo detalhado da incerteza nem do método indireto desenvolvido, nem do procedimento de medição de referência usando o *encoder*. Serão realizados algumas análises de incertezas do tipo A, a qual faz uso de análises estatísticas a

partir da repetição das medições, porém o objetivo é realizar um estudo preliminar e validar a viabilidade de se avançar as pesquisas sobre o método indireto para calcular a velocidade angular instantânea.

No próximo capítulo será apresentado as modificações realizadas no compressor hermético, como instalação dos termopares, *encoder* e outras modificações que foram necessárias para preparar o compressor pra realização dos experimentos.

## 3 Instrumentação do Compressor Hermético

Este capítulo tem como objetivo descrever as modificações e acréscimos de transdutores no compressor hermético original. Tais intervenções foram realizadas com intenção de instrumentar o compressor, e assim adquirir as grandezas de interesse, que são as tensões, correntes, temperatura e velocidade angular do motor.

A seção 3.1 tratará a principal modificação no compressor hermético original, a instalação de um *encoder* incremental de 500 pulsos. Essa tarefa não foi realizada no LIAE, o compressor foi enviado à empresa parceira, e lá foi realizado a instalação do *encoder*. Devido ao espaço limitado no interior do compressor, a carcaça precisou ficar aberta para comportar o acréscimo do *encoder*. Mesmo sem ter presenciado o procedimento, foram repassadas as devidas explicações de como isso foi feito.

Com o compressor hermético aberto, foi possível realizar outra modificação que foi a colocação de seis termopares do tipo T nas bobinas do motor. Foi colocado um termopar em cada uma das bobinas e mais detalhes serão tratados na seção 3.2.

A seção 3.3 abordará a instalação de um manômetro relógio e uma válvula de regulação de vazão na descarga do compressor. Tais modificações tem como objetivo apenas poder acompanhar as pressões de descarga, afim de poder controlá-las e realizar testes em condições variadas e conhecidas.

### 3.1 Instalação do *Encoder* Incremental HEDS 9100

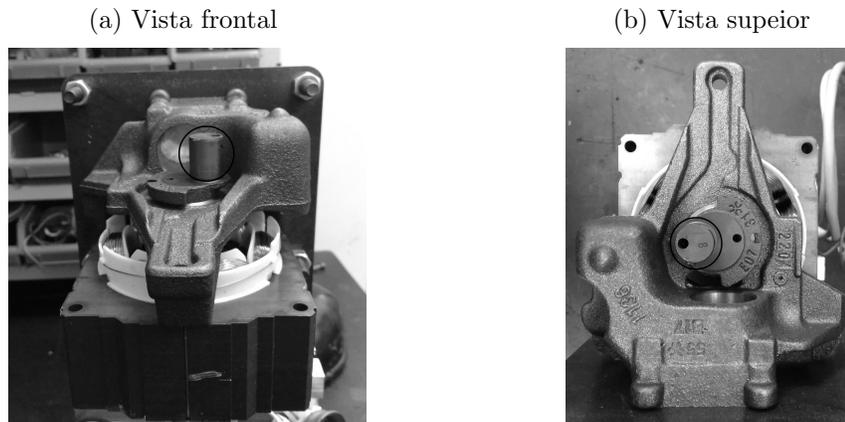
Essa seção irá explicar a instalação do *encoder* ao compressor. Como dito anteriormente, apesar de não participar ativamente da instalação, tomei conhecimento de como foi feita essa operação. Maiores detalhes sobre as características do *encoder* utilizado podem ser vistas na Seção 2.5.

Para atingir o objetivo deste trabalho é preciso ter uma medição de referência com a qual será feito comparações com método indireto. Como ferramenta para ser esse parâmetro de comparação, optou-se por utilizar um *encoder* incremental. Dessa forma pode-se aferir um perfil de velocidade angular obtido diretamente pela contagem de pulsos do *encoder*, e esse valor se tornará o valor verdadeiro de velocidade angular.

A instalação do *encoder* foi realizada na empresa parceira, principalmente por terem profissionais com maior compreensão das dimensões e peças que compõem o compressor. A primeira dificuldade encontrada foi em alinhar o centro do eixo do motor com centro do eixo do *encoder*. A Figura 15 mostra o que seria o cabeçote acoplado ao motor, mas sem a biela

e o pistão.

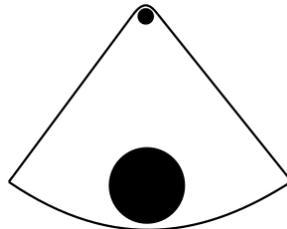
Figura 15 – Vistas dos cabeçote do compressor acoplado ao motor



Fonte: Acervo particular do Autor

A estrutura que transmite o movimento ao pistão (destacada pelo círculo preto), gira de forma excêntrica ao eixo do motor, sendo um desafio acoplar o *encoder*, pois é preciso compensar essa excentricidade. Isso foi resolvido ao se produzir uma peça em formato de palheta, vide Figura 16. Essa peça tem a função de criar novamente um ponto fixo concêntrico ao eixo do motor, e então poder acoplar o *encoder*.

Figura 16 – Representação da peça usada para resolver a excentricidade



Fonte: Autor

Uma vez confeccionada essa peça e realizado algumas adequações para o correto posicionamento do *encoder*, conseguiu-se recriar um eixo girante concêntrico ao rotor. Nesse eixo é acoplado o disco perfurado de 500 pulsos. As figuras a seguir foram feitas após a instalação, portanto não é possível um grande detalhamento das etapas. Mas ainda assim elas ajudam a visualizar o resultado final.

Na Figura 17 a parte inicial da biela que é acoplado ao cabeçote é representado pelo ponto branco. Essa parte gira de forma excêntrica ao eixo do rotor, como já explicado. O ponto preto identifica o mecanismo de suporte que precisou ser confeccionado. São no total 4 placas de aço, que conferem altura ao acoplamento e sobre a última placa tem-se a palheta apresentada anteriormente. A flecha representa o eixo criado e ao qual é acoplado o disco perfurado, que não pode ser visualizado por este ângulo.

Figura 17 – Montagem da estrutura de acoplamento entre o cabeçote e o eixo do *encoder*



Fonte: Acervo particular do autor

Na Figura 18 é apresentada uma vista superior do disco perfurado do *encoder* e uma estrutura branca que é um encapsulamento para proteção que será explicado mais adiante. A dificuldade em apresentar fotos com maiores detalhes é decorrente do recebimento do compressor com o *encoder* já instalado e isolado pelas proteções. Tais proteções são essenciais para garantir que o *encoder*, mais especificamente o disco perfurado, não seja constantemente alvejado com impurezas ou o óleo refrigerante. Essa proteção é feita com material plástico também ajuda a proteger mecanicamente o *encoder*.

Figura 18 – Vista superior do *encoder* acoplado ao cabeçote.



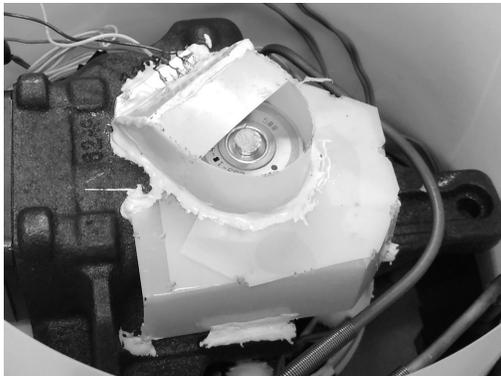
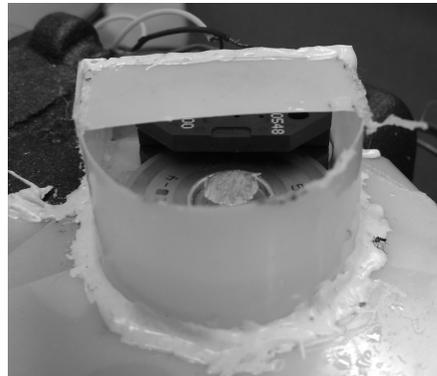
Fonte: Acervo particular do autor.

Em decorrência do acréscimo do *encoder* na parte superior do cabeçote e da proteção, a estrutura como um todo ficou muito alta, impossibilitando o fechamento da carcaça. Por esse motivo o compressor precisa ficar aberto, conforme pode ser visto na Figura 20.

Existe ainda a preocupação de que impurezas possam entrar no compressor, ou que o fluido refrigerante possa sair do compressor. Para amenizar esses problemas, foi feita uma outra proteção de material plástico, que serve como uma barreira. A Figura 21 mostra o *layout* do compressor. Realizada a instrumentação do *encoder* foi dada sequência a próxima atividade. A seção seguinte apresentará a instalação dos termopares em cada bobina do motor.

Figura 19 – Proteção para isolar o *encoder*.

(a) Imagem da proteção completa.

(b) Imagem aproximada da proteção perto do *encoder*.

Fonte: Acervo particular do Autor.

Figura 20 – Compressor sem a parte superior da carcaça devido ao acréscimo do *encoder*.

Fonte: Acervo particular do autor.

Figura 21 – Proteção feita para evitar contato entre a parte interna do compressor com o exterior.



Fonte: Acervo particular do autor.

## 3.2 Instalação dos Termopares nas Bobinas do Motor

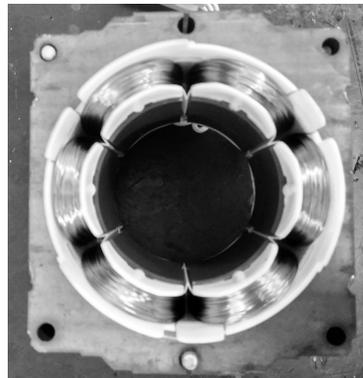
Essa seção irá apresentar a instalação dos termopares, e a importância de poder medir a temperatura das bobinas durante a operação do compressor. A relevância dessa medição se faz presente pois, cada enrolamento das bobinas do motor possui um valor de resistência, esse valor não é desprezível, e ainda sofre variação com a temperatura. O método indireto para estimação da velocidade angular do motor utiliza as equações 2.11, 2.12 e 2.13, apresentadas na Seção 2.2. Uma das variáveis das equações é a resistência das bobinas.

Medir a resistência das bobinas com o motor desligado não é um problema, mas para saber o valor das mesmas durante a operação, tinham-se três possibilidades: utilizar o *know-how* da empresa parceira, que sabe qual a temperatura média de operação, e compensar a resistência com esse valor de temperatura padrão; ligar o compressor por um tempo, até atingir o regime e então, desenergizá-lo e rapidamente adquirir as resistências das bobinas, utilizando assim esse valor de resistência medido; utilizar o valor de resistência medido com o compressor “frio” e esperar que o impacto desse erro fosse desprezível. Todavia como o compressor ficaria aberto de qualquer forma, se pensou numa quarta alternativa, que seria medir em tempo real a temperatura das bobinas. Optou-se por instalar os termopares e poder compensar a resistência individualmente para cada aquisição diferente.

Os termopares utilizados foram os de junção do tipo T, compostos por cobre puro como termoelemento positivo, e constantan (liga composta majoritariamente por Cobre e Níquel) com termoelemento negativo.

Para ter acesso as bobinas do motor foi preciso desmontar o cabeçote e retirar o rotor do motor, para poder trabalhar apenas com o estator. A Figura 22 mostra as seis bobinas do motor.

Figura 22 – Estator do motor *BLDC* utilizado



Fonte: Autor

A condição ideal para medição seria utilizar o termopar como apresentado na Figura 23, e colocá-lo o mais “dentro” das bobinas possível, porém existem alguns empecilhos.

O primeiro problema é que as bobinas possuem fios de cobre esmaltados, para garantir isolamento, ao friccionar a junção de metal para adentrar nos enrolamento, correria-se sérios riscos de danificar esse esmalte e curto-circuitar o motor. Outro problema é que mesmo com a certeza de que o esmalte suportaria o atrito, não há espaço suficiente na bobina para colocar a junção muito mais fundo do que a parte superficial da bobina. Os fios de cobre estão fortemente enrolados e, na realidade, foram feitos para ser assim.

Figura 23 – Junção do termopar tipo T utilizado no trabalho.



Fonte: Acervo particular do autor.

Por esses motivos foi preciso proteger a junção de metal, de maneira que ela não apresente riscos ao esmalte do cobre, e instalar os termopares quase que apenas colados sobre as bobinas.

Para tornar as junções menos abrasivas, foi feito uma junção pequena. Depois com a ajuda de uma lixa, retirou-se as pontas e quinas da junção. Por precaução, a junção ainda foi envolvida por uma cola do tipo resina, que ao curar, criou uma camada de proteção ao redor da junção. A Figura 24 mostra o aspecto final dos termopares.

Figura 24 – Aspecto final da junção do termopar



Fonte: Acervo particular do autor.

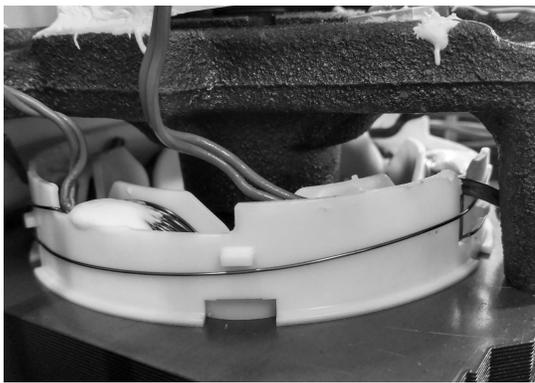
Para efetuar a colocação dos termopares nas bobinas, foi utilizado cotonetes e materiais maleáveis para abrir o máximo possível de espaço nas bobinas, e inserir a junção mais

fundo. Para fixar os termopares nos lugares escolhidos se utilizou a mesma cola usada para envolver as junções. A cura dessa cola é feita ao aquece-la até 200 °C e permanecer nessa temperatura por algumas horas.

A tarefa de instrumentar as bobinas com os termopares levou três dias, pois cada termopar foi posicionado e colado individualmente. Por falta de espaço nas bobinas e tensões mecânicas residuais nos fios, era preciso muito cuidado para que ao posicionar o termopar, este não saísse do lugar ao retirar a força empregada. Feito a instalação dos seis termopares, o estator foi remontado ao compressor como apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Termopares instalados nas bobinas do estator do motor *BLDC*

(a) Imagem do estator posicionado no devolta ao compressor com os termopares



(b) Imagem aproximada do estator e dos termopares instalados nas bobinas



(c) Imagem aproximada do estator e dos termopares instalados nas bobinas com ênfase na resina utilizada para fixação



Fonte: Acervo particular do Autor

Não foi possível fazer fotos do estator aberto já com os termopares posicionados. Como a montagem do estator de volta ao compressor necessita de alguns procedimentos delicados, essa atividade é realizada por um técnico responsável do LIAE. Ao término da secagem do último termopar, o técnico imediatamente remontou o compressor para que as

peças separadas não fossem avariadas. Dessa forma não foi possível uma foto detalhada do resultado final com o estator aberto.

Para a aquisição dos sinais dos termopares foi utilizado o módulo de aquisição *ADAM-4018+*. Este equipamento é capaz de converter os diferenciais de tensão gerados pelos termopares em temperatura.

Com a instalação dos termopares também concluída, resta apenas a instrumentação de um manômetro e uma válvula de vazão na linha de descarga do compressor, a próxima seção traz mais informações.

### 3.3 Instalação de Manômetro e Válvula de Vazão na Descarga do Compressor

Essa seção irá apresentar a instalação de um manômetro analógico de relógio e uma válvula manual reguladora de vazão. Na realidade será dado ênfase na importância desses instrumentos, pois a instalação não possui grande complexidade.

A principal razão de optar-se por fazer essas instalações é poder assegurar melhor controle sobre alguns parâmetros de funcionamento do compressor. Dessa forma também se possibilita uma compatibilidade de informação para realização de novos testes no futuro. Com o manômetro e a válvula reguladora de vazão instalada, consegue-se escolher diferentes valores de pressão de descarga para os testes, podendo assim, percorrer diversas condições de funcionamento do compressor.

Figura 26 – Manômetro analógico e válvula reguladora de vazão

(a) Encaixe da extensão



(b) Manômetro analógico e válvula de vazão



Fonte: Acervo particular do Autor

A instalação foi feita soldando uma “extensão” ao canal de descarga do compressor. Essa extensão era composta pelo manômetro e pela válvula manual de vazão, conforme pode

ser visto na Figura 26.

A primeira figura da esquerda ilustra apenas a solda realizada na saída de descarga. Já a figura da direita mostra o manômetro e a válvula de vazão que está posicionada logo atrás.

Com o acréscimo desses instrumentos, é possível acompanhar a pressão de descarga durante a execução dos testes para aquisição dos dados. Mesmo com uma incerteza envolvida, pode-se garantir fazer inúmeras aquisições com os valores praticamente fixos desses parâmetros de funcionamento. Também possibilita a replicação dos experimentos a partir do conhecimento das condições de contorno.

## 3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as modificações realizadas no compressor hermético original. Na sua maioria foram atividades ligadas a instrumentação do mesmo afim de permitir ter conhecimento de parâmetros e valores relevantes a tarefa de validação, que será o tema do trabalho.

No próximo capítulo será tratado sobre a montagem da bancada e metodologia utilizada para realização dos experimentos.



## 4 Metodologia de Realização dos Experimentos

Este capítulo tem como objetivo descrever com mais detalhes os experimentos com o compressor hermético instrumentado. Detalhando a bancada de testes, as ligações entre os componentes, as condições de contorno utilizadas e a cronologia dos experimentos.

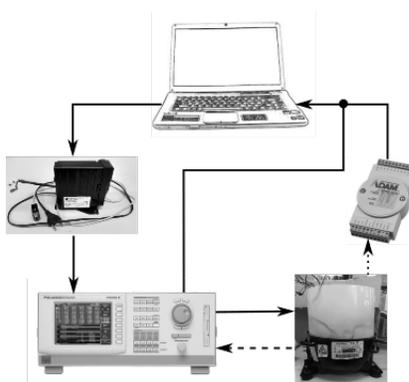
A seção 4.1 apresentará a montagem da bancada para realização dos experimentos. A seção 4.2 abordará os programas embarcados no notebook para aquisição e armazenamento dos dados experimentais. A seção 4.3 apresentará os detalhes da execução dos experimentos e as dificuldades encontradas.

Lembrando que esses experimentos tem como objetivo comparar duas formas diferentes de se obter a velocidade angular do rotor. A medição com *encoder* é considerada uma medição direta, e utilizada como valor de referência para a velocidade angular. Já a segunda forma é uma medição indireta utilizando apenas variáveis elétricas.

### 4.1 Montagem da Bancada Para os Experimentos

Essa seção irá abordar com mais detalhes como foram dispostos os equipamentos utilizados para realizar os experimentos. Tais equipamentos foram descritos individualmente no Capítulo 2. Será mostrado como eles se interligam e, juntos, formam a bancada responsável por realizar o acionamento e aquisição dos sinais de interesse. Logo de início é apresentada a Figura 27, que mostra um esquemático de como ocorre o fluxo de sinais e informações pelos equipamentos que compõem essa bancada.

Figura 27 – Representação esquemática do fluxo de informações entre os equipamentos



Fonte: Autor

No topo está o computador ou notebook, que inicia e termina o ciclo. Saindo do computador há uma ligação com o inversor de frequência, através de um conexão serial RS-232. Por meio dessa comunicação é feito o controle de velocidade do compressor. Mais adiante será tratado sobre o programa em *LabView* responsável por essa comunicação e transmissão dos dados.

Uma vez definida a velocidade desejada, o inversor fornece a energia necessária ao motor *BLDC*. Visto que a corrente de alimentação é uma das variáveis de interesse, necessita-se de um amperímetro em série com o inversor. Por esta razão o equipamento *PZ4000* está conectado entre o inversor e o compressor. Esse equipamento deve medir as 3 correntes e as três tensões de alimentação do compressor. Mais detalhes sobre as ligações serão apresentadas mais adiante.

Passado pelo *PZ4000*, os sinais de alimentação chegam ao compressor, ligando-o. Ao ser posto em funcionamento, o motor começa a girar e o *encoder* começa a registrar os pulsos. A linha tracejada é a medição de tensão relativa à esses pulsos. O *PZ4000* também é o equipamento responsável por adquirir esse sinais, pois é necessário que exista simultaneidade com os sinais de alimentação do compressor.

Com esses sinais adquiridos, o *PZ4000* deve enviá-los, quanto solicitado, de volta ao computador. A linha que sai do mesmo e se dirige novamente ao computador representa essa comunicação. Ela é feita através de uma porta GPIB do *PZ4000*.

Voltando ao compressor, temos uma linha pontilhada que liga este ao módulo de aquisição *ADAM-4018+*. Esta linha representa os termopares, que são ligados ao módulo para a conversão de diferencial de tensão em temperatura absoluta. Em seguida o módulo se conecta também ao computador através de uma conexão RS-232.

Esse esquemático representa então como é realizado a montagem da bancada para os experimentos, em resumo, tem-se vários equipamentos responsáveis por tarefas específicas conectados juntamente com um computador para comando e armazenamento dos dados colhidos.

Para que não fique faltando nenhuma informação, é preciso esclarecer que o computador, inversor de frequência e *PZ4000* são ligados diretamente na tomada, em 220 V. O módulo de aquisição *ADAM-4018+* é alimentado em tensão contínua com 12 V, utilizando-se uma fonte típica de celular. E a alimentação do *encoder* é em tensão contínua com 5 V, e para isso se utilizou uma outra fonte específica para tal.

A próxima seção irá apresentar a interface gráfica desenvolvida em *LabView*. Essa interface é responsável pelo acionamento e armazenamento dos dados.

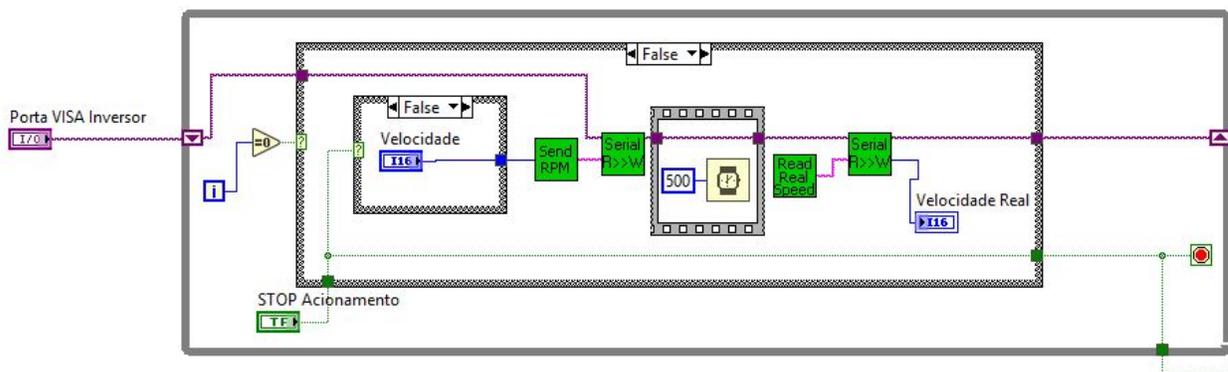
## 4.2 Software em LabView Para Acionamento do Compressor e Aquisição e Armazenamento dos Dados Medidos

Essa seção tem o objetivo de apresentar os programa utilizado para o acionamento, para a aquisição, e para o armazenamento dos dados. Esse programa foi desenvolvido no software *LabView*. Será apresentado as principais características, com uma visão mais geral, sem entrar no detalhe de cada operação computacional. Esses programas foram desenvolvidos em parte pelo autor, em parte pelo mestrando Carlos Monteiro e em parte com bibliotecas específicas de cada equipamento.

A primeira função a ser executada é a comunicação com o inversor e acionamento do compressor. Essa comunicação ocorre através de uma porta Serial RS-232 do inversor. O computador era na realidade, um notebook *Acer Aspire F 15*, e este possui entradas USB, sendo assim foi utilizado um cabo adaptador RS-232/USB.

O diagrama em *LabView* da Figura 28 representa a parte do software responsável por essa função. É basicamente um laço de repetição que envia pro inversor o comando de velocidade a ser atingida. Dessa forma o computador passa um valor de referência de velocidade angular a cada nova iteração, e o inversor executa a tarefa de controle. A comunicação é interrompida e a velocidade volta a 0 RPM no momento que o botão “STOP Acionamento” é ativado.

Figura 28 – Diagrama em *LabView* que faz a comunicação entre computador e inversor de frequência

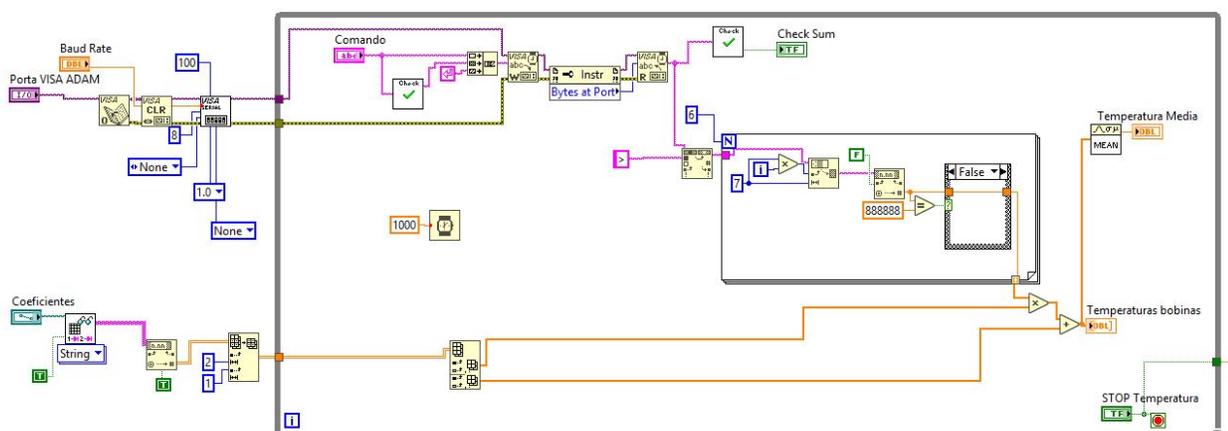


Fonte: Autor

Uma vez que o compressor é posto em funcionamento, é preciso fazer a aquisição dos dados. A comunicação entre o computador e outros dois equipamentos, o *ADAM-4018+* e o *PZ4000*, é quem executa essa tarefa. Começando com a aquisição dos termopares, pois ela é mais simples.

A Figura 29 mostra o diagrama que faz a comunicação e aquisição dos sinais de temperatura. Lembrando que o módulo *ADAM-4018+* faz uma primeira etapa de conversão do sinal, e já disponibiliza as temperaturas medidas. Para efetuar a comunicação é necessário escolher corretamente os parâmetros da Serial. Em resumo, com a comunicação corretamente estabelecida, tem um laço *while* que executa 1 vez por segundo e adquire os seis valores de temperatura. Por fim tem-se as seis temperaturas medidas em cada bobina, e é feito a média entre elas, determinando um valor único de temperatura para as bobinas.

Figura 29 – Diagrama em *LabView* que faz a comunicação entre computador e o módulo de aquisição *ADAM-4018+*



Fonte: Autor

A variável “Temperatura Media” armazena essa informação, e ela é atualizada a cada segundo. Também é preciso mencionar que, assim como o inversor, o módulo de aquisição também possui comunicação Serial RS-232, sendo novamente necessário um conversor para USB. A comunicação é interrompida quando o botão “STOP Temperatura” é ativado.

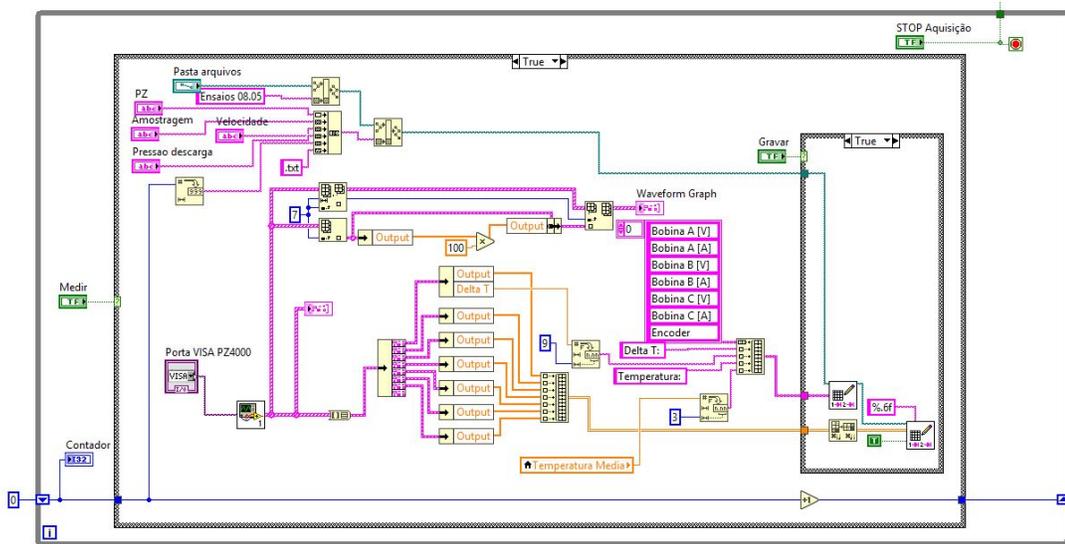
A Figura 30 apresenta o diagrama em *LabView* que realiza a comunicação entre o computador e o *PZ4000*, e o armazenamento de cada medição em um arquivo de texto. Novamente não será tratado de detalhes, apenas o funcionamento geral e como se dá o fluxo de informações.

O *PZ4000* faz as aquisições apenas quando a variável booleana “Medir” é verdadeira, no restante do tempo nada acontece. E mesmo tendo realizado a aquisição, esses valores são armazenados apenas se a variável “Gravar” também for verdadeira.

Se essas condições foram satisfeitas, tem-se um ciclo de comunicação/aquisição dos sinais e posterior armazenamento em um arquivo de texto. O equipamento *PZ4000* possui uma biblioteca própria para *LabView*, com funções de comunicação e adequação dos parâmetros. Essas funções estão alocadas na *VI* localizada no canto inferior esquerdo. É preciso indicar em qual porta está conectado o equipamento, e na saída temos um *array* de *strings* com os

valores medidos. Com os valores disponíveis, o restante do programa é apenas passagem de parâmetros como nome do arquivo de texto e cabeçalho.

Figura 30 – Diagrama em LabView que faz a comunicação entre computador e o PZ4000



Fonte: Autor

O nome do arquivo contém informações importantes como velocidade angular média, frequência de aquisição, pressão de descarga e um indicador numérico que possibilita colocar as medições em ordem de aquisição (importante pois existe mais de uma medição para as mesmas condições de contorno). Já o cabeçalho ajuda a identificar a tensão em cada bobina e corrente em cada bobina, além dos pulsos do *encoder*, temperatura das bobinas e período de amostragem. A comunicação é interrompida quando o botão “STOP Aquisição” é pressionado.

Diferentemente das comunicações anteriores, o PZ4000 possui uma saída GPIB, e foi utilizado um adaptador GPIB/USB. A comunicação GPIB/USB pode demorar algumas dezenas de segundos até ser completada. Isso se mostrou uma limitação temporal para os experimentos.

Por fim esses dados são armazenados em um arquivo de texto. Com informações relevantes no título e com todo o conteúdo necessário para realizar os estudos de comparação e validação propostas nesse trabalho. Para que não fique dúvidas, a Figura 31 ilustra uma parte dos vários arquivos de texto criados após os experimentos. Um arquivo completo tem mais de 10000 linhas.

Figura 31 – Arquivo de texto criado para cada experimento

Bobina A [V]	Bobina A [A]	Bobina B [V]	Bobina B [A]	Bobina C [V]	Bobina C [A]	Encoder Delta T:	Temperatura:
1,464844	-0,510254	-1,098633	0,502930	-0,732422	0,007324	0,000000400	78,845
1,098633	-0,510254	-1,098633	0,500488	-0,732422	0,012207		
1,098633	-0,512695	-0,732422	0,502930	0,000000	0,012207		
1,464844	-0,510254	-1,098633	0,500488	-0,366211	0,012207		
1,464844	-0,510254	-1,464844	0,500488	-0,732422	0,012207		
1,098633	-0,512695	-0,732422	0,498047	-0,366211	0,009766		
1,464844	-0,507812	-1,098633	0,498047	-0,732422	0,009766		

Fonte: Autor

### 4.3 Experimentos Realizados

A primeira decisão a ser tomada é sobre quais as condições de contorno seriam escolhidas. Essa escolha foi feita pelo aluno de doutorado Cícero Borba, pois ele tinha o conhecimento no nível de um especialista, facilitando a decisão sobre os valores adequados. Foram escolhidos três valores de velocidade angular média, sendo elas: 1600 RPM, 2600 RPM e 3600 RPM. Somado a isso também foram escolhidas três pressões de descargas: 4 bar, 5 bar e 6 bar. Ao todo foram 9 condições diferentes para realizar os experimentos. Cada uma dessas condições precisa ser experimentada várias vezes consecutivas, afim de ter em mãos vários dados de uma mesma situação de teste.

Os experimentos foram organizados da seguinte maneira: rotação mais baixa, 1600 RPM, pressão de descarga em ordem crescente, primeiro 4 bar, após 5 bar e por fim 6 bar. Em seguida aumentou-se a rotação para o valor intermediário, 2600 RPM e repetiu-se o escalonamento das pressões. Por fim a velocidade mais alta e o mesmo escalonamento das pressões.

Para cada uma das condições, esperou-se um tempo hábil para acomodação do sistema no regime permanente, para só a partir daí executar as aquisições. A Figura 32 apresenta o painel de controle para comandar os experimentos.

É preciso definir corretamente as portas que se encontram o inversor, o *ADAM-4018+* e o *PZ4000*. E definir a pasta final aonde serão armazenados os dados. Feito isso, basicamente há dois controles para comandar os experimentos, a Velocidade, e a variável booleana Medir.

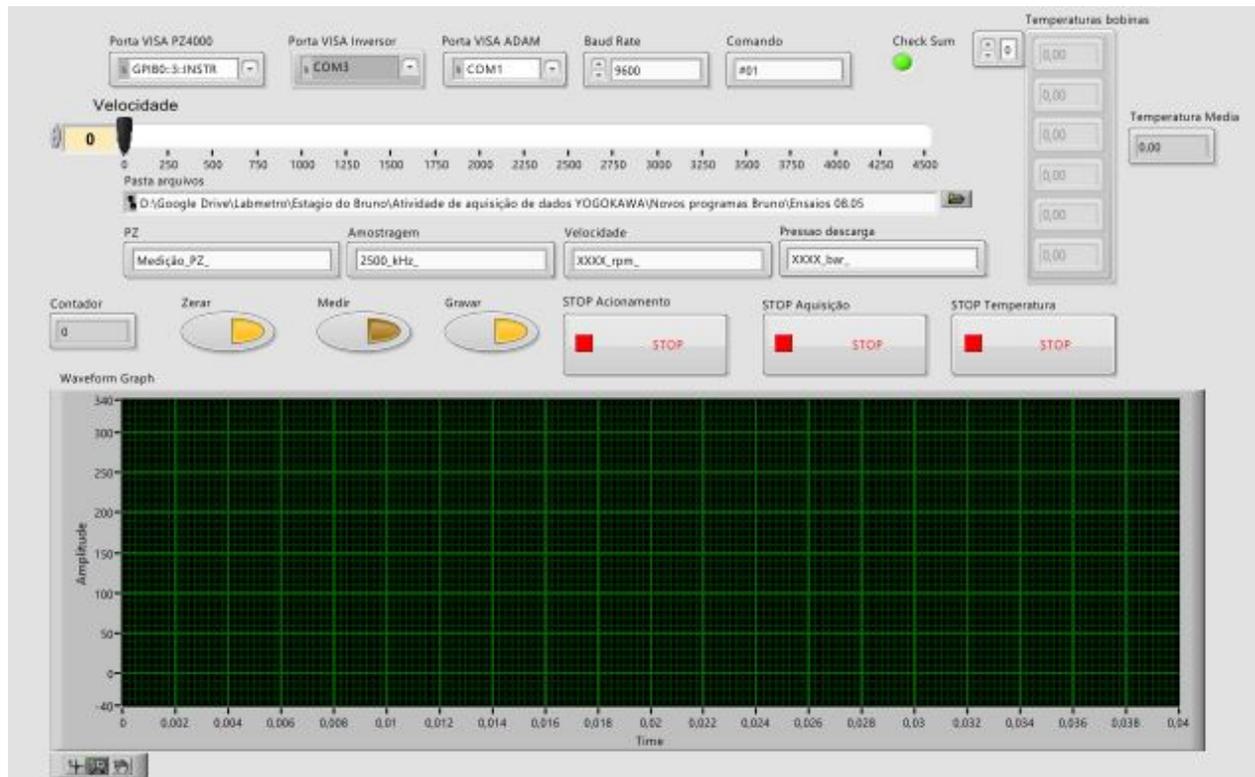
Primeiro define-se a velocidade do motor, por exemplo, 1600 RPM. Em seguida é preciso esperar que o compressor atinja o regime permanente, como o compressor esta sem a carcaça é possível ouvir o motor acelerando e desacelerando até a acomodação.

Com o motor em regime permanente, é preciso atuar sobre a válvula manual de vazão na descarga para definir a pressão desejada, por exemplo, 4 bar. Novamente é preciso um tempo para que o sistema se acomode.

Com o motor em regime na condição de teste, basta acionar o botão Medir, e assim o *PZ4000* ficará continuamente adquirindo e o notebook gravando esses dados nos arquivos de texto. É preciso lembrar de modificar os campos Velocidade e Pressao Descarga logo acima

dos botões de STOP, pois ali estão as informações que irão compor o nome dos arquivos. A cada nova aquisição a variável Contador se altera, dando a cada arquivo de texto um índice que indica a ordem dos teste.

Figura 32 – Painel de controle supervisor em *LabView* para acionamento e aquisição dos dados



Fonte: Autor

Por fim basta desligar o botão Medir, parando as aquisições sem desligar o compressor, e com o botão Zerar ativo, o programa automaticamente zera a variável Contador e fica preparado para uma nova bateria de aquisições.

Como apresentado anteriormente, a cronologia dos testes indica que agora deve-se manter a velocidade de 1600 RPM mas alterar a pressão de descarga para 5 bar. Novamente esperado o tempo de acomodação, e feito a devida modificação nos parâmetros que nomearão os arquivos de texto, basta repetir o processo descrito anteriormente para aquisição dos novos dados para essa condição. Basta repetir esses passos para cada condição escolhida.

Como já havia sido mencionado, ao todo eram 9 combinações distintas de velocidade angular média e pressão de descarga. Também foi determinado que cada condição dispusesse de ao menos 20 aquisições consecutivas. Ao fim deveria-se ter em torno de 180 arquivos de texto com diferentes aquisições. Entretanto houveram complicações durante os experimentos.

Um problema que impossibilitou todas as aquisições desejadas foi a combinação entre carcaça do compressor aberta, e ar atmosférico como fluido comprimido. Essas duas

características acabam descaracterizando o compressor em termos de ciclos de compressão. Porém é importante ressaltar que segundo técnicos e especialista da própria empresa parceira, essa limitação em nada afeta características dinâmicas do motor. Como o interesse é apenas variáveis elétricas e estimativa de velocidade angular, o experimento continua totalmente válido para esse propósito.

Voltando ao problema, por o compressor não estar dimensionado para comprimir ar, e por ter a circulação de fluido refrigerante dificultada por o mesmo estar aberto, as temperaturas no interior da carcaça e nas bobinas no estator atingem valores muito elevados, como 130°C. Vale ressaltar que em operação normal, dentro de um sistema fechado, esses valores podem existir, porém com o compressor no estado hermético, fechado, isso é perfeitamente resolvido. Nos experimentos, o que se observou foi que ao utilizar rotações elevadas, e pressão de descarga elevada, colocavam o compressor em condições de maior esforço. Nessas condições a temperatura subia de forma muito rápida, a ponto de evaporar o fluido refrigerante. Como a evaporação do fluido é algo desagradável para quem estiver ao redor, e a falta do mesmo pode danificar o compressor, optou-se por preservá-lo e não continuar com os experimentos que colocassem o compressor nessa condição crítica.

No final, foi possível realizar a aquisição em velocidade de 1600 RPM com pressões de descarga de 4 bar, 5 bar e 6 bar. Velocidade de 2600 RPM com pressões de descarga de 4 bar e 5 bar. Velocidade de 3600 RPM com pressões de descarga de 4 bar e 5 bar. E criou-se uma condição a mais, que foi velocidade de 2200 RPM com pressões de descarga de 5 bar e 6 bar.

Mesmo com os imprevistos, foi possível adquirir uma quantidade boa de dados e de condições distintas. Possibilitando assim a conclusão dessa etapa, e passagem para o próximo objetivo que é validar o método indireto de estimação de velocidade angular do motor.

## 4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado com detalhes o ferramental necessário para realização dos experimentos. Incluindo a montagem da bancada e apresentação dos seus componentes, informando as características relevantes que levaram a escolha dos mesmos. Também foi apresentado os programas responsáveis pela comunicação e aquisição dos dados experimentais. Sendo de vital importância poder compreender como é feito essa passagem entre fenômenos reais para dados armazenados dentro do computador.

Por fim foi apresentado a metodologia aplicada nos experimentos. Possibilitando a replicação dos mesmos se necessário. No capítulo seguinte será apresentado o método indireto de estimação de velocidade angular e um estudo sobre algumas incertezas do *encoder* incremental.

# 5 Método Indireto de Estimação da Velocidade Angular Instantânea

O método da integral do patamar, chamado por razões de simplicidade de método indireto, é uma parte importante deste trabalho. Por esta razão será dedicado um capítulo para explicação de seus principais aspectos. A seção 5.1 abordará este tema, e irá explicar questões importantes sobre seu funcionamento e implementação.

Familiarizar o leitor acerca do método da integral do patamar para estimação da velocidade angular é fundamental para que o mesmo possa compreender com maior propriedade os resultados.

## 5.1 Método da Integral do Patamar Para Estimar a Velocidade Angular Instantânea

Até o dado momento não foi explicado com detalhes como funciona o método indireto para estimação da velocidade angular. Este é o assunto dessa seção, mas especificamente, será apresentado como o método funciona e porque ele funciona. Não será aprofundado a parte da implementação propriamente dita, que se deu em *LabView*, e pode ser estudada com total nível de detalhes no relatório descrito na referência [2].

O método indireto para estimar a velocidade angular do motor *BLDC*, não necessita de nenhum transdutor acoplado diretamente ao eixo do motor. Na realidade, não necessita de nenhum transdutor para adquirir qualquer variável de natureza mecânica. As únicas entradas para o método são variáveis elétricas, e variáveis relativas à taxa de aquisição desses sinais. Por esse motivo, o método é tratado como sendo uma maneira de estimar a velocidade angular indiretamente. A implementação de tal método se tornou possível após os estudos de mestrado do aluno Monteiro[3], e de doutorado do aluno Walendowsky[1].

A função do método é estimar a velocidade angular do motor, todavia, isso é feito de maneira alternativa, diferente do que se encontrou nas literaturas pesquisadas, e para tal, é preciso poder quantificar um fenômeno específico do motor *BLDC*. Esse fenômeno se trata da tensão *Back EMF*.

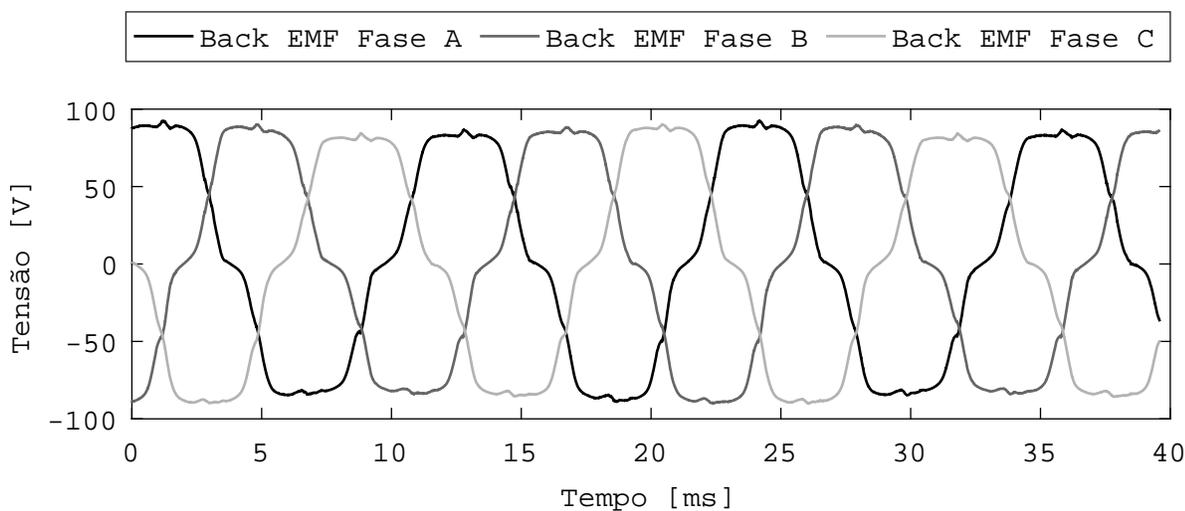
O desafio encontrado era calcular a *Back EMF* sem precisar desligar o motor, ou seja, encontrar uma relação matemática que permitisse chegar a este fenômeno a partir de variáveis de fácil aquisição e com o motor em funcionamento. O capítulo 2.2 sustenta essa etapa. A partir de busca na literatura e dos trabalhos realizados no LIAE, chegou-se nas

equações 2.11, 2.12 e 2.13. Com as informações de tensões e correntes de alimentação do motor, resistência e indutância das bobinas, é possível calcular explicitamente a *Back EMF*.

A aquisição de tensão e corrente é feita na bancada que foi montada, conforme explicado no capítulo 4. Conforme maior a taxa de aquisição, menor o tempo entre os pontos adquiridos e portanto maior é a resolução temporal da *Back EMF*. Já os valores de indutância e resistência são considerados como conhecidos, a partir de medições isoladas destes e de conhecimento prévio passado por especialistas da empresa parceira.

A Figura 33 ilustra uma das aquisições realizadas. Os parâmetros de experimento indicam velocidade angular média de 2600 RPM e pressão de descarga de 4 bar, além disso este é o resultado da 2ª aquisição consecutiva nessas condições.

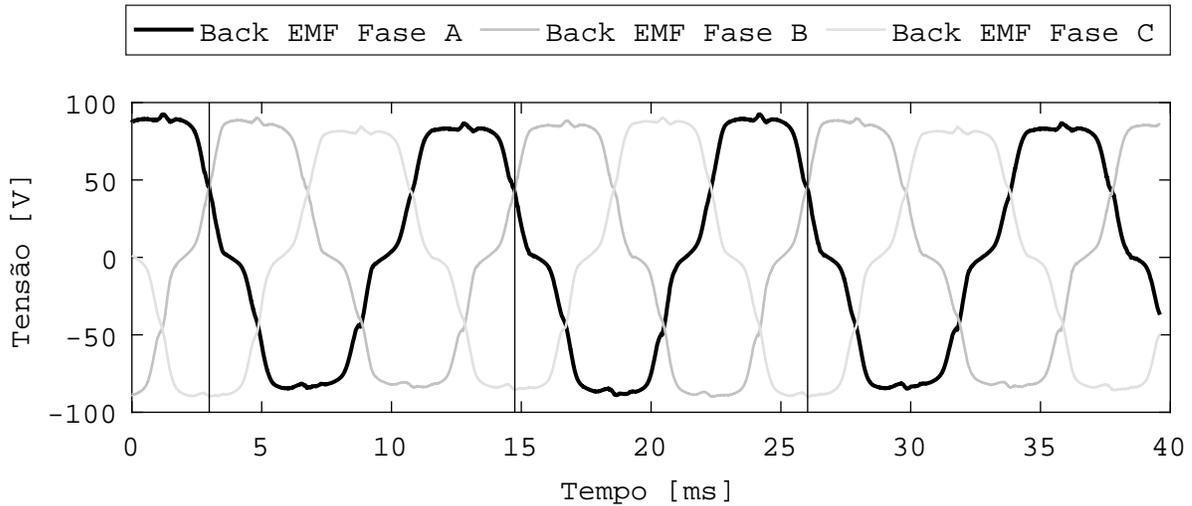
Figura 33 – *Back EMF* calculada para cada uma das três fases do motor *BLDC* acoplado ao compressor hermético



O comportamento mostrado na figura representa a forma da curva característica da *Back EMF* para o tipo do motor em estudo neste trabalho. Cada cor representa a *Back EMF* em uma das fases. Existem duas características que ficam evidentes com a imagem, e que serão exploradas pelo método indireto. A primeira é de que os sinais são periódicos, como esperado. A segunda característica são os cruzamentos consecutivos entre os sinais de fases diferentes, e esses cruzamentos não ocorrem aleatoriamente, eles se dão a cada  $\frac{1}{12}$  de volta, isso será abordado com mais detalhes adiante.

Será utilizado os dados referentes a condição apresentada na Figura 33 para prosseguir com as explicações. Na Figura 34 foi colocado em evidência a *Back EMF* da fase A do motor, e foram traçados três linhas verticais.

Figura 34 – Back EMF calculada para cada uma das três fases do motor *BLDC* acoplado ao compressor hermético



A primeira característica importante do sinal é a periodicidade. A primeira e a segunda linha vertical, que se posicionam em aproximadamente 3 e 15 milissegundos respectivamente, auxiliam a identificar essa característica. Nota-se que dentro desse intervalo existe um ciclo do sinal, e que ele se repete continuamente. A terceira linha vertical, posicionada em aproximadamente 26 milissegundos, indica o fim de um segundo ciclo, ou seja, entre a primeira e a terceira linha vertical, pode-se identificar dois ciclos completos do sinal. De acordo com as informações apresentadas na Seção 2.2, sabe-se que dois ciclos elétricos representam um ciclo mecânico, em outras palavras, duas voltas magnéticas equivalem a uma volta do rotor. Com isso é possível apenas ao analisar a curva da *Back EMF*, identificar o número de voltas do motor.

Ampliando esse raciocínio, observa-se que dentro do intervalo delimitado pela primeira e pela terceira linha vertical, cada uma das três *Back EMF* possui dois ciclos elétricos. Ainda dentro desse intervalo, que corresponde a uma volta completa do motor, observa-se o cruzamento entre subidas e descidas das *Back EMF*. No total estão presentes 13 pontos de cruzamentos, porém o primeiro e o décimo terceiro são o mesmo ponto, simplificando assim para 12 intervalos entre esses cruzamentos. Como uma revolução completa do motor possui  $360^\circ$ , ao dividirmos esse deslocamento em 12 intervalos, tem-se que cada intervalo corresponde a  $30^\circ$  de deslocamento. Para exemplificar esse comportamento, suponha que a primeira linha vertical represente a posição  $0^\circ$  absoluta. No cruzamento seguinte, que se dá em aproximadamente 5 milissegundos, tem-se a posição absoluta de  $30^\circ$ , existindo assim um deslocamento de  $30^\circ$  entre esses cruzamentos consecutivos. Assim sucessivamente, até que na segunda linha vertical o motor se encontra na posição absoluta de  $180^\circ$ , representando meia volta. Prosseguindo a contagem, a última linha vertical representa a posição absoluta

de 360°, ou seja, completa-se uma volta e por definição, o primeiro e o último ponto são a mesma posição física do rotor do motor.

Antes de mostrar exemplos que corroborem com as explicações dadas, é importante salientar qual a relação com o método indireto. Neste momento, é possível identificar com uma boa dose de certeza um deslocamento conhecido de pelo menos 30° em 30°, apenas analisando a forma de curva das *Back EMF* estimada. Não foi necessário nenhum sensor mecânico ou modificar o compressor hermético, foi utilizado até o momento, apenas a aquisição de variáveis elétricas.

Não há dúvidas de que essa característica encontrada a partir da análise das curvas da *Back EMF* trazem boas expectativas, todavia é preciso estudar se a prática é compatível com a teoria. Para investigar a suposição de que cada um dos cruzamentos representavam 30° de deslocamento, propõe-se uma validação simples por comparação com as informações disponíveis pelo *encoder* que foi instalado. O *encoder* possui 500 pulsos por revolução, sabe-se que um deslocamento de 30° corresponde a 41,666 pulsos deste *encoder*. A ideia é contar os pulsos do *encoder* a partir de um cruzamento escolhido, e a cada cruzamento subsequente, contar o total de pulsos encontrados. Com isso se espera que no segundo cruzamento tenha-se passado os 41,666 pulsos, no terceiro espera-se 83,333, no quarto a soma fecha 125, e assim sucessivamente, até que no décimo terceiro cruzamento, termina-se uma volta com a expectativa de somados 500 pulsos.

Tabela 1 – Diferença em pulsos do *encoder* e em graus

Cruzamentos	Diferença em pulso do <i>encoder</i>	Diferença em graus
Cruzamento 1	0	0°
Cruzamento 2	-0.0360	-0.0259°
Cruzamento 3	-0.4818	-0.3469°
Cruzamento 4	-0.6529	-0.4701°
Cruzamento 5	-0.1433	-0.1031°
Cruzamento 6	-0.1373	-0.0988°
Cruzamento 7	0.2185	0.1573°
Cruzamento 8	0.1839	0.1324°
Cruzamento 9	0.2812	0.2024°
Cruzamento 10	0.4196	0.3021°
Cruzamento 11	0.4324	0.3114°
Cruzamento 12	0.5298	0.3814°
Cruzamento 13	0.0901	0.0649°

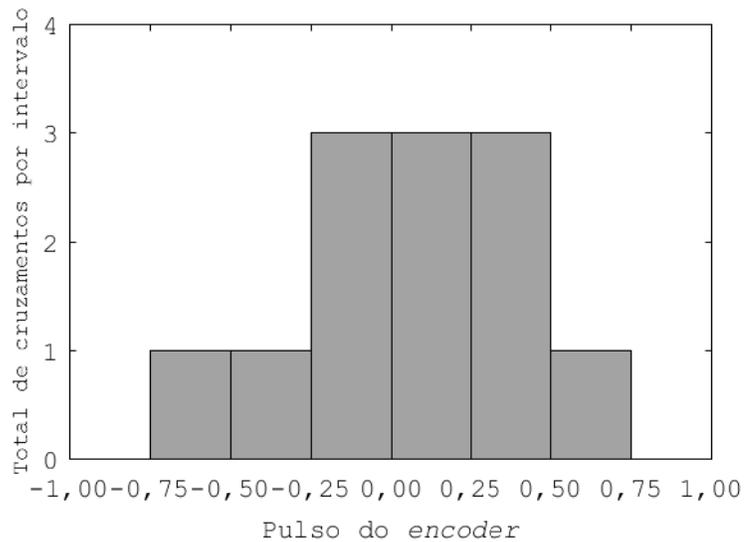
Fonte: Autor

A Tabela 1 apresenta os valores encontrados, lembrando que a referência é o número de pulsos do *encoder* esperado para um deslocamento de 30°. Ao analisar a segunda coluna, fica claro que em nenhum cruzamento o erro chega próximo a 1 pulso do *encoder*, ou seja,

o suposto erro que possa haver nas posições encontradas analisando apenas os cruzamentos da *Back EMF* fica abaixo da própria resolução do *encoder*. A terceira coluna representa essa mesma diferença em graus, apenas para salientar que o erro é realmente bem pequeno.

Uma outra maneira de visualizar é apresentada na Figura 35, aonde nota-se que a maioria dos cruzamentos possui erro dentro do intervalo de 0.25 pulso de *encoder* pra menos, até 0.5 pulso de *encoder* pra mais.

Figura 35 – Histograma



Fonte: Autor

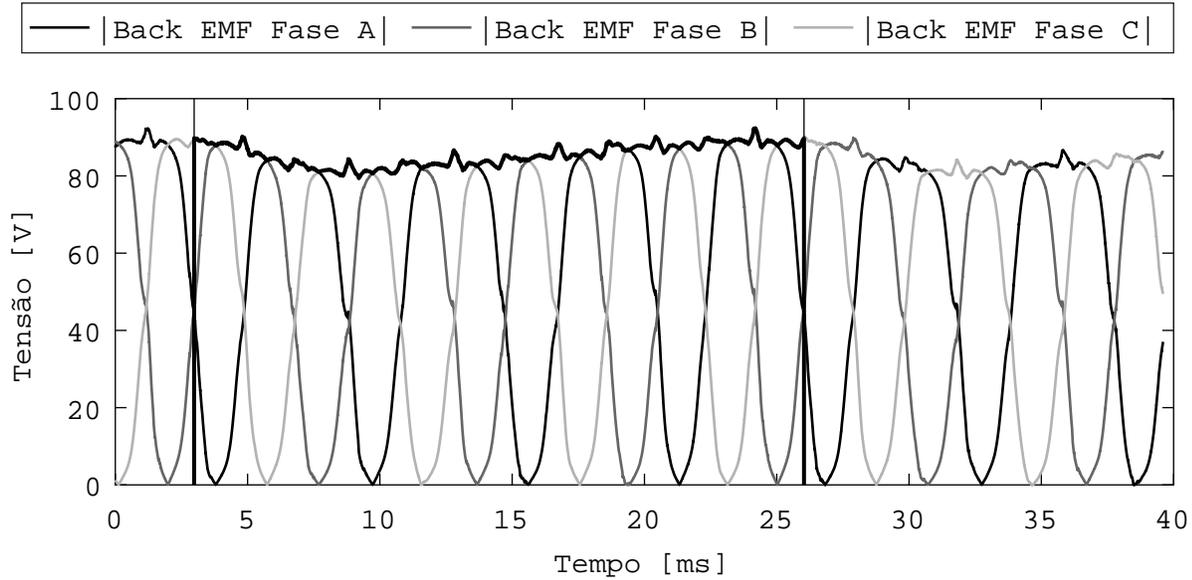
Com esses resultados pode-se prosseguir com o desenvolvimento, sabendo-se que é possível identificar deslocamentos de  $30^\circ$  do rotor analisando somente a *Back EMF* estimada. Porém um intervalo de  $30^\circ$  é muito grande para que seja viável estimar a velocidade angular “instantânea” durante uma volta.

Na teoria seriam necessários o conhecimento de deslocamentos infinitesimais, para então calcular as velocidades instantâneas em cada ponto infinitesimal de deslocamento. Porém na prática não existe essa necessidade de velocidade angular instantânea conforme a teoria. Deslocamento suficientemente pequenos já seriam satisfatórios para a estimativa da velocidade angular do rotor. No momento, o que se tem de concreto é a identificação de 12 intervalos, e deslocamentos de  $30^\circ$ , é preciso aumentar essa resolução.

Foi para resolver esse problema que os integrantes do LIAE, ao qual está incluído o autor, desenvolveram um método inédito para identificação de posições do rotor de uma motor *BLDC*. Esse método será chamado de Integral do Patamar, e será explicado de forma mais simples e direta a seguir. A intenção aqui se resume em apenas mostrar o que é a Integral do Patamar e como funciona, mostrando exemplos e resultados. Maiores embasamentos teóricos ficam a cargo do leitor buscar na referência Walendowsky[1].

A curva da *Back EMF* ainda é ponto de partida, porém agora o interesse não está em encontrar os cruzamentos vistos nas figuras e sim uma outra característica da curva, o patamar de tensão. Esse conceito ficará mais claro com a Figura 36.

Figura 36 – Módulo da Back EMF com destaque para o patamar de tensão



Fonte: Autor

Para calcular o patamar de tensão, basta fazer o módulo das *Back EMF*, como mostrado na Figura 36. O sinal apresentado é o mesmo que já havia sendo apresentado, porém agora temos apenas valores positivos com a utilização do módulo. Com essa operação, gera-se um patamar superior para todo o sinal, esse é o chamado patamar de tensão e foi destacado com uma linha mais forte na imagem. Em outras palavras, o patamar é composto por o maior valor absoluto entre as três *Back EMF* a cada ponto,

$$patamar(i) = \max(|BEMF_a(i)|, |BEMF_b(i)|, |BEMF_c(i)|), \quad (5.1)$$

onde:

*patamar*: patamar de tensão;

$BEMF_{a,b,c}$ : *Back EMF* na fase.

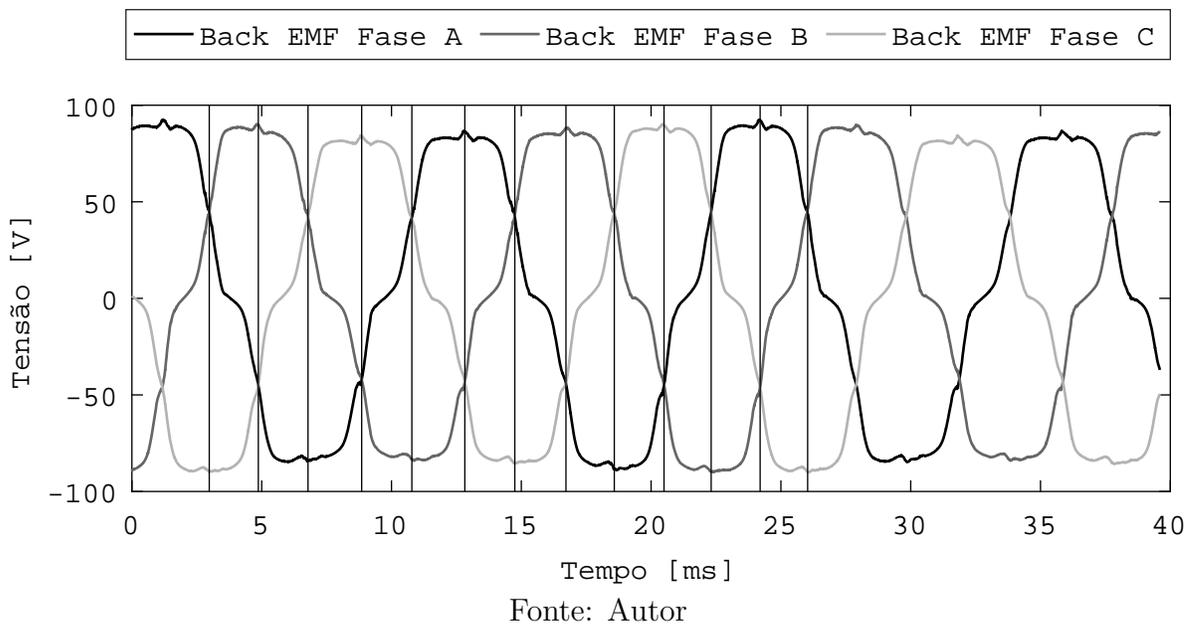
Foi mantida ainda as duas retas verticais que indicam o início e o fim de uma volta e destacado o patamar de tensão nesse intervalo. A proposta é integrar esse sinal de patamar de tensão no intervalo de uma volta, justamente o intervalo destacado na imagem. Com isso obtêm-se um valor único que representaria em apenas um número, o equivalente a  $360^\circ$  de deslocamento do rotor.

Por hipótese, digamos que a integral do patamar de tensão dentro do intervalo destacado na figura, tenha dado o valor de 1000, e que isso representa  $360^\circ$  de deslocamento. A ideia é de que seja possível encontrar outro deslocamento qualquer a partir dessa relação,

sendo assim, se a intenção for encontrar  $180^\circ$  de deslocamento, basta encontrar o ponto em que a integral seja 500, e assim por diante para qualquer intervalo escolhido. Continuando com a hipótese, isso significaria dizer que seria possível encontrar qualquer intervalo de deslocamento desejado, bastando apenas determinar uma relação entre um valor conhecido da integral de tensão dentro de um intervalo conhecido de deslocamento. Esse procedimento foi chamado de Integral do Patamar.

Novamente é preciso alguns testes que validem essa hipótese. Para isso utilizou-se a mesma abordagem apresentada anteriormente para validar os deslocamentos de  $30^\circ$ . Primeiramente a Figura 37 ilustra a mesma curva que já vem sendo apresentada e mostra os locais em que a Integral do Patamar identificou deslocamentos de  $30^\circ$ . Para determinar esses pontos bastou-se realizar a Integral do Patamar no intervalo de uma volta selecionado. O valor da integral foi de 4.927.182,566220027, ao dividir-se por 12, obtêm-se o valor de 410.598,5471850023, que nesse caso equivaleria a  $30^\circ$  de deslocamento. As 13 linhas verticais indicam os locais em que foram identificados esses deslocamentos e pode-se comprovar, ao menos visualmente, que estão exatamente nos locais em que há cruzamento das *Back EMF*.

Figura 37 – Back EMF com divisões determinadas através da Integral do Patamar



Além de demonstrar visualmente, é possível realizar a mesma comparação com o *encoder* já realizada anteriormente. Os resultados são apresentados na Tabela 2 e na Figura 38.

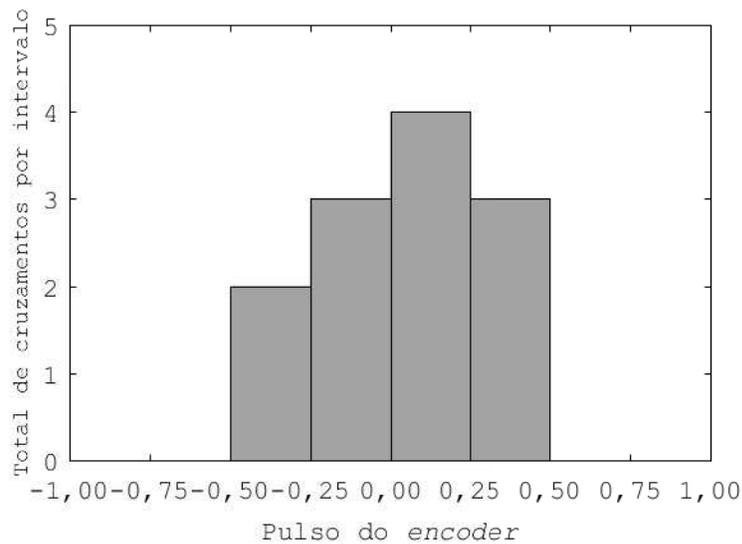
Os resultados mostram que os locais onde ocorreram deslocamentos de  $30^\circ$  indicados pela integral do patamar são ainda melhores na comparação com o *encoder*. Os erros não foram maiores de meio pulso em nenhum momento. Para essa comparação foi escolhido dividir a integral do patamar em 12 intervalos por volta, assim como é o número de intervalos

Tabela 2 – Diferença em pulsos do *encoder* e em graus utilizando os cruzamentos reais e utilizando a integral do patamar

Cruzamentos	Diferença em pulso do <i>encoder</i> (Cruzamentos)	Diferença em pulso do <i>encoder</i> (Integral Patamar)	Diferença em graus (Cruzamentos)	Diferença em graus (Integral Patamar)
Cruzamento 1	0	0	0°	0°
Cruzamento 2	-0.0360	0.0160	-0.0259°	0.0115
Cruzamento 3	-0.4818	-0.3290	-0.3469°	-0.2369
Cruzamento 4	-0.6529	-0.3612	-0.4701°	-0.2601
Cruzamento 5	-0.1433	-0.4230	-0.1031°	-0.3046
Cruzamento 6	-0.1373	-0.0397	-0.0988°	-0.0286
Cruzamento 7	0.2185	-0.0145	0.1573°	-0.0104
Cruzamento 8	0.1839	0.2111	0.1324°	0.1520
Cruzamento 9	0.2812	0.2147	0.2024°	0.1546
Cruzamento 10	0.4196	0.4569	0.3021°	0.3354
Cruzamento 11	0.4324	0.2577	0.3114°	0.1855
Cruzamento 12	0.5298	0.3505	0.3814°	0.2524
Cruzamento 13	0.0901	0.0901	0.0649°	0.0649

Fonte: Autor

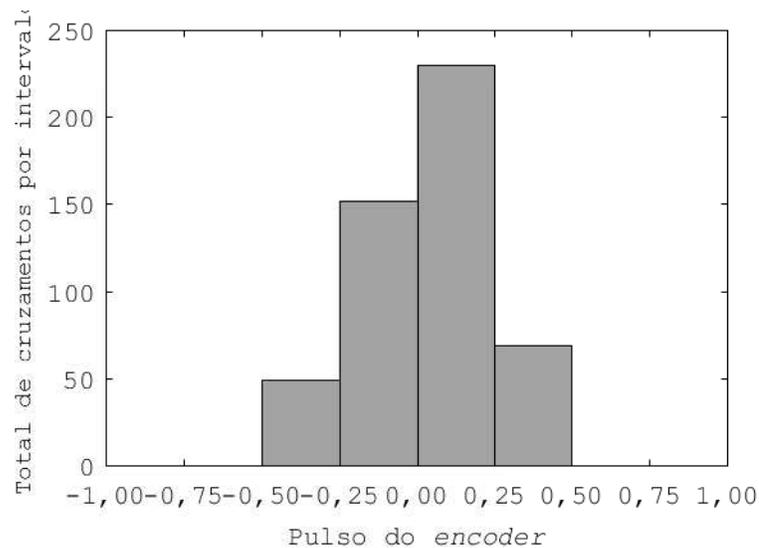
Figura 38 – Histograma



Fonte: Autor

capaz de ser identificado pelos cruzamentos da *Back EMF*, porém a integral do patamar pode fazer melhor que isso. Ao invés de 12 intervalos, optou-se por dividir a volta em 500 intervalos, fazendo com que a integral do patamar possua a mesma "resolução" que o *encoder*. E agora a comparação pode ser feita pulso a pulso, de modo a verificar se a comparação ainda mostra ótimos resultados quando aumentada a resolução da integral do patamar. Os resultados são apresentados também na forma de um histograma na Figura 39.

Figura 39 – Histograma



Fonte: Autor

O resultado é extremamente animador, mais de  $\frac{3}{5}$  dos intervalos apresentaram erros menores que  $\frac{1}{4}$  de pulso do *encoder*. Isso significa que, guardada as proporções, foi criado *encoder* virtual a partir da integral do patamar, e que assim como com um *encoder* tradicional, é possível calcular a velocidade angular. E é assim que funciona o método indireto, ele utiliza os pontos encontrados pela integral do patamar para calcular a velocidade angular do motor. Em resumo, conseguiu-se criar uma "espécie" de *encoder* virtual capaz de gerar pulsos que representam deslocamentos conhecidos, como nesse caso, 500 pulsos por volta.

Antes de terminar essa seção, ficou uma última lacuna a ser preenchida que é sobre os valores de indutância e resistência. Esses valores são parâmetros de entrada para o cálculo da *Back EMF*.

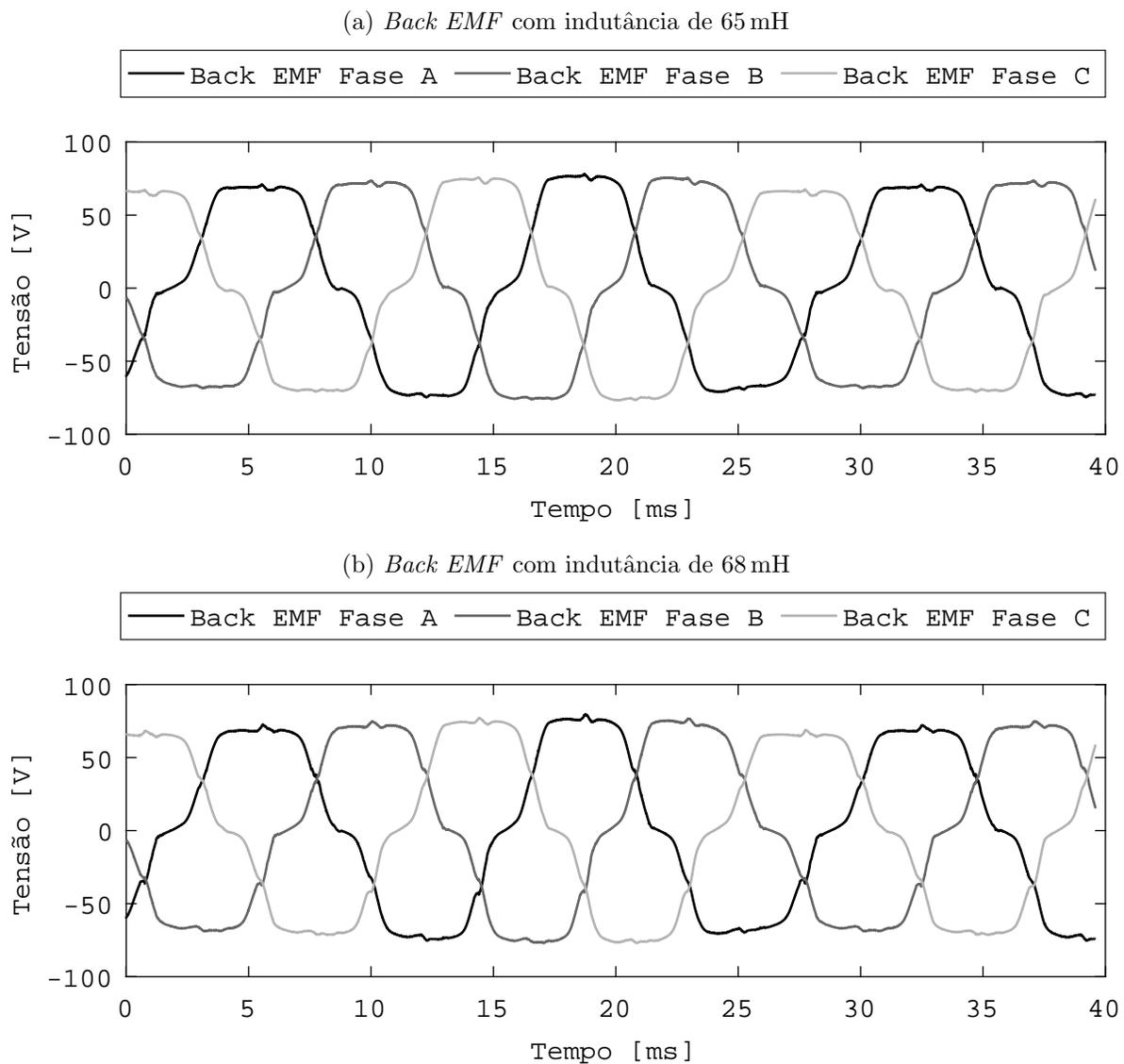
### 5.1.1 Indutância e Resistência do Motor *BLDC*

Esta subseção irá explicar como foram selecionados os valores das variáveis de indutância e de resistência do motor *BLDC*. Esses parâmetros fazem parte da modelagem inicial e a escolha por valores errados pode comprometer o resultado final, que é o cálculo da velocidade angular.

A começar pelo valor de indutância que foi o mais simples de resolver. De acordo com os especialistas na empresa parceira, sabe-se que o valor de indutância das bobinas não sofre grande mudança com o aumento da temperatura. Sendo assim, simplifica muito a escolha do valor correto, pois pode-se descartar o efeito da temperatura. Também segundo os especialistas da empresa parceira, o valor usual da indutância das bobinas é de 65 mH, e foi esse o valor utilizado em todos os experimentos.

Apenas para visualizar o efeito da mudança nesse parâmetro, a figura a seguir ilustra essa situação.

Figura 40 – Efeito de diferentes valores de indutância



Fonte: Autor

Na imagem superior tem-se a *Back EMF* calculada com o valor usual de indutância, 65 mH, enquanto na imagem inferior foi utilizado um valor 68 mH. A diferença causada pelo

indutância pode ser visualizada em pico um pouco maiores nas regiões superiores e inferiores do sinal, e nas regiões de cruzamento.

Explicado o critério de escolha do valor da indutância, resta agora entender como foi feita a escolha para o valor de resistência. Para esse parâmetro a temperatura influencia significativamente e valores diferentes de resistência impactam no cálculo da *Back EMF* e interferem nos resultados finais.

Para solucionar isto, foram utilizados os termopares em cada bobina. As explicações sobre esses transdutores e como foram feitas as aquisições já foram explicadas anteriormente, em especial destaque para a Figura 31 na Seção 4.2 do Capítulo 4, aonde pode ser visualizada na última coluna da direita, que cada medição individual carrega também a informação da temperatura média das bobinas no momento da aquisição. Com o conhecimento desse valor, basta relacionar a variação de resistência com a variação da temperatura utilizando a seguinte fórmula:

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)], \quad (5.2)$$

onde:

$R$ : Resistência para temperatura  $t$ ;

$R_0$ : Resistência para temperatura  $t_0$ ;

$t$ : Temperatura das bobinas durante o experimento;

$t_0$ : Temperatura referência das bobinas;

$\alpha$ : Coeficiente de temperatura para o cobre ( $0.004\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ).

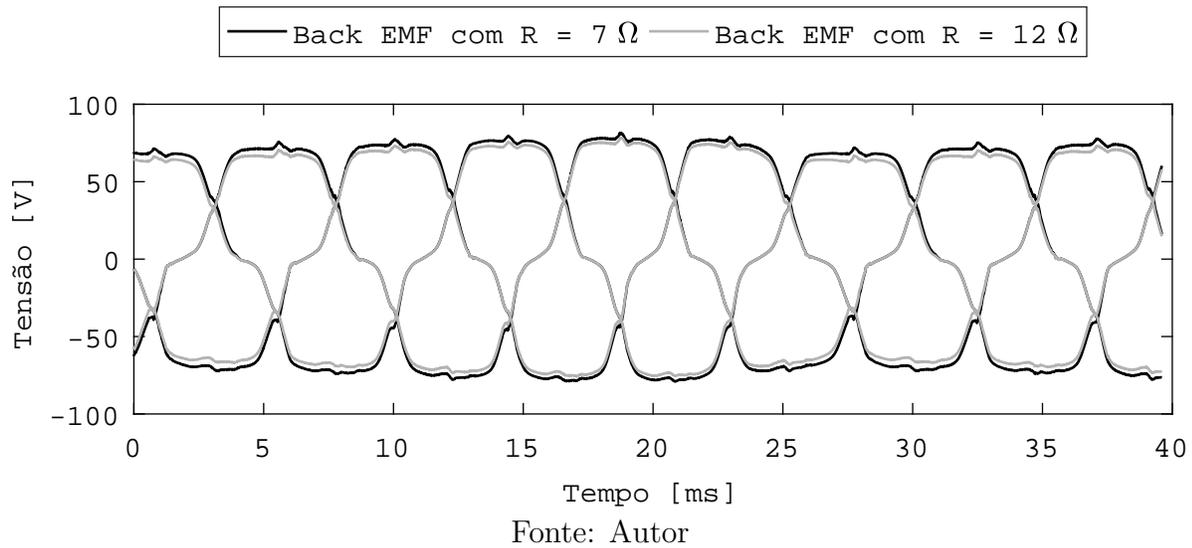
Antes de realizar os experimento foram feitas algumas medições de resistência e temperatura, sendo essa a condição de referência, e para essa situação se verificou que para  $23\text{ }^\circ\text{C}$  a resistência de cada fase era de  $7.5\ \Omega$ . Esses são os valores de  $R_0$  e  $t_0$  respectivamente. Com essas informações pode-se calcular a resistência esperada para cada medição realizada, de acordo com a temperatura durante a aquisição.

E dessa forma que é feito a escolha do valor de resistência para cada medição realizada. A figura a seguir ilustra o impacto causado por valores diferentes de resistência na *Back EMF*.

Como pode ser observado na Figura 41 o efeito da variação da resistência é sentido na forma de aumento na amplitude do sinal da *Back EMF*.

Uma vez explicados como se resolveu a definição dos valores desses dois parâmetros, pode-se afirmar que o método da Integral do Patamar está pronto para ser utilizado. A próxima seção vai tratar do segundo método de medição, o *encoder* incremental.

Figura 41 – Efeito de diferentes valores de resistência



## 5.2 Considerações Finais

Neste capítulo foi tratado sobre o método de medição indireto utilizado no presente trabalho. Foi feita a devida apresentação ao leitor sobre tal método, com enfoque nos aspectos essenciais sobre seu funcionamento e implementação.

O próximo capítulo irá apresentar os resultados de velocidade angular instantânea do rotor calculados com o auxílio da integral do patamar. Esses resultados serão comparados com as respostas de velocidade do *encoder* incremental instalado. Por meio dessas comparações, espera-se validar e demonstrar algumas propriedades metrológicas do método indireto desenvolvido.

## 6 Validação Experimental do Método Indireto

Este capítulo apresentará comparações experimentais entre o método indireto e a utilização *encoder*. Tais comparações foram realizadas ao cruzar os resultados de velocidade angular instantânea obtidas pelos mesmos. Será apresentadas diversas comparações entre múltiplas condições de funcionamento. Também será estudado algumas características metrológicas sobre os resultados, e apresentado um levantamento simplificado de incerteza.

Na seção 6.1 será abordado um estudo sobre o *encoder* incremental utilizado como referência. A seção 6.2 tratará sobre as comparações, e tal seção está dividida em 4 subseções, cada uma abordando um tipo de comparação diferente, sendo elas, comparação entre uma medição experimental, comparação de todas as medições experimentais de uma única condição de contorno, comparações de todas as medições experimentais de mais de uma condição afim de investigar a influência de diferentes valores de velocidade angular média e comparações de todas as medições experimentais de mais de uma condição afim de investigar a influência de diferentes valores de pressão de descarga. A seção 6.3 fará uma análise sobre a frequência de aquisição mínima necessária para o funcionamento do método da integral do patamar.

Por ser um capítulo de apresentação de alguns resultados, ele é denso em informações e imagens. Lembrando que apesar de ser realizado algumas análises de incertezas, essa não é a proposta do trabalho. O objetivo é validar o método desenvolvido, para que em um segundo momento possa ser feito uma análise mais consolidada e detalhada sobre as incertezas de medição, permitindo assim que os resultados possam ser utilizados na implementação em produtos comerciais.

### 6.1 *Encoder* Incremental

Essa seção vai tratar com um pouco mais de detalhes sobre algumas características de implementação do *encoder* incremental. Principalmente com um enfoque em algumas incertezas relacionadas a este método de medição.

Para validar os resultados de velocidade angular obtidos a partir do método indireto criado, se fez uso de um *encoder* incremental HEDS-9100 de 500 pulsos por revolução, como sendo a medida referência de velocidade angular. A utilização do *encoder* possui algumas incertezas que estão fora do nosso alcance de mensurar, e algumas que podem ser mensuradas.

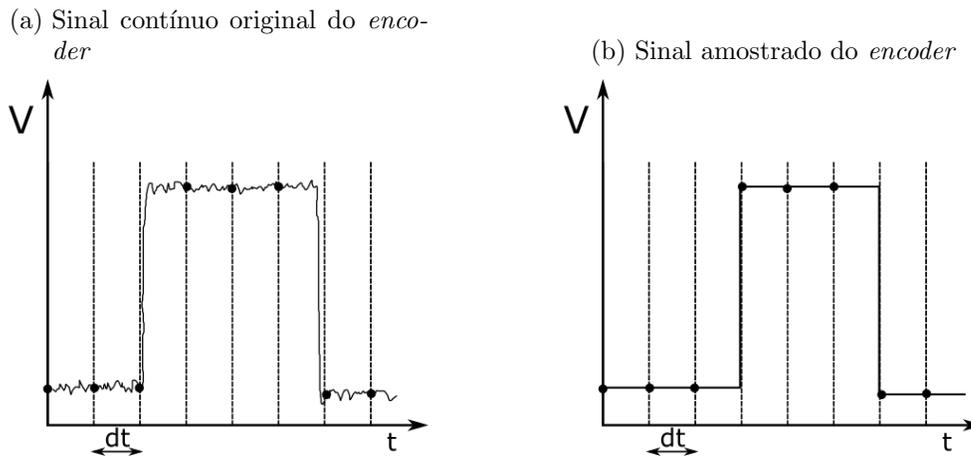
Entre as incapazes de mensurar estão aquelas relacionadas com a montagem do transdutor, que podem trazer algum tipo de desalinhamento. Além disso, ao estar em funcionamento o compressor inteiro acaba vibrando, essa vibração também pode ser prejudicial. E

por último tem-se a possibilidade de acúmulo de sujeira no disco perfurado, mesmo confeccionando as proteções de plástico, não há garantias de que nenhuma partícula vá adentrar essa proteção. Essas questões existem e estão aqui documentadas, mas não serão consideradas em um estudo completo de incertezas.

Uma incerteza possível de mensurar é a questão que envolve a discretização do sinal adquirido pelo *encoder*. O fato é que o *encoder* poder ter mudado de estado entre uma das amostragens, mas só será indicado essa mudança na amostra seguinte, a Figura 42 ajuda a entender esse fenômeno.

A linha tracejada indica os instantes de amostragem e em preto o sinal em tempo contínuo. Os pontos pretos representam os valores que foram amostrados. A passagem do sinal contínuo para o sinal amostrado, no exemplo da Figura 42, ilustra a perda de basicamente 1 amostra entre o tamanho original do pulso e o tamanho final. Felizmente essa incerteza pode ser calculada, e no caso de manter constante o período de amostragem ( $4 \times 10^{-7}$  s), ela vai depender da velocidade média do motor.

Figura 42 – Discretização do sinal do *encoder*



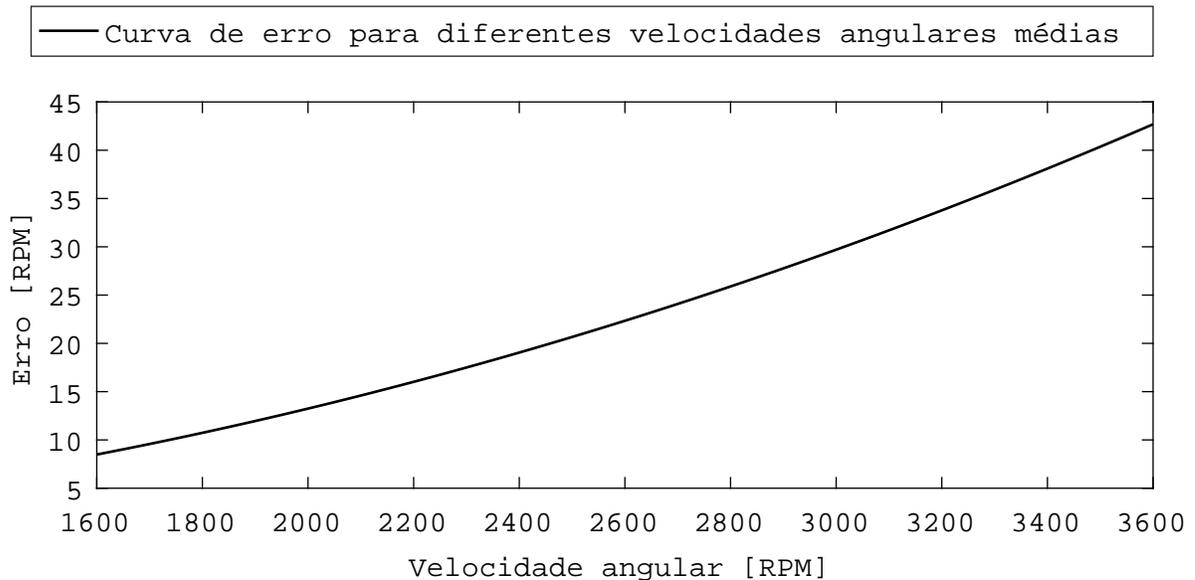
Fonte: Autor

Ao pensar na dinâmica do *encoder* com a velocidade, sabe-se que para uma velocidade mais baixa, um pulso de *encoder* é mais longo e portanto possui mais amostras. Ao aumentar a velocidade tem-se que a duração do pulso diminui e também diminui o número de amostras que o representa. Esse efeito faz com que o erro na amostragem de uma amostra antes ou depois seja relativamente pior para maiores velocidades, pois o número de amostra já é reduzido, ou seja, o acréscimo ou decréscimo de uma amostra tem um efeito maior. A Figura 43 mostra a relação entre velocidade e erro.

A imagem ilustra que ao aumentar a velocidade, o erro que pode ser cometido também aumenta. Mesmo assim, em termos proporcionais esse erro não é maior que 1,5% da velocidade angular corrente.

Tendo feito essas ressalvas, podemos fazer uma análise comparativa entre o método indireto para cálculo da velocidade angular e o resultado apresentado pela medição direta com o *encoder*.

Figura 43 – Curva de erro do *encoder* para diferentes velocidades angulares



Fonte: Autor

## 6.2 Comparação Entre as Velocidades Angulares Obtidas com o Método Indireto e com o Método Direto

Nessa seção será estudado se o método indireto desenvolvido, é capaz de calcular um perfil de velocidade coerente e confiável. Para isso será utilizado um *encoder* incremental como método de medição de referência. Serão apresentados gráficos e alguns estudos metrológicos simples em cima dos resultados para que por fim, possa ser feito uma análise quantitativa e qualitativa do método indireto para estimar velocidade angular no motor *BLDC*.

Para facilitar o entendimento e o encadeamento das ideias, os resultados serão apresentados por partes. A começar pelo estudo mais simples possível, de apenas uma medição realizada em uma única condição. Em seguida se ampliará o estudo para todas as medições realizadas nessa mesma condição. Após será apresentado um estudos para compreender o efeito da mudança dos valores de velocidade angular média. Posteriormente será apresentado um estudo para entender o efeito da mudança das pressões de descarga. Por fim será apresentado um estudo sobre o efeito da escolha de frequências de aquisições menores.

## 6.2.1 Comparação Entre os Resultados Para Uma Única Medição

Como o nome da subseção já sugere, as análises irão começar da forma mais simples. O primeiro estudo levará em consideração apenas uma medição. Cronologicamente essa medição individual corresponde a segunda aquisição, feita com velocidade média de 2600 RPM e pressão de descarga de 4 bar.

Para fazer uma comparação entre os dois resultados de velocidade obtidos para essa medição, é preciso ficar atento a pequenos detalhes que podem interferir nesse processo. No capítulo anterior foi explicado o método indireto, com o qual é possível gerar um “*encoder*” incremental virtual com qualquer resolução desejada. O primeiro cuidado a ser tomado é determinar que o método indireto tenha a mesma resolução do *encoder* incremental real utilizado.

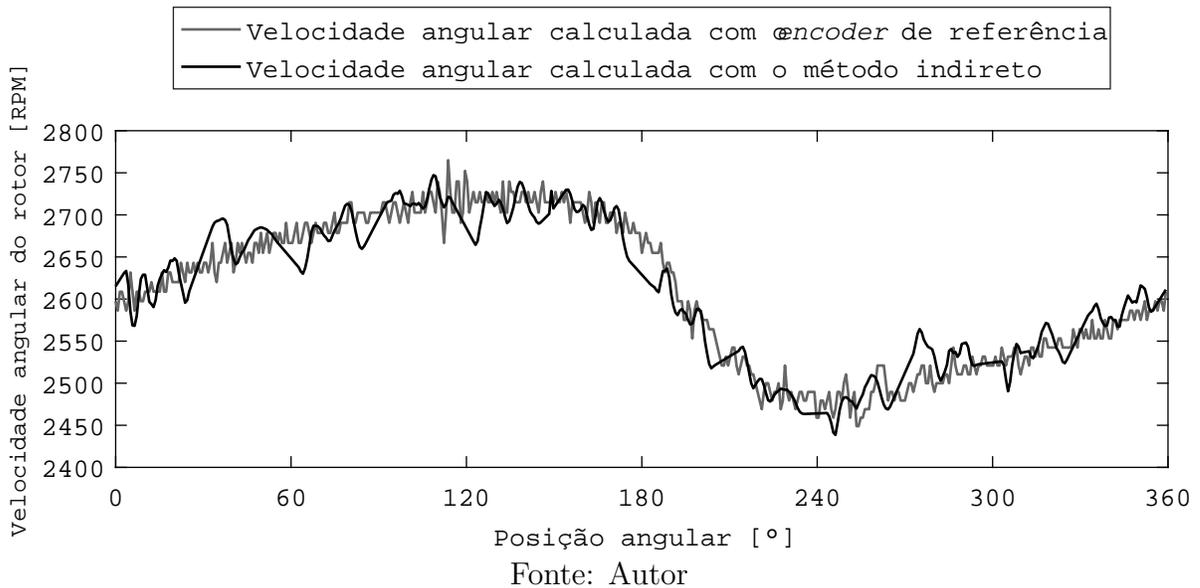
Um outro detalhe importante é que o método indireto necessita de um intervalo deslocamento rotacional do rotor conhecido, só então é possível realizar as considerações para o cálculo da integral. O deslocamento mínimo possível de se determinar é  $30^\circ$ , entretanto optou-se por sempre utilizar o deslocamento de uma volta completa. A frequência de aquisição dos dados é constante e o equipamento de aquisição possui um valor limitado de memória para alocar os dados adquiridos. Isso significa que a janela temporal capaz de ser adquirida é fixa. As velocidades médias mais baixas terão menos “rotações” adquiridas, enquanto as velocidades maiores terão mais “rotações”. Porém mesmo para a menor velocidade, garante-se que há sinal suficiente para identificação de uma volta. Identificado essa volta a partir dos cruzamentos, como explicado na Seção 5.1, tem-se uma janela dos dados que serão realmente utilizados, a questão é que essa mesma janela precisa ser transportada aos dados do *encoder*, garantindo assim que se compare as velocidades nos mesmos momentos, esse detalhe importante precisa ser observado.

Tomados os devidos cuidados, é de se esperar que os dois resultados estejam corretamente sincronizados. Ao fim do condicionamento dos sinais, tem-se um sinal referente à medição de deslocamento do rotor adquiridos da leitura do *encoder* incremental, e um sinal referente aos deslocamentos do rotor a partir do método indireto de estimação de velocidade angular.

O cálculo da velocidade angular precisa de um  $\delta d$  de deslocamento e um  $\delta t$  de tempo. O  $\delta d$  é proporcional à resolução dos dados, e com 500 pulsos por volta de resolução, tem-se que cada pulso equivale a  $0,72^\circ$  de deslocamento. O  $\delta t$  pode ser calculado a partir da diferença de amostra entre cada pulso encontrado, por exemplo, sendo 50 a diferença de amostras entre pulsos consecutivos, e sabendo a taxa de amostragem de aquisição do sinal,  $4 \cdot 10^{-7}s$ , o  $\delta t$  entre os pulsos foi de  $2 \cdot 10^{-5}s$ . Dessa forma é possível calcular um valor de velocidade angular para cada  $0,72^\circ$  de deslocamento do rotor. Uma vez entendido como é

feito o cálculo, os resultados são apresentados na imagem a seguir.

Figura 44 – Velocidade angular dentro de uma volta do rotor calculadas a partir do *encoder* e do método indireto



Na Figura 44 são apresentadas as duas curvas de velocidade angular calculadas. Uma análise visual já demonstra que as duas curvas são parecidas, e que possuem um comportamento senoidal. A resposta do *encoder* que é apresentada em cinza, possui resposta um pouco serrilhada, com pequenos pulsos entre os valores, característica essa comum ao cálculo de velocidade com *encoder* incremental. Já a resposta do método indireto é visualmente mais contínua, porém apresenta oscilações que, se olhadas com mais atenção, percebe-se uma periodicidade a cada  $\frac{1}{12}$  do sinal. Esse valor se deve a comutação do inversor que ocorre justamente a cada  $\frac{1}{12}$  de volta.

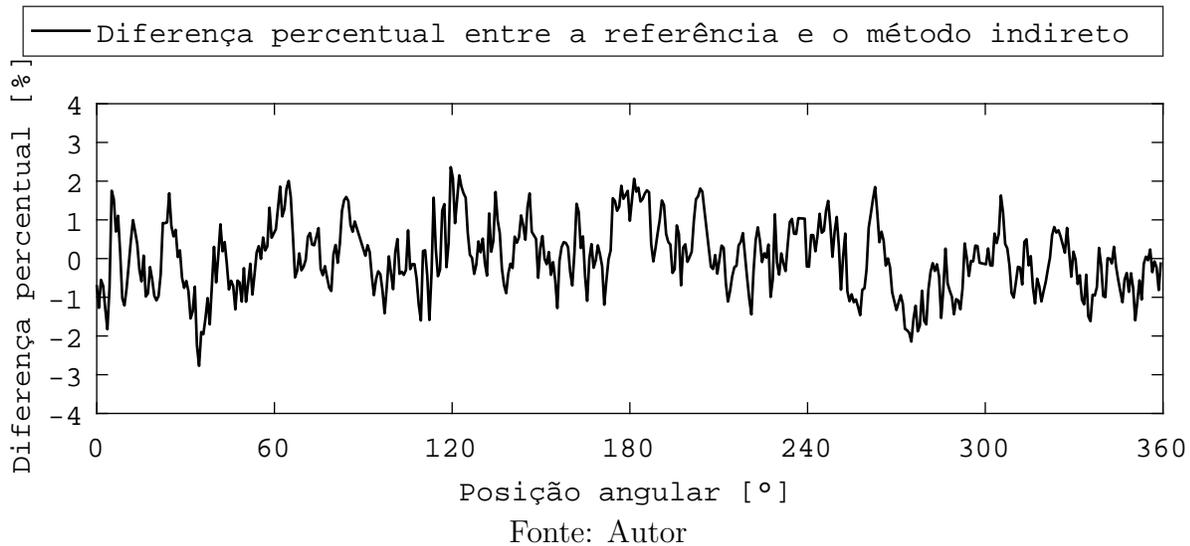
Ainda é cedo para tirar conclusões definitivas, mas é certo de que esses resultados mostram uma enorme similaridade entre as respostas obtidas, depositando assim grande expectativa sobre o método indireto desenvolvido para calcular a velocidade angular.

Um próximo passo para enriquecer a análise é apresentar a diferença encontrada entre os dois sinais. Para convencionar a análise visto que mais a frente serão apresentados outras condições e outras velocidades médias, iremos apresentar os erros em base proporcional ao valor de referência. Ficará mais claro com a próxima figura.

A Figura 45 ilustra agora de forma quantitativa o quão similares são os resultados. A cada amostra temos a diferença entre a referência e o método indireto, e esse valor é apresentado na forma de percentual em relação ao valor de referência esperado. Com isso pode-se concluir que o erro do método indireto é quase sempre menor de 2% do valor de

referência. Com essas informações já é possível ter uma melhor noção da exatidão dos valores obtidos com o método indireto.

Figura 45 – Diferença percentual entre a velocidade angular de referência e a velocidade angular do método indireto



Ainda utilizando apenas o resultado de uma medição, é possível realizar uma outra situação de comparação dos resultados, que é filtrar as velocidades angulares. O filtro em questão é um filtro de média móvel, e será utilizada a mesma configuração de janela para ambos os resultados, garantindo assim, que não exista nenhuma defasagem entre eles. Com a utilização dos filtros espera-se obter resultados livres dos dentes de serra, no caso do *encoder*, e atenuar as interferência oriundas do chaveamento do inversor, no caso do método indireto.

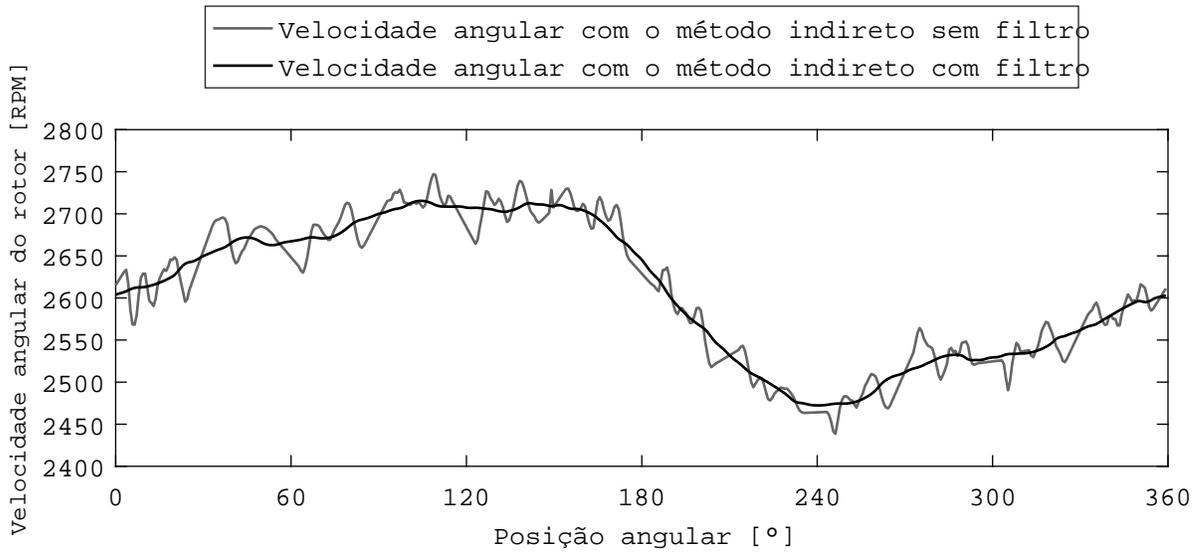
Na Figura 46 é ilustrado as velocidades angulares pós filtro. São apresentados separadamente para que o leitor possa conferir que foi alcançado o efeito esperado com a utilização do filtro em cada uma das curvas.

Em seguida será apresentado as duas respostas já filtradas e sobrepostas, além também da diferença entre elas. Seguindo a mesma convenção usada anteriormente com os resultados sem filtro.

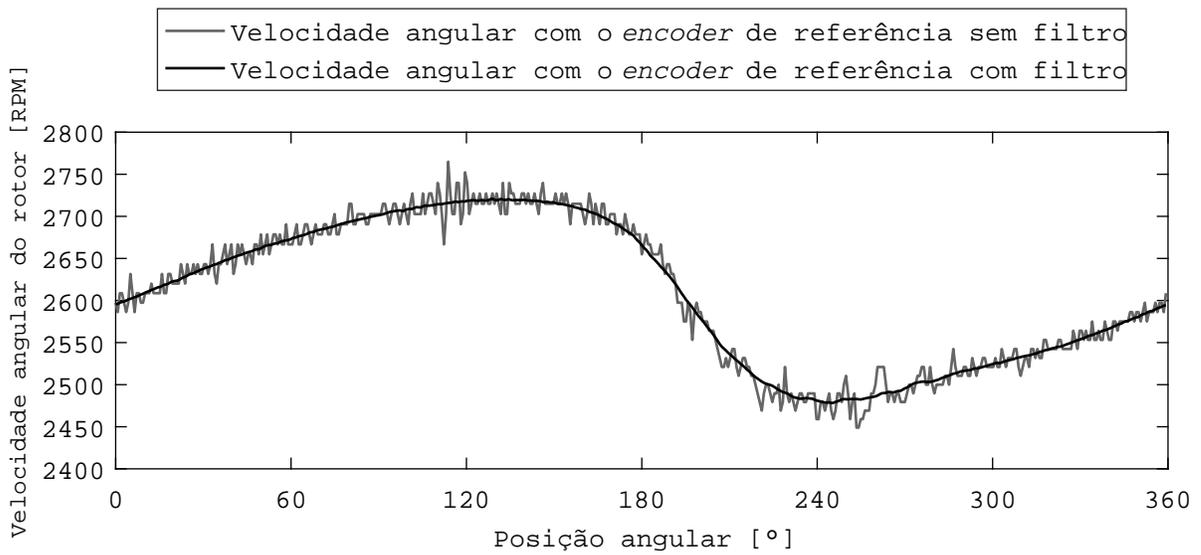
A Figura 47a ilustra bem o ganho adquirido com a utilização dos filtros nas respostas, tornando as curvas mais limpas e fluidas, possibilitando uma comparação visual mais confortável. Na Figura 47b é apresentada a curva de diferença entre as respostas, trazendo números quantitativos para a análise. Com o acréscimo do filtro, a diferença apresenta valores ainda melhores, o que já era esperado, permanecendo praticamente sempre com erros menores que 1% do valor de referência.

Figura 46 – Efeito do filtro em cada uma das respostas isoladamente

(a) Efeito do filtro na velocidade angular com o método indireto

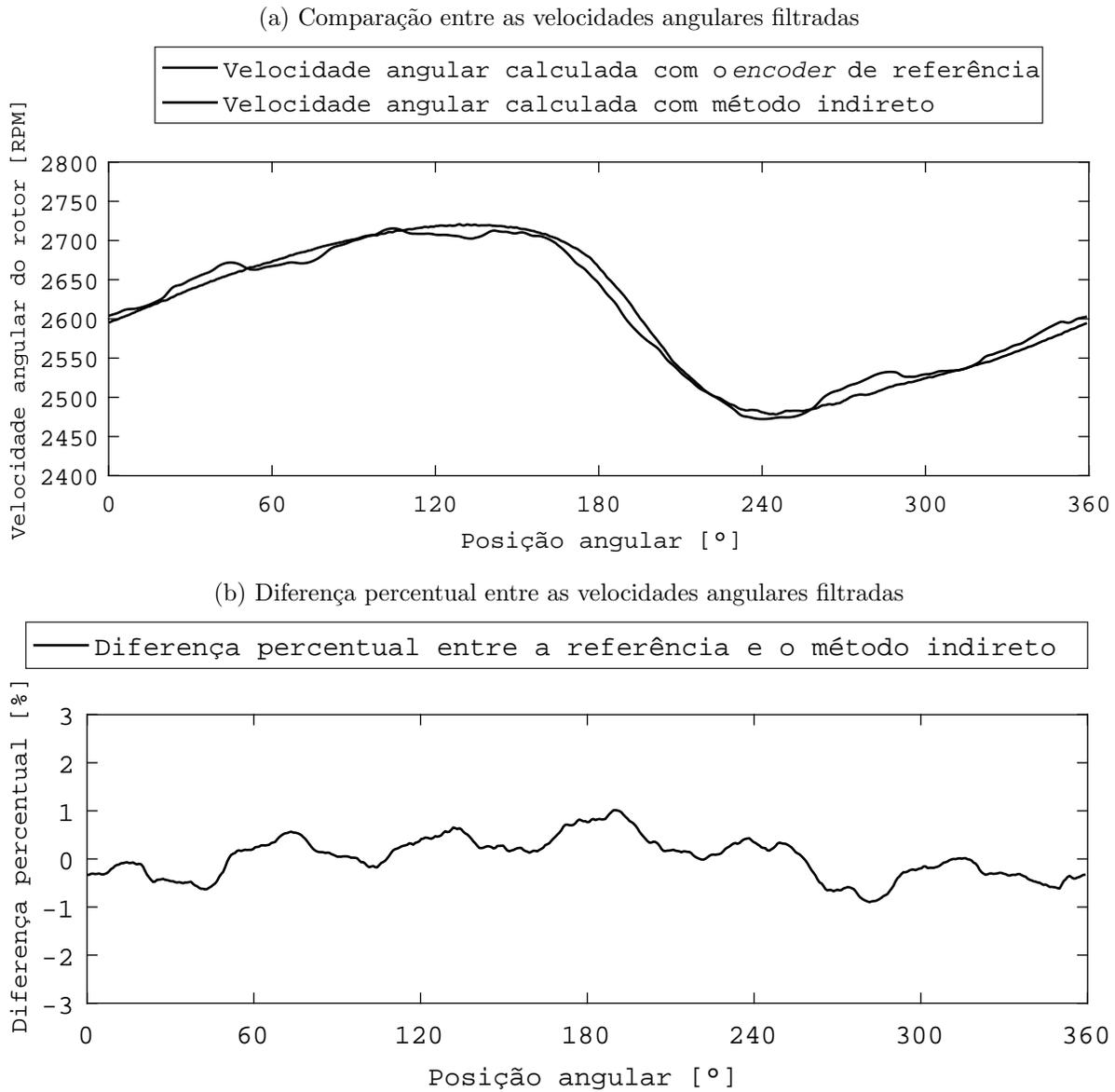


(b) Efeito do filtro na velocidade angular com o *encoder*



Fonte: Autor

Figura 47 – Velocidade angular dentro de uma volta do rotor calculadas a partir do *encoder* e do método indireto filtradas e a diferença entre elas



Fonte: Autor

Até este momento foram apresentadas análises sobre apenas uma das medições, de uma dada condição experimental. Sabe-se que é preciso mais que isso para viabilizar um estudo comparativo mais robusto, na busca de validar a hipótese de que foi desenvolvido um método indireto para calcular velocidade angular confiável. A próxima subseção irá acrescentar todas as medições feitas para a condição que foi analisada.

### 6.2.2 Comparação Entre os Resultados Para Todas as Medições de Uma Única Condição

Dada à condição experimental onde temos como parâmetros, velocidade angular média desejada de 2600 RPM, e pressão de descarga em 4 bar, foram realizados 21 medições consecutivas com o compressor estabilizado nessa condição. Utilizando-se de todas essas medições, pode-se determinar outras características metrológicas como curva média e o desvio padrão das medições.

Antes de começar as análises, é preciso ressaltar que optou-se por utilizar 2 desvio padrão e o motivo dessa escolha é priorizar uma melhor apresentação visual das imagens, visto que com apenas 1 desvio padrão as curvas ficavam muito próximas. O desvio padrão é um parâmetro que indica o grau de variação de um conjunto de elementos em relação a sua média esperada, em outras palavras, quanto menor esse parâmetro, menor a dispersão dos valores ao redor da média. A fórmula de desvio padrão utilizada no presente trabalho é expressa pela raiz quadrada positiva da variância,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2}, \quad (6.1)$$

onde:

$\sigma$ : Desvio padrão;

$\mu$ : Média dos valores  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$ ;

$N$ : Número total de valores;

$A_i$ : Valor corrente;

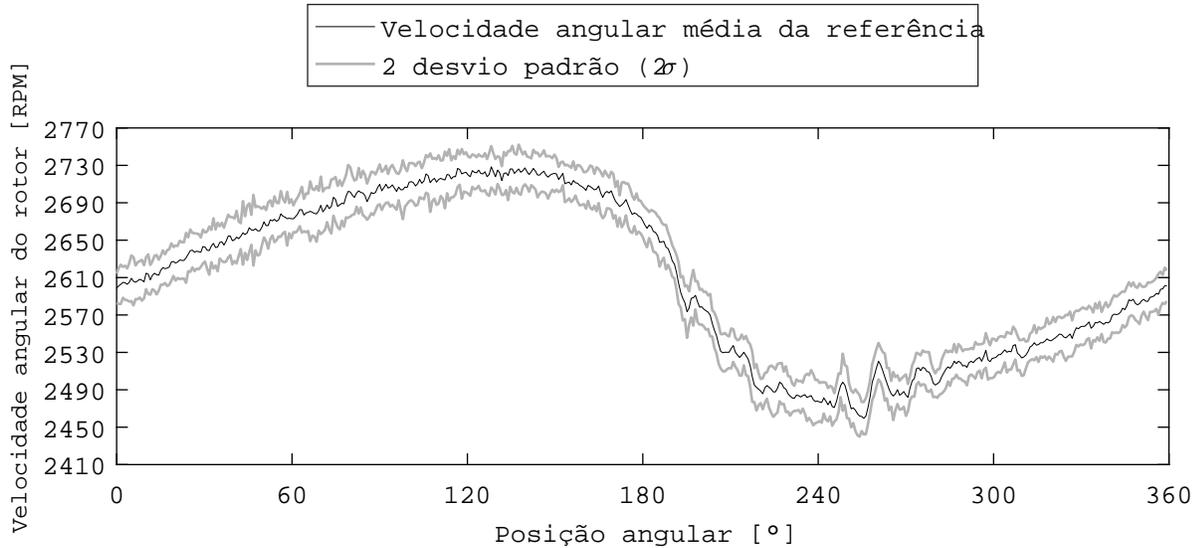
As figuras a seguir mostram a curva média de velocidade angular da referência e do método, sem os filtros na resposta, juntamente com  $2\sigma$ .

A primeira característica a ser citada é que ao realizar a média das velocidades de referência, observa-se que a curva resultante se tornou muito menos serrilhada em comparação a curva de uma única medição. Isto é facilmente explicado ao se lembrar que essa forma serrilhada presente nas medições individuais, é decorrente da contagem de pulsos do *encoder* e esta é aleatória. Com a média de  $N$  curvas, é esperado que ganhe uma forma mais contínua com um número suficientemente grande de  $N$ .

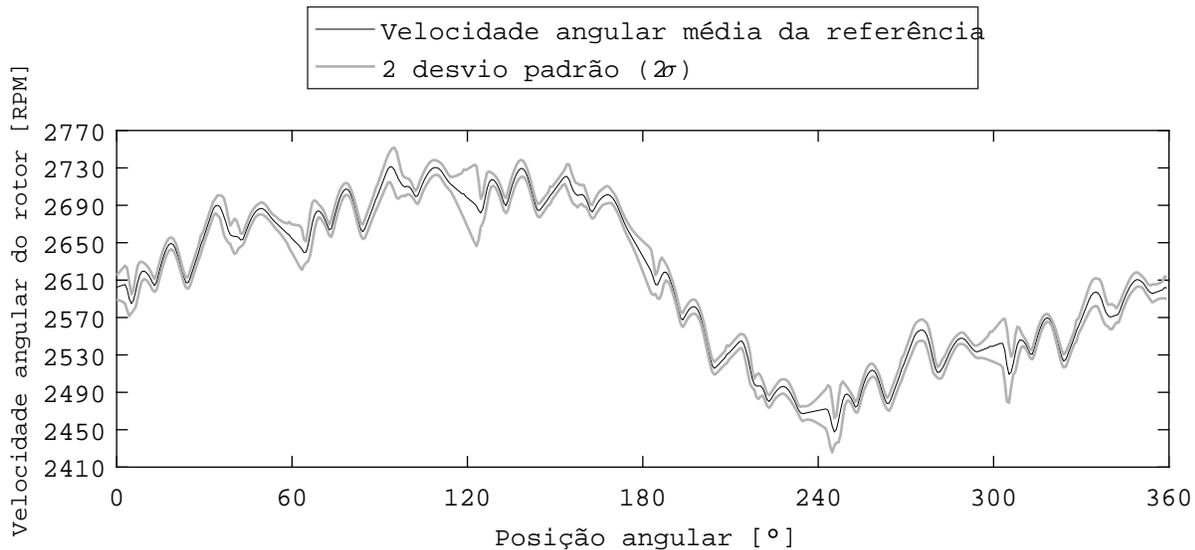
Ao analisar a média das velocidades com o método indireto, tira-se outra conclusão completamente diferente. Quando comparada a curva média com a curva individual, nota-se que os variados picos e vales que percorrem todo o sinal se mantém. Essa característica também pode ser explicada. Diferentemente do *encoder*, esse comportamento não é aleatório e tem relação direta com o chaveamento do inversor de frequência, e por isso, mesmo com a média das medições, a forma da curva não se altera significativamente.

Figura 48 – Curva média das 21 velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto com o envelope de 2 desvio padrão para mais e para menos

(a) Curva média das 21 velocidade angular calculadas com *encoder* e o envelope de 2 desvio padrão



(b) Curva média das 21 velocidades angulares calculadas com método e o envelope de 2 desvio padrão



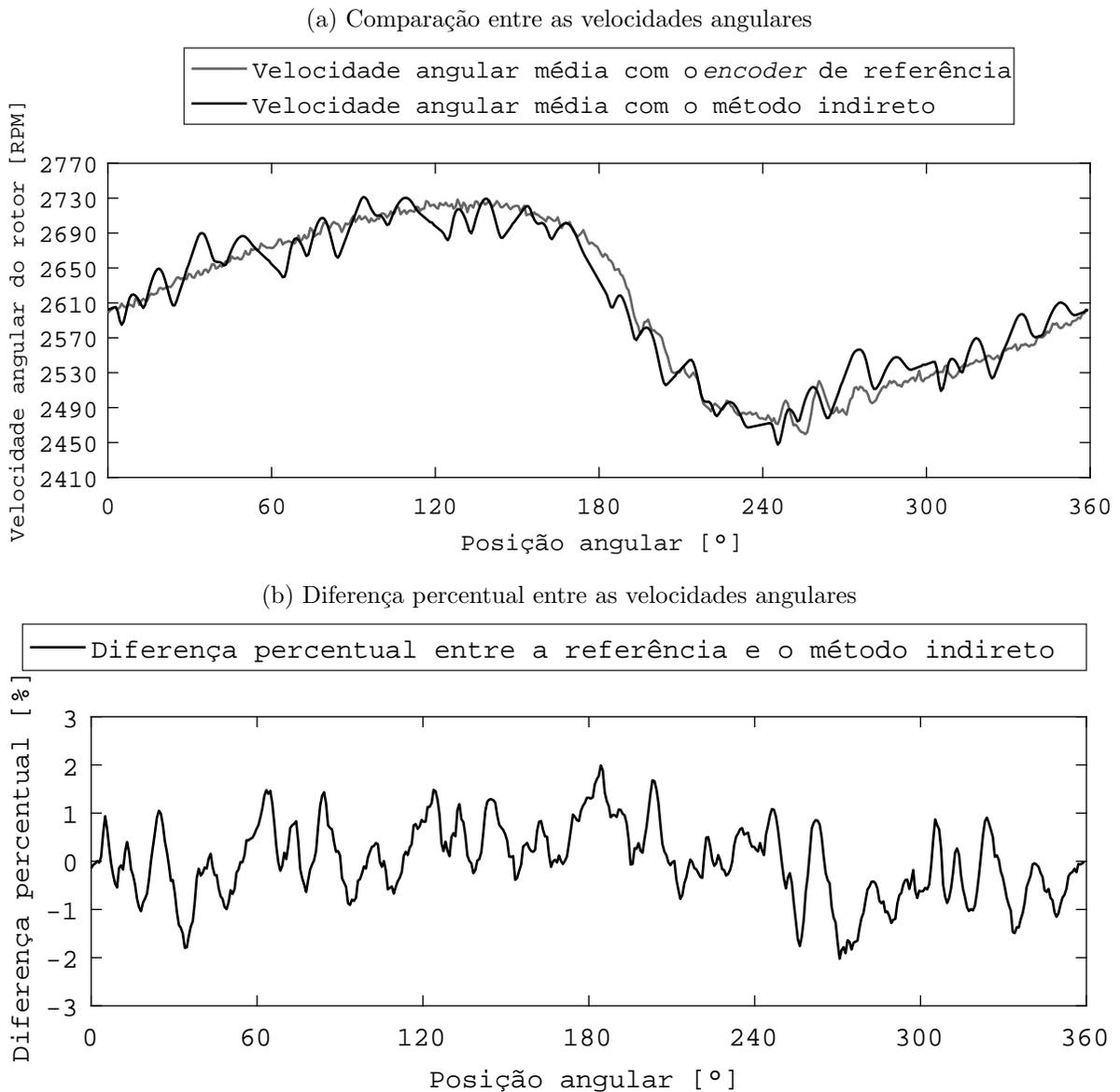
Fonte: Autor

Considerando agora os desvios padrão sobre as duas curvas, verifica-se que o envelope criado pelo método indireto é menor em comparação com o *encoder*, ou seja, existe maior precisão nas medições de velocidade angular com o método indireto. Essa conclusão é muito importante, pois demonstra a confiabilidade que há no método indireto em replicar as respostas, demonstrando não haver grandes erros aleatórios e permitindo de forma fácil a correção de erros sistemáticos quando e se houver. Para quantificar tal conclusão, tem-se que o desvio padrão médio da curva de referência é de 9,7911, enquanto que o desvio padrão

médio da curva do método indireto é de 5,2485.

Ainda fazendo uso das curvas médias de velocidade, a próxima figura apresenta a diferença entre ambas, assim como nas curvas de medição individual. A Figura 49 ilustra visualmente e quantitativamente que o método indireto continua apresentando resultados excelentes.

Figura 49 – Curva média das velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto e a diferença entre elas



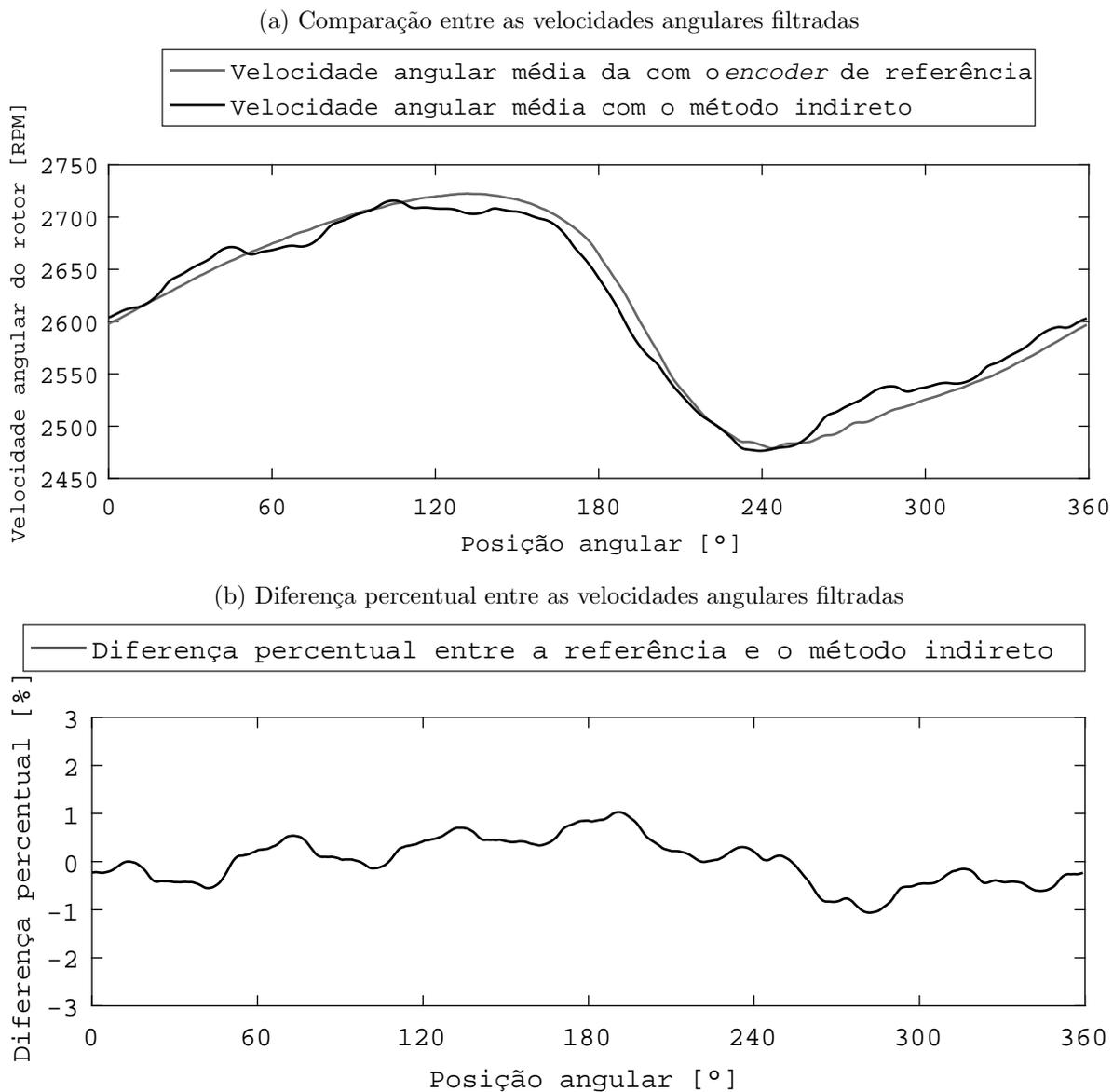
Fonte: Autor

Todas essas análises feitas a partir das múltiplas medições em uma mesma condição também podem ser feitas acrescentado o filtro nas respostas de velocidade. O papel do filtro ficará mais claro agora. A curva média comprova a interferência elétrica do inversor sobre os

sinais elétricos medidos, que por fim se mostram atuantes nos picos e vales que estão presentes sistematicamente no perfil de velocidade. Essa interferência que o filtro busca atenuar.

Como a explicação e as análises seriam idênticas, apenas trazendo novos valores as conclusões, será apenas apresentado diretamente a comparação entre as velocidades médias e a diferença percentual entre ambas, com a única distinção de que os resultados individuais para os dois métodos possuem acréscimo do mesmo filtro.

Figura 50 – Curva média das velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto filtradas e a diferença entre elas



Fonte: Autor

A Figura 50 mostra um cenário parecido com a Figura 47, porém agora os resultados não apresentam apenas uma medição isolada, e sim todas as medições disponíveis para a

condição de 2600 RPM e pressão de descarga de 4 bar. A semelhança entre as velocidades e os erros baixos comprovam que o método é suficientemente exato e preciso para essa condição experimental.

Fazendo um resumo do que foi apresentado de resultados, primeiro foi mostrado os resultados de uma única medição isolada, e a partir desta teceu-se algumas análises ainda muito básicas. Em seguida estendeu-se as análises para um conjunto de medições devidamente adquiridas e dentro de uma condições de contorno bem estabelecida, somando novas análises ao estudo. O passo seguinte é incorporar resultados de outras condições de experimento, e a partir de então poder ter uma análise capaz de cobrir satisfatoriamente todas as possibilidades apresentadas no início desse estudo. Vale relembrar o leitor que foram feitos experimentos em condições que retratam as condições usuais de funcionamento do compressor hermético.

No total foram 9 condições distintas, e uma análise detalhada tal qual a realizada até agora para cada uma das 8 restantes seria demasiadamente cansativa e muitas vezes repetitiva. Para poder apresentar as análises relevantes de forma mais compacta, optou-se por seguir duas linhas de análises: manter uma condição de pressão de descarga constante de 5 bar e caminhar pelas 4 velocidades angulares, 1600, 2200, 2600 e 3600 RPM; depois escolher uma velocidade constante de 1600 RPM e percorrer as 3 pressões de descarga experimentadas, 4, 5 e 6 bar. Com isso espera-se demonstrar o comportamento do método indireto em relação a variações nos dois parâmetros de controle utilizados, e por fim avaliar os resultados globais. A próxima subseção tratará do efeito da velocidade angular média.

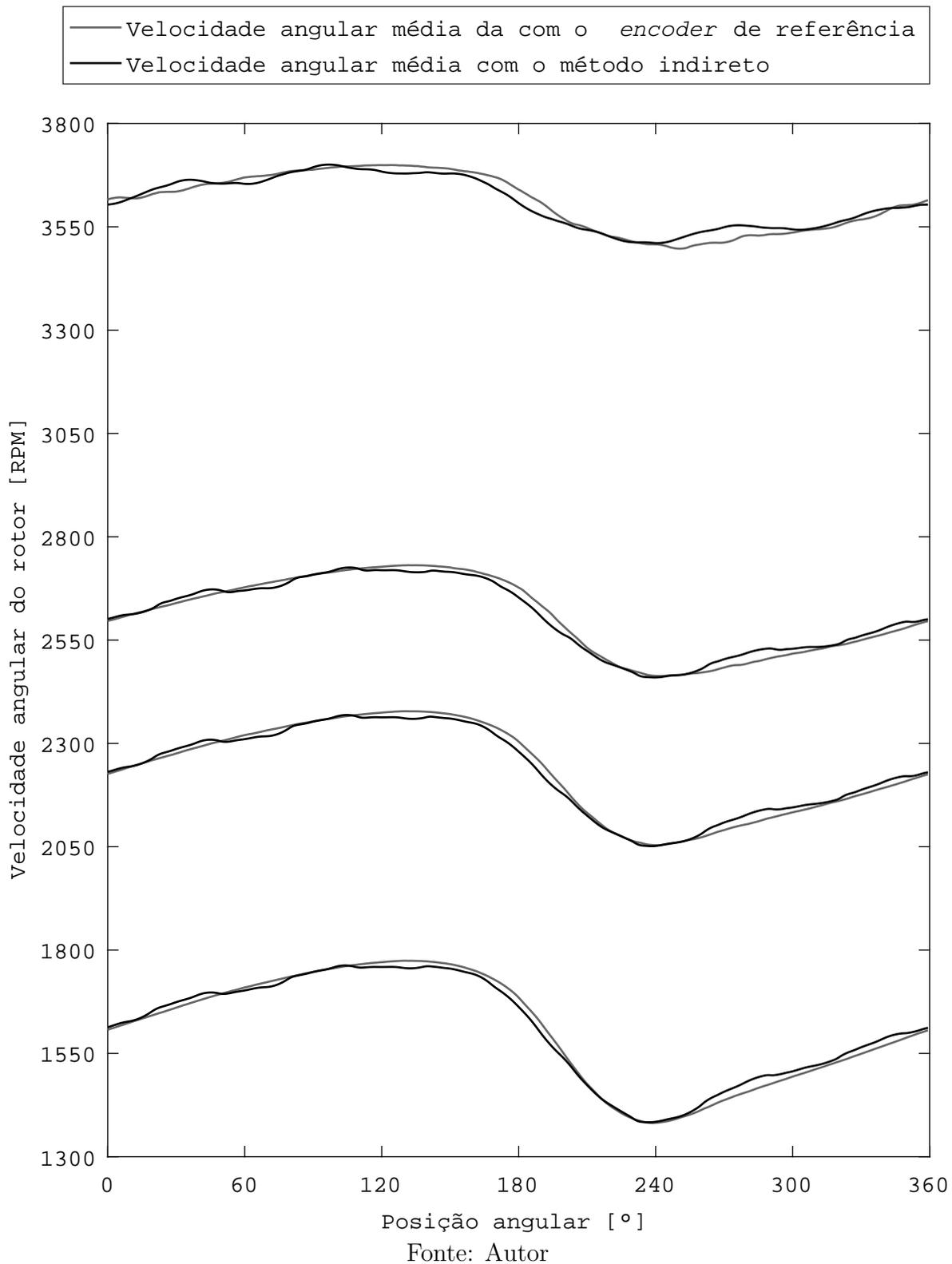
### 6.2.3 Comparação Entre os Resultados Para Diferentes Condições de Velocidade Angular Média

Dando prosseguimento as análises, o objetivo agora é avaliar o efeito da velocidade angular média. Reforçando o que já foi falado, a análise contará com todas as medições nas seguintes condições: 1600 RPM e 5 bar; 2200 RPM e 5 bar; 2600 RPM e 5 bar; 3600 RPM e 5 bar.

A apresentação dos resultados também será feita de forma mais compacta, mostrando diretamente os resultados considerados relevantes, assim sendo, todas as curvas de velocidade angular serão apresentadas com o uso do filtro nas respostas e também com a apresentação apenas da curva média para cada condição, tal qual é apresentado os dados da Figura 50.

Com essa abordagem se espera obter conclusões sobre a sensibilidade do método a velocidades angulares maiores e por consequente dinâmicas elétricas mais rápidas e agressivas, que causariam maiores interferências. Para que o leitor possa ter uma visão completa do efeito das diferentes velocidades, optou-se por mostrá-las todas juntas em um mesmo gráfico.

Figura 51 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do *encoder* e do método indireto, com pressão de descarga constante



A Figura 51 mostra de uma forma compacta o que acontece com a variação da

velocidade. Pode-se identificar que as velocidades médias e baixas (1600, 2200 e 2600 RPM) apresentam uma curva bem comportada e que é muito próxima a referência. Já a condição de maior velocidade (3600 RPM) apresentou uma resposta mais instável, mesmo com o filtro, e as oscilações sobre o sinal ficam mais evidentes. Todavia a curva de referência para esse valor de velocidade também apresenta maiores oscilações. Em regra geral, com o aumento da velocidade as respostas tendem a ficar menos bem comportadas.

Um parâmetro importante de ser apresentado é o valor médio de velocidade em cada uma dessas condições e para cada um dos métodos de cálculo, verificando assim se obteve-se a velocidade média esperada pelo acionamento.

Tabela 3 – Valor de velocidade médio calculado para diferentes condições de velocidades testadas

Pressão de descarga (bar)	Velocidade de acionamento (RPM)	Valor médio com o <i>encoder</i> (RPM)	Valor médio com o método indireto (RPM)
5	1600	1607	1608
5	2200	2234	2233
5	2600	2608	2607
5	3600	3609	3609

Fonte: Autor

Não há muito o que discutir sobre a Tabela 3, ela apenas confirma que os resultados estão compatíveis com as velocidades desejadas de acionamento.

Ainda na Figura 51 pode-se observar uma outra característica marcante da variação de velocidade, que é a variação da amplitude da curva de velocidade obtida. Essa relação é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a velocidade, menor a amplitude. Para dar números a esta observação basta pegar os valores de máximo e mínimo dos sinais e tem-se a amplitude total. Esse valor quanto relacionado com o valor médio da velocidade traz uma noção de quanto varia a velocidade angular em torno do valor médio esperado.

Os dados da Tabela 4 ratificam o que foi dito anteriormente e traz uma visão interessante desse comportamento. Em rotações baixas, a oscilação entre pico e vale do sinal chega a representar quase  $\frac{1}{4}$  do valor médio esperado. Essa oscilação tem sua explicação devido ao torque gerado pelas pressões dentro da câmara de compressão. A diminuição da amplitude entre os picos com o aumento da velocidade leva a supor que, com aumento da velocidade, menor é o impacto desse torque. Essa afirmação precisa ser cuidadosamente estudada, pois para esse caso específico, a pressão de descarga e de sucção permaneceram sempre as mesmas, 5 bar e pressão atmosférica respectivamente. Sendo assim, a força empregada no pistão devido a pressão dentro da câmara é a mesma em todas essas condições. A diminuição desse efeito se deve majoritariamente ao tempo de aplicação desse torque. Em baixas rotações, o

torque pode ser aplicado por mais tempo, gerando assim um efeito mais significativo.

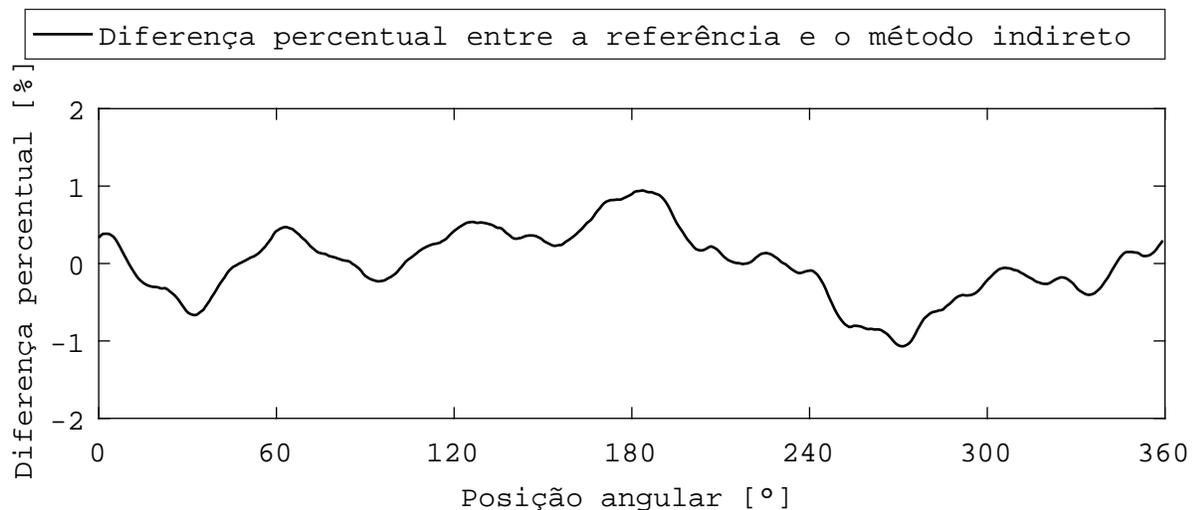
Tabela 4 – Amplitudes da curva de velocidade angular para diferentes condições de velocidades testadas

Pressão de descarga (bar)	Velocidade de acionamento (RPM)	Valor máx/mín/amp abs/amp rel com o <i>encoder</i>	Valor máx/mín/amp abs/amp rel com o método indireto
5	1600	1774,2 / 1381,4 / 392,8 / 24,5%	1762,7 / 1383,3 / 379,4 / 23,7%
5	2200	2377,8 / 2053,5 / 324,3 / 14,7%	2368,7 / 2051,3 / 317,4 / 14,4%
5	2600	2731,1 / 2462,8 / 268,3 / 10,3%	2725,6 / 2459,6 / 266,0 / 10,2%
5	3600	3699,4 / 3497,0 / 202,4 / 5,6%	3700,5 / 3510,6 / 189,9 / 5,2%

Fonte: Autor

É importante compreender e poder explicar o porque dessas oscilações, mas elas não são desejadas. O motor é especificado para entregar um torque médio, porém de acordo com as curvas, esse torque médio não é suficiente para manter uma rotação constante. Os momentos de aceleração de velocidade indicam que o motor está fornecendo mais torque que o necessário, e ao acontecer a desaceleração significa que o cilindro está aplicando um torque contrário maior do que o motor. Esse desbalanço pode não significar nada em termos de regime permanente e de dinâmicas de pressão do sistema, todavia abrem uma vasta possibilidade para estudos de acionamentos capazes de se adaptar a tais situações, com consequências em variáveis como rendimento, eficiência, sobrecarga de mancais, vibrações mecânicas e acústica, e principalmente leis de controles que, se for necessário, evitem ou compensem esses comportamentos.

Figura 52 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 3600 RPM



Fonte: Autor

Para concluir a análise dessa etapa, faltou ainda mostrar as diferenças entre as curvas de velocidade angular calculadas com o *encoder* e com o método indireto, tal qual feito em figuras anteriores.

Nas Figuras 52, 53, 54 e 55, fica claro que ao analisar a exatidão do método indireto para com a referência, os resultados são ótimos e satisfatórios. Com o aumento da velocidade angular houve também o aumento dos erros absolutos entre os métodos, mas em termos proporcionais, todos mostraram resultados sólidos e constantes.

Figura 53 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 2600 RPM

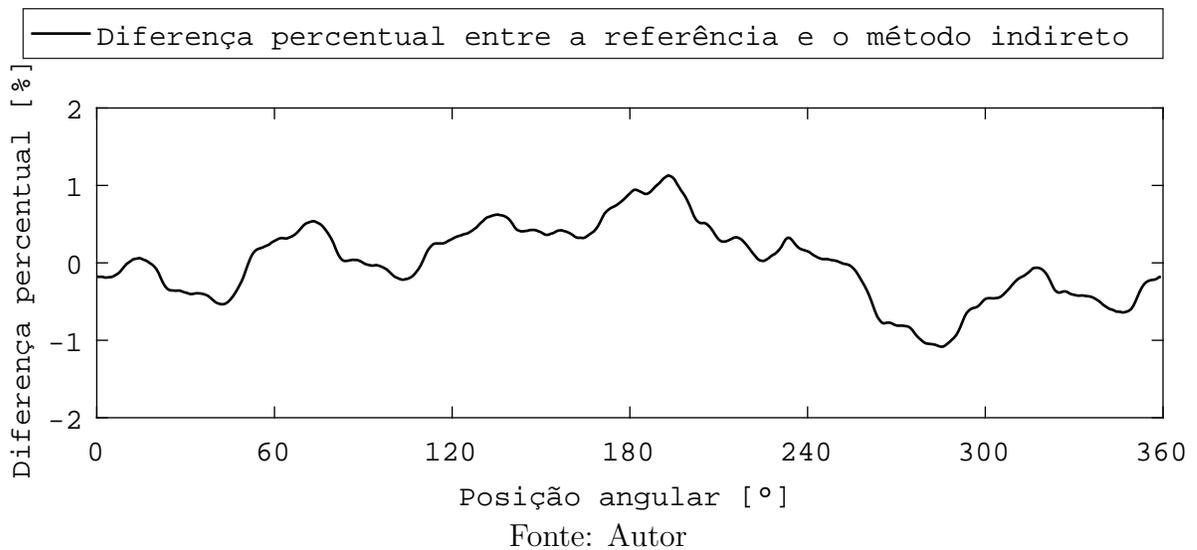


Figura 54 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 2200 RPM

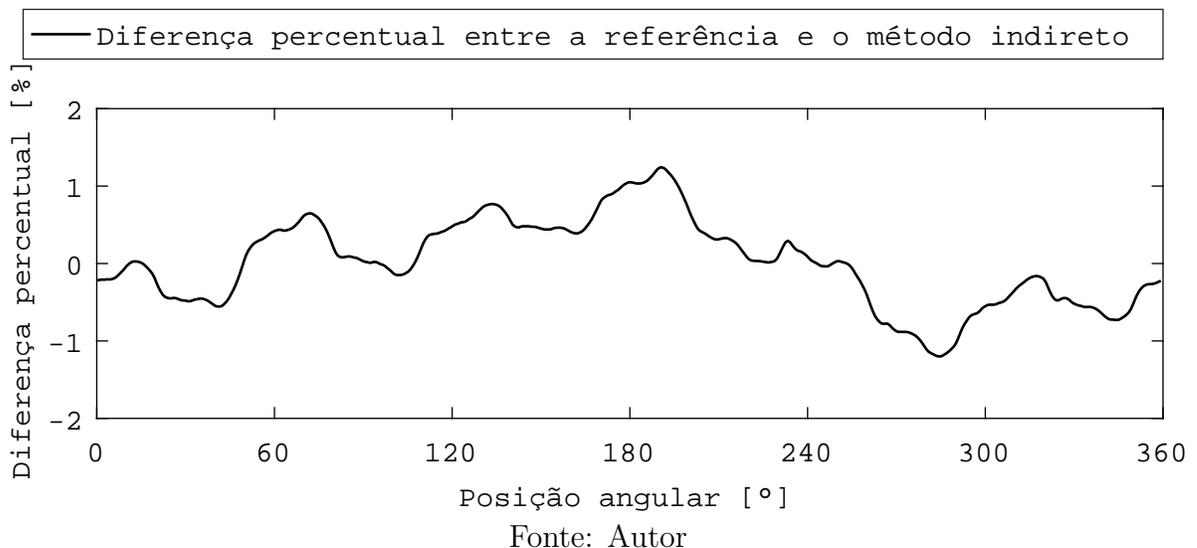
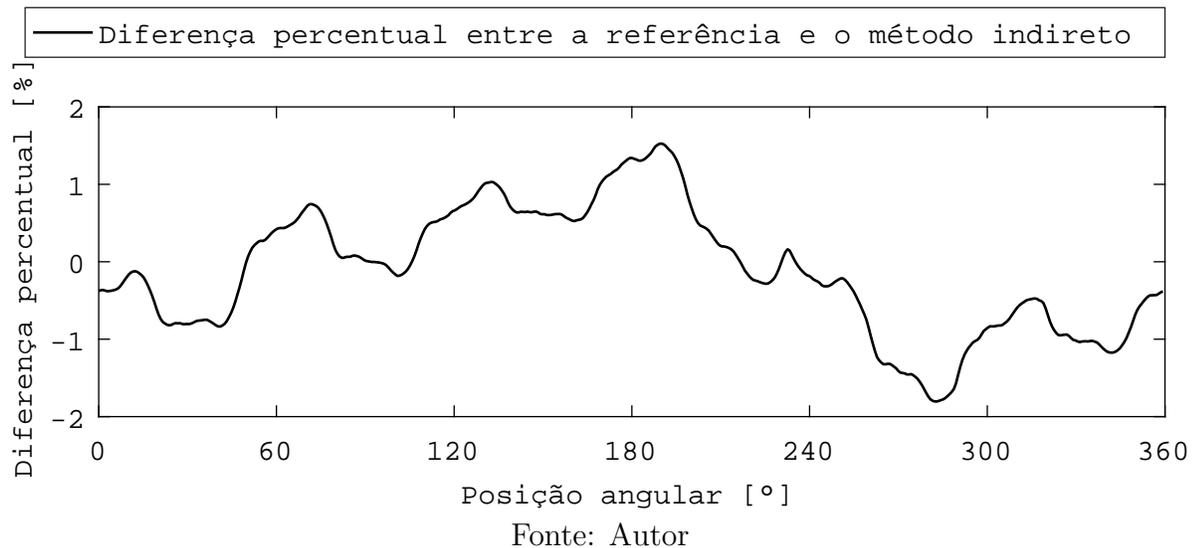


Figura 55 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 1600 RPM



Para prosseguir com os estudos, tem-se que a próxima situação que precisa ser estudada é a sensibilidade do método indireto às mudanças dos valores de pressão de descarga, e é esse o tópico abordado na próxima seção.

#### 6.2.4 Comparação Entre os Resultados Para Diferentes Condições de Pressão de Descarga

Para essa análise será determinado um valor fixo de velocidade angular média, 1600 RPM, e então ir alternando os valores de pressão de descarga entre 4 bar, 5 bar e 6 bar. O objetivo é entender se existe algum efeito da variação de pressão para o cálculo da velocidade angular com o método indireto.

Seguindo a mesma ordem de apresentação das informações feitas anteriormente, primeiro será apresentadas as figuras com as curvas de velocidades angulares média para cada condição e já filtradas. Em seguida uma tabela mostrando os valores médios de velocidade angular calculados, averiguando se existem discrepâncias entre o valor desejado e o medido. Depois será feita também uma análise quanto a amplitude das curvas, que espera-se relacionar com o variação de pressão. Por fim as figuras que mostram a diferença entre os resultados da referência e do método indireto.

As Figuras 56, 57 e 58 não trazem nenhum comportamento diferente do que foi mostrado até agora. Em termos de comparação entre as curvas, mostra-se que elas continuam sendo extremamente similares e que a pressão pouco interfere nesse quesito. A amplitude apresenta variação conforme o aumento de pressão, como era esperado e será novamente explicado mais a frente. Em termos de valor médio de velocidade, a tabela a seguir traz os números encontrados.

Figura 56 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do *encoder* e do método indireto para pressão de descarga de 4 bar

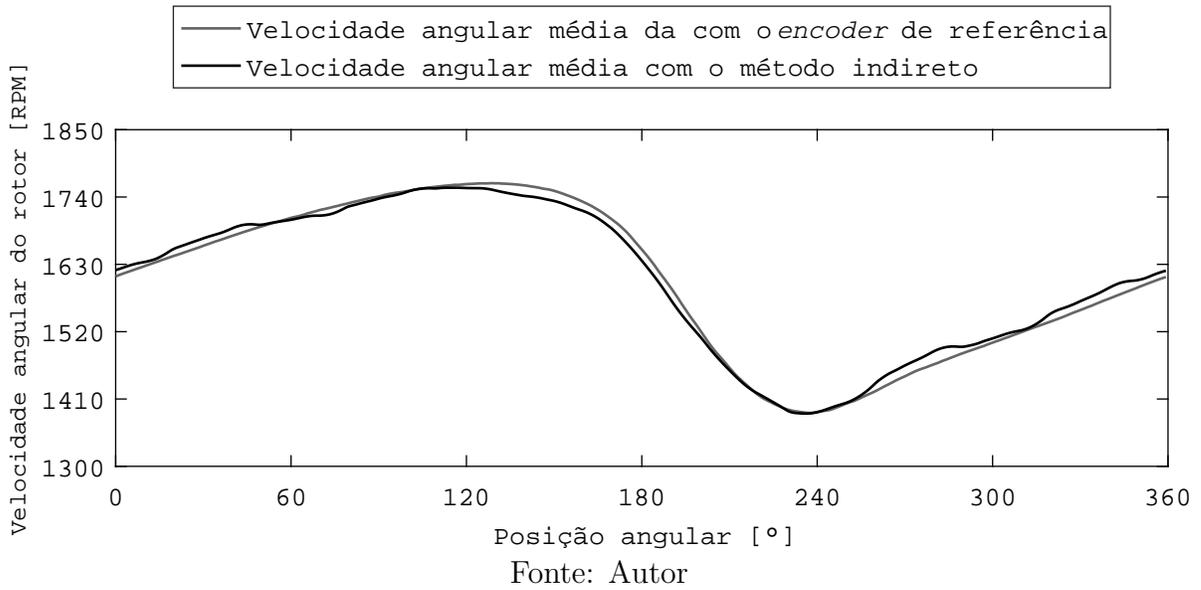


Figura 57 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do *encoder* e do método indireto para pressão de descarga de 5 bar

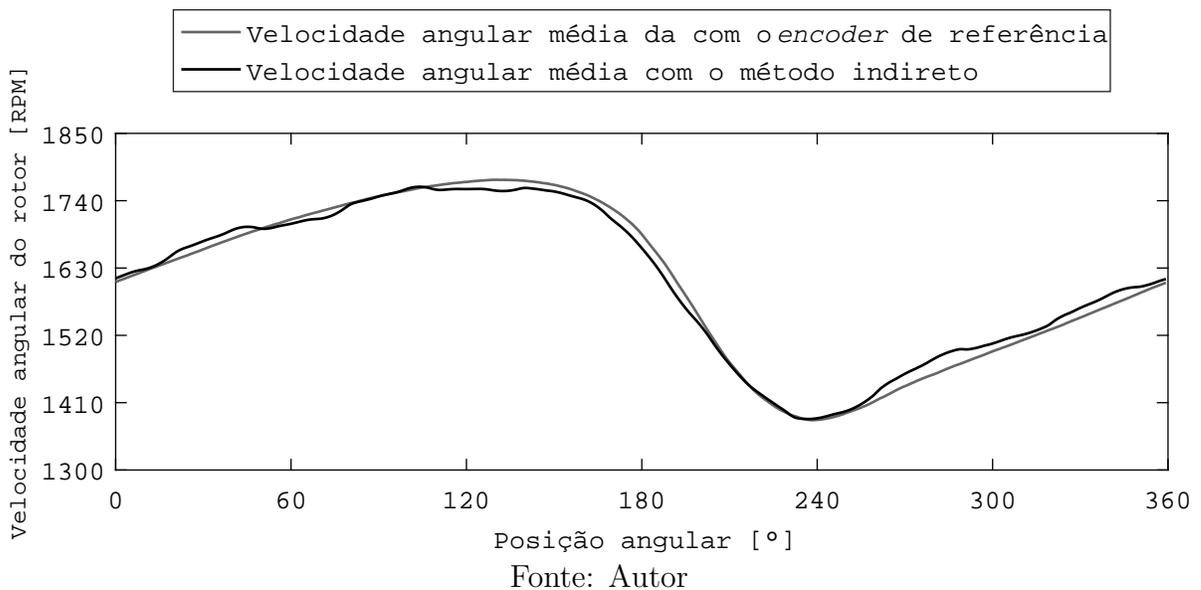
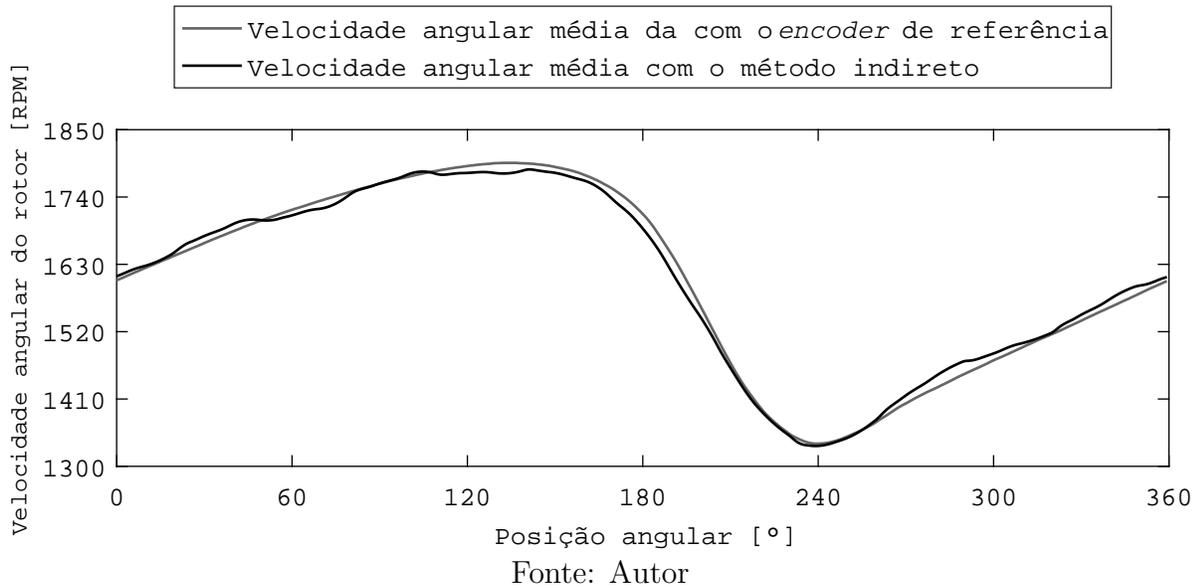


Figura 58 – Curva média das velocidades angulares filtradas calculadas a partir do *encoder* e do método indireto para pressão de descarga de 6 bar



A Tabela 5 apenas confirma as condições de testes esperadas. Os incrementos na pressão de descarga também causaram um aumento na amplitude da curva, assim como observado no caso de incremento de velocidade, contudo as razões para esse aumento são diferentes. Como agora a velocidade se mantém sempre a mesma de 1600 RPM, o tempo de aplicação do torque do cilindro sobre o eixo é igual para as três situações, porém existe uma mudança na pressão de descarga, e com isso existe torques diferentes aplicados pelo pistão em cada situação. Como era esperado, para pressões maiores, tem-se maior força e assim um torque maior, por isso a situação onde a pressão de descarga é maior, apresenta também a maior amplitude. Novamente é montado uma tabela com os números que fortalecem as explicações.

Tabela 5 – Valor de velocidade média calculado para diferentes condições de pressão de descarga testadas

Pressão de descarga (bar)	Velocidade de acionamento (RPM)	Valor médio com o <i>encoder</i> (RPM)	Valor médio com o método indireto (RPM)
4	1600	1603	1603
5	1600	1607	1608
6	1600	1604	1605

Fonte: Autor

Tabela 6 – Amplitudes da curva de velocidade angular para diferentes condições de pressão de descarga testadas

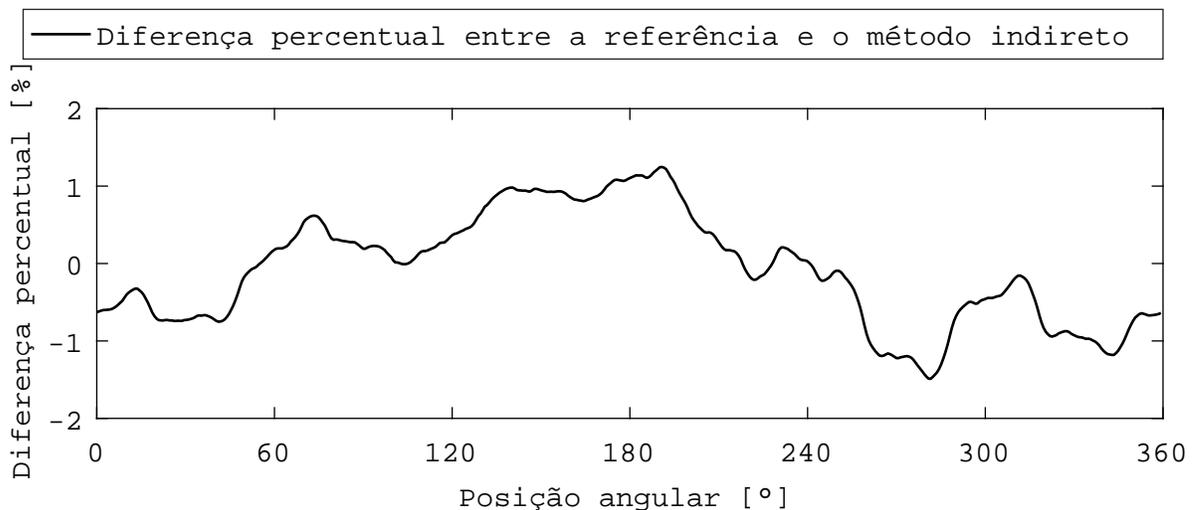
Pressão de descarga (bar)	Velocidade de acionamento (RPM)	Valor max/min/amp rel com o <i>encoder</i> abs/amp	Valor max/min/amp rel com o método indireto abs/amp
4	1600	1762,6 / 1387,2 / 375,4 / 23,4%	1755,2 / 1386,2 / 369,0 / 23,0%
5	1600	1774,2 / 1381,4 / 392,8 / 24,5%	1762,7 / 1383,3 / 379,4 / 23,7%
6	1600	1795,8 / 1336,9 / 458,9 / 28,6%	1785,0 / 1333,2 / 451,8 / 28,2%

Fonte: Autor

Os dados expostos na Tabela 6 corroboram com as explicações. A condição onde o efeito do torque do pistão deve ser o maior o maior possível é a condição de maior pressão de descarga, que acarreta numa maior força, e menor velocidade, aumentando a duração desse torque. De acordo com as condições de testes, essa situação seria rotação de 1600 RPM com pressão de descarga de 6 bar, que é justamente a última linha da tabela 6, e é realmente nessa condição onde se encontra a maior amplitude observada. Para essa condição extrema, a amplitude representa quase 30% do valor médio, e valem novamente todas aquelas considerações já feitas anteriormente acerca dos desdobramentos desse comportamento.

A informação que falta para completar as análises são as figuras que mostram as diferenças entre as curvas de velocidade. Elas são apresentadas a seguir.

Figura 59 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 4 bar



Fonte: Autor

Figura 60 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 5 bar

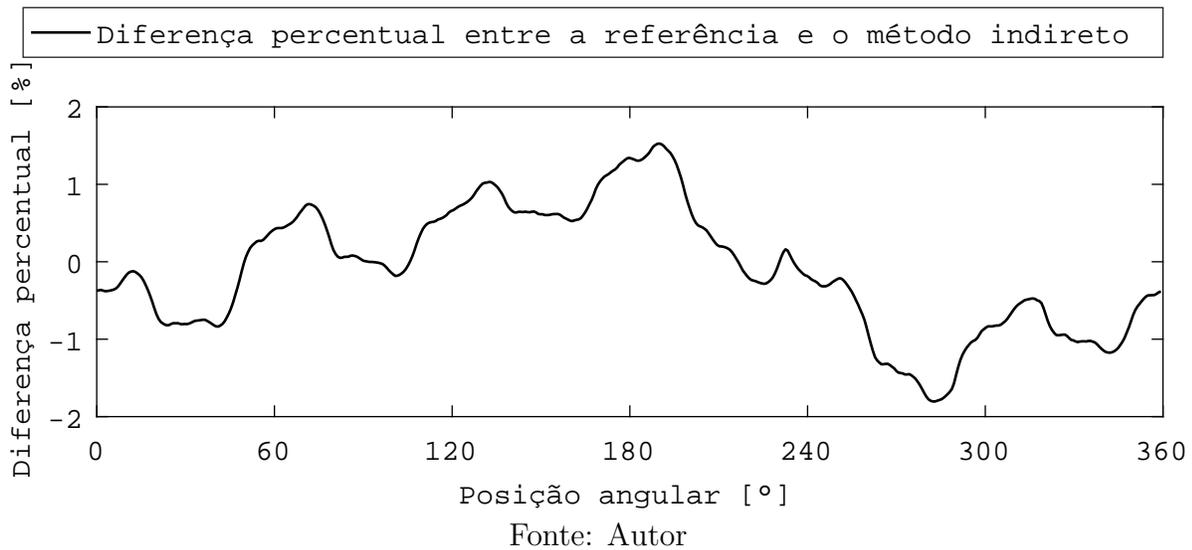
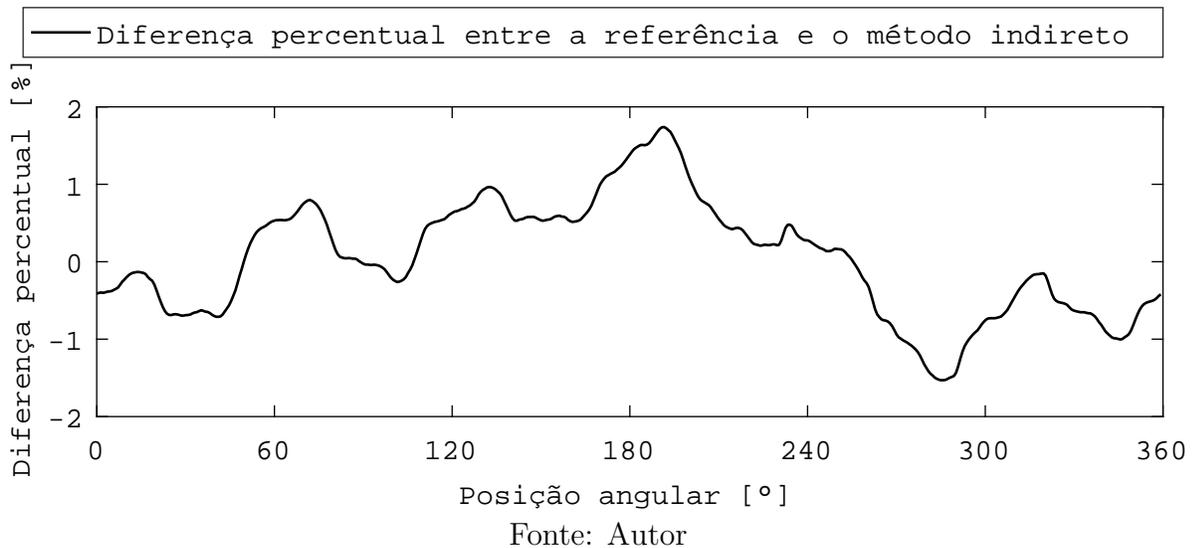


Figura 61 – Diferença percentual entre as velocidades angulares filtradas para 6 bar



Com as Figuras 59, 60 e 61 encerra-se as análises comparativas entre o método indireto e o método com o *encoder*. Porém antes de elaborar uma conclusão global sobre a validação do método indireto, propõe-se uma última seção para verificar a se existe a real necessidade de uma frequência de aquisição tão elevada, 2,5 MHz, e quais as vantagens e desvantagens dessa escolha.

## 6.3 Análise da Frequência de Aquisição Mínima Necessária Para o Funcionamento do Método da Integral do Patamar

A escolha adequada da frequência de aquisição é essencial para uma amostragem correta do sinal medido. Usualmente se define qual a maior frequência presente no sinal medido, e a partir desta se escolhe um frequência de aquisição compatível. Na prática o critério mais utilizado é o teorema de Nyquist,

$$f_a \geq 2f_s, \quad (6.2)$$

onde:

$f_a$ : Frequência de aquisição;

$f_s$ : Frequência do sinal.

Segundo esse critério apresentado pela equação 6.2, a frequência mínima de aquisição necessária para uma reconstrução segura do sinal medido tem que ser 2 vezes a maior componente de frequência do sinal de interesse. Quando não respeitada essa relação, escolhendo-se uma frequência menor que a mínima, tem se normalmente o aparecimento do efeito chamado de *aliasing*. Seria natural que o leitor acreditasse que o ideal seria sempre utilizar a maior frequência de aquisição possível, porém esse também pode ser um erro. Uma frequência de aquisição muitas vezes maior que a frequência mínima necessária pode trazer problemas como a aquisição e amplificação de ruídos de medição, o que normalmente não torna o sinal imprestável, mas acarreta a necessidade de tratamentos com filtros passa baixa.

Além das questões relativas ao domínio da frequência na escolha da taxa de aquisição, tem também os desdobramento no nível da resolução desejada para os pontos adquiridos e a resolução temporal entre cada amostra. A resolução dos pontos adquiridos tem total dependência do número de bits do sistema de aquisição, quanto maior o número, maior a resolução. Um exemplo, um sistema de aquisição de 3 bits é capaz de representar até  $2^3$  valores distintos, se o intervalo de medição é de 0 a 5 V, isso quer dizer que a saída do sistema de aquisição irá entregar os valores 0, 0,714, 1,428, 2,142, 2,857, 3,571, 4,285 e 5. A resolução, portanto, é de 0.714 V para esse exemplo, e ela pode ser generalizada de acordo com a fórmula a seguir,

$$k = \frac{A}{2^{nb} - 1}, \quad (6.3)$$

onde:

$k$ : Resolução;

$A$ : Faixa de medição;

$nb$ : Número de bits.

A equação 6.3 mostra como calcular a resolução em termos dos valores medidos, e

é diretamente ligada ao número de bits. É possível também pensar em termos de resolução temporal, ou seja, qual o intervalo de tempo entre cada amostra medida, e esse valor não depende do número de bits e sim da frequência de aquisição, quanto maior, menor o intervalo entre amostras. Contudo existe um dilema entre essas duas resoluções, não se pode ter o máximo das duas facilmente. Por questões tecnológicas e construtivas, é extremamente custoso um sistema de resolução com alto número de bits e alta frequência de aquisição. Existem por exemplo dispositivos que tem a chamada aquisição simultânea, e podem ser utilizados na função *High Resolution*, onde apresentam um alto número de bits porém a frequência de aquisição é menor. Ou na função *High Speed*, aonde tem-se uma alta frequência de aquisição porém o número de bits é reduzido.

Para os estudos do presente trabalho é muito importante uma característica específica, que é a resolução temporal. Ela é fundamental para o funcionamento do método indireto de estimação de velocidade angular, pois o método se baseia em determinar posições específicas e contar amostras para determinar intervalos de tempo. Erros de 1 amostras quando a frequência de amostragem é alta, exemplo 5 MHz, representam um erro temporal de  $2 \times 10^{-7}$  sec, porém com uma frequência de aquisição de 10 kHz o erro temporal é de  $1 \times 10^{-4}$  sec. Essa diferença pode fazer com que o método perca a exatidão demonstrada até o momento.

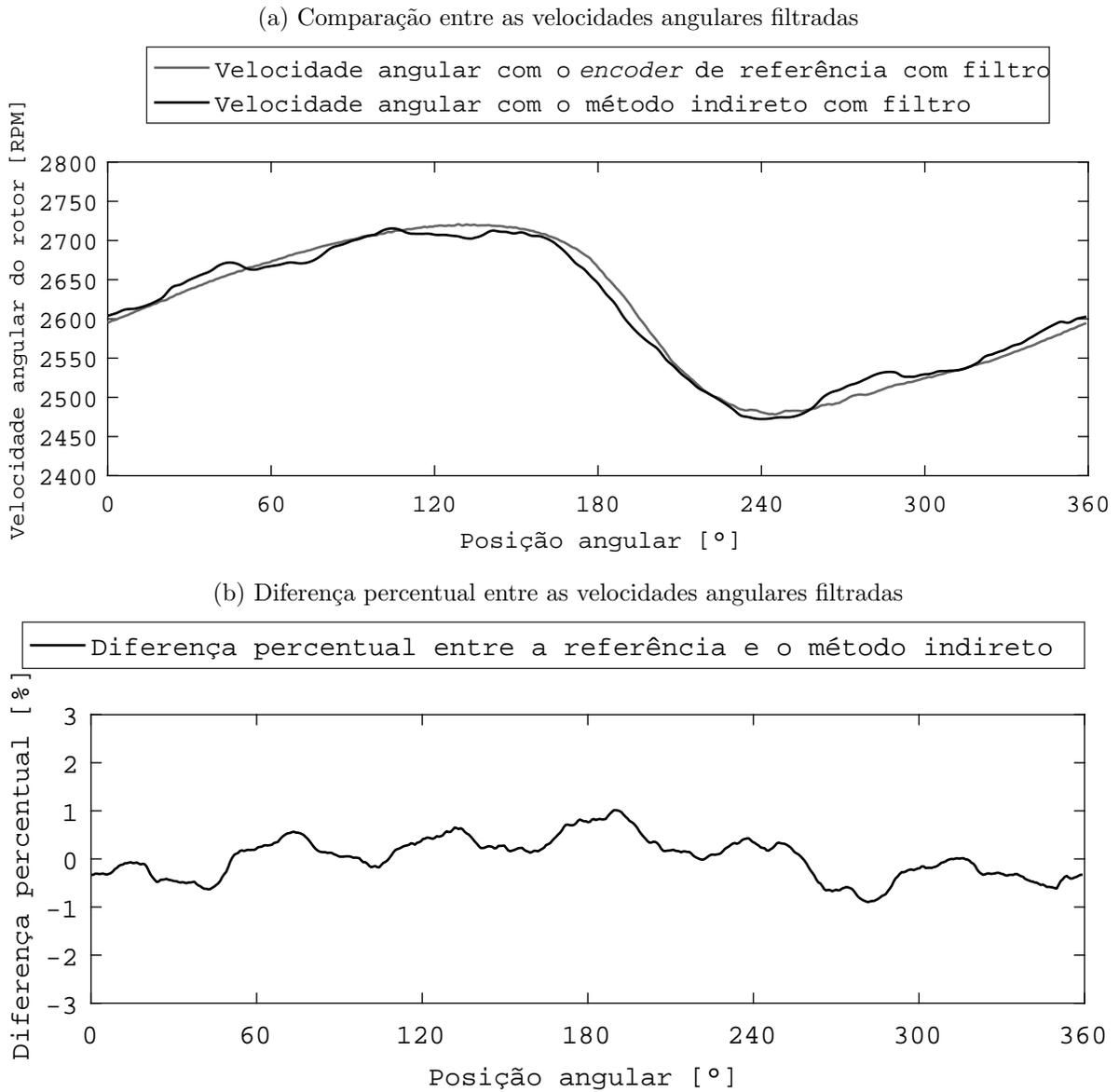
Para estudar o efeito do decréscimo da frequência de aquisição, será realizado uma reamostragem digital sobre os dados originais, com o intuito de encontrar um valor de frequência que torne os resultados inapropriados.

Foram realizados 4 reamostragens, sempre com a metade do valor anterior, ou seja, partindo dos 2.5 MHz originais, obteve-se uma primeira reamostragem de 1.25 MHz, depois 625 kHz, 312.5 kHz e por fim 156.25 kHz. As figuras 62, 63, 64 e 65 mostram os resultados obtidos.

A intenção de analisar o efeito de escolher uma frequência de aquisição menor é baratear e facilitar uma possível implementação do método indireto em produtos comerciais. Numa primeira etapa o método indireto deve ser implementado em laboratórios na própria empresa parceira, e perto da linha de produção. Nesse cenário ainda se tem uma certa flexibilidade quanto aos equipamentos. Porém se a intenção futuramente for de embarcar essa tecnologia no produto final, a facilidade da sua implementação e o baixo custo adicionados serão características indispensáveis.

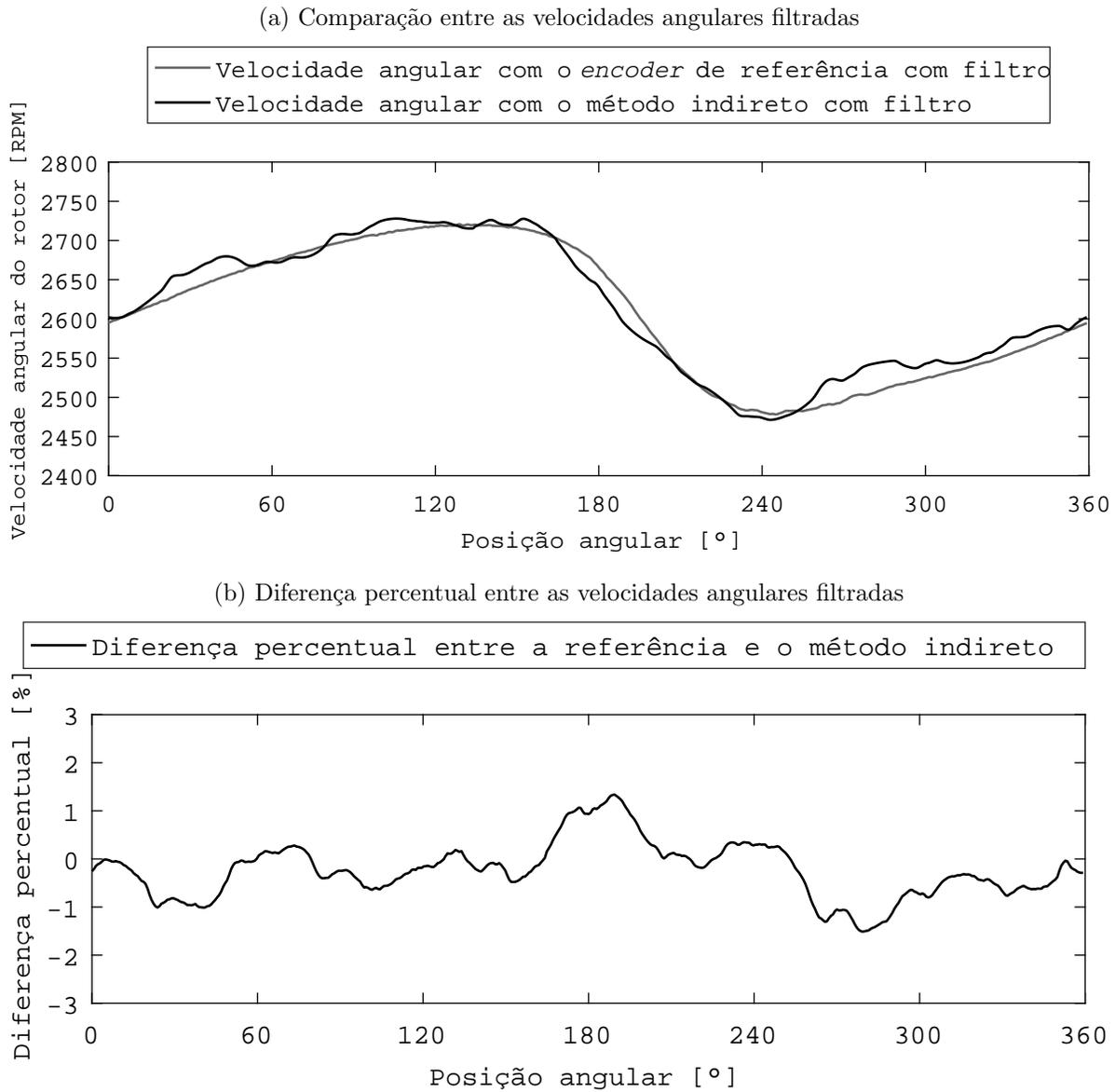
Para essa análise o sinal do *encoder* que serve como referência não foi reamostrado, possibilitando assim analisar o efeito apenas no sinal de interesse.

Figura 62 – Velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto com reamostragem digital para 1.25 MHz e filtro, e a diferença entre elas



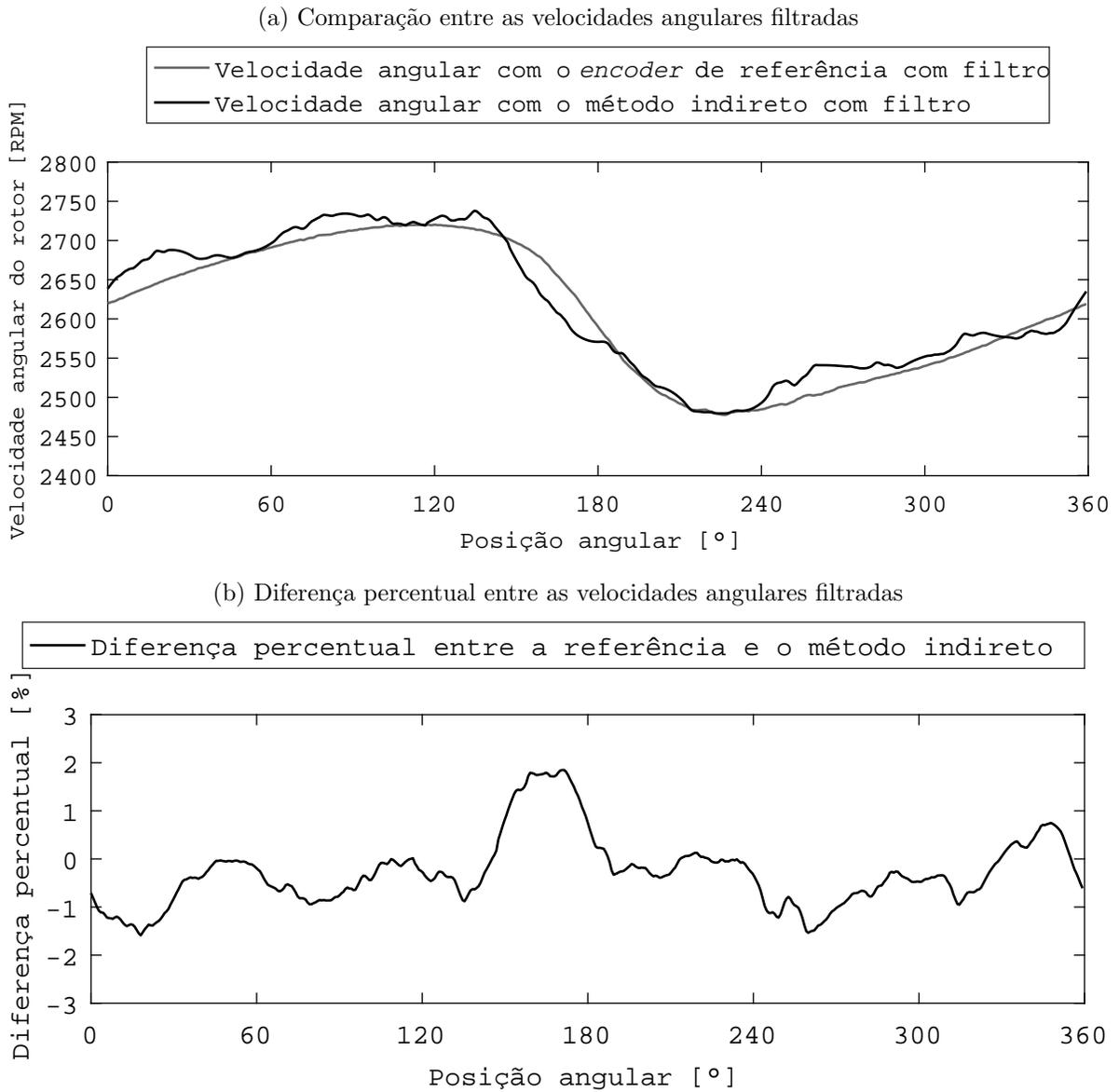
Fonte: Autor

Figura 63 – Velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto com reamostragem digital para 625 kHz e filtro, e a diferença entre elas



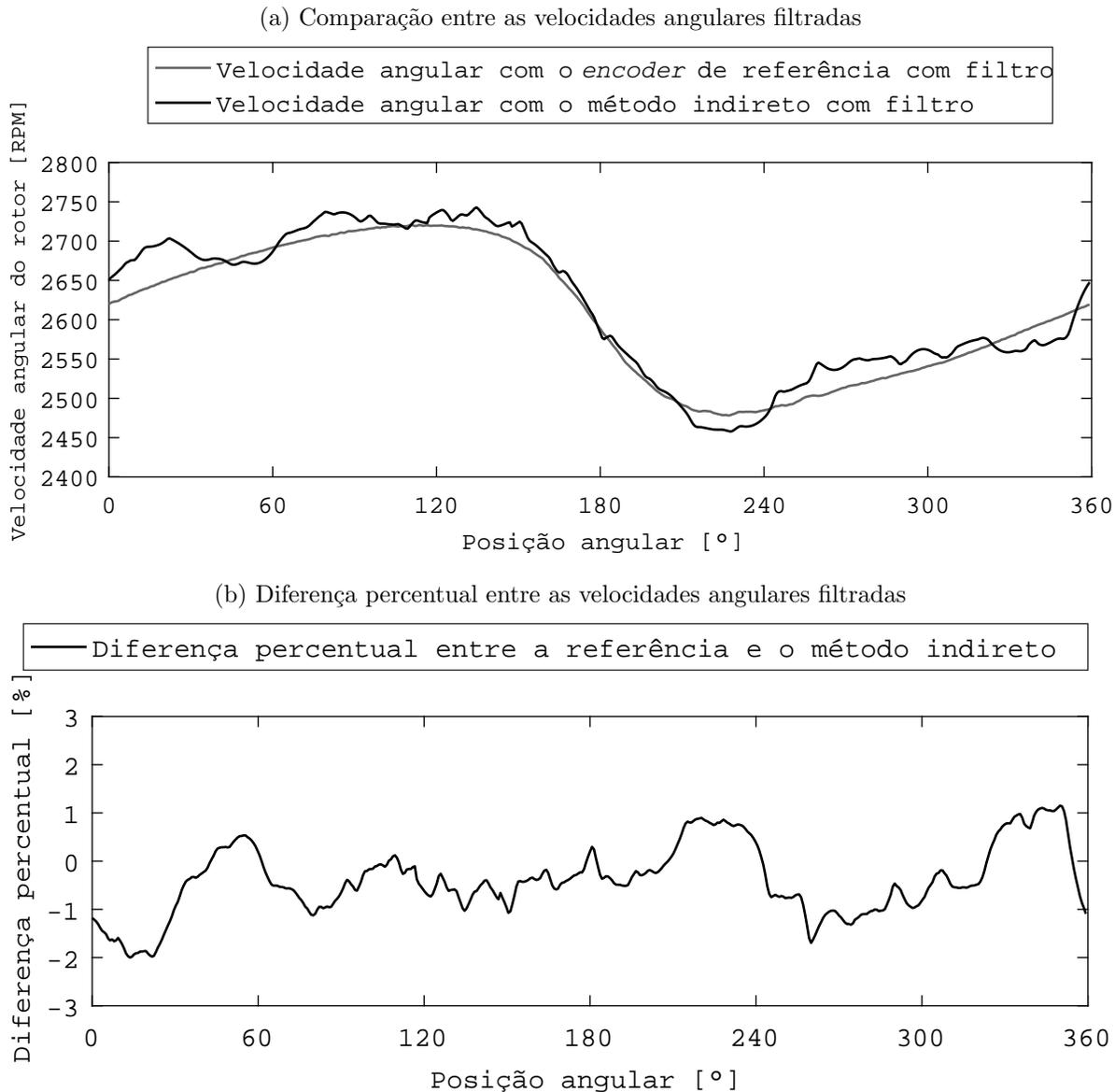
Fonte: Autor

Figura 64 – Velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto com reamostragem digital para 312.5 kHz e filtro, e a diferença entre elas



Fonte: Autor

Figura 65 – Velocidades angulares calculadas a partir do *encoder* e do método indireto com reamostragem digital para 156.25 kHz e filtro, e a diferença entre elas



Fonte: Autor

As figuras mostram claramente que a diminuição da frequência de aquisição não invalida a estimação da velocidade. As diferenças relativas ainda são consideradas baixas, mas o valor de erro médio quadrático aumenta. Além disso o perfil obtido começa a ficar cada vez mais descaracterizado e isso também pode ser um problema caso seja interessante retirar da curva valores estratégicos como máximos e mínimos.

Em resumo, a medida que se diminui a frequência de aquisição, os resultados vão se tornando piores, todavia não se tornam completamente descartáveis. É necessário analisar requisitos, objetivos e orçamentos para optar pela solução que melhor se adequar.

Feito isso, termina-se as análises que foram propostas para a validação ou não do método. É fato que ainda existe uma grande área para ser explorada principalmente no campo da metrologia, porém em virtude dos *dead lines* do projeto principal, e da falta de maiores informações sobre todas os componentes utilizados nos experimentos, esses aprofundamentos não foram realizados.

## 6.4 Considerações Finais

Esse capítulo apresentou todos os estudos comparativos realizados entre o método do *encoder* e o método da integral do patarmar da *Back EMF* para calcular a velocidade angular. Também foi feito um estudo individual quanto a frequência de aquisição mínima necessária para o funcionamento do método indireto.

No próximo capítulo será feito um breve resumo, retomando o que foi apresentado no presente trabalho e concluindo a validação do método indireto de estimação de velocidade angular.



## 7 Análise da Viabilidade do Método Indireto

Este último capítulo irá retomar os principais pontos discutidos ao longo do trabalho. Será feito um breve resumo sobre os objetivos, desafios e resultados apresentados até o dado momento. Com isso o leitor poderá retomar alguns pontos importantes, corroborando para fechamento do trabalho como um todo. Em seguida será apresentados as conclusões sobre viabilidade do método indireto desenvolvido para estimação da velocidade angular, e os resultados finais.

### 7.1 Validação do Método Indireto para Estimação da Velocidade Angular

O presente trabalho tinha com objetivo comparar experimentalmente duas possibilidades de medir ou estimar a velocidade angular instantânea de um motor *BLDC*. A primeira possibilidade é utilizar um transdutor mecânico e largamente estudado e conhecido, um *encoder* incremental. A segunda possibilidade é um método indireto, sem adição de transdutores ao sistema, o qual faz apenas a leitura de tensões e correntes de alimentação. Esse método indireto recebeu o nome de Estimação da Velocidade Angular pela Integral do Patamar da *Back EMF*.

Se buscou estudar a viabilidade de utilizar o método indireto como uma forma confiável de obter a velocidade angular. Dessa forma, foram realizados inúmeros experimentos afim de comparar as respostas obtidas pelas duas possibilidade de medição. Para realizar as comparações, se convencionou que o *encoder* faria o papel de valor de referência a ser seguido. Essa hipótese é válida para o contexto deste trabalho pois tal forma de medir velocidade rotacional é largamente utilizada em todas as áreas, e é conhecidamente bem representativa. Como o método indireto não faz uso de nenhum transdutor mecânico, o *encoder* foi considerado um método direto para estimação de velocidade angular.

Para dar prosseguimento ao trabalho, foi necessário realizar experimentos com um compressor hermético funcional. Esses experimentos tinham o objetivo de impor ao compressor condições de trabalho similares as reais em um sistema de refrigeração.

Após a realização dos experimentos, obteve-se dados suficientes para começar o estudo comparativo entre os resultados e validar a estimação da velocidade angular usando o método indireto.

Entendesse por validação a tarefa de fazer um diagnóstico sobre a capacidade do método em apresentar resultados coerentes, atender a uma boa faixa de utilização, e apre-

sentar algumas características metrológicas interessantes. Não é a intenção aqui fazer o papel de emitir um certificado metrológico acerca dos resultados, pois não se dispunha nem das ferramentas necessária e nem do conhecimento para tal. As principais respostas a serem respondidas são: o uso do método indireto para estimar a velocidade angular é capaz de fornecer resultados úteis? A implementação de tal estratégia é de fácil replicação? As possibilidades de uso para o método indireto viabilizam o prosseguimento dos estudos sobre o mesmo?

Ao fim do trabalho, e avaliando todos os resultados apresentados, concluí-se com satisfação de que o método indireto está sim validado, e que responde positivamente as três perguntas levantadas anteriormente.

No que diz respeito aos resultados de velocidade angular estimados, ficou claro que o método indireto é sim uma possibilidade factível de se obter valores de velocidade angular, e que a comparação frente a valores de referência provaram a acurácia do método. É claro que metrologicamente ainda podem ser feitos inúmeros avanços, apesar que, este trabalho se preocupou em realizar uma análise de incerteza mesmo que simplória, mas que colabora para fortalecer a validade das conclusões.

Outra característica importante do método indireto é a sua implementação, ela é feita de forma não invasiva e utilizando-se de transdutores que já fazem parte do sistema de acionamento. Quanto se preza pela diminuição dos custos e utilização máxima dos recursos disponíveis, entende-se a vantagem dessa aplicação. A análise feita sobre a diminuição da frequência de amostragem foi importante para demonstrar que o circuito de aquisição pode trabalhar com frequências menores, sendo capaz de talvez compartilhar o mesmo processamento já presente nos circuitos eletrônicos do inversor de frequência.

Contabilizando tudo o que foi discutido, os usos vislumbrados com a implementação do método indireto viabilizam estudos mais detalhados e novos testes, para aos poucos, fazer a transição entre laboratório e pesquisa, para indústria e produto comercial. O primeiro passo já foi realizado, que foi a elaboração de um produto para testes na empresa parceira. Esse produto é o método da Integral do Patamar da *Back EMF* implementado em *LabView*, e este já está sendo utilizado nos laboratórios da empresa parceira.

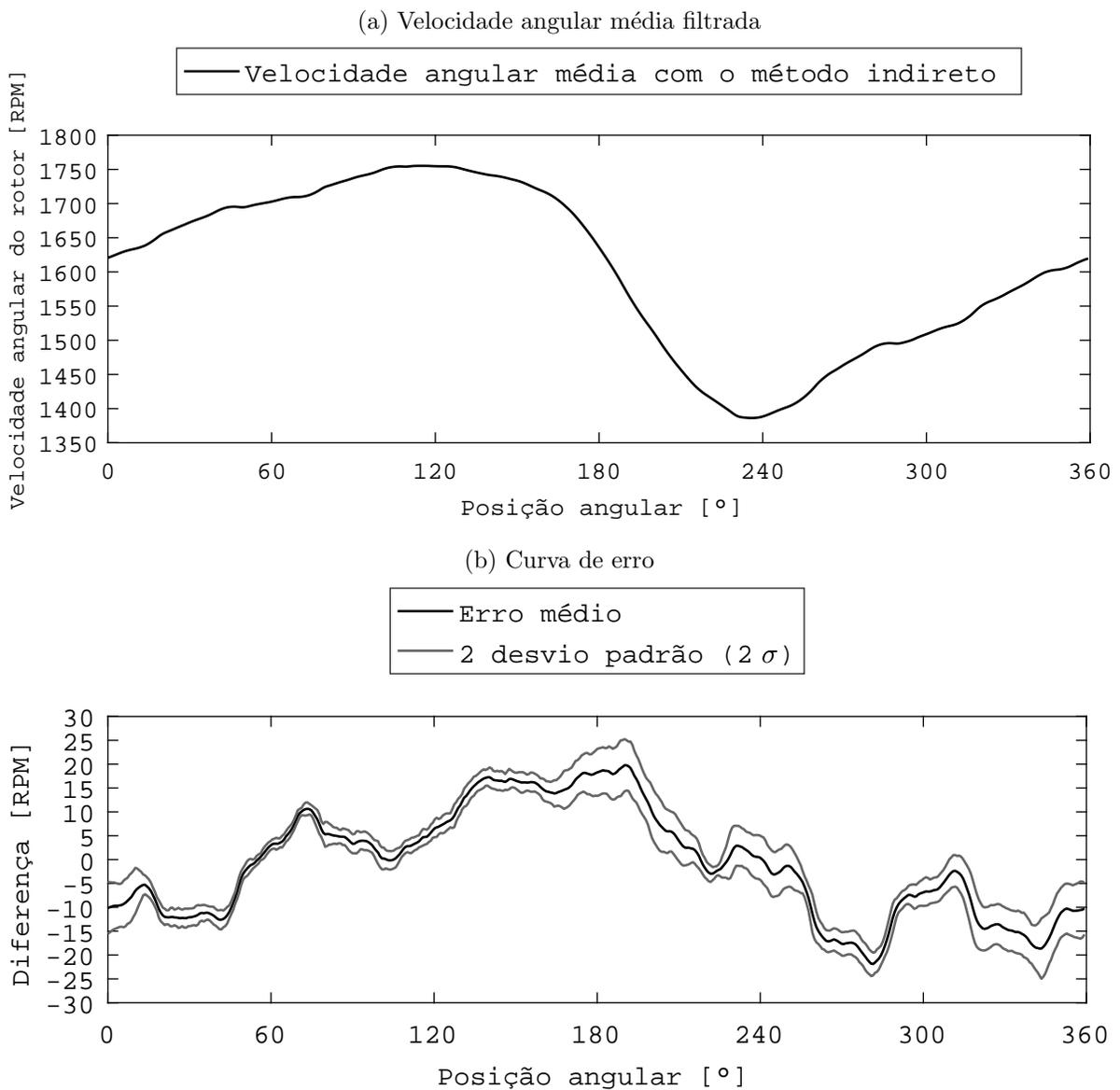
Para finalizar, serão apresentados os resultados do método indireto para cada uma das condições utilizadas de uma forma usualmente encontradas em sistemas de medição reais, com o valor estimado do mensurando e uma curva de erros relativa ao valor de referência utilizado.

A Figura 66 servirá como explicação padrão para todas as que virão a seguir. O título da figura indicará a condição apresentada. A figura superior é a curva de velocidade média para todas as medições feitas nessa condição, utilizando o método indireto. A figura inferior é uma curva de erro do método em função da referência utilizada para comparação, nessa figura tem-se o erro médio, que faz a parte de erro sistemático, e o envelope superior e

inferior de 2 desvios padrão, que faz a parte do erro aleatório.

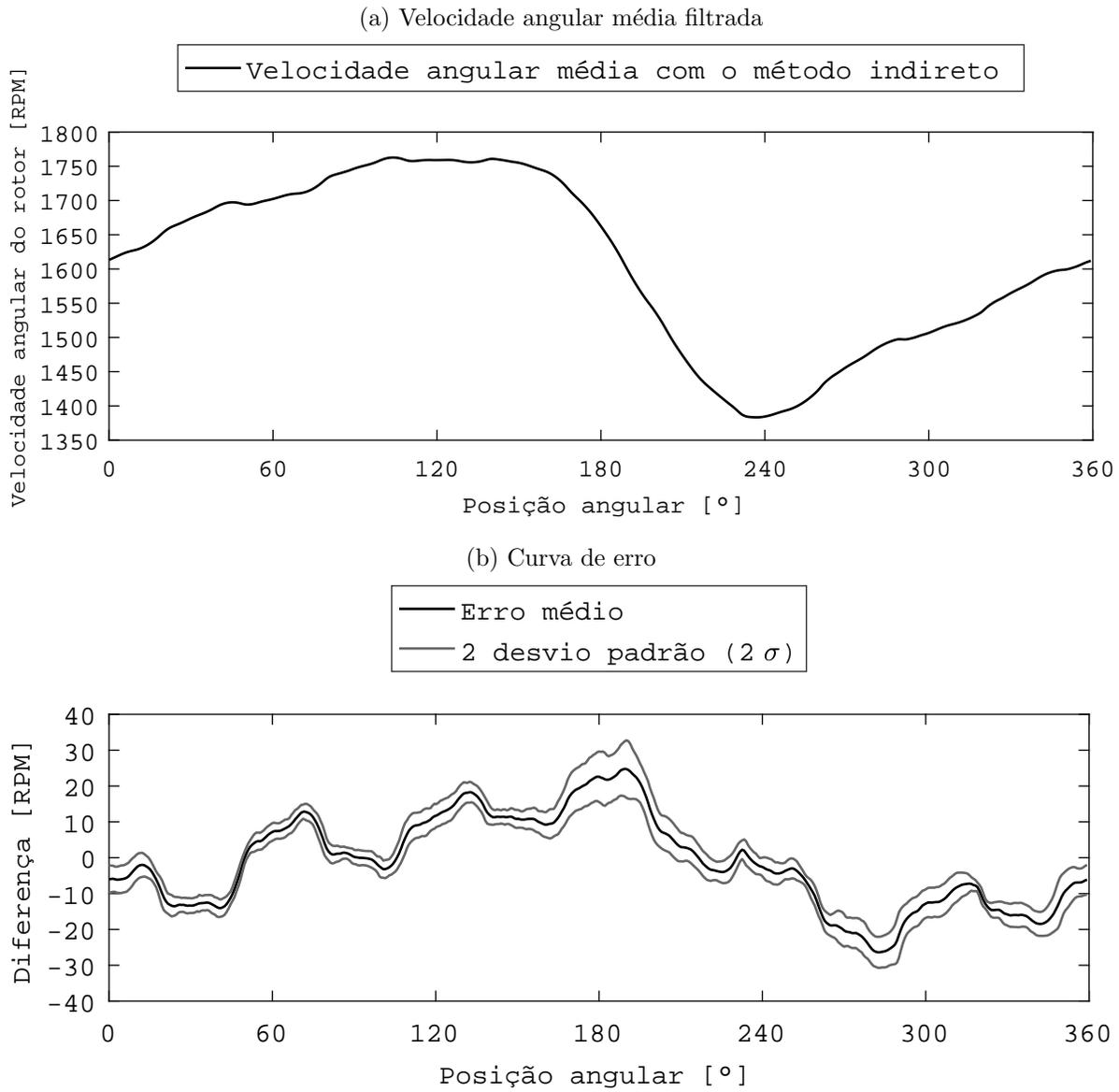
As figuras a seguir buscam apresentar ao leitor os resultados do método de medição indireto tal como se encontra em vários métodos de medições tradicionais. Todavia é apenas uma tentativa de trazer a análise para um domínio mais usual, de forma alguma se afirma que esses resultados, da forma como apresentados, são suficientemente representativos sobre todas as fontes de incertezas e erros que existem no método indireto.

Figura 66 – Velocidade angular média para a condição de 1600 RPM e 4 bar na descarga



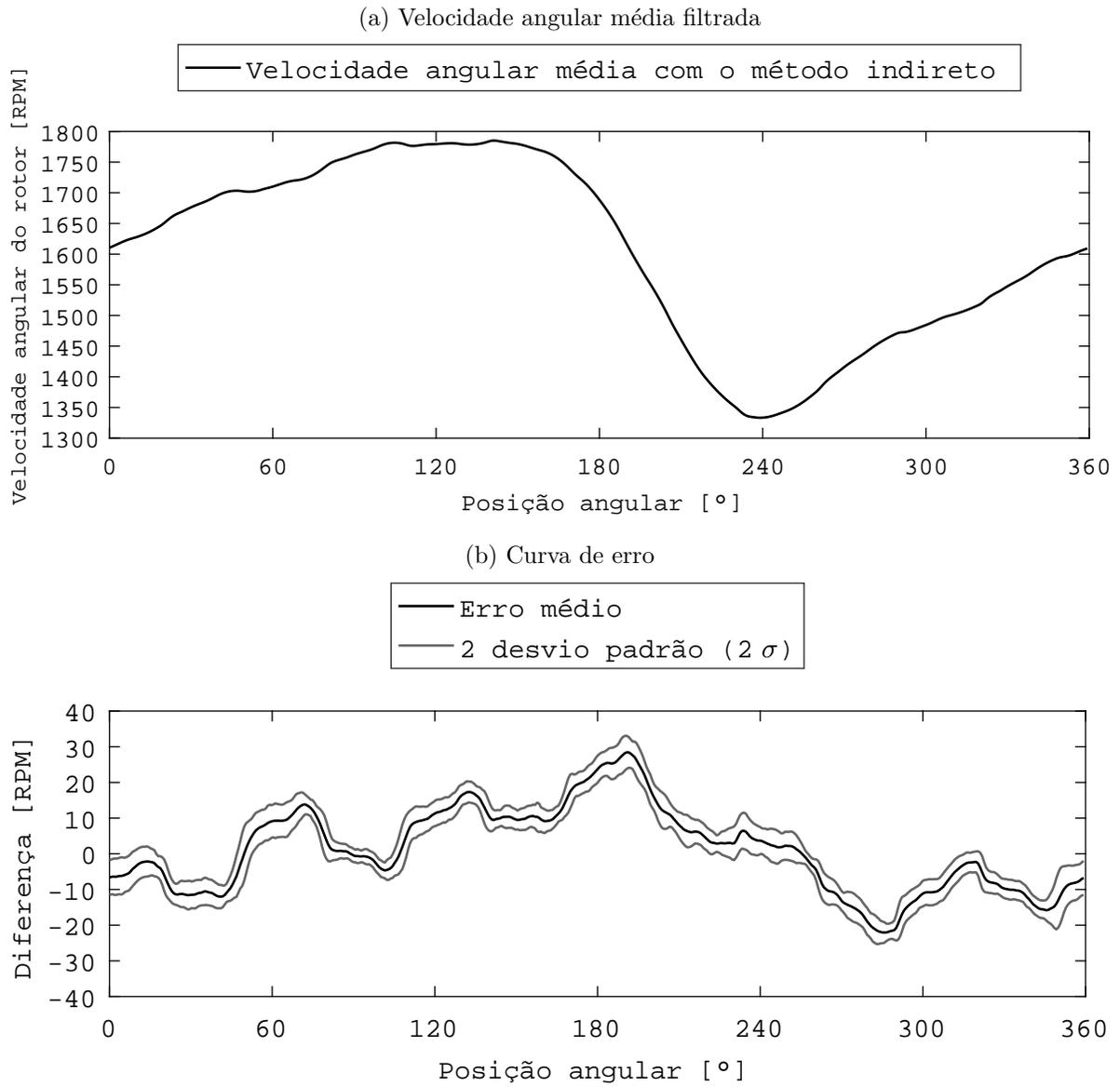
Fonte: Autor

Figura 67 – Velocidade angular média para a condição de 1600 RPM e 5 bar na descarga



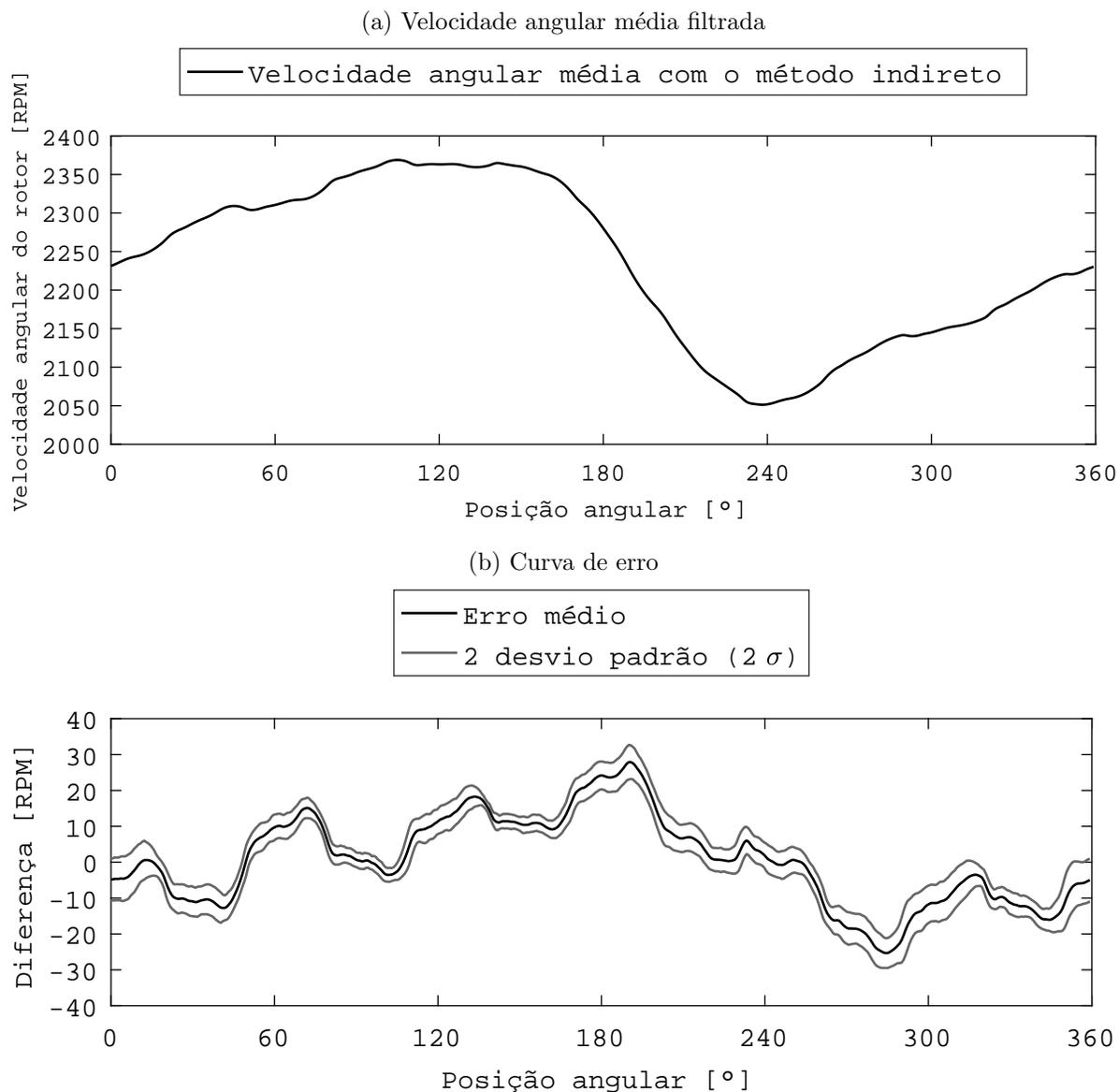
Fonte: Autor

Figura 68 – Velocidade angular média para a condição de 1600 RPM e 6 bar na descarga



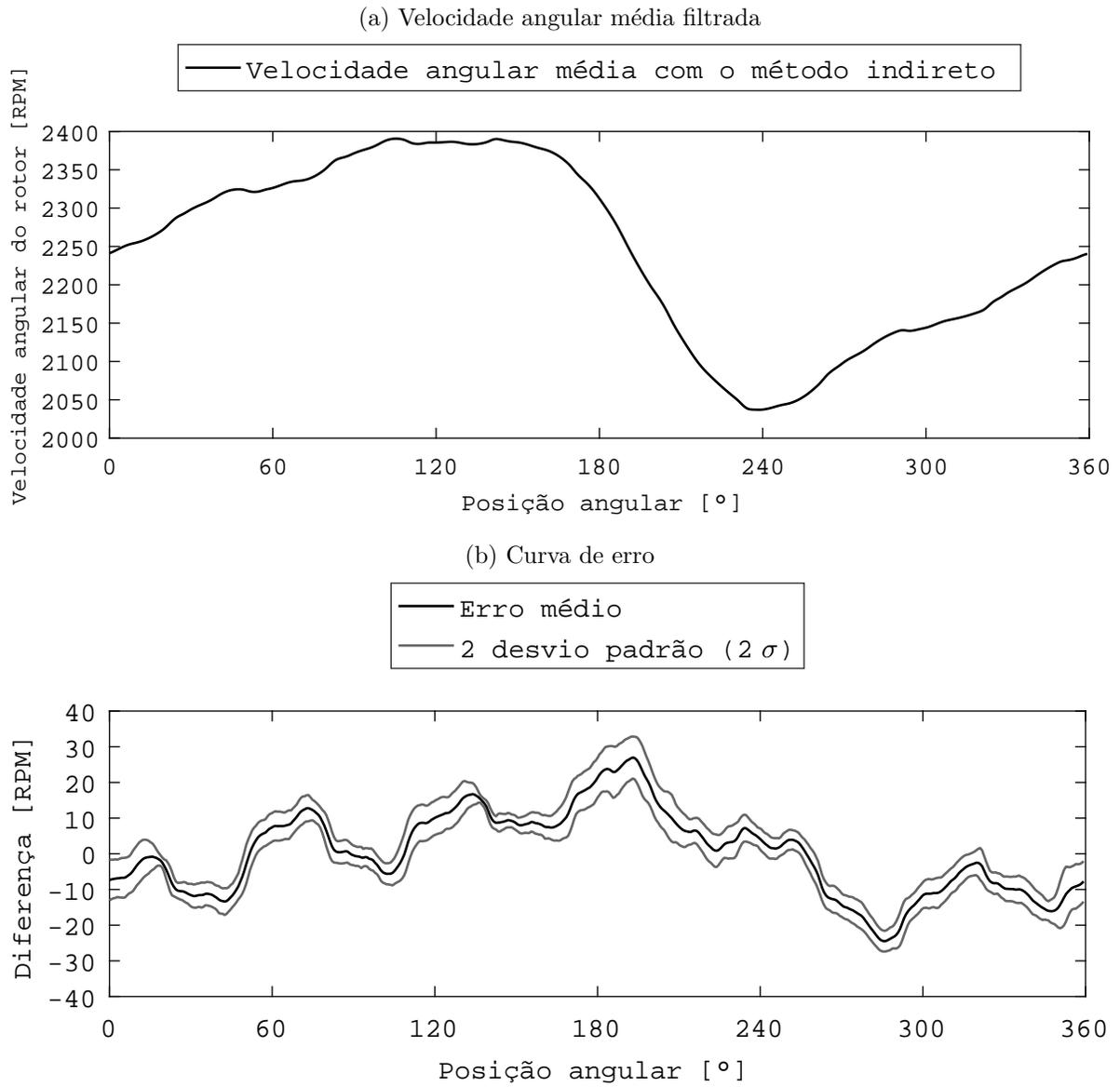
Fonte: Autor

Figura 69 – Velocidade angular média para a condição de 2200 RPM e 5 bar na descarga



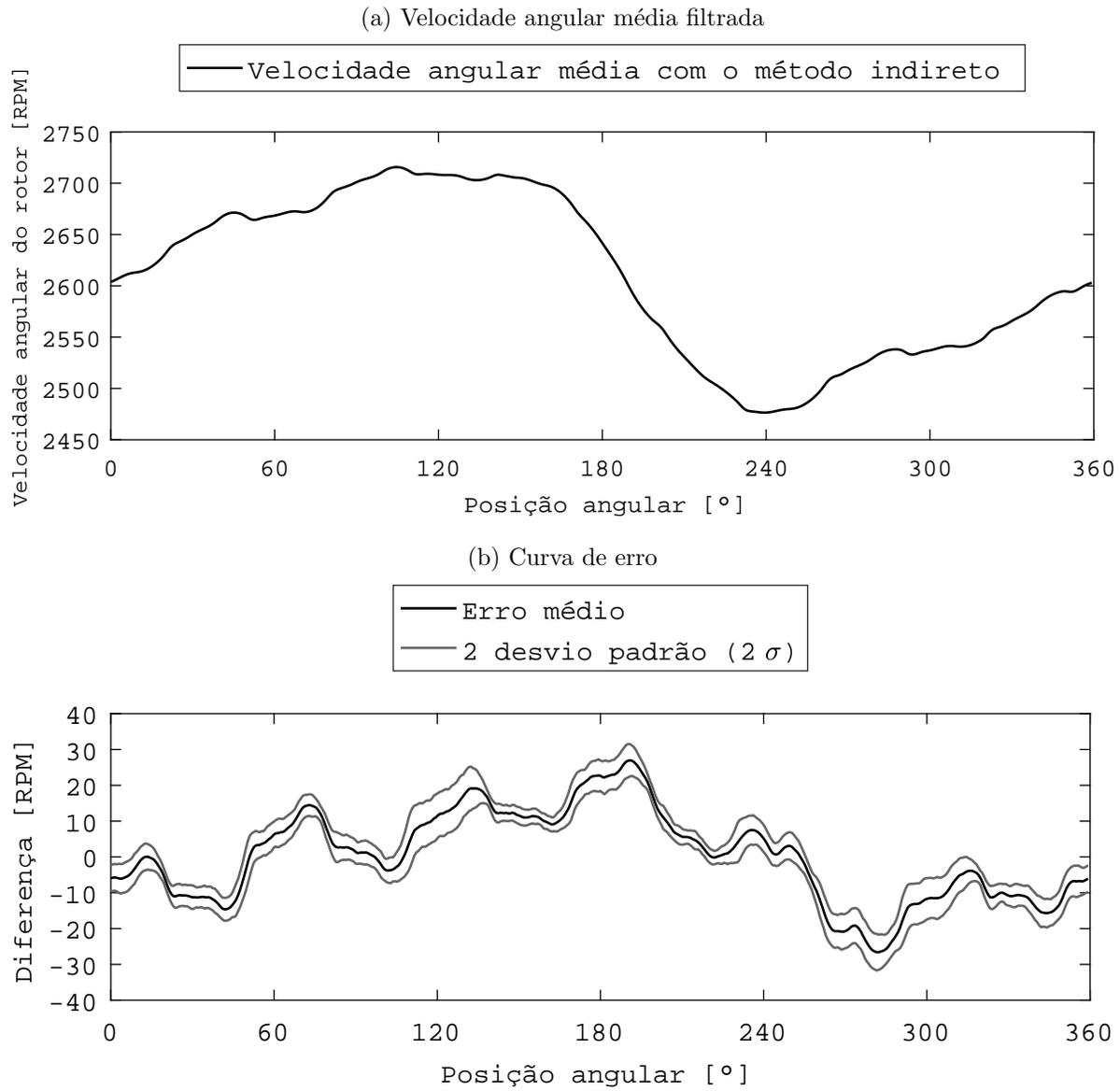
Fonte: Autor

Figura 70 – Velocidade angular média para a condição de 2200 RPM e 6 bar na descarga



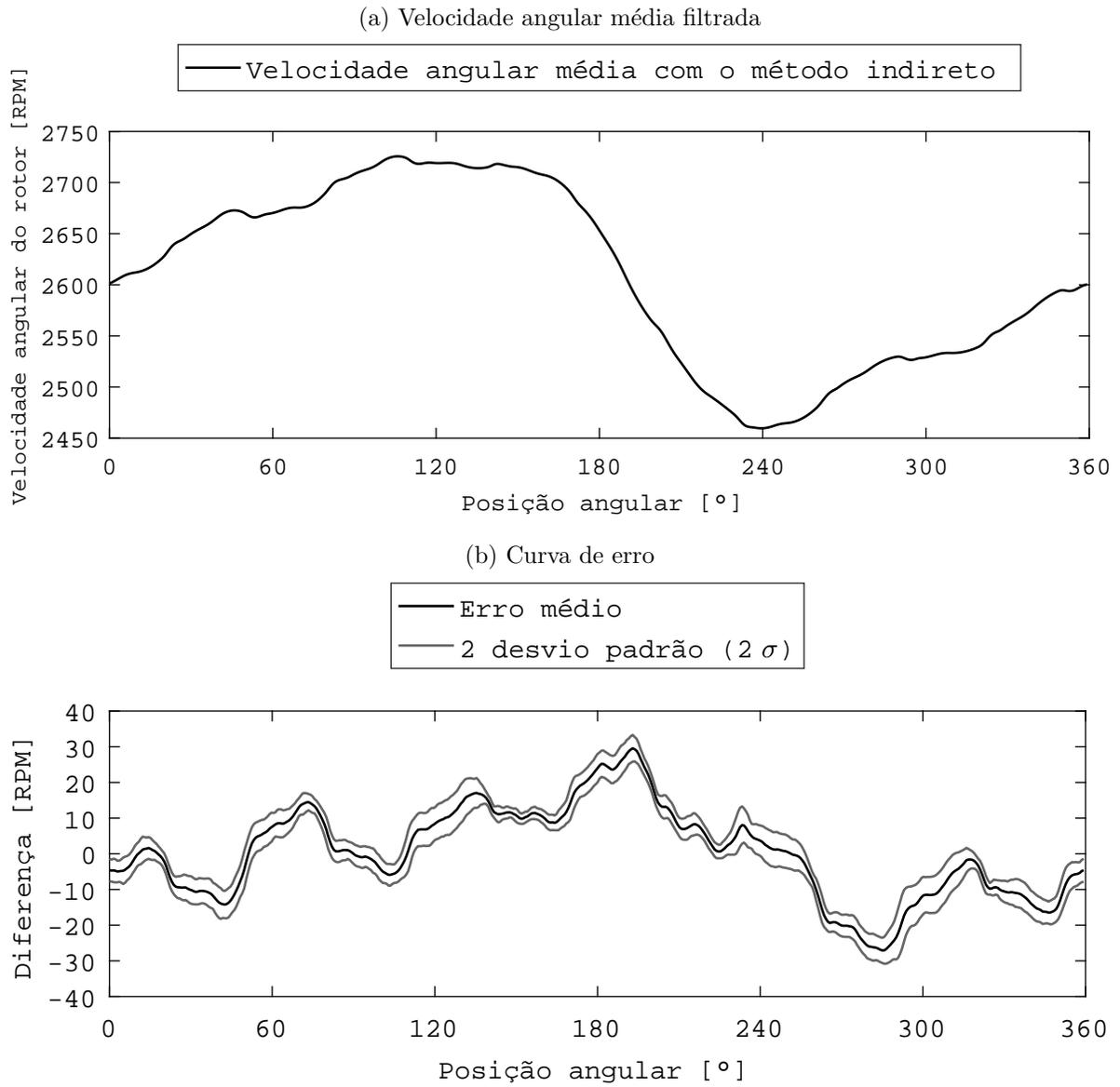
Fonte: Autor

Figura 71 – Velocidade angular média para a condição de 2600 RPM e 4 bar na descarga



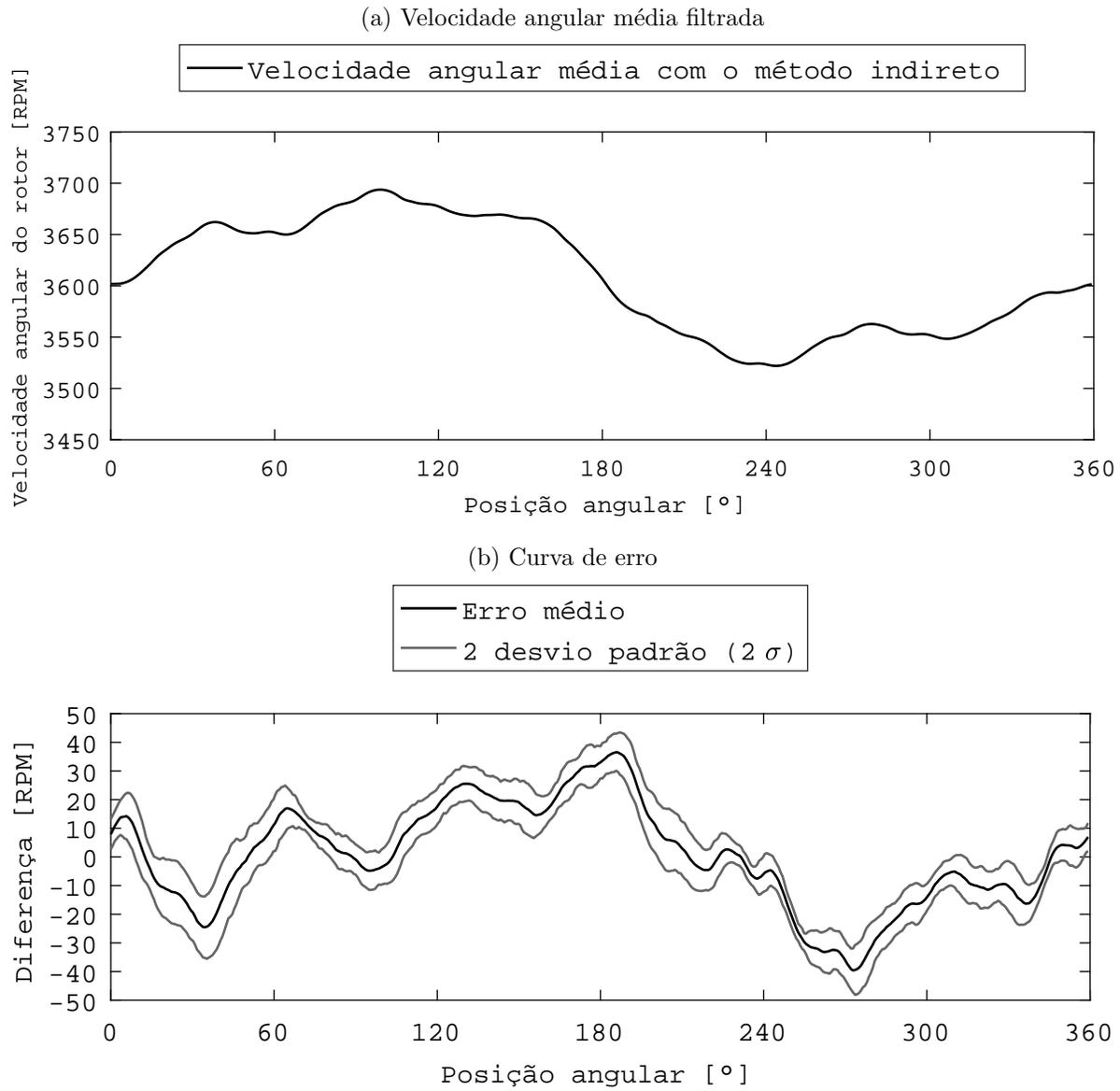
Fonte: Autor

Figura 72 – Velocidade angular média para a condição de 2600 RPM e 5 bar na descarga



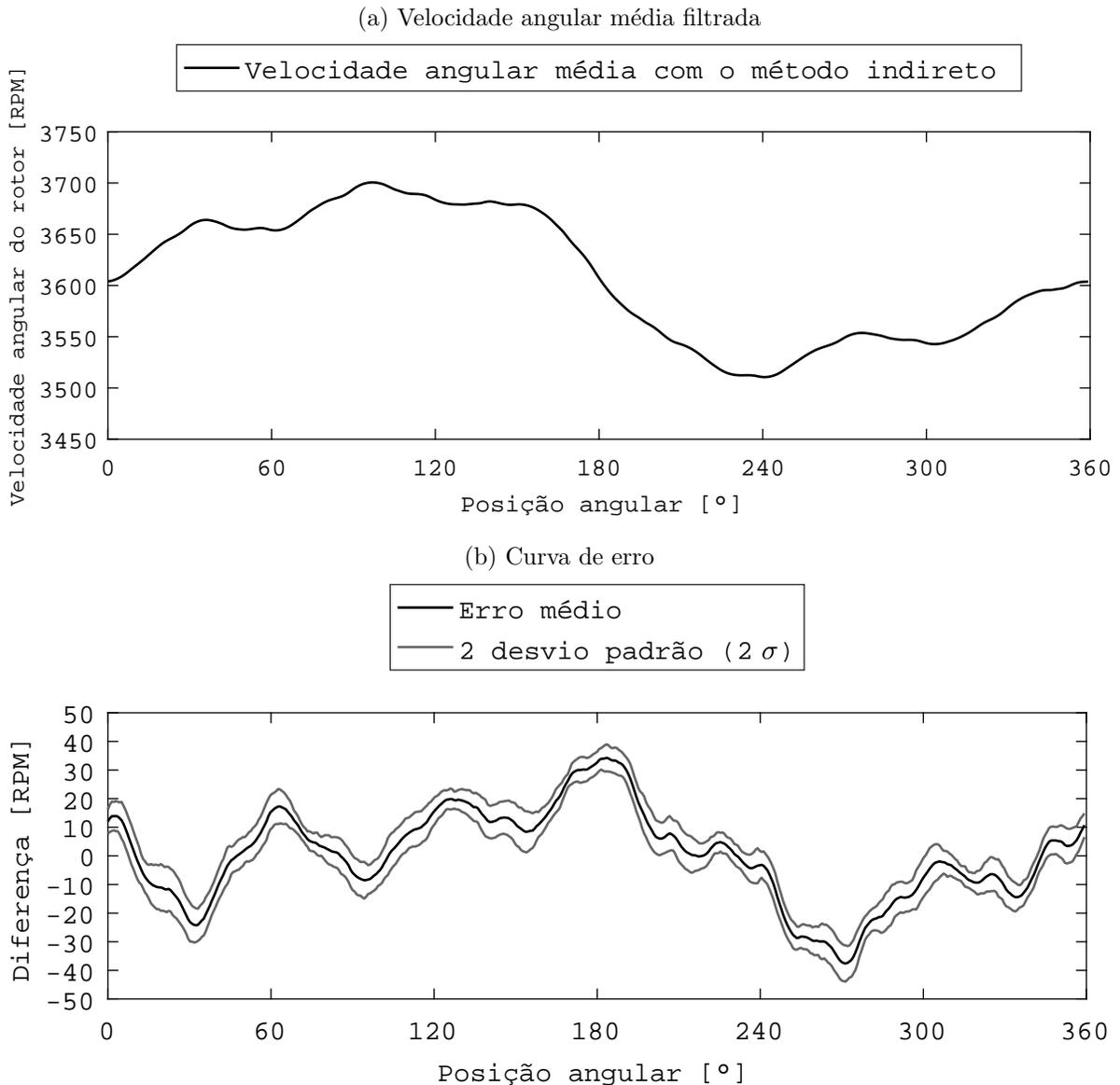
Fonte: Autor

Figura 73 – Velocidade angular média para a condição de 3600 RPM e 4 bar na descarga



Fonte: Autor

Figura 74 – Velocidade angular média para a condição de 3600 RPM e 5 bar na descarga



Fonte: Autor

## 7.2 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado os resultados finais sobre o método indireto para calcular a velocidade angular instantânea. Com a conclusão final de que o método indireto da Integral do Patamar da *Back EMF* foi validado e com boas perspectivas futuras.

Com a validação do método, novos experimentos já estão sendo pensados e a utilização do método já está sendo repensada para alinhar com alguns requisitos do dia-à-dia da empresa.



## 8 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O presente trabalho validou experimentalmente um método indireto para o cálculo da velocidade angular instantânea do motor *BLDC*, com o objetivo de validar os resultados obtidos. Essa validação se deu por meio da comparação direta entre os resultados com o método indireto e com um valor de referência. Vale ressaltar que devido ao carácter inovador do método, não existiam na literatura nenhum tipo de estudo que tratasse de tal comparação. Foram utilizados alguns parâmetros qualitativos e quantitativos para se determinar a eficácia do método.

Para poder alcançar o objetivo principal, foi preciso algumas etapas preliminares, a começar pela escolha dos transdutores e equipamentos necessários. Os transdutores selecionados foram termopares do tipo T, para aquisição da temperatura das bobinas do motor, garantindo assim a correta compensação térmica do valor de resistência elétrica durante os experimentos, e um *encoder* incremental de 500 pulsos, o qual tem papel fundamental nesse trabalho pois, é considerado como o valor verdadeiro do mesurando avaliado. A medição de tensão e corrente ficou à cargo do *Power Analyzer PZ4000*, cujos módulos para aquisição de tensão e corrente estavam alinhados com as necessidades específicas deste trabalho. Também houve a conveniência de utilizar um módulo comercial para aquisição dos termopares, sendo este responsável pela conversão de diferencial de tensão em temperatura absoluta. Também foi utilizado um notebook como interface de acionamento, armazenamento e processamento dos dados.

Alguns transdutores ainda precisavam ser instalados no compressor hermético, é o caso dos termopares e do *encoder*. Essas atividades foram realizadas parte no LIAE e parte na empresa parceira, e assim foi instrumentado um compressor hermético especialmente para esse trabalho.

Com tudo preparado, foi realizada a montagem da bancada para os experimentos. Essa bancada tinha a função apenas de replicar algumas condições conhecidas de uso do compressor, sem replicar condições do sistema de refrigeração como um todo. Os parâmetros de controle eram apenas a velocidade de acionamento e a pressão de descarga. A velocidade era controlada a partir do inversor de frequência já presente no produto comercial, e a pressão de descarga era controlada a partir de uma válvula de vazão e monitorada com um manômetro analógico.

Ao fim dos experimentos, se obteve dados suficientes para passar a próxima e mais importante etapa, análise e dos resultados e estudo para confirmar a validação do método indireto.

Após as análises realizadas utilizando todas as vias disponíveis para este trabalho, é com felicidade que conclui-se a validação dos resultados obtidos através do método indireto para calcular a velocidade angular instantânea do motor *BLDC*. Os resultados se mostraram muito bons e com características metrológicas esperançasas. Como confirmação do sucesso dos estudos, a empresa parceira já solicitou o envio do método implementado na plataforma *LabView*, para que possa ser dado continuidade nos estudos dentro da empresa.

Ainda que os resultados tenha se mostrado satisfatórios e que o objetivo do trabalho tenha sido atingido, existem perspectivas para trabalhos futuros, e estes são colocados a seguir:

- Buscar uma forma de sensoriamento indireto para a resistência das bobinas. O conhecimento de tal parâmetro é essencial para o método indireto e vislumbra-se alternativas de utilizar o próprio método para tal finalidade;
- Buscar o aprimoramento computacional do método, visando uma maior simplicidade em termos de escalonamento e adaptações à outras plataformas;
- Submeter o método indireto a outros compressores e outras situações de operação, agora em condições mais próximas as reais, com o compressor inserido em um sistema de refrigeração mesmo que simplificado;
- Aprofundar os estudos metrológicos acerca dos resultados, de forma a criar uma base consistente para utilização do método indireto como um sistema de medição funcional;
- Pensar na utilização dessa tecnologia embarcada nos sistemas comerciais, abrindo novos horizontes para a refrigeração doméstica e para sistemas de refrigeração de pequeno porte de forma geral.

## Referências

- 1 WALENDOWSKY, C. B. Estimação de pressões de sucção e de descarga de compressores herméticos de refrigeração através de medições não invasivas. *Universidade Federal de Santa Catarina - Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica*, 2017.
- 2 FONTANA, B. F. Implementação de algoritmos em labview para estimação de velocidade angular de um compressor hermético com motor de corrente contínua sem escovas. *Universidade Federal de Santa Catarina - Relatório de Estágio em Engenharia de Controle e Automação*, 2017.
- 3 MONTEIRO, C. A. M. Medição indireta de torque e velocidade angular de motor de corrente contínua sem escovas. *Universidade Federal de Santa Catarina - Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica*, 2016.
- 4 STOECKER, W.; JABARDO, J. Refrigeração industrial, 2a edição. *São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda*, 2002.
- 5 FANG, J.; ZHOU, X.; LIU, G. Instantaneous torque control of small inductance brushless dc motor. *IEEE Transactions of Power Electronics*, v. 27, n. 12, p. 4952–4964, 2012.
- 6 HANSELMAN, D. C. *Brushless permanent magnet motor design*. [S.l.]: The Writers' Collective, 2003.
- 7 MILLER, T. J. E. Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives. *Monographs in Electrical and Electronic Engineering No.2. Oxford*, 1989.
- 8 ZIAEINEJAD, S.; SANGSEFIDI, Y.; SHOULAIE, A. Analysis of commutation torque ripple of bldc motors and a simple method for its reduction. p. 1–6, 2011.
- 9 SHAO, J. Direct back emf detection method for sensorless brushless dc (bldc) motor drives. 2003.
- 10 SINGH, S.; SINGH, B. A voltage-controlled pfc cuk converter-based pmbldcm drive for air-conditioners. *IEEE transactions on industry applications*, IEEE, v. 48, n. 2, p. 832–838, 2012.
- 11 DAMODHARAN, P.; VASUDEVAN, K. Sensorless brushless dc motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (emf) from the line voltage difference. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 25, n. 3, p. 661–668, 2010.
- 12 LAI, Y.-S.; LIN, Y.-K. A unified approach to zero-crossing point detection of back emf for brushless dc motor drives without current and hall sensors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 26, n. 6, p. 1704–1713, 2011.
- 13 SHAO, J. et al. A novel microcontroller-based sensorless brushless dc (bldc) motor drive for automotive fuel pumps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 39, n. 6, p. 1734–1740, 2003.

- 14 SHAO, J. An improved microcontroller-based sensorless brushless dc (blcdc) motor drive for automotive applications. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, v. 42, n. 5, p. 1216–1221, 2006.
- 15 MOREIRA, L. Medição de temperatura usando-se termopar. *Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 5, p. 51–53, 2002.
- 16 NISHINARI, A. *Controle automático de processos industriais: instrumentação*. [S.l.]: E. Blücher, 1966.
- 17 HEDS-9000-9100 Two Channel Optical Incremental Encoder Modules Data Shee. Disponível em [http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-1867EN-DS-HEDS-9x00\\_016-08-01-952637.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-1867EN-DS-HEDS-9x00_016-08-01-952637.pdf).
- 18 YOKOGAWA PZ4000 Power Analyser User's Manual. 2nd, 2000.
- 19 ADVANTECH. ADAM-4018+ User manual.
- 20 INMETRO. Vocabulário internacional de metrologia. *1a. ed, Luso-Brasileira*, 2012.
- 21 ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. Fundamentos de metrologia científica e industrial. *407p.*, Editora Manole, 2008.