

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Bernardo Cassimiro Fonseca de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE VISÃO  
COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO E INSPEÇÃO DE  
ESTATORES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.

Florianópolis  
2015

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

Oliveira, Bernardo Cassimiro Fonseca de  
Desenvolvimento de sistemas de visão computacional para  
medição e inspeção de estatores / Bernardo Cassimiro Fonseca  
de Oliveira ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch -  
Florianópolis, SC, 2015.  
175 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistemas de visão  
computacional. 3. Inspeção. 4. Medição. 5. Estator. I. César  
Costa Flesch, Rodolfo. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
III. Título.

Bernardo Cassimiro Fonseca de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE VISÃO  
COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO E INSPEÇÃO DE  
ESTATORES**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 6 de março de 2015.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.  
Orientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina (Presidente)

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Mario Lucio Roloff, Dr. Eng.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina



A meus pais, **Simone e Domingos**,  
à minha irmã, **Sabrina**,  
à **Elise**  
e à **Nilce**.



## AGRADECIMENTOS

A meus pais, Domingos e Simone, não somente pelo carinho que sempre foi vital, nem pelos sacrifícios feitos, mas muito por aceitar e incentivar as decisões que tomei, as quais me trouxeram até aqui.

À minha irmã, Sabrina, pelas experiências e dicas passadas que sempre são bem vindas.

À Nilce, minha segunda mãe, pelo carinho.

À Elise, meu carinho, muito provavelmente a pessoa que mais me ouviu esbravejar nesses dois anos. Muito obrigado pelo amor e companheirismo.

Ao Professor Rodolfo, pela orientação impecável, disponibilidade e paciência.

Ao Miguel, pela amizade e disponibilidade, muitas vezes quando não poderia.

Aos amigos antigos e novos, pelas possibilidades de escape. As responsabilidades fazem com que nem sempre estar presente seja possível, mas nem por isso suas importâncias são menores.

Aos amigos do LIAE, cujas presenças são sempre agradáveis.

À todos os membros do LABMETRO que contribuíram direta ou indiretamente com o projeto.

Ao CNPq, FEESC e Embraco, pelo subsídio dado ao projeto.

À UFSC, pela forte formação.





## RESUMO

Motores elétricos são amplamente utilizados no mundo, em aplicações bastante diversificadas. Seus principais componentes são o rotor, a parte móvel, e o estator, parte fixa por onde passa a corrente elétrica, gerando o campo magnético responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica. A fabricação do estator é uma atividade complexa, composta por diversas etapas. A ocorrência de falhas nessas etapas pode resultar em um estator com funcionamento inadequado. Então, é comum que haja inspeção para controlar possíveis defeitos. Na atualidade, essa inspeção é feita em grande parte dos processos por operadores humanos, os quais estão sujeitos a fatores como fadiga e desatenção. Faz-se necessário o surgimento de outros tipos de controle que façam o uso de inspeções automatizadas. Nesse contexto, sistemas de visão computacional são fortes candidatos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver técnicas automatizadas de inspeção de defeitos identificáveis à luz visível em estatores, buscando identificar as falhas que operadores humanos treinados costumam encontrar. Foi feita uma análise dos defeitos mais comuns em estatores e posterior seleção dos que poderiam ser detectados com o uso de sistemas de visão. Focou-se em três defeitos: possíveis contatos entre as espiras do estator com o rotor, altura insuficiente de isolante entre o corpo do estator e suas bobinas e a falta de fixação dos cabos de alimentação do estator no conector elétrico. Princípios de inspeção foram desenvolvidos para detectá-los, juntamente com bancadas para realização de testes. Os resultados dos procedimentos desenvolvidos foram avaliados com ensaios tanto em laboratório quanto em uma linha de produção de estatores. Apesar de os testes terem apresentado resultados bastante satisfatórios, são necessárias ainda algumas modificações na bancada desenvolvida para que a confiabilidade dos métodos alcance o nível requerido para o ambiente industrial, onde se toleram muito poucas unidades de indicações errada por milhão de peças avaliadas. Com base na análise dos resultados, sugestões de modificações são apresentadas como propostas para análise em trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** Estator. Inspeção. Medição. Sistemas de visão computacional.



## **ABSTRACT**

Electric motors are widely used in many applications all over the world. They are composed of a moving part, the rotor, and a stationary part, the stator, through which flows an electric current, generating a magnetic field responsible for the conversion from electrical energy to mechanical energy. Stator manufacturing is a complex assignment that comprises many steps and flaw occurrences in these steps can result in a malfunctioning stator. Thus inspections are done in order to control these events. Nowadays human operators are responsible for the most part of the inspections, however they are subjected to factors as fatigue and lack of attention. So, it is important to develop other kinds of control which use automatized inspections. In such context, machine vision techniques are strong candidates. Thus, this work aims to develop automatic inspection techniques of defects which can be seen in visible light, identifying the ones that trained human operators are able to identify. In order to do it, an analysis of the most common defects was made and then a selection of the ones that could be detected using machine vision. Three defects have been the focus: possible shortcuts between coil wires and the rotor, insufficient height of the insulants between the stator body and its coils, and disconnection of the stator power supply cables inside the electrical connector. Measurement principles have been developed, together with test benches, and their results have been evaluated with case studies in laboratory and on a stator assembly line. Although the test results were very satisfactory, some changes on the test bench were considered necessary in order to enhance the reliability required in industry, where few wrong indications per million of evaluated parts are tolerated. Based on the results, suggestions are made as proposals for future works.

**Keywords:** Stator, Inspection, Measurement, Machine vision.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação simplificada dos motores elétricos.....	34
Figura 2 – Motor elétrico com rotor acoplado a um pistão por meio de um eixo.....	34
Figura 3 – Partes de um estator. ....	36
Figura 4 – Caixa de tomadas. ....	36
Figura 5 – Clipe, à esquerda. À direita, sua parte inferior, evidenciando a fixação com o cabo.....	37
Figura 6 – Um rotor acoplado a um eixo.....	37
Figura 7 – ERB.....	38
Figura 8 – Procedimentos que compõem o funcionamento de um sistema de visão computacional. ....	39
Figura 9 – Planos focal e do objeto e distância focal. ....	41
Figura 10 – Tamanhos de pixel em sensores.....	43
Figura 11 – Relação entre o campo de visão e a distância focal. ....	43
Figura 12 – Imagem e suas transformações de intensidade.....	45
Figura 13 – Demonstração da máscara espacial em uma imagem genérica e seu funcionamento. ....	46
Figura 14 – Imagens periódicas e suas transformadas. ....	47
Figura 15 – Imagem não periódica, mais complexa, e sua transformada. ....	48
Figura 16 – Uma imagem filtrada de diferentes formas.....	49
Figura 17 – Um corte tomográfico e o resultado da operação de limiarização sobre ela.....	50
Figura 18 – Formação da imagem em uma câmera <i>pinhole</i> .....	52
Figura 19 – Projeção de um ponto qualquer no espaço 3D.....	53
Figura 20 – Esquema do método de Monte Carlo.....	60
Figura 21 – Um exemplo do defeito "Condutor na trajetória do rotor".	64
Figura 22 – Um exemplo do defeito "Isolante fora da posição".....	65
Figura 23 – Um exemplo do defeito "Cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomada". No detalhe, o orifício de conexão obstruído. ....	65
Figura 24 – Condutor em contato com as lâminas na parte externa do estator. ....	67

Figura 25 – Primeira alternativa para o defeito "condutor na trajetória de inserção do rotor".....	70
Figura 26 – Segunda alternativa para o defeito "condutor na trajetória de inserção do rotor".....	71
Figura 27 – Imagem capturada com lente grande-angular.....	72
Figura 28 – Primeira alternativa de solução para o monitoramento de altura de isolantes.....	73
Figura 29 – Câmera alinhada coaxialmente com o estator.....	75
Figura 30 – Imagem para detecção de condutores em um estator. Em destaque, um condutor na trajetória. ....	78
Figura 31 – Circunferências superior, inferior, superior de posição e inferior de posição.....	78
Figura 32 – Imagem de origem em (a) e o gabarito virtual de (a) em (b). .....	80
Figura 33 – Circunferência de detecção e detalhe em intersecções, chamadas de zonas neutras. ....	81
Figura 34 – Pontos de detecção e zonas neutras. ....	81
Figura 35 – Fluxograma do algoritmo de detecção de condutores no estator. ....	82
Figura 36 – Imagem capturada para detecção de condutores no ERB. Em A, um condutor na trajetória. Em B, um fio de bandagem. ....	83
Figura 37 – Circunferência do rotor (vermelha) e circunferência de detecção (verde). ....	84
Figura 38 – Detecção de bordas dos condutores e de bandagem nos detalhes A e B. ....	85
Figura 39 – Condutor que foi erroneamente não considerado como defeito. O detalhe à direita mostra o diâmetro diferente da esperada. ..	86
Figura 40 – Diferença entre luz branca em (a) e luz azul em (b). ....	86
Figura 41 – Fluxograma do algoritmo de detecção de condutores no ERB.....	88
Figura 42 – Bancada para obtenção de imagens para detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor. ....	89
Figura 43 – Sistema de posicionamento da câmera. ....	90
Figura 44 – Sistema de posicionamento do estator. ....	91

Figura 45 – Vista interna da cúpula escura. Destaque para os LEDs de iluminação superior. ....	92
Figura 46 – Difusor de luz externa. ....	93
Figura 47 – Paleta do ERB. ....	93
Figura 48 – Perspectiva forçada. ....	97
Figura 49 – Modelo <i>pinhole</i> aplicado ao monitoramento de altura de isolantes. ....	97
Figura 50 – Imagem capturada para o experimento de perspectiva. ....	99
Figura 51 – Algoritmo de experimento de perspectiva. ....	100
Figura 52 – Curva formada pelos dados obtidos pelo algoritmo. Detalhe para sua forma exponencial. ....	101
Figura 53 – Nuvem de dados. ....	103
Figura 54 – Determinação dos valores máximos e mínimos de H pelo método A, detalhe em preto representa uma ampliação de um trecho da curva. ....	104
Figura 55 – Esquema da análise da variação da altura de isolante a partir de uma variação de seu raio. ....	107
Figura 56 – Determinação dos pontos médios das extremidades dos segmentos que representam as bordas dos isolantes. ....	108
Figura 57 – Determinação de um terceiro ponto que pertence à bissetriz de um isolante. ....	109
Figura 58 – Extremidade do estator encontrada. ....	109
Figura 59 – Parâmetros utilizados no cálculo do comprimento da projeção da altura dos isolantes. ....	110
Figura 60 – Fluxograma do algoritmo de monitoramento de alturas de isolantes. ....	111
Figura 61 – Esquema de captura de imagem da detecção de cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas. ....	113
Figura 62 – Caixa de tomadas com defeito em dois cabos. Em destaque, a alteração visual causada pelos defeitos. ....	114
Figura 63 – Imagem capturada para detecção pelo algoritmo. ....	115
Figura 64 – Imagem padrão para encontrar a caixa de tomadas na imagem, uma das entradas do algoritmo. ....	115

Figura 65 – Resultado da função de encontro de padrões na imagem. Em destaque, as linhas que representam as extremidades da caixa de tomadas. ....	116
Figura 66 – Resultado da operação de limiarização (negativo). ....	117
Figura 67 – Comparação entre imagens com defeito e sem, e suas limiarizações. ....	117
Figura 68 – Resultado da técnica com determinação da quantidade de circunferências na imagem. À esquerda, uma caixa com defeito. À direita, uma sem. ....	118
Figura 69 – Resultado da técnica com a determinação do tamanho dos orifícios de conexão. Em destaque, as linhas de análise e os pontos encontrados. ....	119
Figura 70 – Resultado da técnica de determinação do comprimento dos objetos na parte superior da caixa de tomadas. Os retângulos tracejados representam as áreas de interesse e as linhas cheias, as ROIs.....	120
Figura 71 – Etapas do algoritmo de detecção de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas. ....	121
Figura 72 – Funcionamento da bancada de tração. ....	122
Figura 73 – Bancada de tração (frente). ....	123
Figura 74 – Bancada de tração (trás).....	124
Figura 75 – Webcam Logitech Pro 9000. ....	125
Figura 76 – Diferenças de iluminação da situação A e da situação B em um estator $\Sigma$ . ....	129
Figura 77 – Diferenças de iluminação da situação A e da situação B em um estator $\Omega$ . ....	131
Figura 78 – Diferenças entre as posições dos centros das circunferências superior e inferior, causadas pelo mau posicionamento do estator. ....	132
Figura 79 – Estator $\Omega$ com problemas de iluminação na parte inferior da parede interna, à esquerda e à direita. ....	133
Figura 80 – Exemplificação do porquê, para uma mesma fonte de luz numa mesma posição, a luz recebida pela câmera é diferente. ....	134
Figura 81 – Divisão da imagem em setores para controle de iluminação individual. ....	134
Figura 82 – Diferença da iluminação na aquisição de imagens do ERB (vide texto). ....	136



Figura 83 – Incertezas de medição de altura de isolante para os vários métodos desenvolvidos. ....	140
Figura 84 – Estator com isolantes no nível zero.....	146
Figura 85 – Denominação de cada posição de isolante. ....	147
Figura 86 – Comparação entre incertezas. ....	150



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Expressões para obtenção da incerteza de medições diretas. .....	56
Quadro 2 – Classificação de defeitos em estatores. ....	66
Quadro 3 – Defeitos selecionados. ....	68
Quadro 4 – Vantagens e desvantagens das estratégias de inspeção. ....	76



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos ensaios $\Sigma A$ e $\Sigma B$ , em porcentagem do total de casos. ....	130
Tabela 2 – Resultados dos ensaios $\Omega A$ e $\Omega B$ , em porcentagem do número total de casos. ....	131
Tabela 3 – Resultados dos ensaios com ERB na fábrica, em porcentagem do total de casos. ....	136
Tabela 4 – Resultados dos ensaios com ERB com luz azul, em porcentagem do total de casos testados. ....	137
Tabela 5 – Análise da variação da altura de isolante com base na variação de seu raio. ....	142
Tabela 6 – Indicações incorretas da detecção de extremidades de isolantes de estatores de modelo $\Sigma$ . ....	144
Tabela 7 – Indicações incorretas da detecção de extremidades de isolantes de estatores de modelo $\Omega$ . ....	145
Tabela 8 – Incertezas de medição para cada posição de isolante na imagem (modelo <i>pinhole</i> ). ....	148
Tabela 9 – Incertezas de medição para cada posição de isolante na imagem (modelo exponencial). ....	148
Tabela 10 – Resultados dos ensaios nas caixas de tomada. ....	151
Tabela 11 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo <i>pinhole</i> , considerando as grandezas estatisticamente independentes. ....	165
Tabela 12 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo <i>pinhole</i> , considerando as grandezas estatisticamente dependentes. ....	168
Tabela 13 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo exponencial, considerando as grandezas estatisticamente independentes. ....	172
Tabela 14 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo exponencial, considerando as grandezas estatisticamente dependentes. ....	174



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ERB	Conjunto estator-rotor-bloco
FN	Falso negativo
FP	Falso positivo
GUM	Guia de expressão da incerteza de medição
laser	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
pixel	<i>Picture element</i>
ROI	<i>Region of interest</i>
SM	Sistema de medição
SV	Sistemas de visão computacional
VC	Visão computacional
$\Sigma A$	Experimento com modelo $\Sigma$ situação A
$\Sigma B$	Experimento com modelo $\Sigma$ situação B
$\Omega A$	Experimento com modelo $\Omega$ situação A
$\Omega B$	Experimento com modelo $\Omega$ situação B





## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>29</b>
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	29
1.2.	OBJETIVOS .....	30
<b>1.2.1.</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>30</b>
<b>1.2.2.</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>31</b>
1.3.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	31
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
2.1.	MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO .....	33
2.2.	ESTADORES .....	35
2.3.	VISÃO COMPUTACIONAL E VISÃO DE MÁQUINA .....	38
2.4.	AQUISIÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS .....	40
2.5.	PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS .....	44
2.6.	SEGMENTAÇÃO DE OBJETOS EM IMAGENS DIGITAIS .....	48
2.7.	CÂMERA <i>PINHOLE</i> .....	51
2.8.	MEDIÇÕES E SEUS ERROS .....	52
2.9.	MÉTODO DE MONTE CARLO PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO .....	59
<b>3.</b>	<b>ANÁLISE E SELEÇÃO DOS DEFEITOS EM ESTADORES</b> .....	<b>63</b>
3.1.	IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS EM ESTADORES .....	63
3.2.	ANÁLISE SOB O PONTO DE VISTA DA VISÃO COMPUTACIONAL .....	64
3.3.	SELEÇÃO DOS DEFEITOS A SEREM ESTUDADOS.....	68
3.4.	SELEÇÃO DA ABORDAGEM PARA CADA UM DOS DEFEITOS .....	68
<b>3.4.1.</b>	<b>Alternativas para inspeção dos defeitos “Condutores das bobinas em contato com o rotor” e “Condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor” .....</b>	<b>69</b>
<b>3.4.2.</b>	<b>Alternativas para o defeito “Isolantes ausentes ou fora do lugar” .....</b>	<b>72</b>
<b>3.4.3.</b>	<b>Alternativas para o defeito “Cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas“ .....</b>	<b>73</b>
<b>4.</b>	<b>DETECÇÃO DE CONDUTOR NA TRAJETÓRIA DE INSERÇÃO DO ROTOR E EM CONTATO COM O ROTOR</b> .....	<b>75</b>

4.1.	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE CONDUTORES NO ESTATOR.....	77
4.2.	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE CONDUTORES NO ERB .....	82
4.3.	BANCADA DE TESTES DE DETECÇÃO DE CONDUTORES NA TRAJETÓRIA .....	87
<b>5.</b>	<b>MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE ISOLANTES.....</b>	<b>95</b>
5.1.	PERSPECTIVA, FUNÇÃO DE MEDIÇÃO E MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO .....	96
5.1.1.	Método MC1 - Projeções e alturas.....	102
5.1.2.	Métodos MC2 e MC3 – Coeficientes.....	105
5.1.3.	Análise da variação da altura do isolante a partir de uma variação em seu raio.....	106
5.2.	ALGORITMO DE MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE ISOLANTES.....	108
<b>6.</b>	<b>DETECÇÃO DE CABOS FIXADOS INCORRETAMENTE DENTRO DA CAIXA DE TOMADAS .....</b>	<b>113</b>
6.1.	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE CABOS FIXADOS INCORRETAMENTE DENTRO DA CAIXA DE TOMADAS.....	114
6.2.	BANCADA PARA DETECÇÃO DE CABOS FIXADOS INCORRETAMENTE NA CAIXA DE TOMADAS.....	122
<b>7.</b>	<b>ESTUDOS DE CASOS .....</b>	<b>127</b>
7.1.	CONDUTORES NA TRAJETÓRIA NOS ESTADORES DO MODELO $\Sigma$ .....	128
7.1.1.	Características do ensaio com modelo $\Sigma$ .....	128
7.1.2.	Resultados e discussões dos ensaios $\Sigma A$ e $\Sigma B$ .....	129
7.2.	CONDUTORES NA TRAJETÓRIA NOS ESTADORES DO MODELO $\Omega$ .....	130
7.2.1.	Características do ensaio com modelo $\Omega$ .....	130
7.2.2.	Resultados e discussões do ensaio $\Omega A$ e $\Omega B$ .....	131
7.3.	CONDUTORES NA TRAJETÓRIA NO ERB.....	135
7.3.1.	Características do ensaio .....	135
7.3.2.	Resultados e discussões dos ensaios com ERB em fábrica..	135
7.3.3.	Resultados e discussões do ensaio com ERB e luz azul em laboratório .....	137

7.4.	MONITORAMENTO DE ALTURA DOS ISOLANTES NOS ESTADORES .....	138
7.4.1.	Resultados acerca das funções de medição e incertezas para determinação da altura dos isolantes.....	138
7.4.2.	Análise da variação da altura do isolante a partir de uma variação em seu raio.....	141
7.4.3.	Ensaio de detecção de extremidade de isolante em fábrica.....	143
7.4.4.	Testes de nível zero em laboratório.....	145
7.4.5.	Comparação entre os resultados das medições em nível zero e as incertezas obtidas .....	149
7.5.	CAIXA DE TOMADAS .....	151
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153
8.1.	CONCLUSÕES .....	153
8.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	155
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DA INCERTEZA PELOS MÉTODOS ANALÍTICOS .....</b>	<b>163</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Motores elétricos estão presentes no cotidiano de todos. No Brasil, 46% da energia elétrica é consumida pela indústria, sendo 55% dessa parte apenas pelo uso de motores elétricos (RAMOS, 2009), representando um tópico com grande importância econômica (HASEWAGA, 2003).

A versão desse equipamento mais usada na indústria é o motor de corrente alternada assíncrono, ou motor de indução. Esse equipamento é composto basicamente de um rotor e um estator, por onde passa uma corrente elétrica, criando um efeito indutivo cujo resultado final é a conversão de energia elétrica em energia mecânica, a qual pode ser usada para os mais diversos fins, como bombas hidráulicas, elevadores e compressores (WEG, 2015).

Após a saída da linha de montagem, o estator é unido ao rotor e a um bloco fundido, formando um conjunto. Este conjunto, aqui denominado ERB (estator, rotor e bloco), tanto antes como depois da sua união, pode apresentar defeitos de fabricação, como por exemplo, condutores das bobinas do estator quebrados ou partidos, ou até mesmo em curto-circuito com outras partes, tanto do estator como do rotor. Dessa maneira, é importante que a verificação da integridade dos componentes do ERB seja feita de forma apropriada.

É comum que essa inspeção seja realizada por operadores humanos, contudo eles estão sujeitos a momentos de desatenção e à fadiga inerente ao processo repetitivo de inspeção visual. Ainda, segundo Gill, Kumar e Agarwal (2013), a inspeção humana, além de subjetiva, é cara e inconsistente, o que faz surgir a necessidade por outros tipos de controle.

No campo de controle de qualidade, cada vez mais tem sido notável o uso de inspeções automatizadas (FELICIANO; SOUZA; LETA, 2005). Dentro desse grupo, sistemas de visão (SV)<sup>1</sup> têm a vantagem de poder oferecer confiabilidade em inspeções sem contato. Quando se trata de tarefas como classificação de defeitos em peças, medições e análise de incertezas em geometrias, vê-se um nicho muito interessante para o uso de SV que utilizam visão computacional (VC). Fundamentalmente, a VC é um grupo de operações de alto nível para

---

<sup>1</sup> Também conhecidos pelo termo visão de máquina (FISHER et al, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2008).

retirar informações de uma imagem e tomar uma decisão com base nelas (FELICIANO; SOUZA; LETA, 2005; FISHER et al, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2008).

Muitas vezes, inspeções as quais poderiam ser feitas por SV são feitas por operadores sem auxílio de qualquer equipamento eletrônico. A literatura apresenta diversos bons resultados de aplicação de técnicas de VC a problemas concretos e inclusive existem propostas de sistemas com bons resultados para avaliações de classes específicas de problemas em determinados tipos de estatores (ITS LTDA, 2013). No entanto, com base em um levantamento de informações junto a profissionais da área, revelou-se que não há conhecimento sobre algum tipo de solução satisfatória para essa questão. Desta maneira, surge um potencial interessante para pesquisa de soluções com emprego de SV.

Tendo em vista o exposto acima, este trabalho propõe o uso de SV no monitoramento dos defeitos em estatores de motores elétricos. Este trabalho foi desenvolvido junto a uma empresa parceira, que forneceu dados sobre os defeitos mais relevantes em sua linha de produção. Soluções para a inspeção desses problemas serão propostas. Após, estudos de caso verificarão a eficiência dessas ideias em laboratório e também em ambiente fabril da parceira e conclusões serão tiradas a respeito dos seus desempenhos.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

*Desenvolver protótipos de sistemas automatizados de inspeção dos principais defeitos identificáveis à luz visível em estatores, baseadas em visão computacional.*

Dessa forma, busca-se a identificação dos mesmos defeitos que atualmente são identificados pelos operadores humanos através de inspeção visual. Com o resultado deste trabalho pretende-se fornecer subsídios para um processo de inspeção automática de alguns dos principais defeitos em estatores que possa substituir o procedimento feito atualmente de modo manual pelo operador. Para a indústria, o objetivo global é diminuir o índice de motores elétricos com defeitos devidos a problemas no estator.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- A. avaliar os defeitos comuns em estatores;
- B. selecionar os defeitos que podem ser detectados através de VC;
- C. desenvolver princípios de inspeção para cada defeito selecionado;
- D. projetar protótipos de SV para a realização de inspeções dos defeitos selecionados;
- E. avaliar os resultados obtidos nas inspeções, com base na meta de 95% de indicações corretas, e
- F. documentar dados e experiências obtidas.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Seguindo o proposto nos objetivos específicos, o trabalho foi dividido da seguinte maneira:

- o capítulo 2 revisa conceitos importantes para o entendimento dos procedimentos adotados no projeto;
- o capítulo 3 fala sobre como os defeitos em estatores foram analisados e selecionados;
- o capítulo 4 trata do algoritmo e da bancada desenvolvidos para detecção do defeito “condutores na trajetória de inserção do rotor”;
- o capítulo 5 discorre acerca do monitoramento da posição dos isolantes, mais especificamente dos desenvolvimentos da bancada e algoritmo;
- o capítulo 6 fala sobre a detecção de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas, também especificamente do algoritmo e da bancada;
- o capítulo 7 aborda todos os estudos de caso feitos para analisar o comportamento dos algoritmos e bancadas em ambiente de laboratório e fábrica e,
- por fim, o capítulo 8 se trata das considerações finais, incluindo as conclusões e propostas de trabalhos futuros.





## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

Em 1821, Michael Faraday realizou experimentos com transformação de energia eletromagnética em energia mecânica, os quais possibilitaram o desenvolvimento de equipamentos com as mais variadas aplicações. As primeiras invenções que surgiram a partir desses experimentos não eram muito eficientes, tampouco tinha muito valor para indústria, pois deixavam a desejar na questão de geração de trabalho. Thomas Davenport em 1837 desenvolveu um pequeno motor elétrico capaz de movimentar trens de brinquedo, e Moritz von Jacobi em 1834 inventou um barco elétrico que navegou no Rio Neva, em São Petersburgo, mas ainda eram necessários avanços para trabalhos com grandes cargas. Isso ocorreu somente em 1888, quando Nicola Tesla e Mikhail Dolivo Dobrovolsky desenvolveram um motor elétrico capaz de realizar trabalhos de maiores magnitudes (RAMOS, 2009; CALVERT, 2015; USPTO, 2015).

Motores elétricos se tratam de máquinas as quais transformam energia elétrica em mecânica, sendo o tipo mais usado de motor, superando inclusive motores à combustão em especial devido à sua versatilidade (WEG, 2015).

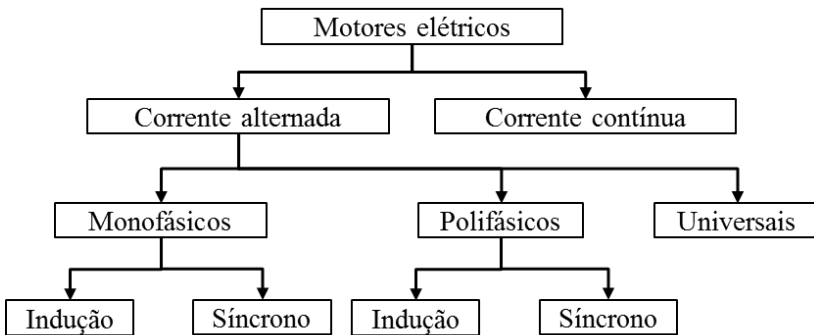
Uma divisão bastante simplificada dos motores elétricos é apresentada por Ramos (2009), contudo ela atende à necessidade de caracterizar o tipo de motor que será estudado neste trabalho. No diagrama da figura 1, os motores estudados neste trabalho são de corrente alternada, monofásicos e de indução. Os motores que funcionam com corrente contínua são usados na indústria quando é necessário um controle preciso da velocidade. Já os motores que funcionam com corrente alternada são os mais usados na indústria devido ao seu projeto simples e manutenção barata. Adicionalmente, sua alimentação é realizada por corrente alternada, que é a forma como a energia elétrica vem da rede. Esses são divididos em síncronos, cuja utilização na indústria se dá comumente nos casos de grande potência, ou assíncronos<sup>2</sup>, mais baratos, robustos e simples (RAMOS, 2009).

Nos motores de corrente alternada monofásicos assíncronos, o efeito de indução provocado pela passagem de corrente elétrica no estator faz com que o rotor seja rotacionado, o que possibilita que a

---

<sup>2</sup> Assíncronos ou de indução.

Figura 1 – Classificação simplificada dos motores elétricos.

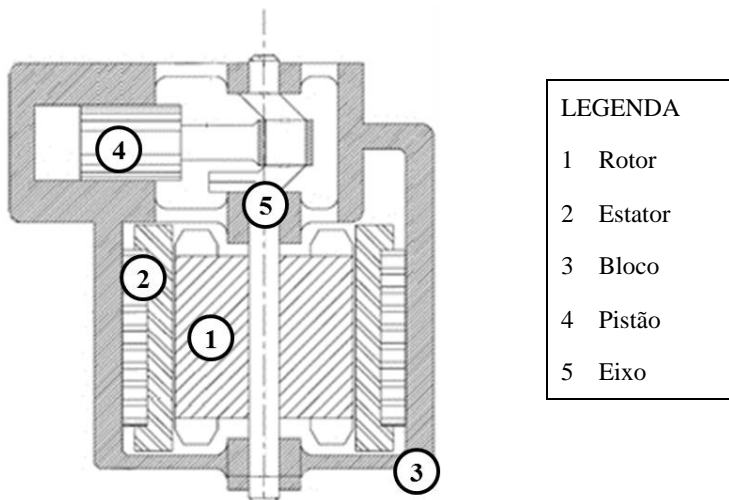


Fonte: adaptado de Weg (2015).

energia mecânica viabilize, por exemplo, a compressão de um fluido, conforme mostrado na figura 2 (WEG, 2015).

Essencialmente, o estator e o rotor são as partes mais importantes de um motor elétrico. O estator é a parte fixa do motor cuja função é

Figura 2 – Motor elétrico com rotor acoplado a um pistão por meio de um eixo.



Fonte: adaptado de Scussel (2006).

conduzir o fluxo magnético para rotacionar o rotor, a parte móvel, e é composto basicamente de um núcleo magnético e de bobinas, sendo primeiro responsável pela formação de polos no motor e o segundo pelo transporte de corrente elétrica para magnetização. Já o rotor é composto também de um núcleo magnético, para acompanhar os polos gerados pelo núcleo do estator e de um eixo, o qual é acoplado a outro mecanismo desejado (OLIVEIRA, 2015; WEG, 2015).

Mais informações sobre estatores, como sobre sua estrutura, serão apresentadas na seção 2.2.

## 2.2. ESTADORES

A concepção de estator utilizada no presente trabalho é a dotada de um núcleo magnético composto de uma estrutura sanduíche de lâminas de ferro com ranhuras, uma bobina principal, uma bobina auxiliar, isolantes e bandagens.

As bobinas são feitas em geral de alumínio ou cobre. Delas saem cabos compostos por condutores que são fixados, com a ajuda de cliques metálicos, dentro de uma caixa de tomadas<sup>3</sup>. Essa caixa é dotada de orifícios de conexão, nos quais entram os pinos do plugue, se conectando com os cliques, para transmitir a energia da fonte de tensão para as bobinas e, assim, movimentar o rotor.

A bobina principal é a parte que gera o efeito indutivo, movimentando o rotor. Contudo, na partida do motor, é necessário gerar uma defasagem no campo para iniciar a rotação e vencer a inércia, tarefa da bobina auxiliar, causando uma defasagem no campo magnético que permite que o motor inicie o movimento. As ranhuras do pacote são para alojar os condutores das bobinas e os isolantes, cuja finalidade é impedir o contato entre elas e as lâminas de ferro (ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, 2013, OLIVEIRA, 2015).

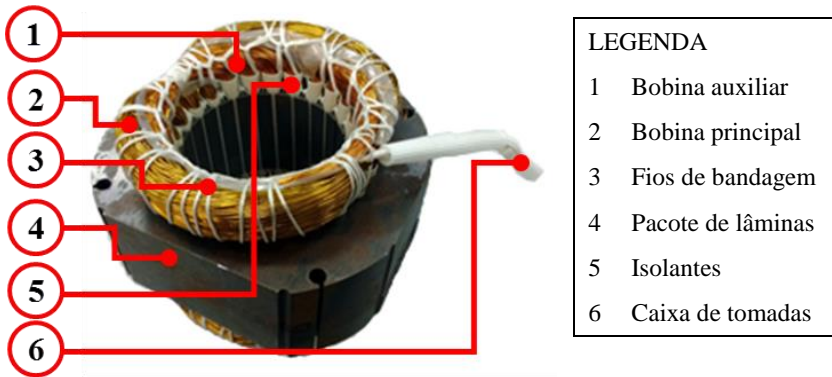
A figura 3 mostra um estator e identifica as partes aqui descritas. Na figura 4 é mostrada a caixa de tomadas e suas partes principais. E na figura 5 um clipe é mostrado, com detalhe para a fixação dos cabos que vêm da bobina.

Após a montagem de um estator, essa peça é acoplada a um bloco estrutural fundido, o qual também recebe posteriormente um rotor, formando o conjunto aqui denominado de conjunto estator-rotor-bloco (ERB). Um rotor é mostrado na figura 6 e um ERB na figura 7.

---

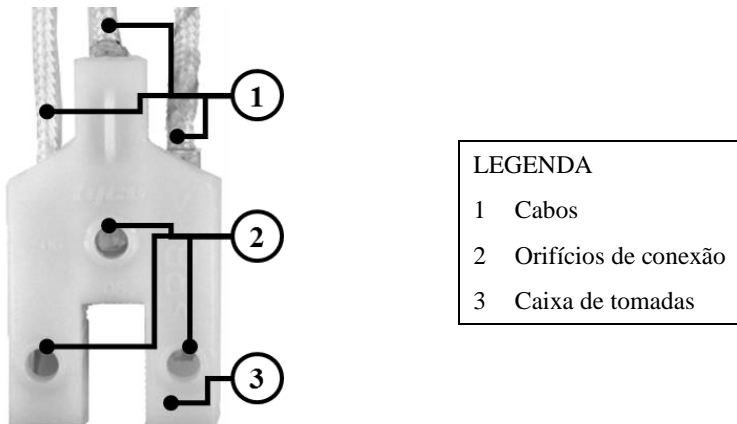
<sup>3</sup> Caixa de tomadas é o termo mais aceito na indústria para o conector elétrico do estator, portanto essa nomenclatura será mantida neste trabalho.

Figura 3 – Partes de um estator.



Fonte: autor.

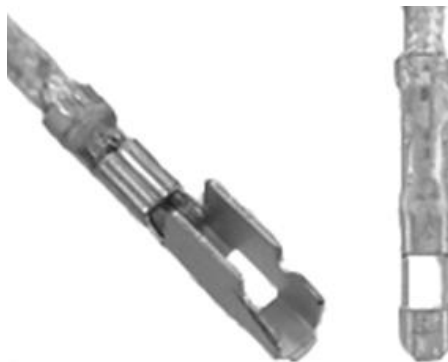
Figura 4 – Caixa de tomadas.



Fonte: autor.

A montagem do ERB precisa ser feita tendo em vista algumas precauções, em especial durante a inserção do rotor, quando podem ser produzidos vários tipos de defeito, como o deslocamento de isolantes e a movimentação de condutores da bobina.

Figura 5 – Clipe, à esquerda. À direita, sua parte inferior, evidenciando a fixação com o cabo.



Fonte: autor.

Figura 6 – Um rotor acoplado a um eixo.



Fonte: adaptado de Valco (2015).

Para o correto funcionamento do ERB, é necessário que a inserção seja feita da melhor maneira possível, deixando assim uma folga radial uniforme entre estator e rotor, de forma que esse último gire sem tocar nas paredes do primeiro.

No capítulo 3 são descritos defeitos em estatores e alguns deles aparecer durante essa etapa.

Figura 7 – ERB.



Fonte: autor.

### 2.3. VISÃO COMPUTACIONAL E VISÃO DE MÁQUINA

As definições dos termos “visão computacional” e “visão de máquina” costumam causar confusão por não haver um consenso sobre o assunto. Na língua inglesa, existem os termos “*computer vision*” e “*machine vision*” e há divergências em relação às suas traduções para o português.

Sistemas de visão (SV), também conhecidos pelo termo “visão de máquina”, são conjuntos de equipamentos dedicados à solução de um problema de natureza visual, compostos tanto por hardware quanto por software, fazendo o uso de técnicas de processamento de imagens e de visão computacional (VC). Já o processamento de imagens é o termo utilizado para designar processos cujas entradas e saídas são imagens, consideradas operações de baixo e médio nível. Por fim, VC é a extração de características importantes de imagens, as quais serão utilizadas para a tomada de decisão (FISHER et al, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2000).

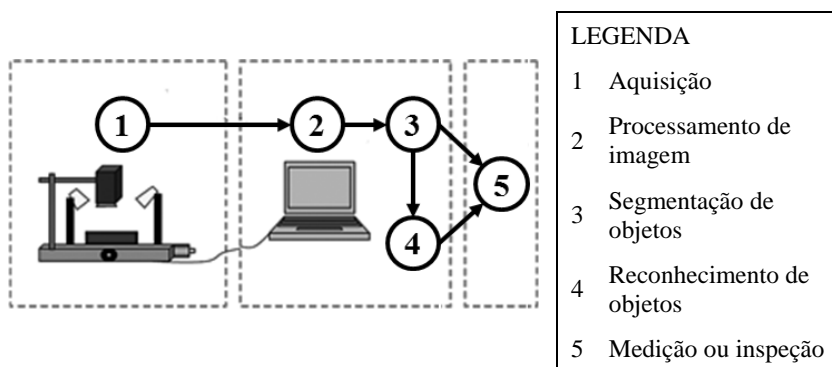
SV podem oferecer ótimos resultados em inspeções, sem entrar em contato com o objeto de estudo. Isso se deve muito ao fato de eles poderem eliminar aspectos como subjetividade, fadiga, lentidão e custo associados à inspeção humana (FELICIANO; SOUZA; LETA, 2005).

Feliciano, Souza e Leta (2005) dividem esquematicamente o funcionamento básico de um sistema de inspeção ou medição por visão computacional da seguinte maneira, acordando com a figura 8:

- aquisição, que é o processo de captura de uma imagem;
- processamento, em que se utilizam diversas ferramentas matemáticas a fim de preparar a imagem para as próximas etapas;
- segmentação de objetos, que é o isolamento dos objetos de interesse na imagem;
- reconhecimento dos objetos de interesse, em que a localização dos objetos é matematicamente determinada na imagem, e
- medição ou inspeção, que utiliza característica dos objetos para medi-los, podendo haver tomada de decisão com base nesse resultado.

Existem algumas características recorrentes para se chegar a bons resultados em VC: um sistema de iluminação adequado, uma câmera com resolução apropriada e ainda uma lente de acordo com as características dimensionais da bancada em questão, como será visto na seção 2.4. Depois, utiliza-se o processamento de imagens para melhorar sua qualidade, de forma a facilitar a segmentação de objetos, passo seguinte. Após essas, vem o reconhecimento dos objetos de interesse e, posteriormente, a inspeção ou medição desejada, sendo essas operações

Figura 8 – Procedimentos que compõem o funcionamento de um sistema de visão computacional.



Fonte: Adaptado de Feliciano, Souza e Leta (2005).

que se utilizarão das figuras reconhecidas (FELICIANO; SOUZA; LETA, 2005).

Hoje em dia, novas técnicas de visão computacional vêm sendo utilizadas com sucesso em muitas aplicações, como nas áreas da astronomia, medicina, análise de impressões digitais, metrologia, alimentos, soldagem, inspeções, entre outras (RUDEK; COELHO; CANGIOLIERI JUNIOR, 2011).

Como exemplos, podem-se citar os seguintes autores: Jampana, Shah e Kadali (2010) utilizaram técnicas de segmentação e detecção de borda para o monitoramento do nível da interface das fases de areias oleosas em decantadores, de forma a controlar a alimentação dessa areia dentro no equipamento; já Shafeek et al (2003) capturaram imagens de radiografias de soldas para detectar defeitos comuns nesse tipo de processo de fabricação, com o uso de gráficos de níveis de cinza; Pinto (2010) desenvolveu um sistema óptico portátil para medição de superfícies livres de grande extensão, como blocos de motores; ainda, Girolami et al (2012) fizeram uso de uma câmera industrial para substituir um colorímetro, o qual determinava cores de carnes de forma a indicar a qualidade delas; ainda na indústria alimentícia, ElMasry et al (2012) desenvolveram um sistema de visão para avaliação da forma de batatas, determinando também sua qualidade; Nagarajan et al (2006) utilizaram um sistema de visão para inspecionar a fabricação de placas de circuito integrado; Burin (2010) propôs um protótipo de um sistema de visão estereoscópico para monitoramento da posição de pêndulos em barragens; e Haertel (2009) desenvolveu um sistema de medição portátil utilizando fotogrametria para inspeção da parte externa de dutos expostos a corrosão. É perceptível, pois, que o uso de VC para detecção de defeitos em ambiente industrial é interessante e viável (BELLON, 1990).

Nas seções 2.4, 2.5 e 2.6, mais informações serão fornecidas sobre algumas das etapas ilustradas na figura 8.

#### 2.4. AQUISIÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Nesta seção, aborda-se o processo de obtenção uma imagem e sobre pontos a serem considerados para se conseguir bons resultados nessa captura.

O princípio da captura eletrônica de imagens passa pelo fato que a imagem de uma cena, ao passar por uma lente e ser projetada num sensor corretamente, representa bidimensionalmente algo que está no



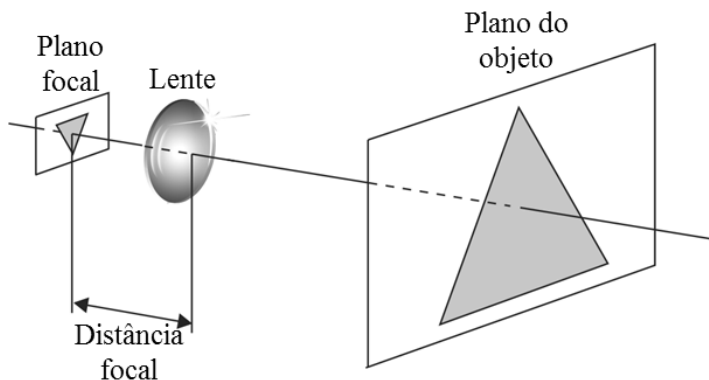
espaço tridimensional, relacionando a imagem à cena por leis físicas e geométricas (HOFMANN, 2012).

Na figura 9, a imagem de um objeto, representada pelo plano do objeto, passa pela lente, sendo projetada no plano focal,  $l$ , o qual contém o ponto focal. Esse é o ponto onde deve estar o sensor da lente para a imagem estar focalizada.

Cada imagem capturada por uma câmera pode ser convertida numa matriz  $N \times M$  cujos elementos, os quais são chamados de pixels (*picture elements*), representam uma intensidade de luz que atingiu o sensor da câmera. Para imagens em tons de cinza, as quais serão utilizadas neste trabalho, os valores de intensidade de luz contidos em cada pixel são os níveis de cinza.

Esse processo de captura que ocorre quando uma imagem é obtida consiste em uma digitalização, tendo em vista que uma cena é composta por intensidades contínuas de luz que podem ser definidas para qualquer ponto da cena e que uma imagem digital representa apenas pontos discretos da cena no espaço através de um conjunto de valores discretos em amplitude. O processo de escolha das localizações físicas dos pontos da cena que serão representados na imagem digital é chamado de amostragem. Por outro lado, a representação de um valor contínuo em amplitude através de um conjunto de valores discretos em amplitude recebe o nome de quantização (FISHER et al, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2000).

Figura 9 – Planos focal e do objeto e distância focal.



Fonte: autor.

Logicamente, tanto a amostragem quanto a quantização agregam erros próprios a processos de digitalização, como em qualquer dispositivo eletrônico. É interessante considerá-los, em especial quando se utilizam imagens para realizar medições.

Para que bons resultados sejam obtidos na captura de imagens com câmeras digitais e lentes, são importantes os quatro seguintes pontos (POINT GREY, 2015):

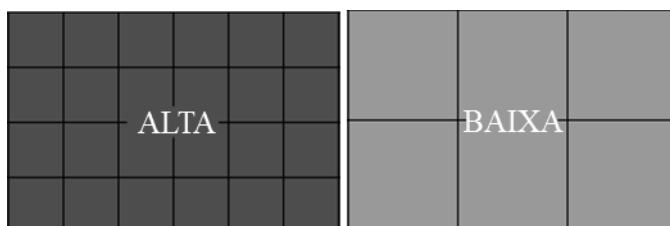
- o acoplamento da lente na câmera;
- o tamanho do sensor da câmera;
- a resolução espacial do sensor da câmera e
- a distância focal da lente.

Acoplamentos de lente podem ser encontrados mais comumente com a denominação C ou CS. Isso determina a distância entre o plano focal, onde deve estar o sensor da câmera, e a flange da lente, onde inicia a rosca cuja função é fazer o acoplamento entre as partes. Para C, essa distância é de aproximadamente 17,5 mm, enquanto que para CS, é 12,5 mm. Uma câmera com acoplamento CS pode ser usada com uma lente C, se for utilizado um espaçador. Entretanto, o contrário não é verdade. Uma câmera C não pode ser usada com uma lente CS, pois o foco não será alcançado (POINT GREY, 2015). A garantia do correto acoplamento entre lente e câmera é importante para a obtenção de uma imagem nítida.

Em relação ao tamanho do sensor da câmera, sabe-se que a lente precisa ser dimensionada para corresponder no mínimo a ele, de modo que a imagem projetada por ela consiga cobri-lo todo. Uma câmera com um sensor maior do que o contemplado pelas especificações da lente produzirá uma imagem circular, com o restante em preto, tendo em vista que a imagem projetada nele não conseguirá cobri-lo por inteiro. O caso contrário fará com que o sensor esteja exposto somente à porção central da imagem (POINT GREY, 2015).

Outro fator relevante na seleção de equipamento para aquisição de imagens é resolução espacial do sensor. Essa se trata da quantidade de pixels nas direções horizontal e vertical numa imagem em questão. Para cada aplicação existe uma determinada resolução mínima necessária para detectar objetos de interesse na imagem capturada. A resolução fornecida por um sensor pode afetar o tamanho que cada pixel vai ter em sua superfície, e isso é relevante para que ele consiga discernir corretamente detalhes da imagem. Um sensor com grande resolução costuma ser também grande para que seus pixels não sejam pequenos. Isso é mostrado na figura 10. Para um mesmo tamanho de

Figura 10 – Tamanhos de pixel em sensores.

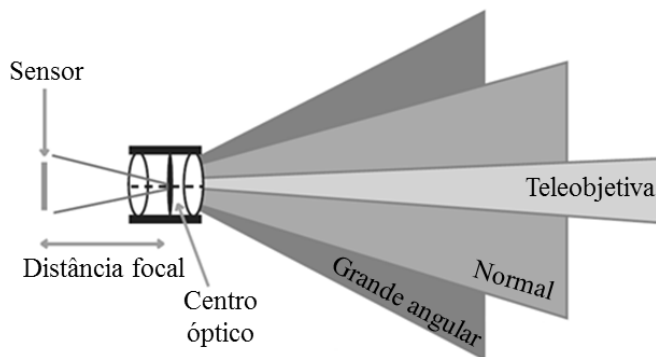


Fonte: adaptado de Spatial (2015).

sensor, uma resolução alta e uma baixa têm tamanhos de pixel pequenos e grandes, respectivamente.

Por fim, o último ponto é a distância focal. Uma lente com a distância focal aproximadamente igual à diagonal do sensor da câmera produz uma imagem semelhante à criada pelo olho humano, sendo chamada de normal. Lentes com distância focal menor que o normal são chamadas lentes grande angulares. As com distância maior, por outro lado, são denominadas lentes teleobjetivas. Grande angulares capturam um campo de visão maior que normais. Já as teleobjetivas um campo de visão menor. Na figura 11, essas características são ilustradas (POINT GREY, 2015; COMPUTAR, 2014).

Figura 11 – Relação entre o campo de visão e a distância focal.



Fonte: adaptado de Computar (2014).

## 2.5. PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

São abordadas nesta seção ferramentas para aprimorar a qualidade de imagens digitais.

Para que se chegue à etapa 5 ilustrada na figura 8 obtendo bons resultados, primeiramente será visto o papel das transformações de intensidade e dos filtros de imagem presentes na etapa 2 da mesma.

Transformações de intensidade<sup>4</sup> são alterações no nível de cinza de cada pixel de uma imagem digital individualmente, de modo a obter algum resultado desejado. Existem muitos operadores para realização de transformações de intensidade em processamentos de imagens. São alguns exemplos: negativos de imagem, alargamento de contraste, operações matemáticas com os níveis de cinza dos pixels, como adição subtração, multiplicação, divisão, média e mediana, entre outros<sup>5</sup>. O alargamento de contraste e o negativo de imagem foram utilizados nos algoritmos das seções 4.2 e 6.1, sendo o primeiro para aumentar a diferença numérica entre níveis de cinza de uma imagem, melhorando o contraste, e o segundo para realizar a inversão dos níveis de intensidade de luz, produzindo o equivalente ao negativo de filmes fotográficos (FISHER et al, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2000; SCOTT; MCCANN, 2005). Na figura 12, são mostradas suas utilizações.

Filtros de imagem são técnicas para realçar partes de interesse da imagem e comumente são classificados em duas grandes categorias: espaciais e no domínio da frequência. Os espaciais tratam-se da manipulação direta do valor de cinza dos pixels no plano da imagem, enquanto que no domínio da frequência, são feitas modificações em seus componentes de frequência (SCOTT, MCCANN; 2005).

Os filtros espaciais utilizam máscaras para gerar alterações numa determinada imagem. Máscaras são matrizes cuja função é relacionar os valores de intensidade de luz onde ela está centrada baseando-se nos valores dos pixels da vizinhança. Um desses filtros pode ser visto na figura 13. Quando o centro da máscara estiver na posição  $(x,y)$  da imagem, a intensidade de luz dessa posição é substituída na imagem filtrada por um valor  $S$ , o qual consiste na soma dos produtos dos coeficientes dos elementos da matriz que representa a máscara pela sua intensidade. Essa máscara vai se movendo pela imagem até que todos os pixels tenham sido cobertos. Nas bordas da imagem, o cálculo de  $S$  é

---

<sup>4</sup> Também conhecidas pelo termo realce ponto-a-ponto.

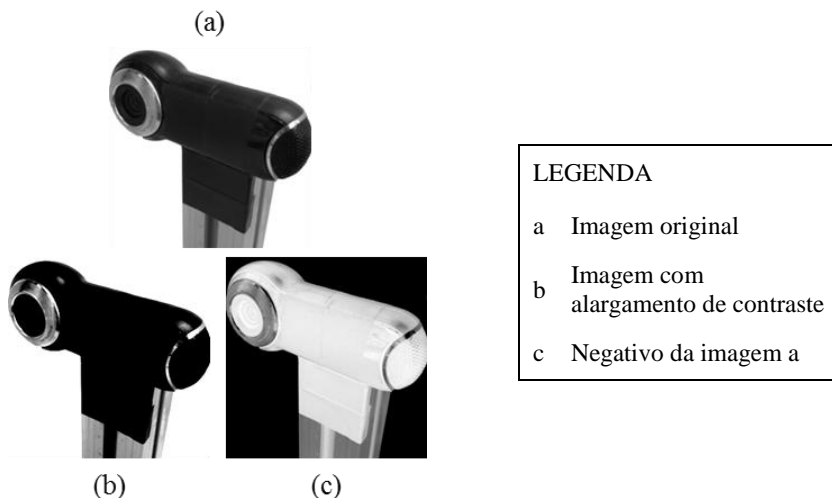
<sup>5</sup> Mais informações podem ser vistas em Gonzalez e Woods (2000) e Fisher et al (2014).

adaptado para considerar apenas os elementos da máscara que representam pixels dentro da imagem. Cada tipo de filtro terá um tipo de máscara específico (GONZALEZ, WOODS, 2000; SCOTT, MCCANN, 2005).

Filtros no domínio da frequência utilizam o espectro de frequências de uma imagem, determinado através de sua transformada de Fourier, gerando uma função bidimensional de intensidade desse espectro da imagem. Após o processamento desejado, a transformada inversa dessa função é calculada, gerando a imagem com as modificações desejadas. Em muitos trabalhos, também é comum o emprego de imagens que representam individualmente as partes real e imaginária da imagem transformada, bem como imagens que representam as fases e a magnitude da função intensidade transformada. (GONZALEZ, WOODS, 2000; SCOTT, MCCANN, 2005).

Na figura 14, são mostradas duas imagens com comportamentos periódicos e suas transformadas. , onde (b) representa o espectro de (a) e (d) o de (c). As imagens (a) e (c) têm comportamento periódico facilmente identificável, sendo (a) com direção horizontal e (c) vertical, isto é, a imagem se repete horizontalmente e verticalmente,

Figura 12 – Imagem e suas transformações de intensidade.

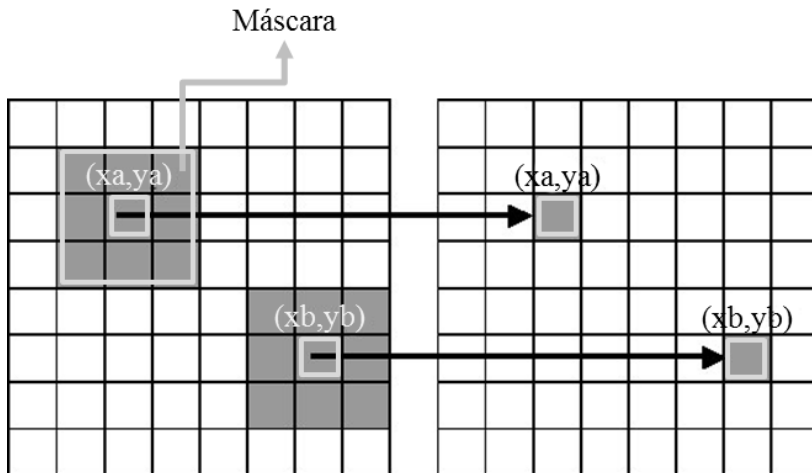


Fonte: autor.

respectivamente. Esse comportamento é utilizado aqui para facilitar a explicação do que representa a função de intensidade do espectro de frequências da imagem, pois é possível se perceber que a função de intensidade só tem valor diferente de zero nas direções nas quais a imagem é periódica. Os pontos representam as amplitudes das transformadas. Nas frequências nas quais as amplitudes são maiores, os pontos que as representam são mais claros. Em suma, em (b) e (d) os pontos representam a frequência e a amplitude do sinal representado pelas imagens (a) e (c). Na figura 15, uma imagem mais complexa e sua transformada são mostradas em (a) e (b), respectivamente.

Uma técnica de processamento de imagens bastante comum é a chamada suavização, usada para atenuar ruídos, suavizar contornos e remover detalhes de uma imagem. São ferramentas de suavização<sup>6</sup> os filtros passa-baixas tanto os espaciais, usando máscaras com elementos iguais, quanto espectrais, apagando no mapa de intensidade resultante da transformação as frequências mais altas, e ainda os operadores como média e mediana. (GONZALEZ, WOODS, 2000; SCOTT, MCCANN, 2005).

Figura 13 – Demonstração da máscara espacial em uma imagem genérica e seu funcionamento.



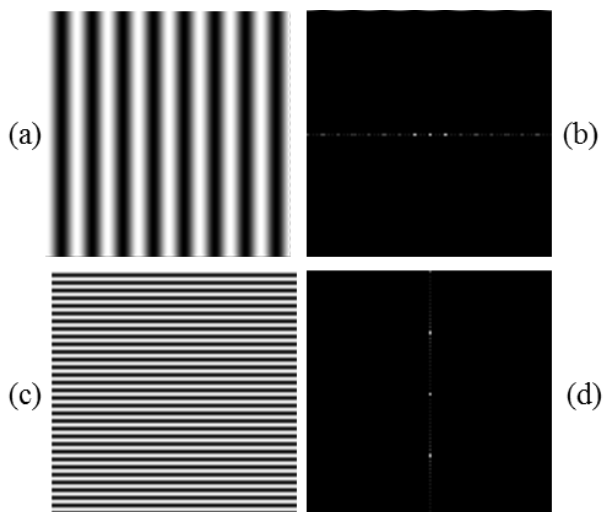
Fonte: adaptado de Tracer (2015).

<sup>6</sup> Também chamados de passa-baixas.

Outra técnica relevante é a ênfase<sup>7</sup>. As ferramentas que implementam essa técnica fazem de certa forma o papel contrário das de suavização: ênfase detalhes finos e bordas. Com uma máscara cujo valor central seja alto e os outros negativos, um filtro espacial de aguçamento cumpre seu papel, deixando as bordas das imagens mais evidentes. A versão espectral atenua as componentes de frequência mais baixa da imagem, chegando a resultados similares. Ainda, existem filtros espaciais especiais que utilizam derivadas dos valores de cinza de uma máscara em questão para fazer o aguçamento, como por exemplo, o Prewitt e o Sobel<sup>8</sup>, os quais foram usados no desenvolvimento de alternativas de projeto. Esses costumam resultar em imagens nas quais somente as bordas aparecem, o que pode ser bastante útil em aplicações industriais (GONZALEZ, WOODS, 2000; SCOTT, MCCANN, 2005).

Na figura 16, a imagem original (a) de uma webcam é filtrada por suavização em (b), por aguçamento em (c) e por aguçamento com derivada em (d). Todas essas técnicas foram utilizadas nos algoritmos

Figura 14 – Imagens periódicas e suas transformadas.



Fonte: adaptado de Brayer (2015).

<sup>7</sup> Também chamado de aguçamento, realce de detalhes, ou ainda de passa-altas.

<sup>8</sup> Os operadores Prewitt e Sobel têm resultados semelhantes quando aplicados em imagens. Contudo, quando se deseja suavizá-la também, o Sobel é o mais indicado, pois sua máscara atua também como passa-baixas.

Figura 15 – Imagem não periódica, mais complexa, e sua transformada.



Fonte: adaptado de Exoto (2015).

descritos nas seções 4.1, 4.2, 5.2 e 6.1.

Uma dúvida pode surgir em relação a qual tipo de filtro usar, tendo em vista que os efeitos descritos podem ser conseguidos tanto através de filtros espaciais quanto do domínio da frequência. Na maioria das aplicações, máscaras espaciais são mais usadas pela simplicidade de implementação e velocidade, deixando os outros filtros para aplicações mais específicas e complexas (GONZALEZ, WOODS, 2000).

Uma última forma de se acentuar as bordas de uma imagem é o uso da limiarização<sup>9</sup> Ela é uma ferramenta simples de ser implementada, ocupando posição de destaque no trabalho com imagens digitais, sendo considerada importante tanto para a parte de processamento de imagens quanto para a parte de segmentação. De forma simples, pode-se dizer que ela determina um nível de cinza, e atribui a todos os pixels que tenham níveis abaixo desse para zero e todos os com níveis maiores para o nível máximo do sistema de cores utilizado. Na figura 17, um exemplo de limiarização é mostrado. Na imagem (a), é apresentado um corte tomográfico de uma cabeça humana, e na (b), a limiarização de (a).

## 2.6. SEGMENTAÇÃO DE OBJETOS EM IMAGENS DIGITAIS

Conforme a figura 8, após o processamento vem a parte de segmentação da imagem a qual, como visto, trata-se da seleção das partes relevantes para uma determinada aplicação. Nesta seção, aborda-se sobre essa etapa.

---

<sup>9</sup> Do termo em inglês, *thresholding*.



Figura 16 – Uma imagem filtrada de diferentes formas.



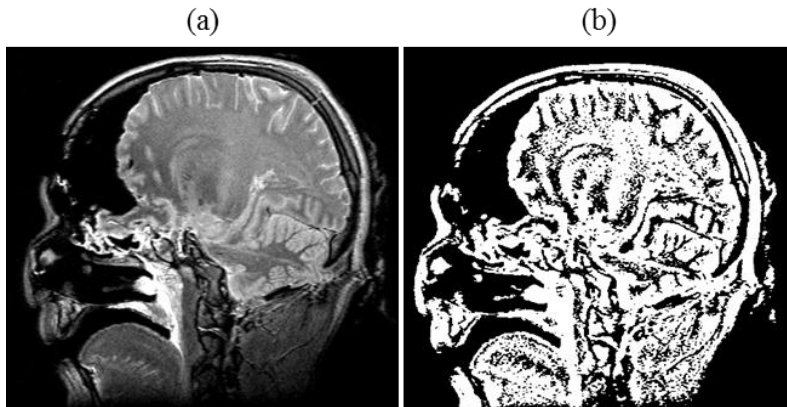
Fonte: adaptado de Brayer (2015).

De forma geral, a segmentação de imagens é uma etapa bastante importante, pois sua precisão determina o sucesso ou falha dos passos subsequentes (GONZALEZ; WOODS, 2000; SCOTT; MCCANN, 2005).

Algoritmos de segmentação são em geral baseados em descontinuidades, representadas por mudanças abruptas de intensidade, e similaridades, que são propriedades comuns de regiões da imagem (SCOTT; MCCANN, 2005).

Primeiramente falando sobre descontinuidades, em imagens digitais existem basicamente três tipos de abordagem: pontos, linhas e bordas (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Figura 17 – Um corte tomográfico e o resultado da operação de limiarização sobre ela.



Fonte: adaptado de Core Optical Inc. (2015).

No primeiro caso, os pontos podem ser obtidos de maneira direta, usando a mesma máscara do filtro passa-altas descrita nesta seção, e diz-se que um ponto foi encontrado numa determinada posição quando o resultado da máscara for maior que um limiar arbitrário, escolhido de forma que o ponto encontrado corresponda a um com o nível de cinza consideravelmente diferente que seus vizinhos (GONZALEZ; WOODS, 2000).

No segundo, faz-se o uso de quatro máscaras com os mesmos valores, mas em orientações diferentes, defasadas de  $90^\circ$  uma da outra, de forma a detectar linhas em todas as direções (GONZALEZ; WOODS, 2000).

O terceiro caso, detecção de bordas, é uma situação mais comum. Uma borda é o limite entre duas regiões com níveis de cinza que diferem uma quantidade desejada. Para executar essa tarefa, usa-se um operador de borda, o qual se trata de um operador matemático desenvolvido para tal fim. Dentre os vários tipos, o mais comum é o operador por gradientes chamado laplaciano, numa técnica de nome cruzamento por zeros, que utiliza as derivadas segundas dele para localizar a borda (GONZALEZ; WOODS, 2000; SCOTT; MCCANN, 2005).

Após determinada a localização das bordas, é necessário fazer a união delas. Em situações práticas, dificilmente o resultado da procura por bordas gera um fronteira sem falhas. Isso acontece por causa de efeitos como ruídos e iluminação não uniforme. Uma das técnicas mais empregadas para união dessas entidades é o ajuste de curvas, o qual tenta encaixar uma forma geométrica conhecida nas informações de descontinuidades que foram encontradas (GONZALEZ; WOODS, 2000; SCOTT; MCCANN, 2005).

Dos algoritmos baseados em similaridade, os que utilizam a limiarização, descrita acima, são os mais comuns.

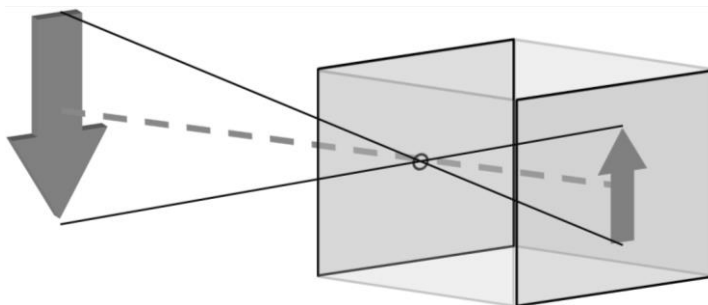
Existem também algoritmos de procura por padrões na imagem, os quais foram utilizados no capítulo 6. De forma simples, uma imagem denominada padrão é escolhida para ser encontrada em outras imagens e, quando encontrada, são fornecidas sua posição e orientação. Isso é útil para limitação da área de trabalho na imagem desejada, inspeções do tipo presença-ausência, cálculo de orientação da imagem, entre outras aplicações.

## 2.7. CÂMERA *PINHOLE*

Para relacionar pontos da imagem capturada com o ambiente o qual ela representa, existem muitos modelos matemáticos. O chamado modelo de câmera *pinhole* tem seu primeiro relato feito por Mozi, na China, por volta de 500 a.C.. A câmera *pinhole* é uma forma de se capturar imagens de um ambiente, utilizando somente uma caixa com um filme fotossensível dentro, cuja única entrada de luz é um pequeno orifício – o furo de agulha, do inglês *pinhole*. Se for ignorado o fato de a luz ser uma onda, ela pode ser tratada como raios que se propagam em linha reta em um meio homogêneo (STEGER; ULRICH; WIEDERMANN, 2008). Pensado dessa forma, o modelo de câmera *pinhole* pode ser esquematizado como um dispositivo composto de uma câmara escura e um pequeno orifício, chamado de centro de projeção, o qual permite a passagem de luz. Quando esse dispositivo está com a face do orifício voltada para uma cena, forma-se na face oposta ao centro de projeção uma imagem real e invertida da cena alvejada, conforme pode ser visto na figura 18. A forma como a imagem se forma é utilizada hoje em dia cientificamente como modelo matemático de captura de imagens em câmeras, sendo o mais utilizado no mundo (CMS, 2015; NEEDHAM, 1986; STEGER; ULRICH; WIEDERMANN, 2008).

Infinitos pontos no espaço podem ser projetados no anteparo, desde que exista uma reta que passe por esse ponto, pelo centro de

Figura 18 – Formação da imagem em uma câmera *pinhole*.



Fonte: autor.

projeção e que seja concorrente ao plano da imagem, conforme está mostrado na figura 19.

Através de semelhança de triângulos, a relação ilustrada na figura 19 é encontrada e mostrada na equação 1 (STEGER; ULRICH; WIEDERMANN, 2008).

$$y = \frac{-fY}{Z} \quad \text{Eq. 1}$$

onde

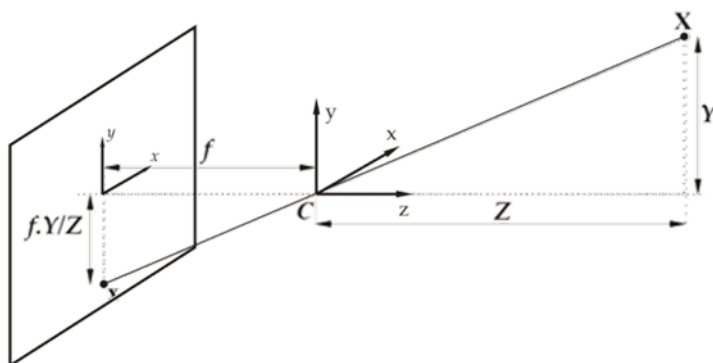
$y$	altura $Y$ no plano da imagem
$f$	distância focal
$Y$	altura de um objeto
$Z$	distância do centro óptico ao objeto

O sinal negativo aparece devido ao fato de a imagem ser invertida. Como mostrado, essa equação pode ser estendida para outras dimensões e será usada na seção 5.1 deste trabalho.

## 2.8. MEDIÇÕES E SEUS ERROS

É necessário relembrar alguns conceitos de metrologia úteis para o entendimento do trabalho para o entendimento deste trabalho, tendo em vista que um dos sistemas apresentados se trata de uma medição. Para tal abordagem, optou-se pelo tratamento de incertezas adotado no Guia de expressão da incerteza de medição 2008 (GUM), traduzido por Inmetro (2008).

Figura 19 – Projção de um ponto qualquer no espaço 3D.



Fonte: adaptado de Hoffmann (2006).

A medição de um objeto é o procedimento através do qual se encontra o valor de uma grandeza física, denominada mensurando, utilizando um sistema de medição (SM) (ALBERTAZZI G. JR.; SOUSA, 2008).

No início do século XIX, para tentar quantificar a qualidade de uma medição, K. F. Gauss propôs a chamada Teoria do Erro, a qual sugeria que qualquer grandeza física a se medir tinha um valor verdadeiro e a variabilidade encontrada nos resultados de medição era derivada da introdução de erros no processo (SALICONE, 2007). De fato, devido a fatores como imperfeições do SM e as condições do ambiente onde o procedimento é efetuado, torna-se inviável medir sem cometer erros, fazendo com que eles sejam um objeto de estudo necessário (ALBERTAZZI G. JR.; SOUSA, 2008).

Considerando sua natureza, erros de medição são comumente divididos em duas categorias: erros sistemáticos e erros aleatórios. Os primeiros se tratam de erros os quais, sob o mesmo procedimento, mesmo instrumento e mesmas condições de referência, apresentam o mesmo módulo e sinal, se repetindo equivalentemente em todas as medições, possibilitando a correção parcial ou total de seu efeito (ALBERTAZZI G. JR., SOUSA, 2008). Já os aleatórios são erros que levam repetições no processo de medição a ter resultados diferentes, e que podem ser reduzidos com o aumento no número de observações (SALICONE, 2007).

A Teoria do Erro de Gauss foi substituída pela Teoria da Incerteza no final do século XX. A incerteza representa a falta de conhecimento do valor exato do mensurando, a parcela de dúvida da grandeza medida (SALICONE, 2007). Aqui vale ressaltar a diferença entre erro de medição e incerteza. Segundo o Inmetro (2014, p. 21), erro de medição é a “diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência”. Cada indicação diferente levará a um erro diferente, de maneira que não é possível corrigi-lo totalmente, levando a uma zona de dúvida, a qual então caracteriza a incerteza (ALBERTAZZI G. JR.; SOUSA, 2008).

Erros sistemáticos e aleatórios costumam assumir valores diferentes dependendo da indicação dada pelo SM. Aqui, portanto, se faz importante outra definição. De acordo com Inmetro (2014, p. 38), o intervalo de medição é o “conjunto de valores de grandezas da mesma natureza que pode ser medido por um dado instrumento de medição”. Para cada valor desse intervalo, de fato esses erros tendem a se comportar de maneira diferente.

Quanto à forma de obtenção do resultado de medição, pode se ter medições diretas e indiretas. As diretas são resultado direto da aplicação do SM no mensurando. Já as indiretas refletem impossibilidade de obtenção de determinada grandeza dessa maneira (ALBERTAZZI G. JR.; SOUSA, 2008), sendo necessário o uso de uma ou mais grandezas para tanto, essas chamadas de grandezas de entrada, as quais são obtidas via medição direta. A partir de uma determinada equação a qual as relacione, denominada função de medição, encontra-se a grandeza de saída desejada (INMETRO, 2014). Ainda, em medições indiretas, surge uma questão interessante, que é a possibilidade de as grandezas de entrada apresentarem correlação. Existe correlação entre duas grandezas quando a variação de uma tem algum sincronismo com a variação de outra, isto é, quando o aumento ou diminuição de uma estiver relacionado com o aumento ou diminuição da outra. De acordo com essa relação, as grandezas podem ser classificadas em correlacionadas, não correlacionadas ou com correlação parcial (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; AYYUB; KLIR, 2006). Em cada caso, a incerteza relativa à grandeza de saída tem um tratamento matemático diferente.

As grandezas de entrada podem ser consideradas variáveis aleatórias. Uma variável aleatória é uma que “pode assumir qualquer um dos valores de um conjunto especificado de valores e com a qual está associada uma distribuição de probabilidade”, segundo Inmetro (2008, p. 39). É comum a representação da faixa de valores de uma variável aleatória através de um intervalo de números reais. Como teoricamente a

quantidade de valores é infinita, pode se usar uma função conhecida como função densidade de probabilidade para expressar a distribuição de probabilidades dos possíveis valores que uma variável aleatória pode assumir (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Uma função densidade de probabilidade pode assumir qualquer forma, sendo as mais comumente empregadas a normal e a retangular (FIGLIOLA; BEASLEY, 2000).

O resultado de uma medição em geral depende de uma série de fatores, conhecidos ou não. Há um teorema, chamado Teorema Central do Limite, o qual diz que quanto maior o número de fatores que influenciam o valor de variável aleatória, mais a forma da distribuição dessa variável se aproxima de uma distribuição normal. Dessa forma, medições muitas vezes se apresentam em uma forma aproximada à distribuição normal, chamada distribuição t de Student<sup>10</sup> (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

A incerteza de medição calculada com base no desvio padrão de n repetições avalia a repetibilidade de um SM. De acordo com Inmetro (2014), a repetibilidade é a precisão de uma medição num mesmo procedimento padronizado, com os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo ambiente. Numa função distribuição normal, pegando um valor de desvio padrão para um lado da média e esse mesmo valor para outro, aproximadamente 68% dos possíveis valores da variável serão abrangidos. Porém, em metrologia, costuma-se usar um intervalo de confiança de aproximadamente 95%. Para mudar o valor da incerteza para esse intervalo, portanto, é necessário multiplicá-lo por um coeficiente que o aumente, caracterizando a maior zona de abrangência. O coeficiente t de Student, o qual depende basicamente do intervalo de confiança e do número de graus de liberdade da medição, que é o número de repetições menos um, pode ser usado para isso.

Outra definição importante para medições tem a ver com a variabilidade do mensurando. De acordo com Albertazzi e Sousa (2008, p. 171), “um mensurando é considerado invariável se seu valor permanecer constante durante o período em que a medição é efetuada”, e “é variável quando seu valor não é único, mas varia em função da posição, do tempo ou de outros fatores”. Tecnicamente, nada é invariável. Contudo, não faz sentido considerar variações imperceptíveis num mensurando. Assim, na prática, o mensurando é considerado

---

<sup>10</sup> A distribuição foi desenvolvida por William Sealy Gosset, usando o pseudônimo de Student, em 1908.

invariável se suas variações forem inferiores à resolução do SM utilizado e variável se forem superiores.

A expressão matemática de um resultado de medição e o meio pelo qual se chega a ele dependem do fato de o mensurando ser variável ou invariável e de a medição ser direta ou indireta. Há ainda a diferenciação do tratamento desses dados caso decida-se pela não correção dos erros sistemáticos. Assim, se numa medição direta um mensurando é influenciado apenas por uma fonte de incertezas, ou uma delas é dominante em relação às outras, isto é, muito maior que as outras, segundo Albertazzi e Sousa (2008), um resultado de medição pode ser expresso por uma das equações do quadro 1. No caso, a incerteza dominante é a repetibilidade, tendo em vista que expressões diferentes aparecem com ela representando a parcela de incerteza devido ao aumento do número de indicações obtidas. Ainda, a correção  $C$  é o fator que é somado a uma média de  $n$  indicações que corrige o efeito dos erros sistemáticos em um ponto sendo, portanto, o oposto da tendência.

Quadro 1 – Expressões para obtenção da incerteza de medições diretas.

		Corrigindo Es	Não corrigindo Es
Mensurando invariável	$n = 1$	$I + C \pm Re$	$\bar{I} \pm E_{m\acute{a}x}$
	$n > 1$	$\bar{I} + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}}$	
Mensurando variável	$n > 1$	$\bar{I} + C \pm t \cdot u$	$\bar{I} \pm (E_{m\acute{a}x} + t \cdot u)$

onde

$E_s$	Erro sistemático
$n$	Números de medições efetuadas
$I$	Uma indicação
$C$	Correção do erro sistemático
$Re$	Incerteza relativa à repetibilidade
$\bar{I}$	Média de $n$ indicações
$E_{m\acute{a}x}$	Erro máximo do SM
$t$	Coefficiente t de Student
$u$	Incerteza relativa à variação das $n$ indicações

No caso da presença de mais fontes de incerteza, o problema se torna mais complexo. Os termos que aparecem nas expressões do quadro 1 após os símbolos não são os dominantes, de forma que passa a ser necessário o cálculo da incerteza combinada de todas as fontes relevantes. Mesmo o termo da correção necessita ser revisto, pois é comum que fontes de incerteza diferentes agreguem também correções à



complexidade do problema. A equação 2 mostra a expressão para o cálculo da incerteza de medição combinada e a equação 3 a da correção combinada (INMETRO, 2008) Os símbolos  $u$  representam a incerteza padrão de cada grandeza que se trata de, segundo Albertazzi e Sousa (2008; p. 57), “uma medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição, correspondendo ao desvio-padrão dos erros de medição”.

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2 \quad \text{Eq. 2}$$

onde

$u_c$	incerteza combinada
$u_i$	i-ésima incerteza
$n$	número de fontes de erro diferentes

$$C_c = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad \text{Eq. 3}$$

onde

$C_c$	correção combinada
$C_i$	i-ésima correção
$n$	número de fontes de erro diferentes

Cada fonte de incerteza de um determinado grau de liberdade, baseado na quantidade de repetições que foram feitas para se determinar a sua incerteza. Ao combiná-las, naturalmente todos os graus de liberdade precisam ser levados em conta para se determinar corretamente o coeficiente t de Student efetivo para expandir a incerteza combinada encontrada para o intervalo de confiança de 95%, gerando o valor U conhecido como incerteza expandida. Para tanto, utiliza-se a equação de Welch-Satterthwaite mostrada na equação 4 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \frac{u_3^4}{v_3} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n} \quad \text{Eq. 4}$$

onde

$u_c$	incerteza combinada
$u_i$	i-ésima incerteza
$n$	número de fontes de erro diferentes
$v_i$	i-ésimo grau de liberdade
$v_{ef}$	grau de liberdade efetivo

Com isso, para calcular a expressão final de um resultado de uma medição com várias fontes de incerteza, basta utilizar as equações 2, 3 e 4 e utilizar a expressão da equação 5 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$RM = \bar{I} + C_c \pm U \quad \text{Eq. 5}$$

onde

$RM$	resultado da medição
$\bar{I}$	média das indicações
$C_c$	correção combinada
$U$	incerteza expandida

Conforme visto anteriormente nesta seção, uma medição indireta depende de outras grandezas, o que é matematicamente escrito na equação 6.

$$G = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{Eq. 6}$$

onde

$G$	grandeza de saída
$X_i$	i-ésima grandeza de entrada

A equação 7 é a utilizada para se calcular a incerteza da grandeza de saída G (INMETRO, 2008).

$$u(G)^2 = \left[ \frac{\partial G}{\partial X_1} u(X_1) \right]^2 + \left[ \frac{\partial G}{\partial X_2} u(X_2) \right]^2 + \dots + \left[ \frac{\partial G}{\partial X_n} u(X_n) \right]^2 \quad \text{Eq. 7}$$

onde

$u(G)$	incerteza combinada da grandeza G
$X_i$	i-ésima grandeza de entrada
$\frac{\partial G}{\partial X_i}$	coeficiente de sensibilidade relacionada à i-ésima grandeza de entrada
$u(X_i)$	incerteza padrão da i-ésimo grandeza de entrada que está sendo combinada

É possível que as grandezas estudadas sejam correlacionadas. Contudo esse grau de correlação é desconhecido. Para essa situação, a equação 7 é alterada para considerar o pior caso, ou seja, o caso no qual não se conhece se a correlação é direta ou inversa nem qual sua magnitude, sendo necessário considerar a incerteza máxima. Desta forma, usa-se uma equação 8 abaixo.

$$u(G) = \left| \frac{\partial G}{\partial X_1} \right| u(X_1) + \left| \frac{\partial G}{\partial X_2} \right| u(X_2) + \dots + \left| \frac{\partial G}{\partial X_n} \right| u(X_n) \quad \text{Eq. 8}$$

onde

$u(G)$	incerteza combinada máxima da grandeza G
$X_i$	i-ésima grandeza de entrada
$\frac{\partial G}{\partial X_1}$	coeficiente de sensibilidade relacionada à i-ésima grandeza de entrada
$u(X_i)$	incerteza padrão da i-ésimo grandeza de entrada que

está sendo combinada

Para que os graus de liberdade usados para a expansão da incerteza conseguida pela equação 7 ou 8 sejam obtidos, é necessário introduzir o conceito da incerteza relativa  $u_R$ . Trata-se da razão da incerteza de uma grandeza e da própria grandeza, como visto na equação 9 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$u_R(X) = \frac{u(X)}{X} \quad \text{Eq. 9}$$

onde

$u_R(X)$	incerteza relativa da grandeza X
$u(X)$	incerteza da grandeza X
X	uma grandeza qualquer

Daí, usa-se uma variação da equação de Welch-Satterthwaite, mostrada na equação 10 (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

$$\frac{u_R(G)^4}{v_G} = \frac{u_R(X_1)^4}{v_1} + \frac{u_R(X_2)^4}{v_2} + \frac{u_R(X_3)^4}{v_3} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n} \quad \text{Eq. 10}$$

onde

$u_R(G)$	incerteza relativa da grandeza G
$u_R(X_i)$	incerteza relativa da grandeza $X_i$
$X_i$	i-ésima grandeza de entrada
$v_i$	i-ésimo grau de liberdade
$v_G$	grau de liberdade da grandeza G

Ainda, como será visto na seção 2.9, existem outras formas para se calcular a incerteza de medição de grandezas de saída.

## 2.9. MÉTODO DE MONTE CARLO PARA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

No início dos anos 40, técnicas de simulação foram desenvolvidas com o intuito de testar sistemas de forma barata imitando o comportamento deles, sendo chamadas de técnicas de simulação de Monte Carlo (AYYUB; KLIR, 2006). Esse tipo de simulação também pode ser usado para se chegar a resultados de medição, sendo especialmente relevantes para avaliar medições as quais a análise via o método convencional, descrito na seção 2.8, não pode ser utilizado. Isso pode acontecer pelos seguintes motivos (JCGM, 2008):

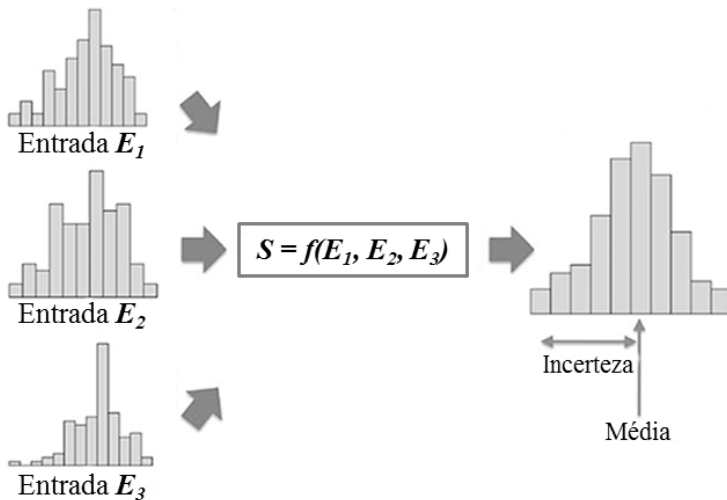
- a) a resolução das derivadas parciais presentes nas equações 7 e 8 para determinação da incerteza de saída é difícil ou inconveniente;

- b) a função densidade de probabilidade da grandeza de saída não é uma distribuição normal nem pode ser aproximada por uma distribuição t de Student;
- c) a grandeza de saída e sua incerteza calculada pelas equações 7 e 8 têm aproximadamente a mesma magnitude;
- d) a função de medição é não linear; ou
- e) as funções densidade de probabilidade das grandezas de entrada são assimétricas.

Através da geração numérica de valores das variáveis aleatórias das grandezas de entrada, determinadas a partir de condições de contorno pertinentes a cada situação, elas podem ser relacionadas iterativamente usando a função de medição em questão e, assim, chegando a uma distribuição de valores para a grandeza de saída, que deve ser avaliada estatisticamente para chegar à sua média e incerteza de medição.

A figura 20 representa esquematicamente o uso do método. Relacionam-se os valores assumidos nas funções densidade de probabilidade das grandezas de entrada através da função de medição, obtendo a função para a grandeza de saída.

Figura 20 – Esquema do método de Monte Carlo.



De maneira mais sistemática, os seguintes passos precisam ser desenvolvidos para utilizar o método em metrologia (JCGM, 2008):

- a) selecionar um número  $M$  de medições coerente com o fenômeno estudado;
- b) gerar para cada grandeza de entrada uma função densidade de probabilidade baseada na sua incerteza e no seu valor base previamente conhecidos, contendo  $M$  valores;
- c) propagar esses valores através da função de medição do modelo estudado, obtendo  $M$  quantidades da grandeza de saída;
- d) analisar o histograma dos resultados e determinar os limites que cerceiam 95% dos dados centrais.

Muitos pesquisadores utilizam a simulação para obter avaliações da incerteza de medição ou comparar resultados com os obtidos através do método convencional, descrito na seção 2.8. O trabalho de Meyer et al (2010) compara resultados de medições indiretas de rendimento de sensores de câmeras de raios-X usando o método convencional e o de Monte Carlo. Cordero et al (2012) realizaram medições de raios ultravioleta com espectroradiômetros e calcularam a incerteza do equipamento usando a simulação, pois fatores como ruído e temperatura dificultavam a medição tradicional. Já Horne et al (2012) utilizaram o método de Monte Carlo para estimar a incerteza de um sistema de medição de viscosidade a alta temperatura, já que a própria medição de viscosidade é iterativa. O trabalho de Eichstädt et al (2012) avalia implementações da simulação de Monte Carlo na incerteza de medição de grandezas transientes, tendo em vista que elas são tipicamente não lineares, favorecendo o método numérico. E Brandão et al (2011) propõem um método para determinação da impedância acústica *in-situ* e avaliam a incerteza de medição do método proposto através do emprego da simulação de Monte Carlo devido a não linearidades no fenômeno.

No capítulo 5, a simulação será empregada para desenvolver quatro métodos de determinação de incertezas de medições de altura de isolante. Mais informações serão apresentadas a seu respeito, com uso de detalhes específicos da aplicação.



### 3. ANÁLISE E SELEÇÃO DOS DEFEITOS EM ESTADORES

#### 3.1. IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS EM ESTADORES

Com base na análise de relatórios internos acerca do processo de fabricação da empresa parceira, uma lista de defeitos recorrentes em estadores foi desenvolvida:

- a.* condutores da bobina principal quebrados;
- b.* condutores da bobina principal partidos;
- c.* condutores da bobina auxiliar quebrados;
- d.* condutores da bobina auxiliar partidos;
- e.* condutores das bobinas em contato com o rotor;
- f.* condutores das bobinas em contato com as lâminas do estator;
- g.* condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor;
- h.* isolantes ausentes ou fora do lugar;
- i.* condutores das bobinas sem passagem de corrente e
- j.* cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomada.

Os defeitos de *a* a *d* representam danos aos condutores das bobinas. Condutores quebrados são os que já ultrapassaram sua tensão máxima admissível e estão na iminência de romper totalmente. E os condutores partidos já romperam, formando duas pontas.

Os defeitos *e* e *g* também têm relação. Um condutor na trajetória se caracteriza por um condutor elétrico que está presente no caminho por onde o rotor será inserido num processo subsequente, de forma a tocá-lo em algum momento durante a inserção. E o condutor em contato é aquele que, após a inserção, de alguma forma, se manteve junto ao rotor. O defeito *f* é similar ao defeito *e*, porém neste os condutores estão em contato com o rotor, enquanto naquele os condutores estão em contato com o corpo do próprio estator.

O defeito *h* se caracteriza pelo posicionamento errado dos isolantes devido a um erro de inserção ou dele próprio ou das bobinas. Um isolante está teoricamente na posição correta quando sua extremidade está dentro de um intervalo de (0 a 12) mm em relação ao pacote de lâminas.

Ainda, o defeito *i* inclui os casos nos quais a corrente não está fluindo pelas bobinas por motivos não identificados.

Por fim, o defeito *j* ocorre por um defeito no encaixe entre o clipe metálico e a caixa de tomadas, fazendo com que movimentações das peças possam cessar a circulação de corrente no sistema.

Cada defeito tem características próprias, podendo causar maus funcionamentos específicos. Os defeitos *a*, *b*, *c* e *d* podem impossibilitar

o trabalho correto da sua respectiva bobina, devido à falta de corrente. Já os defeitos apresentados nas letras *e*, *f* e *h* representam defeitos que podem causar curtos-circuitos no sistema. O defeito *g* pode, além de causar curtos-circuitos, levar ao travamento do rotor. Ainda, o representado pela letra *i* acarreta em não funcionamento do estator. Por fim, o defeito *j* pode não permitir o funcionamento por falta de corrente entrando nas bobinas do estator.

Na figura 21, na figura 22 e na figura 23 são mostrados exemplos de dois dos defeitos da lista acima. Na primeira, um condutor se destaca, devido a seu afastamento do resto da bobina auxiliar, se direcionando para o centro do estator, caracterizando o defeito de condutor na trajetória de inserção do rotor. Na segunda, um dos isolantes, parte de cor branca na imagem, está bastante abaixo da posição que deveria estar aproximadamente no mesmo nível que os outros ilustrados. Na terceira, uma caixa de tomadas com seus três cabos é mostrada, sendo que a seta indica a alteração visual que indica o defeito, isto é, o encaixe imperfeito entre o clipe metálico do cabo da esquerda da imagem faz com que o cabo esteja numa posição incorreta, a qual é evidenciada nos orifícios de conexão com sua obstrução total ou parcial.

### 3.2. ANÁLISE SOB O PONTO DE VISTA DA VISÃO COMPUTACIONAL

Com base em experimentos feitos em laboratório, chegou-se a conclusões sobre quais dos defeitos em estatores listados na seção 3.1 têm possibilidade de detecção com VC. Dividiram-se os defeitos em

Figura 21 – Um exemplo do defeito "Condutor na trajetória do rotor".



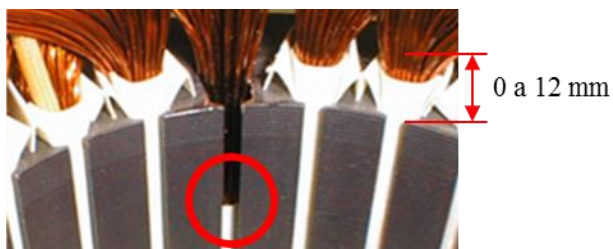
Fonte: autor.



grupos (A, B e C) de acordo com a possibilidade de inspecioná-los através de uma mesma forma, isto é, num mesmo ponto de visualização da câmera.

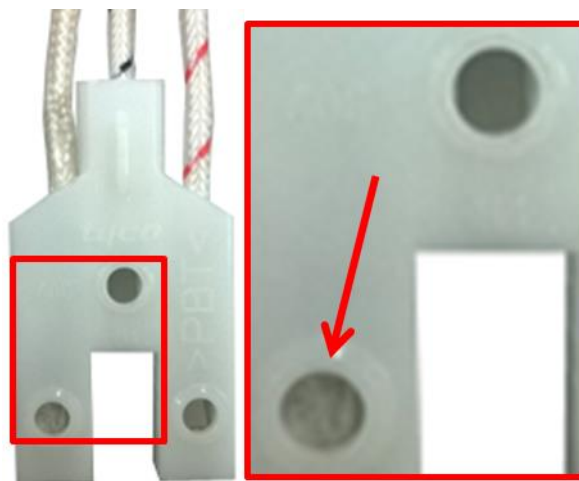
Os defeitos que foram colocados no grupo A são os que precisam de mais de um ponto de vista para ser inspecionado satisfatoriamente. No grupo B, estão os que podem ser inspecionados através do uso de uma câmera posicionada de forma coaxial ao eixo do furo central do

Figura 22 – Um exemplo do defeito "Isolante fora da posição".



Fonte: autor.

Figura 23 – Um exemplo do defeito "Cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomada". No detalhe, o orifício de conexão obstruído.



Fonte: autor.

estator. Finalmente, no grupo C a inspeção pode se dar com uma câmera posicionada à frente da caixa de tomadas.

No Quadro 2, a divisão de cada defeito entre os grupos é mostrada, bem como a análise em relação à possibilidade de detecção via VC.

Quadro 2 – Classificação de defeitos em estatores.

	Defeitos	Grupo	Detecção VC
<i>a</i>	Condutores da bobina principal quebrados	A	pouco provável
<i>b</i>	Condutores da bobina principal partidos	A	pouco provável
<i>c</i>	Condutores da bobina auxiliar quebrados	A	pouco provável
<i>d</i>	Condutores da bobina auxiliar partidos	A	pouco provável
<i>e</i>	Condutores das bobinas em contato com o rotor	B	muito provável
<i>f</i>	Condutores das bobinas em contato com as lâminas do estator	A	muito provável
<i>g</i>	Condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor	B	muito provável
<i>h</i>	Isolantes ausentes ou fora do lugar	B	muito provável
<i>i</i>	Condutores das bobinas sem passagem de corrente	-	improvável
<i>j</i>	Cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas	C	muito provável

Primeiramente com respeito ao defeito *i*, tendo em vista que ele não foi encaixado em nenhum grupo, ele se trata de um problema cuja causa mais provável é o condutor partido dentro da bobina, o que nas condições de trabalho do estator não se faz detectável à luz visível. Além disso, a falta de corrente elétrica não produz nenhum efeito identificável por inspeção visual, justificando o “improvável” na quarta coluna do quadro 2. Em trabalhos como o de Šebök, Gutten e Kučera (2011), no qual foi utilizada uma câmera sensível à radiação infravermelha para medição de corrente elétrica em cabos, seria possível sua detecção. Contudo, esse equipamento está fora do contexto proposto, isto é, inspeção visual à luz visível.

O grupo A compreendeu os defeitos de condutores danificados, sejam partidos ou quebrados, em ambas as bobinas, e os condutores em contato com as lâminas do estator.

Em relação aos condutores danificados, existe uma dificuldade considerável para que esses sejam identificados através de VC. Isso acontece porque sua visualização nem sempre é trivial, tendo em vista que, primeiro, os condutores danificados podem não estar na superfície

externa da bobina, impossibilitando qualquer método de visão utilizando câmeras comuns, para luz visível e, segundo, mesmo que os condutores danificados estejam na superfície externa das bobinas, suas tonalidades, brilhos e suas disposições não ordenadas dificultam a detecção por qualquer sistema de visão, já que esses condutores estarão camuflados, de certa forma, pelos próprios condutores na bobina.

Em contrapartida, a detecção de condutores das bobinas em contato com as lâminas do estator foi considerada muito provável. Contudo, uma observação superior não seria suficiente para a tomada de decisão, visto que a própria bobina poderia cobrir um condutor defeituoso, ou ainda, mesmo que ele pudesse ser visualizado, a perspectiva não permitiria a identificação correta da situação. Vale lembrar aqui que esse último ponto não seria um problema quando a avaliação fosse do condutor podendo tocar o estator, pois mesmo não o fazendo, a situação seria classificada como condutor na trajetória de inserção, também um defeito. Portanto, seria necessária a utilização de mais de um ponto de vista para garantia de uma inspeção suficiente e, dessa forma, uma bancada com mais graus de liberdade para garantir um bom resultado. Abaixo, pode-se ver na figura 24 um condutor na parte de fora da bobina do estator.

O Grupo B contém os defeitos caracterizados pela presença de condutores em contato ou na trajetória de inserção do rotor, e também pela não conformidade da posição dos isolantes. Como dito anteriormente, esses defeitos podem ser encontrados com o uso de uma câmera que esteja posicionada coaxialmente com o estator. No quadro 2,

Figura 24 – Condutor em contato com as lâminas na parte externa do estator.



Fonte: autor.

todos os defeitos desse grupo são considerados de detecção muito provável. Isso se deu com base em testes preliminares feitos em laboratório e também pela própria experiência da empresa parceira, a qual já testara outras alternativas com VC para inspeção.

Por fim, o grupo C é composto apenas de um defeito, a identificação de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas, sendo que sua detecção foi também considerada muito provável, graças a testes preliminares.

### 3.3. SELEÇÃO DOS DEFEITOS A SEREM ESTUDADOS

Com base na possibilidade de detecção com VC e na complexidade do projeto de bancada, os defeitos escolhidos foram dispostos no quadro 3. Os defeitos *a*, *b*, *c*, *d* e *i* foram abandonados pela pouca possibilidade de detecção com VC. Já o defeito *f*, mesmo com boa possibilidade de detecção, não foi considerado viável, pois, como falado na seção 3.2, precisa de mais de um ponto de vista para detectá-lo satisfatoriamente.

Quadro 3 – Defeitos selecionados.

<i>a</i>	Defeitos	Deteção VC
<i>e</i>	Condutores das bobinas em contato com o rotor	muito provável
<i>g</i>	Condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor	muito provável
<i>h</i>	Isolantes ausentes ou fora do lugar	muito provável
<i>j</i>	Cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas	muito provável

### 3.4. SELEÇÃO DA ABORDAGEM PARA CADA UM DOS DEFEITOS

De acordo com os defeitos escolhidos, foram desenvolvidas propostas de solução de inspeção para cada um deles.

Primeiramente, serão abordadas as propostas de inspeção dos defeitos “Condutores das bobinas em contato com o rotor” e “Condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor” na seção 3.4.1. Após isso, na seção 3.4.2 serão mostradas as propostas para monitoramento da posição dos isolantes. Por fim, alternativas para a detecção de cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas serão abordadas na seção 3.4.3.

### 3.4.1. Alternativas para inspeção dos defeitos “Condutores das bobinas em contato com o rotor” e “Condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor”

Nessa perspectiva, três alternativas foram selecionadas como as mais promissoras para resolver o problema da inspeção desses defeitos: utilização de uma fonte laser, algoritmos de VC na imagem com lente telecêntrica<sup>11</sup> ou algoritmos de VC na imagem com lente grande-angular<sup>12</sup>.

A primeira alternativa proposta se trata de um emissor *laser* e um fotorreceptor, mostrados na figura 25. O *laser* desse emissor estaria acoplado a um sistema de movimentação bastante preciso, o qual faria essa fonte realizar uma trajetória circular do diâmetro do furo interno do estator numa das faces desse. Na outra, um fotorreceptor acompanharia essa trajetória, de forma que quando houvesse um condutor no caminho, ele interromperia a comunicação entre emissor e receptor. A escolha da fonte de luz sendo o *laser* se dá com base no fato de o *laser* ser uma fonte de raios paralelos, o que permitiria uma menor influência na inspeção de raios refletidos, já que a luz conseguiria passar na folga presente entre estator e rotor. A vantagem desse método seria a possibilidade de investigação em ambas as faces do estator em um procedimento apenas. Contudo, as desvantagens são poucas, mas cruciais: a inspeção no ERB seria muito complexa, tendo em vista que a presença do bloco iria dificultar a movimentação do *laser* ou do receptor e o sistema de movimentação teria que ser muito preciso para garantir que tanto o laser quando o receptor estivessem sempre na trajetória correta.

Já a segunda alternativa consiste no uso de algoritmo de detecção de objetos numa imagem capturada com o auxílio de uma lente telecêntrica. Um esquema da vantagem da captura de imagens com a lente telecêntrica é mostrado na figura 26 (a), bem como a imagem que seria capturada nessa concepção em (b). A vantagem, assim como no exemplo anterior, é a possibilidade de detecção do defeito em ambas as faces do estator. As desvantagens desse acessório são: o preço, que

---

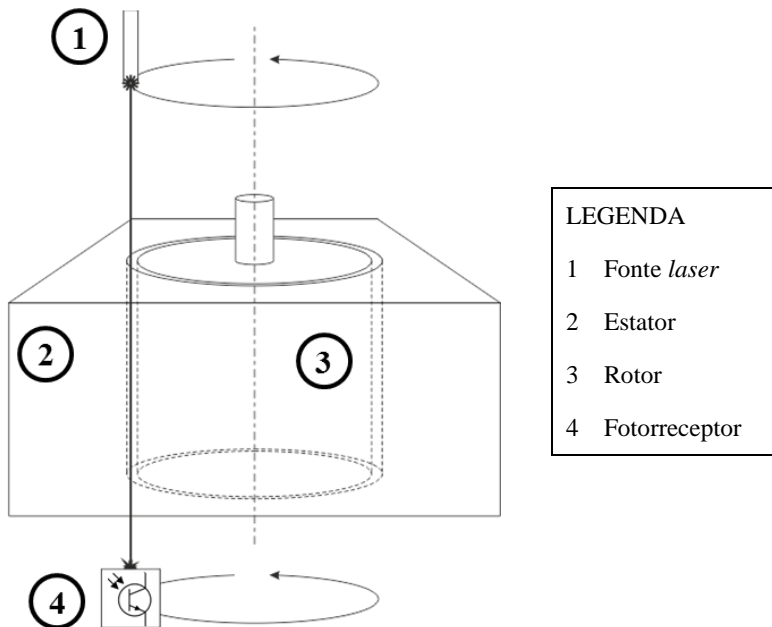
<sup>11</sup> Telecentricidade é uma característica de projeto de lentes compostas no qual os raios que entram nelas são colimados e paralelos ao eixo óptico da lente, permitindo que seja capturada uma vista ortogonal do ambiente, ou seja, eliminando efeitos de perspectiva. Lentes com essa características são muito usadas na metrologia óptica (EDMUND OPTICS, 2014).

<sup>12</sup> Lente grande-angular é uma lente com distância focal pequena (aproximadamente de 1 mm a 7 mm). Quando a distância focal é maior ou igual a 50 mm, as lentes são chamadas de teleobjetivas. Com valores entre 7 mm a 50 mm, são lentes normais (COMPUTAR, 2014).

oscila entre 2 mil dólares a 5 mil dólares; as dimensões bem maiores que as de lentes comuns, o que pode ser um limitante no projeto de uma bancada; e a dificuldade de iluminação no caso do ERB, já que o ideal seria colocá-la entre o estator e o bloco, ou ainda iluminar o conjunto lateralmente, no caso de outro tipo de fonte de luz, de forma a usar reflexões da luz no bloco como iluminação.

Finalmente, a terceira alternativa também se trata do uso de algoritmo de detecção de objetos em imagens, porém agora capturadas utilizando uma lente grande-angular. Lentes grande-angulares apresentam uma distorção na região mais externa da imagem, a qual faz com que os objetos que lá estão apareçam na imagem maiores do que realmente são em relação à proporcionalidade da imagem como um todo. Na figura 27, pode ser vista uma imagem de um estator capturada utilizando uma lente grande-angular, na qual se nota a ampliação na região mais próxima à borda da imagem, causada por distorções

Figura 25 – Primeira alternativa para o defeito "condutor na trajetória de inserção do rotor".

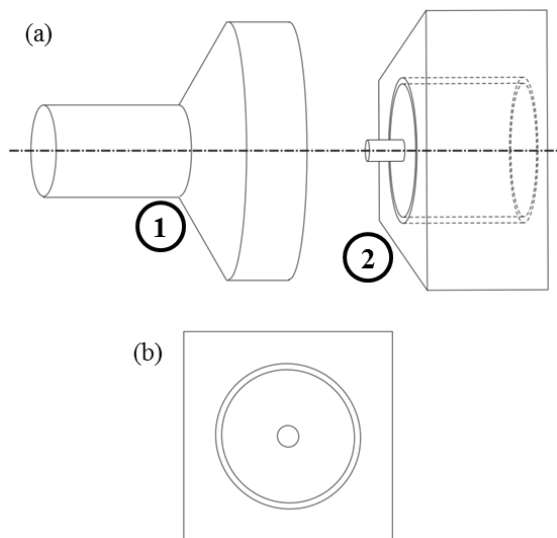


Fonte: autor.

provenientes da forma da lente. As principais vantagens do método são: o aumento da região de interesse proporcionado pela distorção da lente, o preço atrativo e a possibilidade de integração dos testes de detecção de alguns dos outros defeitos estudados. Já a desvantagem encontrada foi a impossibilidade de realizar o teste em duas faces do estator num mesmo procedimento.

Baseado no exposto seguiu-se com a terceira alternativa, isto é, o uso de algoritmo de detecção de objetos em imagens utilizando uma lente grande-angular. A segunda alternativa também é considerada promissora, de forma que, num outro momento, ela deveria ser

Figura 26 – Segunda alternativa para o defeito "condutor na trajetória de inserção do rotor".

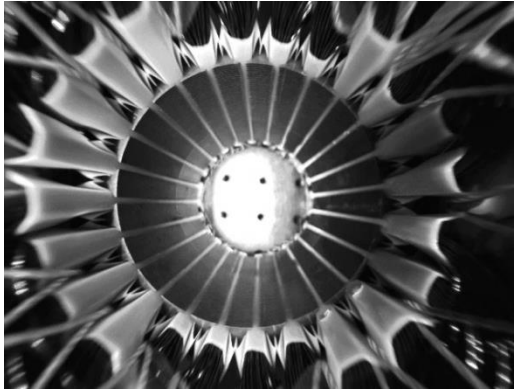


#### LEGENDA

- |       |   |
|-------|---|
| (a) 1 | Lente telecêntrica  |
| (a) 2 | ERB   |
| (b)   | Imagem isométrica do ERB obtida com o uso da lente telecêntrica |

Fonte: autor.

Figura 27 – Imagem capturada com lente grande-angular.



Fonte: autor.

investigada. Já a primeira é considerada de realização bem complexa. Talvez uma melhor análise nas possibilidades de iluminação deixasse mais simples a obtenção de um bom resultado.

Maiores detalhes da terceira alternativa serão dados na seção 4.

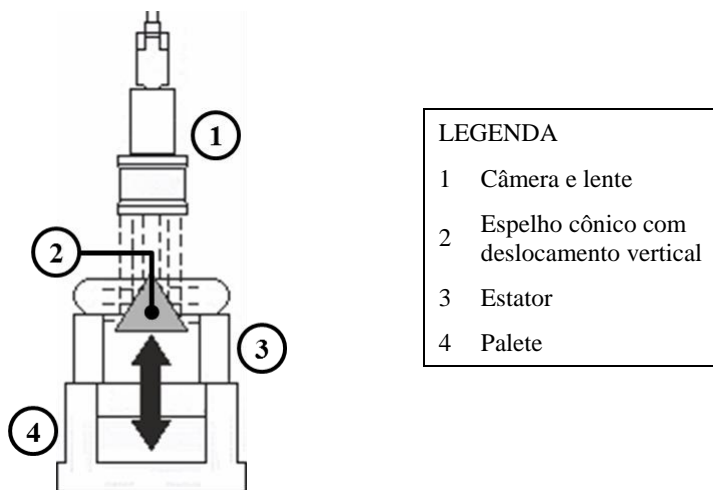
### **3.4.2. Alternativas para o defeito “Isolantes ausentes ou fora do lugar”**

Para esse defeito, foram consideradas mais viáveis duas alternativas: o uso de uma câmera capturando imagens de um espelho cônico e usando somente uma câmera, ambos com posterior uso de algoritmos de VC.

A primeira usa um espelho cônico montado numa plataforma que se movimenta verticalmente, como visto na figura 28. Esse método permite o monitoramento dos isolantes em ambos os lados do estator. No entanto, o espelho cônico é caro, frágil e precisa estar bem limpo para ter um bom funcionamento, o que não é compatível com o ambiente industrial. Ainda, o sistema de movimentação induziria a criação de bancadas consideravelmente complexas, tanto para uso em laboratório quanto em fábrica.



Figura 28 – Primeira alternativa de solução para o monitoramento de altura de isolantes.



Fonte: autor.

E na segunda alternativa usar-se-ia apenas a câmera com uma lente grande angular, para causar o efeito mostrado anteriormente na figura 27. Esse caminho funcionaria exatamente da mesma forma que a alternativa escolhida na seção 3.4.1, possuindo inclusive as mesmas vantagens e desvantagens.

Para esse caso, também foi escolhida a alternativa do uso de câmera com lente grande angular, principalmente pela possibilidade de integrar as detecções num mesmo procedimento. O devido detalhamento será dado na seção 5.

### 3.4.3. Alternativas para o defeito “Cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas”

Por fim, duas possibilidades de solução foram tratadas como plausíveis na avaliação de fixação dos cabos na caixa de tomadas: o teste de continuidade elétrica dos cabos e o uso de câmera e algoritmos de VC.

A fim de aumentar a confiabilidade do ensaio, ambos os ensaios foram levados à frente. Contudo, no escopo deste trabalho, apenas a alternativa da câmara será detalhada, o que acontecerá na seção 6.

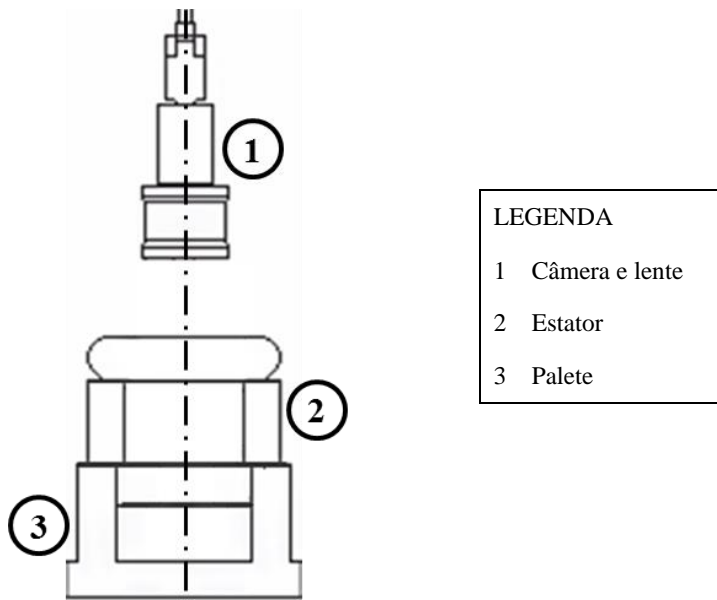
#### 4. DETECÇÃO DE CONDUTOR NA TRAJETÓRIA DE INSERÇÃO DO ROTOR E EM CONTATO COM O ROTOR

Os defeitos “condutor na trajetória de inserção do rotor” e “condutor em contato com o rotor” foram unidos em um único caso, pois como visto na seção 3 o método de detecção proposto se dá da mesma forma, inclusive sendo pouco provável a diferenciação dos dois com a adoção da câmera na posição superior.

Conforme abordado na seção 3.2, foi utilizada uma câmera acima do estator de maneira que ela ficasse coaxialmente posicionada em relação ao estator, visando à aquisição de uma única imagem para a inspeção. Na figura 29, é ilustrada a ideia. Lembrando, conforme falado no capítulo 3, que a ideia aqui é utilizar uma câmera sustentada na parte vertical de forma que ela ficasse coaxialmente posicionada em relação ao estator, visando à aquisição de uma única imagem para a inspeção.

Para uma melhor avaliação de possíveis abordagens, o projeto tratou tanto o caso da inspeção do estator sozinho quanto quando já está

Figura 29 – Câmera alinhada coaxialmente com o estator.



Fonte: autor.

inserido o rotor, caso cujo nome é ERB, conforme visto anteriormente. No quadro 4, mostram-se as vantagens e desvantagens de se inspecionar de uma forma ou de outra.

Quadro 4 – Vantagens e desvantagens das estratégias de inspeção.

Verificação	Vantagens	Desvantagens
Estator	Possibilidade de detecção de condutores ao longo de toda a profundidade do estator	Necessidade da correção da perspectiva
	Detecção do problema em estágio inicial de produção	Problemas de foco devido à profundidade de campo
ERB	Detecção simplificada (por tratar apenas de um plano)	Impossibilidade de detecção em ambos os lados
	Minimização dos riscos de introdução de defeitos depois da inspeção	Retrabalho mais complexo

A grande vantagem da detecção somente com o estator é a possibilidade de detecção de condutores na região do rotor ao longo de toda a profundidade do estator. Por mais que a especificação de um conjunto ótico possa ser complicada para inspeção ao longo de toda a profundidade, por questões como foco e distorções da lente, existe a possibilidade de rotação do estator em sua linha de produção, o que contornaria as principais limitações. Além disso, a detecção de um defeito nas fases iniciais de produção do estator, sem inserção do rotor e de outros componentes, facilita o retrabalho e evita o desperdício de materiais. Apesar das vantagens presentes na inspeção do estator de forma isolada, esse método exige um cuidado maior com a perspectiva e com o ajuste da profundidade de campo do conjunto lente-câmera.

Esse problema não existe se a inspeção for feita direto no ERB, tendo um volume de investigação menor. Contudo, não é possível a detecção em ambos os lados devido à presença do bloco fundido e o retrabalho pode exigir a volta para a linha de montagem anterior. Ainda, existe a possibilidade do aparecimento do defeito após a inspeção que seria feita do estator, assim sendo a inspeção no ERB poderia garantir melhor a ausência de defeitos no produto montado, principalmente pensando que os próprios processos inerentes à montagem que aconteceriam após essa inspeção poderiam produzir tais inconformidades.

#### 4.1. ALGORITMO DE DETECÇÃO DE CONDUTORES NO ESTATOR

Esta seção apresenta detalhes sobre o algoritmo desenvolvido para a detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor quando é analisado apenas imagens do estator sem o rotor ou o bloco. Apesar de o algoritmo ter sido implementado em linguagem de programação do LabVIEW, apresenta-se sua descrição em nível mais alto, sem focar em detalhes de programação.

Na figura 30, pode ser vista uma imagem obtida em um estator que apresenta o defeito. Esse defeito está destacado com um retângulo na imagem da esquerda e é apresentada uma versão ampliada dele à direita. Vale ressaltar aqui que a imagem à esquerda é a imagem típica sobre a qual se trabalha para identificar possíveis defeitos.

Primeiramente, é interessante ver o que a imagem representa. Devido à existência da perspectiva, é possível visualizar a parede interna do estator a partir de uma vista superior. Isso pode ser tanto um problema quando um auxílio. No caso, foram usadas várias características dessa parede como parâmetros de localização para o algoritmo criado, de forma a usar a perspectiva em prol do trabalho.

O algoritmo segue as seguintes etapas: localização do estator, localização da posição dos isolantes, detecção de pontos numa zona onde é comum a ocorrência de defeitos e diferenciação entre defeitos e outros pontos quaisquer achados na imagem.

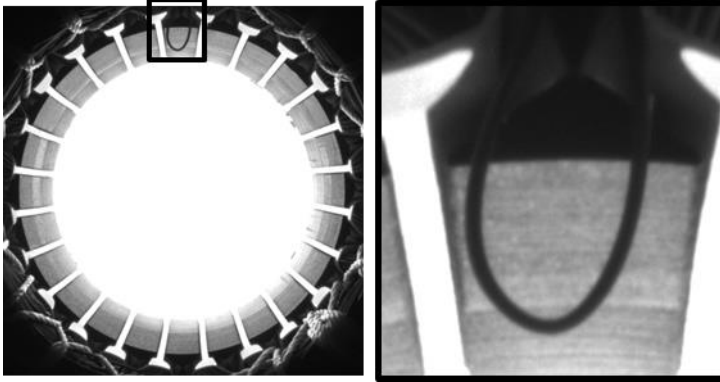
Inicia-se usando uma função<sup>13</sup> para encontrar formas circulares numa determinada região de interesse da imagem (*region of interest*, ROI), visando localizar as denominadas circunferências superior e inferior, as quais representam a face superior e inferior do estator inspecionado. Subtraindo uma pequena parcela do raio da superior e somando essa mesma parcela no raio da inferior, encontram-se a circunferência superior e inferior de posição, respectivamente, conforme mostrado na figura 31. Elas são importantes para a correta localização do estator na imagem.

Ambas as circunferências de posição são utilizadas como início (inferior) e fim (superior) da área de avaliação de uma estrutura de repetição incrementa o raio para obter os níveis de cinza de todos os pixels que definem cada uma das circunferências entre a inferior e a superior.

---

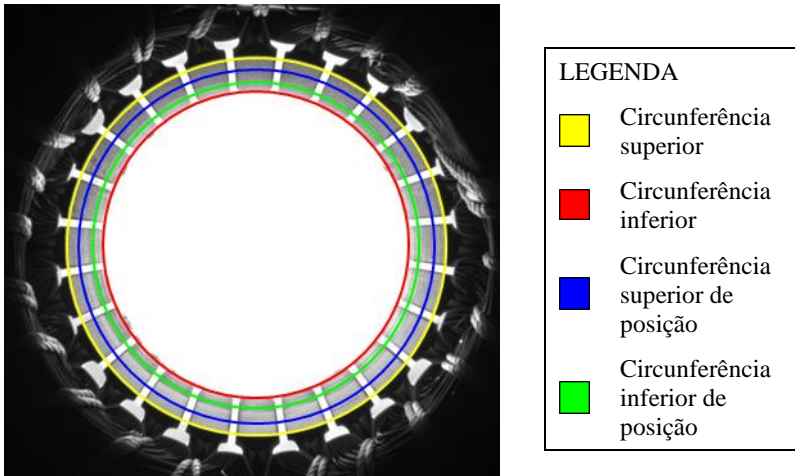
<sup>13</sup> IMAQ Find Circular Edge 2 do Lab VIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

Figura 30 – Imagem para detecção de condutores em um estator. Em destaque, um condutor na trajetória.



Fonte: autor.

Figura 31 – Circunferências superior, inferior, superior de posição e inferior de posição.



Fonte: autor.

Com esses níveis, são separados todos os pontos com um nível de cinza maior que um determinado nível de corte, usualmente 250, pois eles são os parâmetros de entrada para a criação do chamado gabarito virtual, que se trata de uma ferramenta a qual visa o posicionamento de todos os isolantes do estator de forma correta.

As coordenadas desses pontos são usadas como centros de círculos cujos raios são escolhidos de acordo com a iluminação utilizada para a captura da imagem, isto é, quanto menos luz, maiores os raios, quanto mais luz, menores os raios, de forma a obter regiões que simulam coerentemente a posição dos isolantes na imagem original. Assim, diminui-se drasticamente a chance de anormalidades como variações de iluminação, sujeiras em partes do estator, variações de posição dos isolantes e até mesmo a presença de condutores e bandagem prejudicarem esse procedimento de localização do estator na imagem.

Para melhorar o desempenho, recomenda-se utilizar uma área de análise que evite ao máximo a presença dos itens acima citados. Isso justifica o uso das circunferências de posição ao invés das circunferências superior e inferior, pois utilizando as primeiras é possível excluir da área de análise um trecho o qual pode conter, por exemplo, fios que estejam presentes das faces inferior e superior do pacote do estator.

Na figura 32, é mostrado em (b) um gabarito virtual e a imagem a qual o originou em (a). Com o gabarito, foi possível determinar as bordas laterais dos isolantes usando uma função de detecção de bordas<sup>14</sup>, como é visto em (b).

Com os isolantes localizados, determina-se a intersecção de cada um desses segmentos cinza da figura 32 (b) com uma circunferência denominada circunferência de detecção, como mostrado na figura 33, de mesmo centro que a circunferência superior e raio 10 pixels menor. Essas intersecções representam as chamadas zonas neutras, e sua funcionalidade será descrita mais a frente nesta mesma seção.

Retiradas essas informações da imagem do gabarito virtual, volta-se a trabalhar com a imagem original. Para limpar da imagem sujeiras da fábrica e outras imperfeições, é utilizado um filtro de suavização<sup>15</sup>.

Com a imagem filtrada, a circunferência de detecção é usada como ROI para uma função de detecção de borda<sup>16</sup>, a qual determina

---

<sup>14</sup> IMAQ Find Concentric Edge 2 do Lab VIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

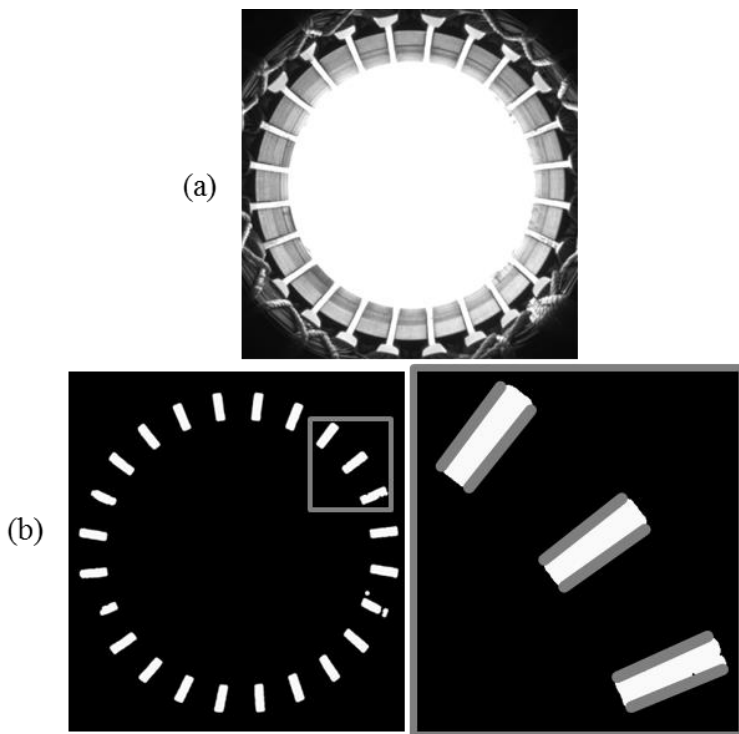
<sup>15</sup> IVA Grayfilters – Nth order do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

<sup>16</sup> IMAQ Edge tool 3 do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

uma série de pontos que podem ser defeitos em potencial. Dentro desse conjunto de pontos, estão também bordas que representam as ranhuras dos isolantes, conforme a figura 34. Daí que vem a utilidade de já ter determinado as zonas neutras com o gabarito virtual. Os pontos detectados que estiverem dentro das zonas neutras são bordas que representam as ranhuras dos isolantes e não defeitos. Já a existência de pontos que não estejam dentro das zonas neutras indica a ocorrência de um defeito, acionando um alerta luminoso no painel frontal do programa.

Um resumo das etapas passadas pelo algoritmo para detecção de defeitos no estator é mostrado na figura 35.

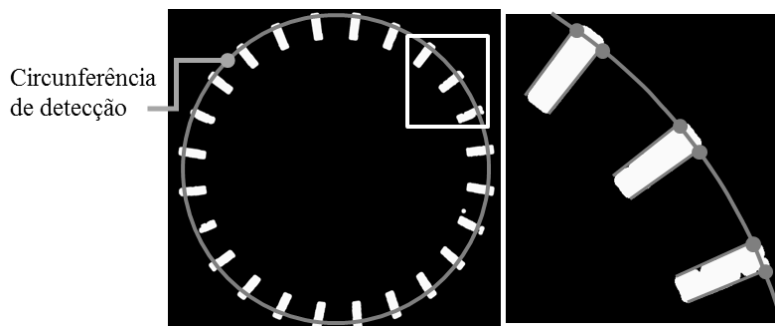
Figura 32 – Imagem de origem em (a) e o gabarito virtual de (a) em (b).



Fonte: autor.

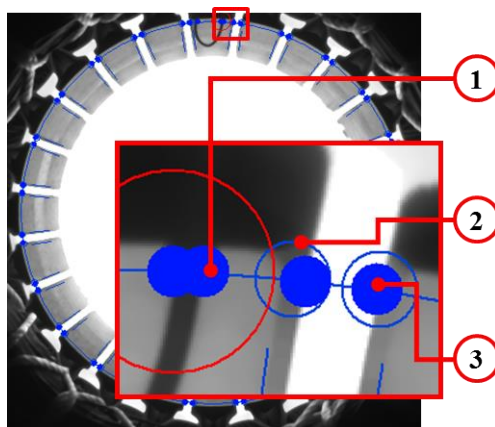


Figura 33 – Circunferência de detecção e detalhe em intersecções, chamadas de zonas neutras.



Fonte: autor.

Figura 34 – Pontos de detecção e zonas neutras.

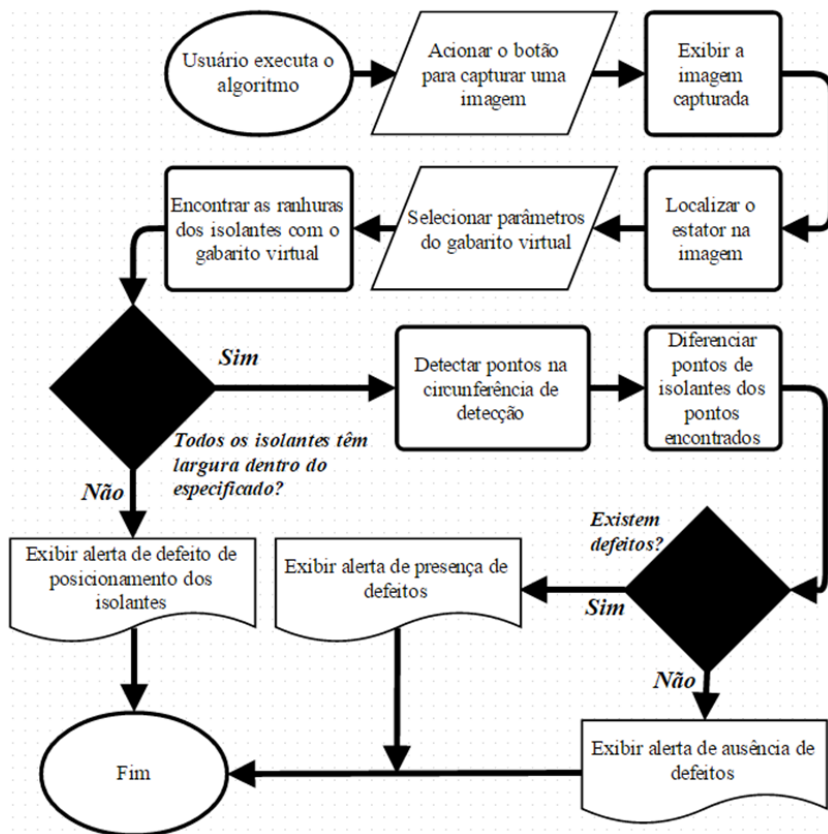


**LEGENDA**

- 1 Pontos determinando um defeito
- 2 Zona neutra
- 3 Ponto determinando uma ranhura do isolante

Fonte: autor.

Figura 35 – Fluxograma do algoritmo de detecção de condutores no estator.



Fonte: autor.

#### 4.2. ALGORITMO DE DETECÇÃO DE CONDUTORES NO ERB

Descrevem-se agora os procedimentos tomados pelo algoritmo para detecção de condutores no ERB. Da mesma maneira que na seção 4.1, na qual foi descrito o programa para detecção de condutores somente com o estator, a abordagem será em alto nível.

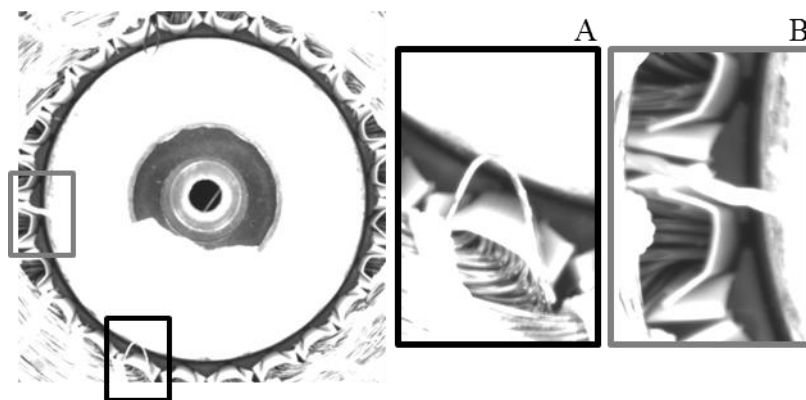
O algoritmo passa pelos seguintes passos: localização do rotor na imagem, determinação da zona de procura por defeito, detecção de defeitos e diferenciação entre condutores e fios de bandagem.

Na figura 36, pode-se ver uma imagem obtida para a detecção do defeito. Em A, o detalhe de um condutor na trajetória e, em B, de um fio de bandagem.

Esse destaque é relevante no sentido de que é desejável que o algoritmo saiba reconhecer e diferenciar condutores e fios de bandagem, já que os últimos não são um problema para o produto final. Na figura 36, é possível perceber que os condutores e os fios são visualmente diferentes, fator determinante para que o programa consiga diferenciá-los. Mais a frente nesta seção será descrito como é feita a distinção deles.

Primeiro, a imagem capturada passa por uma etapa de pré-processamento, onde pode se escolher se apenas o contraste da imagem será aumentado, se será utilizado um conjunto de filtragem contendo um filtro de realce de detalhes e um filtro de suavização ou se a imagem será utilizada sem pré-processamento algum. Tanto os filtros quanto o aumento do contraste visam um maior realce do rotor.

Figura 36 – Imagem capturada para detecção de condutores no ERB. Em A, um condutor na trajetória. Em B, um fio de bandagem.



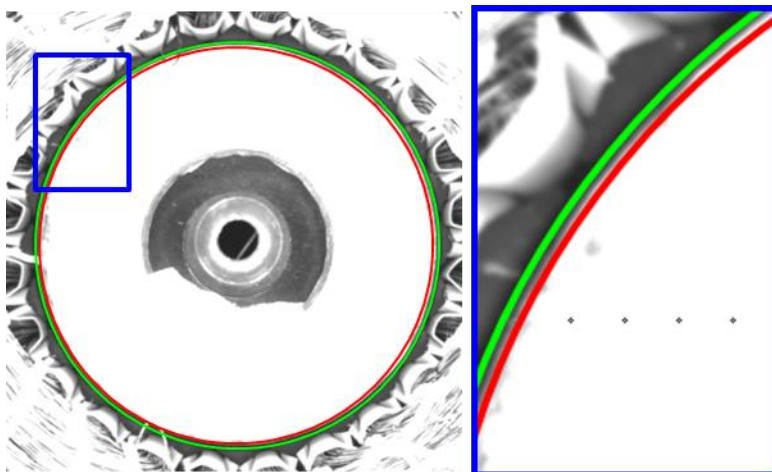
Fonte: autor.

A próxima ação é localizar o rotor na imagem, o que é feito com uma função de detecção de circunferência<sup>17</sup>. Ao raio dessa circunferência, é somado um valor em pixels para gerar a circunferência de detecção. Ambas são mostradas na figura 37.

Na sequência, uma função de detecção de borda<sup>18</sup> foi utilizada, empregando a circunferência de detecção como ROI. Tanto condutores quanto fios de bandagens são encontrados com esse procedimento, conforme mostrado na figura 38 com losangos pretos e brancos, de forma que foi necessário criar uma forma de diferenciar os dois, tendo em vista que o defeito consiste na presença do condutor e que os fios de bandagem não devem ser identificados como defeito.

Tanto na figura 36 e na figura 38, quanto em testes especificamente desenvolvidos com esse fim, foi constatado que o condutor apresenta um diâmetro<sup>19</sup> menor do que o fio de bandagem. Assim sendo, essa característica foi uma das escolhidas para realizar a

Figura 37 – Circunferência do rotor (vermelha) e circunferência de detecção (verde).



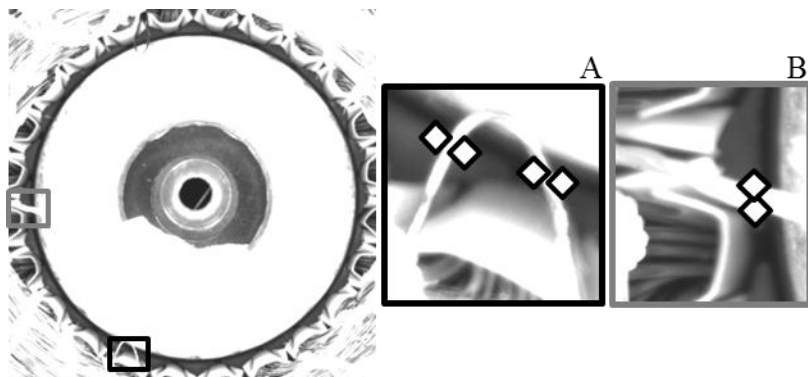
Fonte: autor.

<sup>17</sup> IMAQ Find Circular Edge 2 do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

<sup>18</sup> IMAQ Edge tool 3 do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

<sup>19</sup> As dimensões de seção do condutor e fio de bandagem na figura 36 não necessariamente são diâmetros, tendo em vista que elas podem ser secantes aos fios de forma oblíqua. No entanto, devido à falta de denominação mais conveniente, ainda assim elas serão chamadas de diâmetro.

Figura 38 – Detecção de bordas dos condutores e de bandagem nos detalhes A e B.



Fonte: autor.

diferenciação deles.

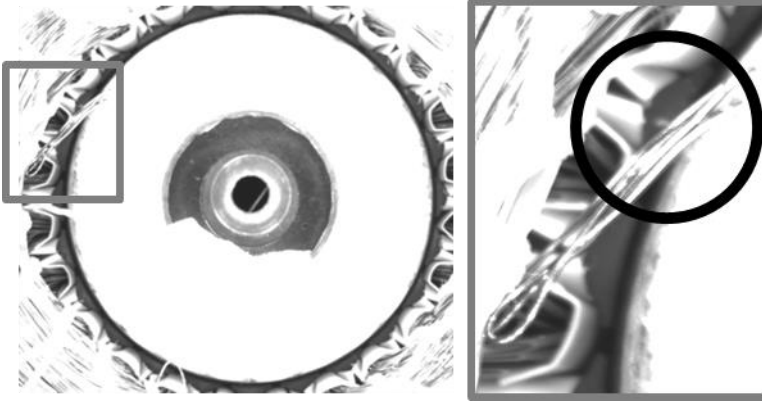
Calculando a distância entre cada um dos pontos encontrados, mostrados na figura 38 e conhecendo o diâmetro esperado da seção dos condutores, foi possível determinar com sucesso o que é efetivamente um defeito.

No entanto, a diferenciação pelo diâmetro não é suficiente para distinguir todas as situações em que condutores e de bandagem aparecem na ROI. Ainda em laboratório, foram constatados casos nos quais condutores muito próximos uns dos outros foram erroneamente considerados como fio de bandagem, pois a proximidade entre eles fez com que algumas bordas não fossem detectadas, como exemplificado na figura 39.

Na seção 7.3, são mostrados testes numa linha de montagem que mostram justamente a necessidade de um adendo no algoritmo para caracterizar corretamente condutores e fios.

Para solucionar essa questão, posteriormente foi empregado o uso de LEDs de cor azul. A cor azul se justifica porque, como os condutores utilizados nesse trabalho passam por tratamentos de superfície que os deixam acobreados (cor composta basicamente por vermelho) e os fios de bandagem são brancos (cor que contém todas as componentes de cor), a luz azul faz com que objetos que não tenham azul em sua componente de cor fiquem escuros na imagem em tons de cinza da câmera.

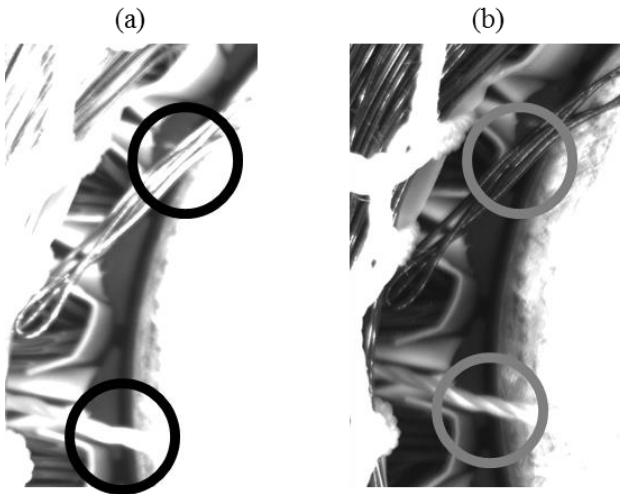
Figura 39 – Conductor que foi erroneamente não considerado como defeito. O detalhe à direita mostra o diâmetro diferente da esperada.



Fonte: autor.

Na figura 40, esse efeito é demonstrado.

Figura 40 – Diferença entre luz branca em (a) e luz azul em (b).



Fonte: autor.

Percebe-se que o condutor na luz azul fica bem escurecido, o que dificulta muito para o algoritmo encontrá-lo. Assim, considerando que na imagem com luz branca (esquerda) o condutor é encontrado e com a imagem com luz azul (direita) não, e que o fio de bandagem é visível em ambas as imagens, gera-se outra condição para a diferenciação no algoritmo.

Na figura 41, são mostradas as etapas que o algoritmo passa para achar condutores no ERB.

#### 4.3. BANCADA DE TESTES DE DETECÇÃO DE CONDUTORES NA TRAJETÓRIA

Foi desenvolvida uma bancada para aplicação dos algoritmos descritos nas seções 4.1 e 4.2. Nessa etapa inicial do trabalho, era interessante que ela dispusesse de meios para estudar a influência tanto da posição quanto da iluminação sobre as imagens e os resultados dos programas. Assim, a primeira versão da bancada tinha como requisitos principais a possibilidade de movimentação tanto da câmera quanto do estator ou do ERB, e ainda um controle de iluminação.

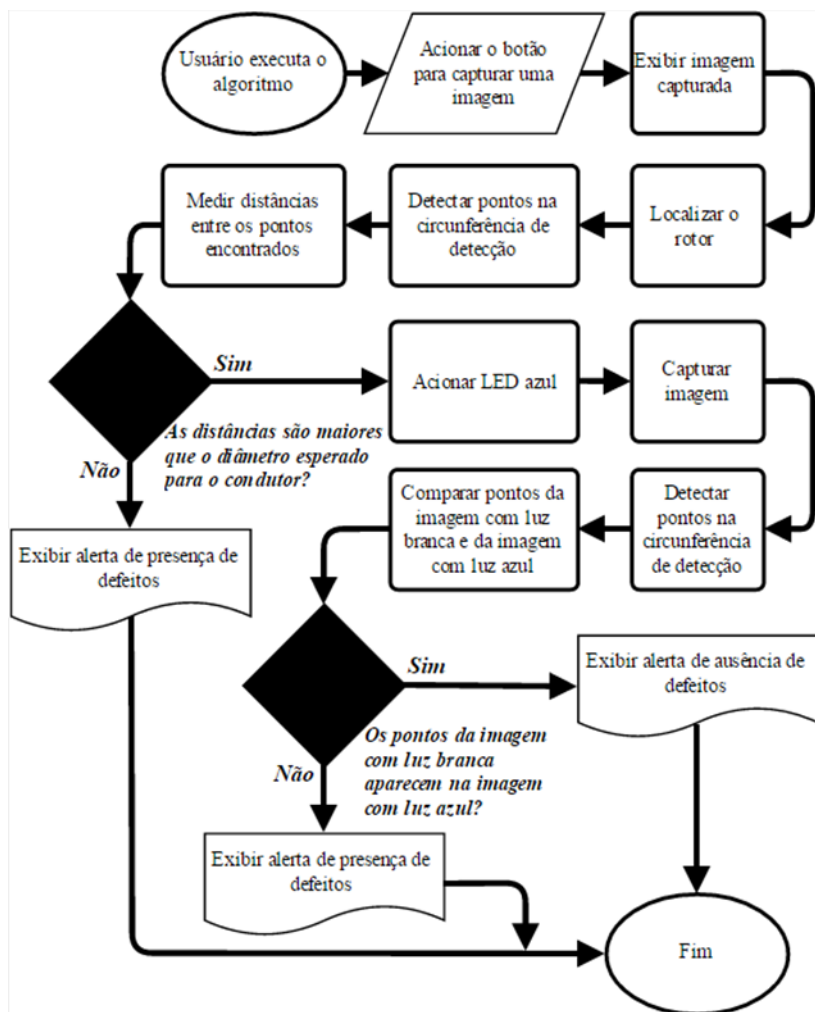
Na figura 42, é mostrada a bancada na versão para uso com o estator.

A câmera disponível para ser utilizada foi a Pixelink PL-B777G. Ela é uma câmera Gigabit Ethernet com sensor CMOS 1/2,5" (10,16 mm) e resolução de 2592 pixels por 1944 pixels. A lente usada foi uma Fujinon HF9HA-1B com foco manual, distância focal 9 mm e distância mínima de trabalho de 0,1 m.

Esses dados foram importantes para o projeto como um todo, pois serviram de parâmetros de entrada para se determinar todas as dimensões da bancada. Começando pela lente, era necessário o uso de uma que tivesse uma distância focal pequena (lente grande angular), conforme visto na seção 3.4. Com a distância mínima de trabalho e a área de trabalho na distância mínima, chegou-se à distância de trabalho de aproximadamente 200 mm para poder focalizar tanto o estator como o ERB aproveitando o máximo possível da área disponível.

O sistema de posicionamento da câmera (item 2 da figura 42) é composto de uma estrutura de ferro fundido e aço com variação de altura que sustenta duas mesas de rotação graduadas da empresa Newport, com resolução de 0,5°, permitindo o ajuste da rotação da câmera nos eixos x e y, conforme visto na figura 43.

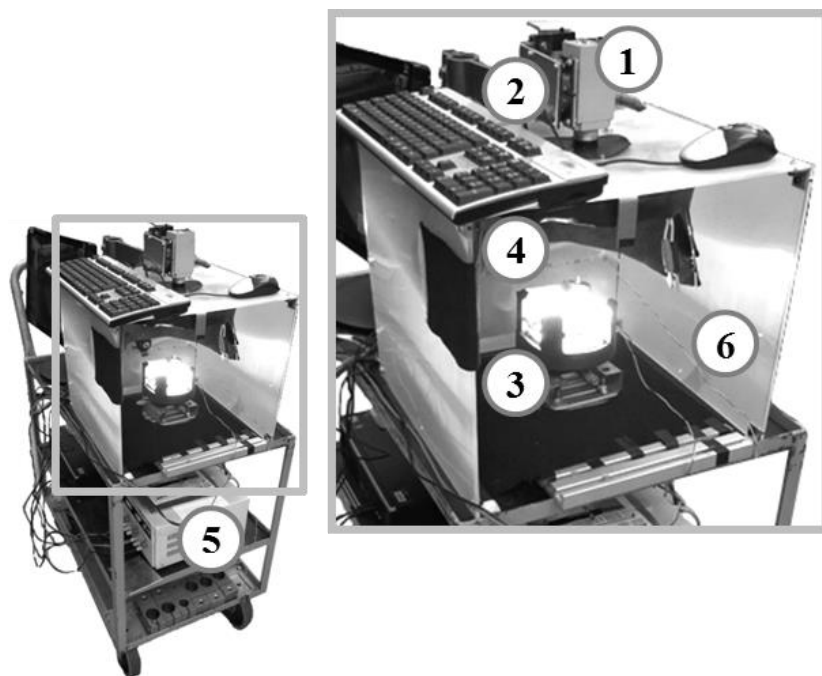
Figura 41 – Fluxograma do algoritmo de detecção de condutores no ERB.



Fonte: autor.



Figura 42 – Bancada para obtenção de imagens para detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor.

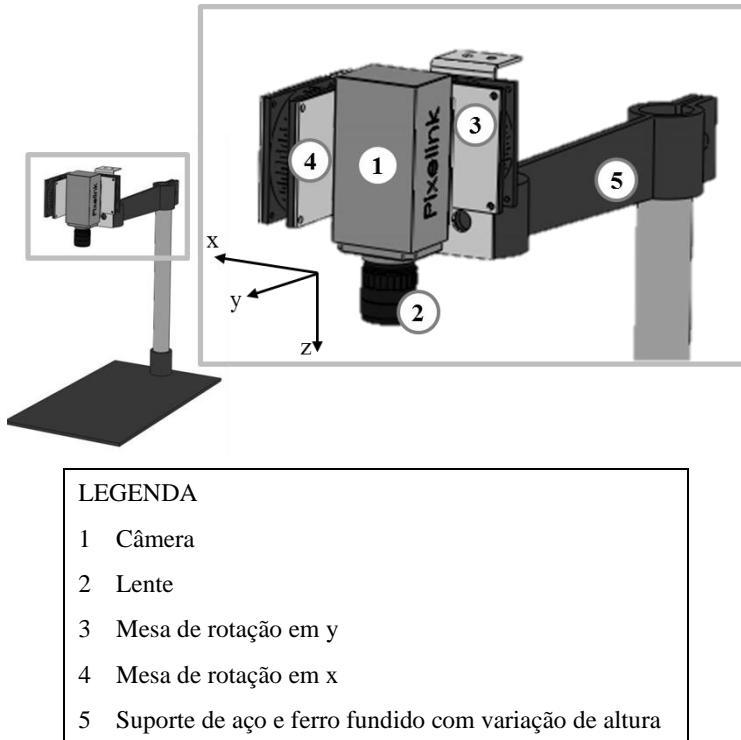


#### LEGENDA

- 1 Câmera e lente
- 2 Sistema de posicionamento da câmera
- 3 Sistema de posicionamento do estator
- 4 Cúpula de isolamento de luz externa
- 5 Fonte 12 V
- 6 Difusor de luz externa

Fonte: autor.

Figura 43 – Sistema de posicionamento da câmera.



Fonte: autor.

Seguindo, o sistema de posicionamento do estator (item 3 da figura 42) é composto de um paleté<sup>20</sup> polimérico de sustentação do estator, uma mesa de deslocamento de dois eixos da Newport para movimentação em x e y e seus parafusos micrométricos (resolução de 0,2  $\mu\text{m}$ ), um circuito de iluminação composto por uma fita de LED de luz branca e de peças metálicas para fixação, além de um tecido escuro não reflexivo para evitar que a reflexão de luzes externas na superfície

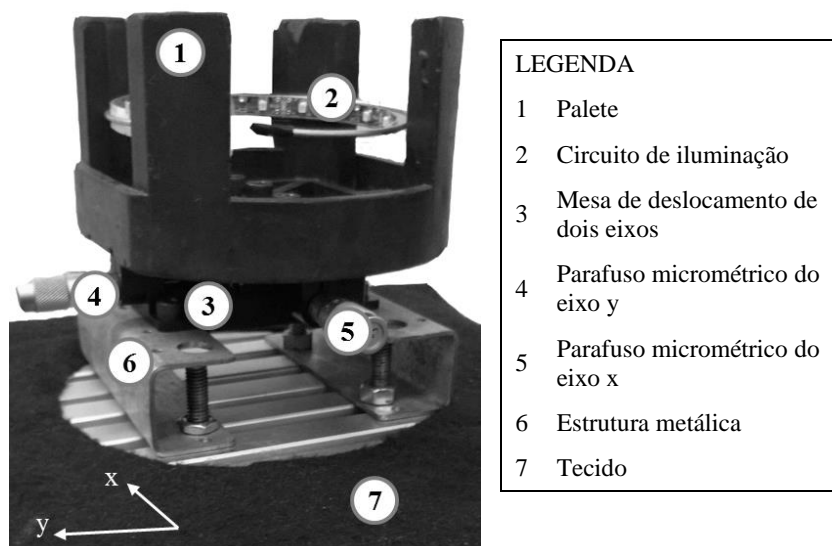
<sup>20</sup> O paleté foi obtido na empresa que fabrica os estatores que foram utilizados nos estudos de caso e é o mesmo usado para o transporte desses durante o processo de fabricação nas suas linhas de montagem. Essa escolha foi feita para facilitar a montagem da bancada, tendo em vista que não haveria necessidade de desenvolver uma parte dela que encaixasse corretamente no estator.

metálica da base atrapalhasse a qualidade das imagens capturadas. Essa montagem, realizada em cima de uma placa metálica, foi feita de forma que fosse fácil a modificação da bancada para trabalhar com o ERB ao invés do estator. Na figura 44, ela é mostrada.

A iluminação com fita de LEDs foi escolhida devido à praticidade de montagem, flexibilidade para criação da geometria desejada e possibilidade do controle de brilho através da corrente elétrica, fatores essenciais para a criação de um protótipo, cujos parâmetros são, num primeiro momento, desconhecidos. Além disso, LEDs emitem pouco calor e apresentam grande durabilidade, sendo considerados a principal técnica de iluminação em SV (STEGER; ULRICH; WIEDERMANN, 2008).

O sistema da figura 44 utiliza iluminação na parte inferior, de forma a evidenciar as partes relevantes (isolantes e superfície interna do estator) e ocultar detalhes não importantes, como aconteceria, por exemplo, se os LEDs estivessem na parte superior do estator.

Figura 44 – Sistema de posicionamento do estator.



Fonte: autor.

O tecido escuro acima citado foi usado para a confecção de uma cúpula (item 4 da figura 42) para isolar o estator ou o ERB de luzes externas. Nela foram instalados circuitos de LED para se obter uma iluminação num posição superior, a qual é a adequada quando se capturam imagens do ERB, pois se fosse na parte inferior, além de ser difícil de ser instalada, pouco ajudaria na captura da imagem, já que pouca luz passa pela folga entre rotor e estator. A estrutura pode ser vista na figura 45.

Ambos os circuitos de LED da iluminação inferior e superior são alimentados por uma fonte Minipa MPL-3303 (item 5 da figura 42).

Por fim, o difusor de luz externa (item 6 da figura 42) é composto de quatro placas de acrílico transparente com uma película difusora fosca aplicada. Seu uso é interessante para filtrar a luz externa, garantindo que nenhum ponto de concentração de luz atrapalhe a aquisição de imagens. Na figura 46, é mostrado o difusor.

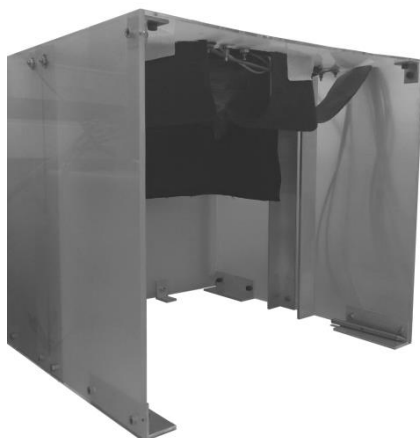
Para se realizar a inspeção do ERB com a bancada, é necessário apenas retirar o sistema de posicionamento do estator (item 3 da figura 42). Como a bancada foi pensada para ser utilizada com posicionamento manual, em laboratório utilizou-se uma série de blocos metálicos para apoiar o conjunto e no ambiente fabril dos estudos de caso do capítulo 7 os próprios paletes da linha de montagem estudada (figura 47) serviram de suporte.

Figura 45 – Vista interna da cúpula escura. Destaque para os LEDs de iluminação superior.



Fonte: autor.

Figura 46 – Difusor de luz externa.



Fonte: autor.

Ainda, o projeto da bancada foi pensado para poder ser facilmente adaptado à linha de montagem para, no futuro, executar testes mais definitivos, possibilitando a captura de imagens diretamente nela, sem necessidade de remoção do palete da logística fabril.

Figura 47 – Paleta do ERB.



Fonte: autor.



## 5. MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE ISOLANTES

Neste capítulo será tratado o defeito “isolante ausente ou fora da posição”. Como já mencionado na seção 3.2, da mesma maneira que foi feito para a detecção do defeito “condutores na trajetória de inserção do rotor”, para o monitoramento da altura dos isolantes foi usada uma câmera numa posição superior ao estator, virada para baixo, com a lente posicionada coaxialmente em relação ao eixo dele, possibilitando a detecção de múltiplos defeitos simultaneamente numa única aquisição de imagem.

Como visto na seção 3.4.2, a grande questão no monitoramento da posição dos isolantes usando VC é a falta de acesso adequado para captura de imagens. Sendo a proposta a aquisição de única imagem em uma posição superior, é evidente que as medições dos isolantes feitas com ela estarão sujeitas a problemas com a perspectiva. Não medir dimensões em verdadeira grandeza, isto é, com o eixo da câmera normal à superfície do objeto que contem o mensurando de forma que a escala esteja paralela à grandeza, acarretará em uma incerteza de medição maior, além do que é necessário conhecer a relação entre a projeção dos isolantes na imagem e sua altura. Encontrar uma função de medição que relaciona a altura de cada um dos isolantes com a projeção por ele apresentada na imagem capturada não é uma tarefa trivial.

O modelo de câmera *pinhole* equaciona esses tipos de relação, conforme mostrado na seção 2.7. Contudo, como será visto na seção 5.1, há problemas na consideração do modelo devido ao fato dos isolantes não estarem sempre num mesmo afastamento em relação ao centro do estator. Dessa forma, optou-se por desenvolver uma forma numérica de obtenção de uma função de medição e das incertezas de medição associadas a cada valor do intervalo de medição considerado. A obtenção da função de medição é explicada também na seção 5.1.

Considerando o objetivo de unificar a detecção desse defeito com os do capítulo 4, a bancada utilizada para testes em laboratório e nos estudos de caso foi a mesma descrita na seção 4.3.

Na seção 5.2, o algoritmo desenvolvido é apresentado, e na seção 7.4 são explicados os estudos de caso executados em fábrica para testes do algoritmo com peças reais da linha.

## 5.1. PERSPECTIVA, FUNÇÃO DE MEDIÇÃO E MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A perspectiva permite dizer se um objeto conhecido está mais próximo ou mais distante de um determinado ponto de visualização (CANO, 2015). Naturalmente um objeto que esteja mais longe desse ponto aparentará ter um tamanho menor do que esse mesmo objeto numa posição mais próxima. Na figura 48, vê-se uma fotografia utilizando a chamada perspectiva forçada<sup>21</sup>. Nela, a garrafa e as pessoas foram posicionadas estrategicamente para parecer que a garrafa é muito maior do que realmente é.

Pensando dessa maneira, vê-se que conforme um determinado objeto se afasta do ponto de visualização da cena, menor ele parece para o observador. Logicamente, isso também ocorre com os isolantes presentes numa imagem capturada de um estator. No entanto, nesse caso ainda existe um agravante, que é a questão de os isolantes não estarem paralelos à câmera. Isso, de maneira simplificada, poderia ser explicado usando a figura 48 da seguinte maneira: com relações trigonométricas simples, é possível inferir sobre a altura das pessoas da foto se a distância delas em relação à câmera que capturou a imagem é conhecida, porque pode se considerar que estando a pessoa de pé, ela está numa posição vertical em relação ao solo e, portanto, paralela à lente da câmera; se a pessoa estivesse inclinada em relação à lente, cada ponto do corpo dela estaria a uma distância diferente do observador, ou seja, a altura medida na imagem não seria a altura real da pessoa, e sim uma projeção da altura, a qual é aproximadamente proporcional ao ângulo de inclinação dela em relação à lente.

Primeiramente pode-se pensar que o modelo *pinhole* mostrado na seção 2.7 seria o indicado para relacionar as projeções das alturas na imagem com as alturas dos isolantes no mundo real. A figura 49 mostra o modelamento da câmera *pinhole* aplicado à situação de monitoramento de altura de isolantes<sup>22</sup>.

Com as relações de triângulos da figura 49, obtêm-se a equação 11 e a equação 12, referentes às semelhanças de triângulos A e B da imagem, respectivamente.

---

<sup>21</sup> Técnica a qual usa justamente a forma como a perspectiva possibilita a diferenciação do tamanho de objetos considerando a distância a que eles estão do ponto de observação para criar ilusões de óptica.

<sup>22</sup> Todas as grandezas em caixa alta estão em milímetros e as em caixa baixa em pixels, exceto a distância focal, que é representada pela letra *f* em caixa baixa devido ao uso disseminado dessa representação para a grandeza na literatura.

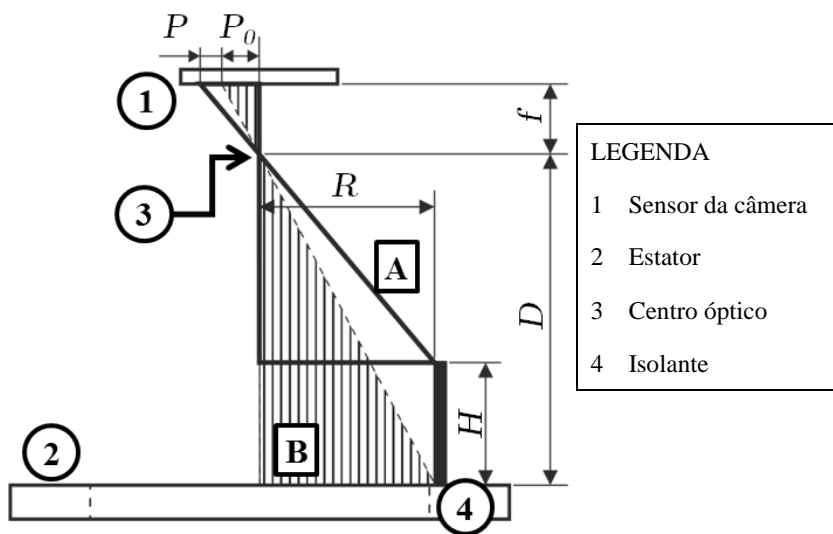


Figura 48 – Perspectiva forçada.



Fonte: adaptado de Unbelievable (2015).

Figura 49 – Modelo *pinhole* aplicado ao monitoramento de altura de isolantes.



Fonte: autor.

$$\frac{R}{D} = \frac{P_0}{f} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\frac{R}{D - H} = \frac{P + P_0}{f} \quad \text{Eq. 12}$$

onde

$R$	raio do isolante, em mm
$D$	altura entre o centro óptico e a face superior do pacote de lâminas do estator, em mm
$H$	altura do isolante, em mm
$P$	projeção da altura do isolante no sensor da câmera, em mm
$P_0$	projeção do raio do isolante no sensor da câmera, em mm
$f$	distância focal, em mm

Unindo as equações 11 e 12 e deixando em evidência a altura  $H$ , tem-se a expressão da equação 13.

$$H = \frac{PD^2}{PD + Rf} \quad \text{Eq. 13}$$

Um experimento para a determinação da relação entre a projeção da altura do isolante na imagem e sua altura real foi realizado em laboratório utilizando um estator, uma escala preta-e-branca cuidadosamente colada em seu interior, de forma que uma determinada graduação da escala coincida da melhor forma possível com a face superior do pacote de lâminas do estator, e a câmera e lente descritas na seção 4.3, as mesmas utilizadas na bancada. Na figura 50, é vista uma imagem capturada com o experimento proposto.

Utilizando um algoritmo criado em LabVIEW, que emprega principalmente uma função de detecção de bordas do pacote de VC do ambiente de desenvolvimento<sup>23</sup>, foram encontradas uma circunferência representando a primeira graduação da escala, mais próxima à câmera, e uma representando a última graduação, mais distante. Então, duas circunferências foram inseridas na imagem, uma de raio 10 pixels maior que o da circunferência da primeira graduação da escala, e outra 10 pixels menor que o da circunferência da última graduação. Aí, 46 linhas foram criadas partindo da circunferência maior para a menor, uma a cada 7,5° da anterior, sem utilizar a parte sem escalas, conforme visto na

<sup>23</sup> IMAQ Edge tool 3 do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

figura 51. Isso foi feito visando reduzir da melhor forma disponível os efeitos de qualquer desalinhamento da câmara em relação ao estator.

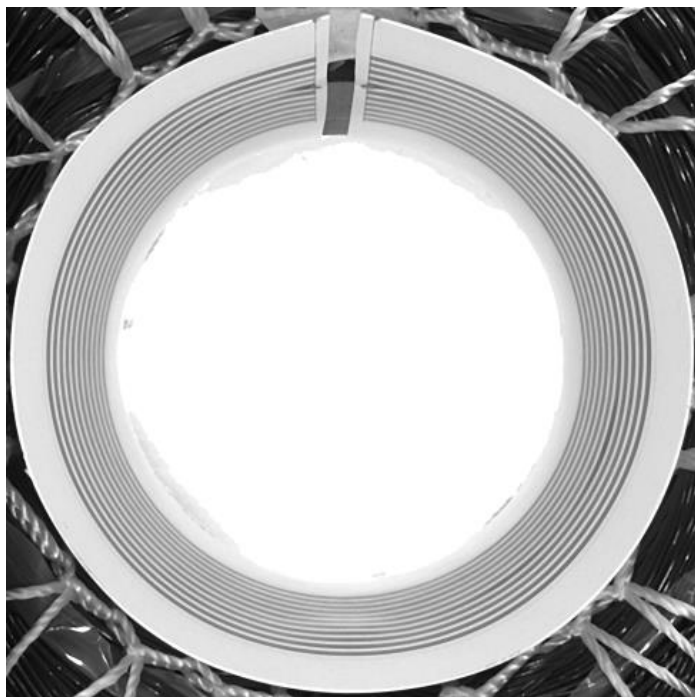
Essas regiões de interesse determinaram as coordenadas das transições de preto para branco e de branco para preto da escala onde elas estavam posicionadas. Com as distâncias entre esses pontos e o centro da circunferência de referência, acham-se as projeções  $p$  que representam as alturas dos pontos na imagem em relação à face superior do pacote de lâminas, conforme apresentado na equação 14.

$$p = l - r_{ref} \quad \text{Eq. 14}$$

onde

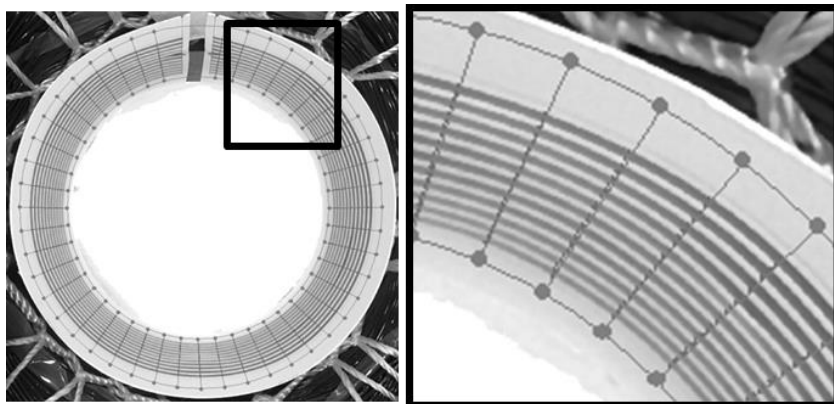
$p$             projeção do isolante, em pixels

Figura 50 – Imagem capturada para o experimento de perspectiva.



Fonte: autor.

Figura 51 – Algoritmo de experimento de perspectiva.



Fonte: autor.

$l$	distância entre o centro da circunferência de referência e o ponto que representa interface preto e branco na escala, em pixels
$r_{ref}$	raio da circunferência de referência, em pixels

As relações entre altura e projeção conseguidas com os pontos da figura 51 colocadas em um gráfico apresentam forma similar à mostrada na figura 52.

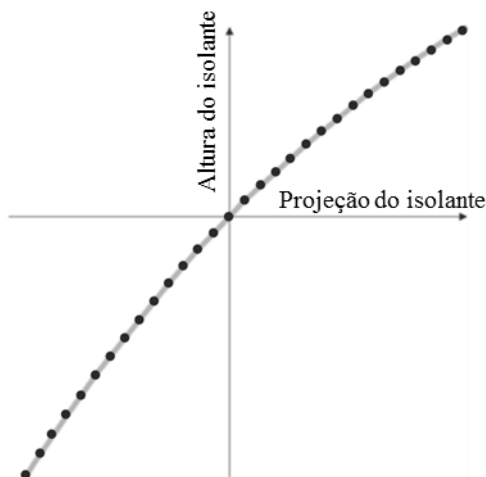
Visando encontrar os parâmetros  $D$  e  $R$  da equação 13, os dados foram ajustados à curva proposta por essa expressão. Ainda, para efeito de comparação, esses dados foram ajustados tanto a essa quanto a uma curva exponencial proposta, cuja expressão é a apresentada na equação 15.

$$H = \alpha \left( 1 - e^{-\frac{p}{\beta}} \right) + \gamma \quad \text{Eq. 15}$$

onde

$H$	altura de um determinado isolante, em mm
$\alpha, \beta$ e $\gamma$	coeficientes de ajuste da equação
$p$	projeção da altura na imagem, em pixels

Figura 52 – Curva formada pelos dados obtidos pelo algoritmo. Detalhe para sua forma exponencial.



Fonte: autor.

Uma vez definidas as equações para os ajustes, foi desenvolvida uma forma de encontrar os parâmetros das equações. Encontraram-se os parâmetros  $R$  e  $D$ , para equação 13, e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , para a equação 15, utilizando a ferramenta de ajuste de curvas do *software* MATLAB, o qual inclusive fornece os resultados já com incertezas com 95% de confiança. Essa alternativa foi escolhida, pois a medição de  $R$  e  $D$  é complicada, tendo em vista que o acesso de um instrumento de medição às extremidades dessas distâncias é limitado em ambas as situações, no primeiro caso pela bobina e no segundo pelo fato do centro óptico estar em um ponto efetivamente dentro da lente. Além disso,  $R$  varia com o afastamento dos isolantes em relação ao centro, dificultando ainda mais mensurar essa grandeza.

Por fim, determinaram-se as incertezas relativas à medição utilizando a função de medição encontrada para todo o intervalo de medição de comprimentos de projeção de isolante. Para tanto, utilizou-se tanto a forma analítica de cálculo de incertezas como também foram desenvolvidos três métodos utilizando simulação de Monte Carlo, os quais culminaram também em curvas que possibilitam a comparação entre todos os métodos, dando uma ideia do desempenho metrológico do

equipamento projetado. Os métodos numéricos são descritos nas seções que seguem. Os resultados desses métodos, dos cálculos analíticos e também do cálculo dos coeficientes serão mostrados na seção 7.4.

### 5.1.1. Método MC1 - Projeções e alturas

O primeiro método a ser descrito é o Método MC1 – Projeções e alturas. A ideia geral do método consiste em determinar as incertezas tanto do processo de ajuste de curvas quanto da etapa de uso da curva ajustada. Para isso, são gerados diversos valores em torno dos pontos que deram origem à figura 52 com base na variação esperada da altura (incerteza na escala e no processo de montagem do experimento) e da projeção (incerteza do algoritmo de identificação de bordas e variabilidade da projeção em função da posição em que se encontra na imagem). Esses pontos são empregados para gerar várias curvas ajustadas, que representam uma família de possíveis curvas que poderiam ser obtidas com base na variabilidade do processo. Posteriormente, avalia-se o efeito da variação da projeção durante o uso das curvas ajustadas, dando origem a limites máximos e mínimos para a incerteza de medição em cada coordenada  $p'^{24}$  de projeção de altura de isolante.

As curvas do primeiro experimento (figura 50 e figura 51) contêm cada uma 24 coordenadas ( $p'$ , H), onde  $p'$  é a projeção e H é a altura de um isolante, tendo forma semelhante à apresentada na figura 52. As coordenadas de uma dessas curvas foram usadas para criar uma distribuição normal para cada um dos 24  $p'$  e uma para cada um dos 24 H dela, contendo  $10^6$  elementos cada uma. O número  $10^6$  foi escolhido de modo que o aumento da ordem de grandeza desse valor não alterasse consideravelmente o envoltório das curvas de saída do algoritmo. Foram utilizados como incertezas expandidas na entrada da função 0,0198 mm para as projeções e 2,5 mm para as alturas, para o modelo *pinhole*, e 9 pixels para projeções e 2,5 mm para alturas, para o modelo exponencial, valores obtidos como uma estimativa inicial da variabilidade esperada no processo pelas condições do experimento de identificação da curva de medição.

Cada uma dessas distribuições de  $p'$  e H retrata a dispersão do fenômeno, isto é, para cada  $p'$  e H desejado há uma distribuição normal com  $10^6$  elementos criada de acordo com a respectiva função densidade

---

<sup>24</sup>  $p'$  representa uma projeção de altura de isolante independentemente da unidade, podendo ser em pixel ou em milímetro.

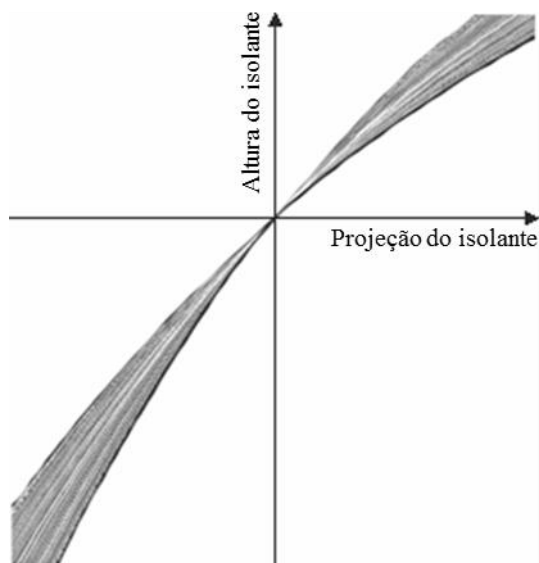
de probabilidade que caracteriza o comportamento aleatório de cada uma das variáveis devido a erros de medição.

Esses dados foram organizados para cada modelo de forma a gerar  $10^6$  conjuntos com 24 coordenadas, da mesma forma que a curva que os havia gerado. Cada conjunto entrou numa função de ajuste de curvas do LabVIEW, resultando em  $10^6$  grupos de coeficientes R e D, para o modelo *pinhole*, e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , para o modelo exponencial, formando uma nuvem de dados similar à ilustrada na figura 53.

Como o número de pontos gerado é bastante grande, essas nuvens de dados representam bem a variação que o processo de medição de altura da escala com base na projeção dessa altura na imagem pode ter, considerando as incertezas expandidas utilizadas.

Caso não houvesse variabilidade no processo na utilização da curva ajustada, o procedimento de determinação da incerteza de medição estaria terminado com a escolha, para cada ponto de projeção de interesse, dos limites inferior e superior de alturas das curvas ajustadas. Esse procedimento está ilustrado na figura 54 com o número

Figura 53 – Nuvem de dados.

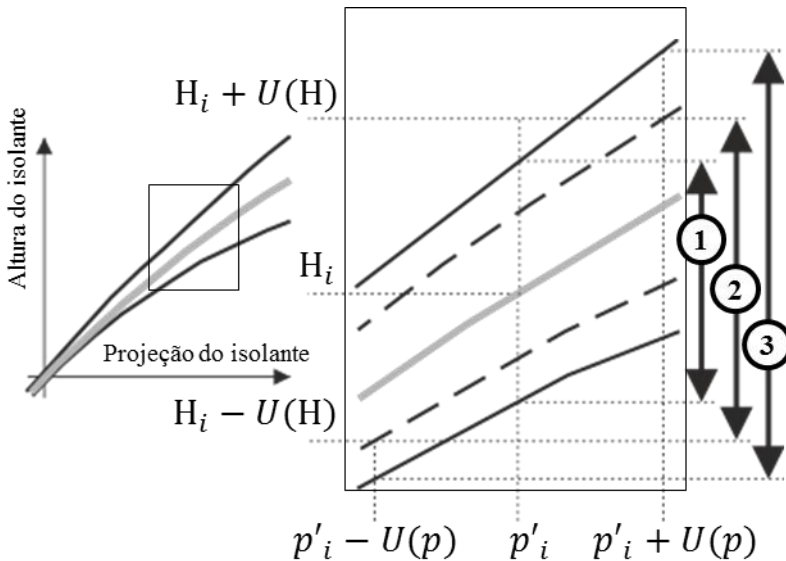


Fonte: autor.

1. Todavia, existe incerteza também no uso da curva ajustada, sendo necessário considerar essa parcela no balanço final de incertezas. Além disso, em metrologia não é comum o emprego de um intervalo de confiança de 100%, o que exige um processamento diferente na determinação dos máximos e mínimos para cada ponto de projeção.

Para considerar a incerteza das projeções no uso da melhor curva ajustada, a incerteza das projeções foi somada e subtraída dos valores nominais de projeção, gerando para cada projeção  $p'_i$  os valores  $p'_i + U(p')$  e  $p'_i - U(p')$ , onde  $U(p')$  é essa incerteza. Foi considerado que  $U(p')$  é igual a 9 pixels com base na observação da variabilidade do experimento, o que no modelo *pinhole* se tornou 0,0198 mm. É interessante ressaltar que as incertezas assumidas na fase de ajuste da curva e de uso da mesma foram consideravelmente diferentes. No primeiro caso, a incerteza de pixel está essencialmente associada à incerteza de detecção de bordas pelo algoritmo empregado, enquanto no segundo é uma composição dessa mesma incerteza com a variabilidade natural do posicionamento do isolante, que pode estar mais próximo ou

Figura 54 – Determinação dos valores máximos e mínimos de H pelo método A, detalhe em preto representa uma ampliação de um trecho da curva.





mais distante do eixo central do estator. Isso ocorre porque, para uma mesma altura, dois isolantes podem ter projeções diferentes se estiverem mais próximos ou mais distantes do centro do estator.

De maneira simples, se considerou que cada valor  $p_i$  pode variar dentro do intervalo criado pela incerteza  $U(p')$ , podendo, pois, assumir um intervalo de valores maior, mostrado no número 3 da figura 54. Esses valores limites das projeções foram empregados nas curvas ajustadas, dando origem a um grupo de valores de alturas possíveis para cada projeção  $p'_i$ . Dessa forma, tem-se um conjunto de pontos que representam a variabilidade possível do processo considerando tanto a fase de ajuste de curvas quanto o uso da curva ajustada.

A partir desses grupos, para cada uma das projeções  $p'_i$  foram determinados os limites inferior e superior da variação esperada (incerteza de medição) considerando um intervalo de confiança de 95%, menos conservador, seguindo o Método de Monte Carlo para avaliação de incertezas de JCGM (2014). Para cada projeção, foram determinados o máximo e mínimo como sendo os extremos de um subconjunto desses dados, contendo 95% deles, de modo que a diferença entre o máximo e o mínimo fosse a menor possível. Esse intervalo é mostrado com a seta de número 2 na figura 54. Esses valores máximos e mínimos representam, portanto, com 95% de confiança, os limites superior e inferior, respectivamente, da incerteza para cada  $p'_i$  do intervalo de medição escolhido.

Para se determinar as curvas com as incertezas de medição para a comparação entre os métodos, era indispensável comparar os valores encontrados de limites superior e inferior de incerteza com um valor de  $H$  nominal. Para ser possível comparar o desempenho desse método com os que serão descritos a seguir, foram usados como valores nominais os obtidos com a função de medição, ou seja, com os coeficientes da equação 15 conseguidos no MATLAB, conforme descrito acima. Portanto, obteve-se essa curva através da subtração entre o máximo e o valor nominal e entre o valor nominal e o mínimo, resultando então no limite superior e inferior, respectivamente, para cada  $p'_i$ . Ela será mostrada na seção 7.4.1, juntamente com discussões acerca dela.

### 5.1.2. Métodos MC2 e MC3 – Coeficientes

No método MC1, valores de projeção e altura foram usados para ajustar curvas, visando encontrar as incertezas para cada ponto. Outra possibilidade seria utilizar diretamente as incertezas dos coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  (equação 15), encontrados via MATLAB anteriormente, para criar

a nuvem de dados para descobrir as incertezas de  $H$ . Partindo disso, foram desenvolvidos dois métodos: MC2 e MC3. Vale ressaltar que nesses métodos, a incerteza foi considerada sobre os coeficientes de ajuste e não sobre os dados brutos originais de medição.

No método MC2, foi gerada para cada modelo uma distribuição normal com  $10^6$  números para cada um dos coeficientes, centrada neles e considerando seus desvios-padrão também resultantes do ajuste numérico via MATLAB. Os elementos  $R_i$ ,  $D_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$ , para  $i$  de um a um milhão, foram utilizados para gerar  $10^6$  curvas as quais relacionavam projeções de isolante e suas alturas, formando a nuvem de dados, semelhante à da figura 53. Para que os máximos e mínimos fossem determinados, foram escolhidos os mesmos intervalos de medição utilizados no método MC1. Vale ressaltar, entretanto, que esse método considera apenas a incerteza do ajuste, não representando a incerteza do uso da curva ajustada.

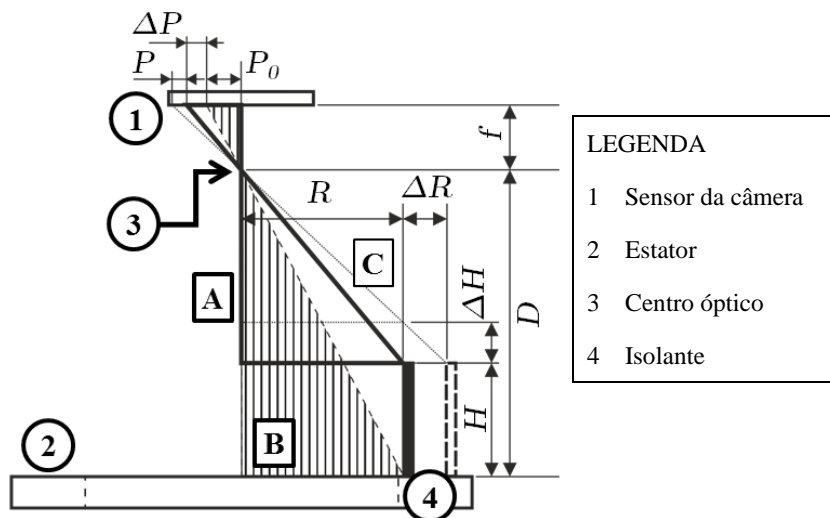
O método MC3 diferiu de MC2 na forma de criar a nuvem, a fim de considerar a incerteza da projeção, ou seja, a incerteza no uso da curva. Para tanto, ao aplicar os coeficientes das distribuições normais, para cada curva utilizou-se uma escala em que cada  $p$  dela foi acrescido de valor pertencente ao intervalo de números representados pela incerteza  $\pm 0,0198$  mm para o modelo *pinhole* e  $\pm 9$  pixels para o modelo exponencial, como feito no método MC1, portanto sendo escalas diferentes para cada curva. Isso foi feito para que se chegasse cada vez mais perto de um procedimento não virtual de medição, aumentando a confiabilidade do experimento.

### **5.1.3. Análise da variação da altura do isolante a partir de uma variação em seu raio**

Utilizando o modelo *pinhole*, foi possível também alguns cálculos para mensurar o efeito da variação do raio do isolante, isto é, da distância entre ele e o centro do estator, na medição da altura desse isolante. Como a altura de isolantes é medida em uma imagem que é uma planificação do estator, tanto variação de raio quanto variação da altura são percebidos da mesma forma na imagem. Assim, esta seção busca determinar se a variação de raio é ou não um problema crítico para a medição de altura de isolantes.

Para tanto, foi necessário variar o raio  $R$  uma quantidade conhecida e, conforme mostrado na figura 55, calculou-se o quanto isso variaria a altura  $H$ , gerando a grandeza e sua expressão, mostrada na equação 16.

Figura 55 – Esquema da análise da variação da altura de isolante a partir de uma variação de seu raio.



Fonte: autor.

$$\Delta H = \frac{fDR}{PD + Rf} \left( 1 - \frac{R}{R + \Delta R} \right) \quad \text{Eq. 16}$$

onde

$\Delta H$	variação da altura de isolante causada por uma variação no seu raio
$R$	raio do isolante
$D$	altura entre o centro óptico e a superfície superior do estator
$P$	projeção da altura do isolante no sensor da câmera
$f$	distância focal
$\Delta R$	variação no raio do isolante

Na seção 7.4.2 são mostrados resultados em relação a essa análise.

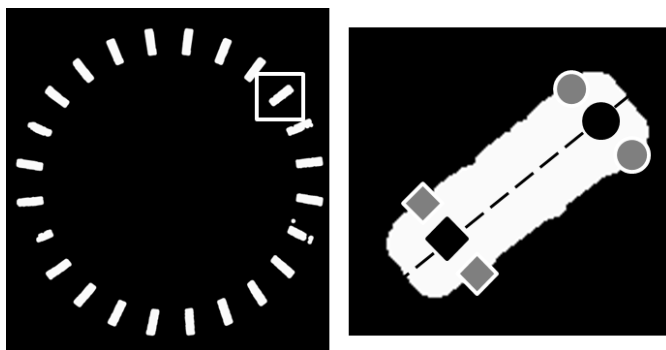
## 5.2. ALGORITMO DE MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DE ISOLANTES

Nesta seção, será descrito o algoritmo usado para encontrar as extremidades dos isolantes na imagem e, com isso, calcular a projeção, obtendo através da função de medição calculada na seção anterior, as alturas dos isolantes no estator medido.

O algoritmo é igual ao descrito na seção 4.1 até a parte na qual as bordas dos isolantes são encontradas no gabarito virtual (figura 32). As extremidades dos segmentos que representam as bordas dos isolantes são utilizadas então para determinar a localização de pontos que pertencem à bissetriz de cada isolante, através do cálculo de um ponto médio entre as extremidades superiores e um entre as inferiores (pontos pretos da figura 56).

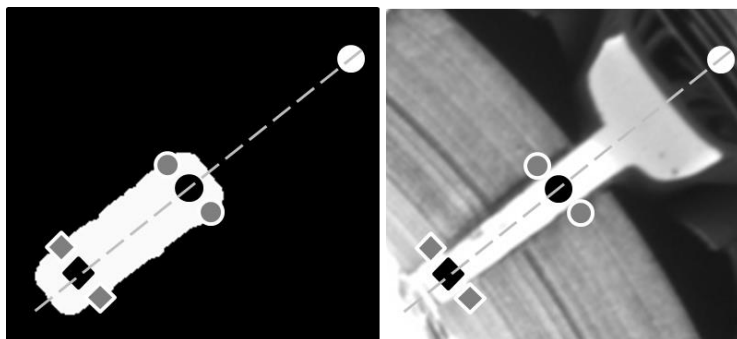
Em posse das coordenadas dos pontos das bissetrizes dos isolantes, segmentos de reta tracejados da figura 57 (a) e (b), manipulações matemáticas são feitas de forma a obter outros pontos que pertencem a esses segmentos de reta, porém mais afastados do centro, representados pelos círculos brancos nas partes direitas da mesma figura. Esse procedimento é adotado para criação das ROIs, que são cada um dos segmentos limitados pelo losango preto e pelo círculo branco na figura 57. Essas ROIs serão utilizadas para determinar a posição da extremidade do isolante da imagem original, empregando

Figura 56 – Determinação dos pontos médios das extremidades dos segmentos que representam as bordas dos isolantes.



Fonte: autor.

Figura 57 – Determinação de um terceiro ponto que pertence à bissetriz de um isolante.

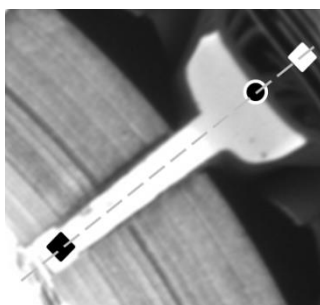


Fonte: autor.

uma função de detecção de bordas<sup>25</sup> para determinar as coordenadas da extremidade dos isolantes do estator, representadas pelo círculo preto de borda branca da figura 58.

Esse é o dado necessário para se calcular o comprimento da projeção da altura do isolante na imagem. Juntamente com o valor das coordenadas do centro da circunferência superior e seu raio, mostrados em vermelho na figura 59, todas as informações requeridas para determinar as projeções estão em mãos.

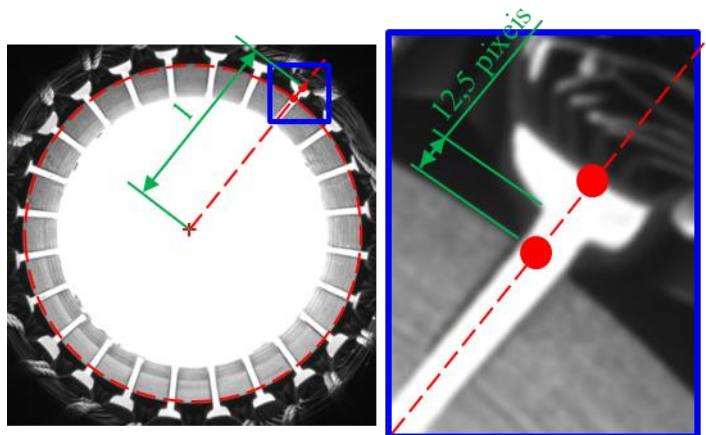
Figura 58 – Extremidade do estator encontrada.



Fonte: autor.

<sup>25</sup> IMAQ Edge tool 3 do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

Figura 59 – Parâmetros utilizados no cálculo do comprimento da projeção da altura dos isolantes.



Fonte: autor.

Contudo, há de se observar o fato que os isolantes não ficam à mesma distância do centro do estator que a sua parede interna. Assim, uma operação matemática direta com dados que envolvam essas partes está sujeita a erros consideráveis.

A correção dessa diferença de posições é complexa, pois lida com projeções de distâncias tridimensionais presentes na imagem, sendo que provavelmente a própria perda de informações do mundo real 3D para a sua planificação na captura da imagem pode fazer com a que a informação necessária para resolver essa situação se perca. Resolveu-se então compensar parte do problema através da medição na imagem da distância entre a parede interna do estator e a ranhura do isolante, o que resultou em 12,5 pixels. Essa dimensão é empregada como correção no cálculo do comprimento da projeção, da forma mostrada na equação 17:

$$p = l - p_0 - 12,5 \quad \text{Eq. 17}$$

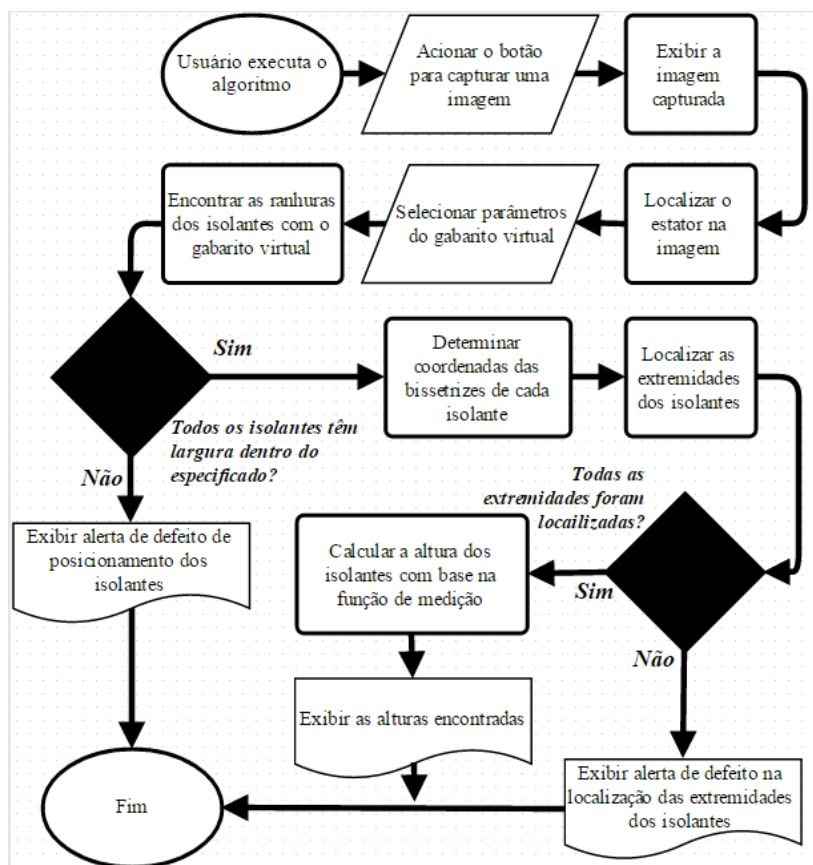
onde

- $p$  comprimento da projeção do isolante, em pixels
- $l$  distância entre o centro da circunferência superior e o ponto que representa a extremidade do isolante, em pixels
- $p_0$  raio da circunferência superior, em pixels

Por fim, cada valor  $p$  encontrado pela equação 17 de cada isolante é usado na equação de seu respectivo modelo com os parâmetros encontrados pelo procedimento descrito na seção 5.1, encontrando finalmente as alturas dos isolantes da imagem capturada, sendo que para o modelo *pinhole* as projeções precisam ainda ser multiplicadas pelo tamanho do pixel no sensor para assegurar a correta análise dimensional dos modelos.

Na figura 60, as etapas para se calcular a altura dos isolantes são esquematicamente mostradas.

Figura 60 – Fluxograma do algoritmo de monitoramento de alturas de isolantes.



Fonte: autor.





## 6. DETECÇÃO DE CABOS FIXADOS INCORRETAMENTE DENTRO DA CAIXA DE TOMADAS

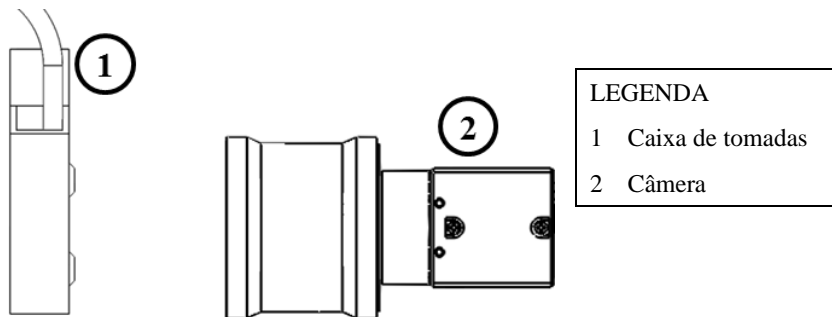
O sistema de visão proposto para a detecção do defeito de cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas tem posicionamento relativo semelhante ao mostrado na figura 61, com a câmera visualizando a caixa de tomadas com os orifícios de conexão voltados para frente.

O defeito que se busca identificar é caracterizado por uma falha no encaixe do clipe com o engate de plástico presente dentro da caixa de tomadas, o que pode gerar um mau funcionamento do estator, uma vez que qualquer movimentação da tomada pode acabar por abrir o circuito.

Um cabo sem defeito pode suportar ser tracionado até uma determinada tensão máxima sem se romper ou se soltar da caixa de tomadas, de forma que ao submetê-lo até uma tensão próxima, é possível constatar se existe o defeito ou não. Visualmente, após a atuação dessa tensão, os cliques com defeitos ficam evidentes nos orifícios de conexão e/ou na parte superior da caixa de tomadas, conforme mostrado na figura 62. Nela, o cabo central e o cabo da direita apresentam defeito, evidentes tanto na parte superior quanto nos seus respectivos orifícios, o que não acontece no da esquerda, o qual não tem inconformidades.

Essas alterações mostradas na figura 62 são os elementos que serão procurados na imagem pelo algoritmo, como será descrito na seção 6.1.

Figura 61 – Esquema de captura de imagem da detecção de cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas.



Fonte: autor.

Figura 62 – Caixa de tomadas com defeito em dois cabos. Em destaque, a alteração visual causada pelos defeitos.

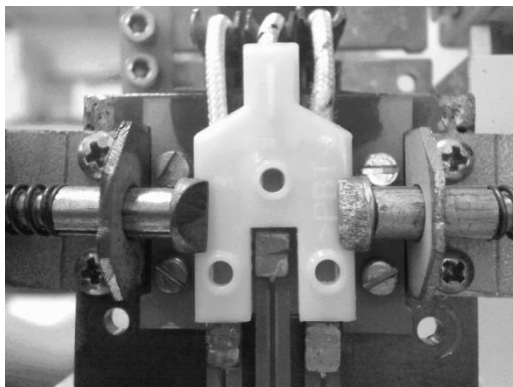


Fonte: autor.

#### 6.1. ALGORITMO DE DETECÇÃO DE CABOS FIXADOS INCORRETAMENTE DENTRO DA CAIXA DE TOMADAS

Na figura 63, é mostrada uma imagem obtida com o auxílio da bancada desenvolvida para identificação dos defeitos na fixação de cabos na caixa de tomadas. Mais detalhes sobre a bancada serão exibidos na seção 6.2, a qual trata especificamente sobre ela. Uma imagem como a da figura 63 é empregada como entrada no algoritmo desenvolvido.

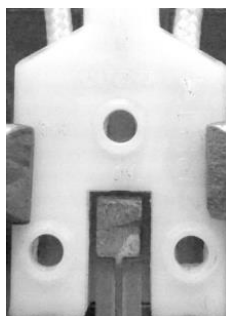
Figura 63 – Imagem capturada para detecção pelo algoritmo.



Fonte: autor.

Como pode ser observado na figura 63, a imagem contém a caixa de tomadas e algumas partes da bancada. Dessa forma, a primeira etapa consiste na localização da caixa de tomadas na imagem. Isso é feito com uma função de detecção de padrões<sup>26</sup>, a qual utiliza o padrão mostrado na figura 64 para encontrá-la.

Figura 64 – Imagem padrão para encontrar a caixa de tomadas na imagem, uma das entradas do algoritmo.



Fonte: autor.

---

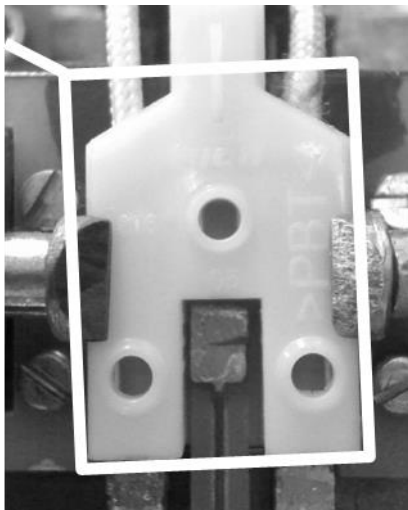
<sup>26</sup> IVA Match Pattern Algorithm 2 do LabVIEW. Mais informações em National Instruments (2015).

A localização da caixa de tomadas como um dos primeiros passos do programa é importante para reduzir a chance de problemas relacionados a variações de posicionamento e rotação da caixa, facilitando inclusive a identificação dos orifícios de conexão, os quais do contrário precisariam ser buscados na imagem inteira. Além disso, as coordenadas das extremidades da caixa, identificadas pelas linhas espessas na figura 65, são importantes para as funções dos passos seguintes do programa.

Com a posição da caixa conhecida, o próximo passo é a utilização de um filtro de limiarização visando evidenciar os orifícios de conexão. Como resultado da operação, é entregue o negativo da imagem resultante, facilitando a visualização deles. Na figura 66, é mostrada a imagem binária resultante dessa operação.

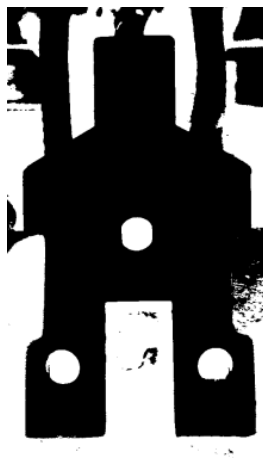
Lembrando o que foi exposto anteriormente, os defeitos em questão causam alterações visuais na imagem, mais particularmente na região dos orifícios. Uma comparação entre imagens com e sem defeito é feita na figura 67, com objetivo de mostrar a diferença entre os orifícios de conexão. Nessa imagem aparece em destaque o clipe obstruindo o orifício de encaixe central.

Figura 65 – Resultado da função de encontro de padrões na imagem. Em destaque, as linhas que representam as extremidades da caixa de tomadas.



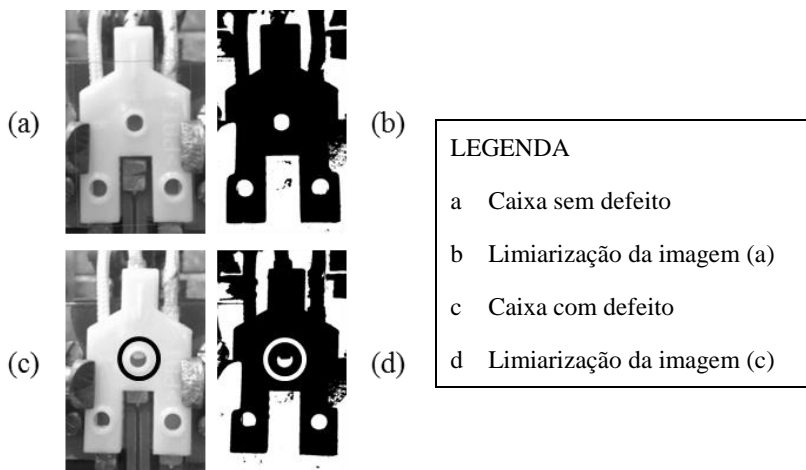
Fonte: autor.

Figura 66 – Resultado da operação de limiarização (negativo).



Fonte: autor.

Figura 67 – Comparação entre imagens com defeito e sem, e suas limiarizações.



Fonte: autor.

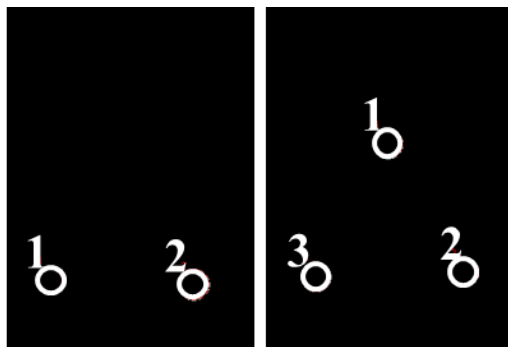
A partir da imagem com limiarização, três técnicas foram desenvolvidas para serem usadas em conjunto. Essa redundância foi pensada visando aumentar a confiabilidade do ensaio, pois eventualmente se uma técnica resulta em falso negativo, ainda há duas outras com possibilidade de detecção correta.

A primeira delas utiliza uma função de detecção de circunferências na imagem binária<sup>27</sup> para determinar a qualidade dos círculos que representam os orifícios de conexão na imagem após o uso de uma máscara para deixar apenas esses círculos expostos. Se esses círculos não tiverem um diâmetro dentro do intervalo esperado para o orifício de conexão não obstruído, a função ignora essas entidades.

A indicação de defeito por essa função vem da quantidade de circunferências encontradas. Se a função encontra três circunferências, o que indicaria que os três orifícios estão desobstruídos, julga que a caixa ensaiada não tem defeitos. Qualquer quantidade diferente de entidades encontradas indica o defeito. Abaixo, na figura 68, podem-se ver duas imagens, à esquerda o resultado dessa técnica numa caixa com defeito e à direita, sem.

A segunda usa detecção de bordas juntamente com o cálculo de

Figura 68 – Resultado da técnica com determinação da quantidade de circunferências na imagem. À esquerda, uma caixa com defeito. À direita, uma sem.



Fonte: autor.

---

<sup>27</sup> Várias ferramentas de VC só trabalham com imagens binárias, por questões matemáticas intrínsecas de seus funcionamentos.

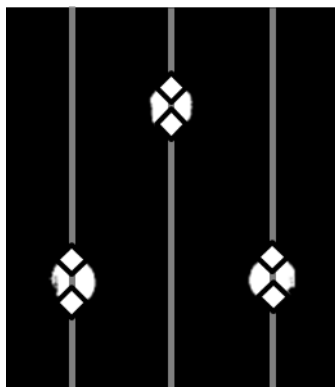
distância entre pontos para determinar o tamanho dos círculos dos orifícios de encaixe na imagem. Os losangos brancos da figura 69 representam os pontos encontrados pelo algoritmo de detecção. Analisando variações de níveis de cinza em cima de três linhas, as quais passam em cima dos três círculos dos orifícios, pode se encontrar as bordas e, com a comparação da distância entre esses pontos com um valor previamente medido, é possível saber se o orifício está sendo obstruído por um clipe, desta forma indicando o defeito. Na figura 69, são mostradas essas linhas de análise e os pontos encontrados, representados pelos losangos brancos.

Por fim, a terceira técnica é a única que analisa a parte superior da caixa de tomadas ao invés dos orifícios de conexão.

Ao se tracionar o cabo no início do ensaio, em algumas vezes o clipe sai mais que o previsto da caixa de tomadas, de forma que ele acaba por não obstruir o seu respectivo orifício de conexão, o que levaria a um falso negativo se fossem usadas somente as técnicas anteriormente descritas. No entanto, essa movimentação fica evidente ao se analisar o diâmetro desse cabo na parte superior da caixa, pois o clipe passa a aparecer nessa região. Como o clipe é mais espesso que o cabo, é possível determinar a existência de defeitos olhando, portanto, para esse ponto.

Após aplicar a limiarização, linhas paralelas às dimensões da

Figura 69 – Resultado da técnica com a determinação do tamanho dos orifícios de conexão. Em destaque, as linhas de análise e os pontos encontrados.



Fonte: autor.

parte superior da caixa de tomadas são criadas para serem usadas como ROI na função de detecção de bordas. Essa função determina as extremidades do cabo ou clipe que estão na região. Então, comparando a distância entre essas extremidades encontradas com um valor esperado para o diâmetro<sup>28</sup> do cabo em pixels à distância de trabalho conhecida entre a câmera e a caixa de tomadas, é possível determinar se o objeto que está na parte superior é um clipe ou um cabo, indicando assim a presença de um defeito.

Na figura 70, as linhas cinza representam as ROI utilizadas pelo algoritmo para determinar o diâmetro do cabo ou clip passando através dela. Os retângulos cinza representam as áreas na parte superior utilizadas na busca por defeitos, sendo que o com linhas tracejadas indica a ausência de defeitos e os com linhas cheias indicam a presença.

Figura 70 – Resultado da técnica de determinação do comprimento dos objetos na parte superior da caixa de tomadas. Os retângulos tracejados representam as áreas de interesse e as linhas cheias, as ROIs.



Fonte: autor.

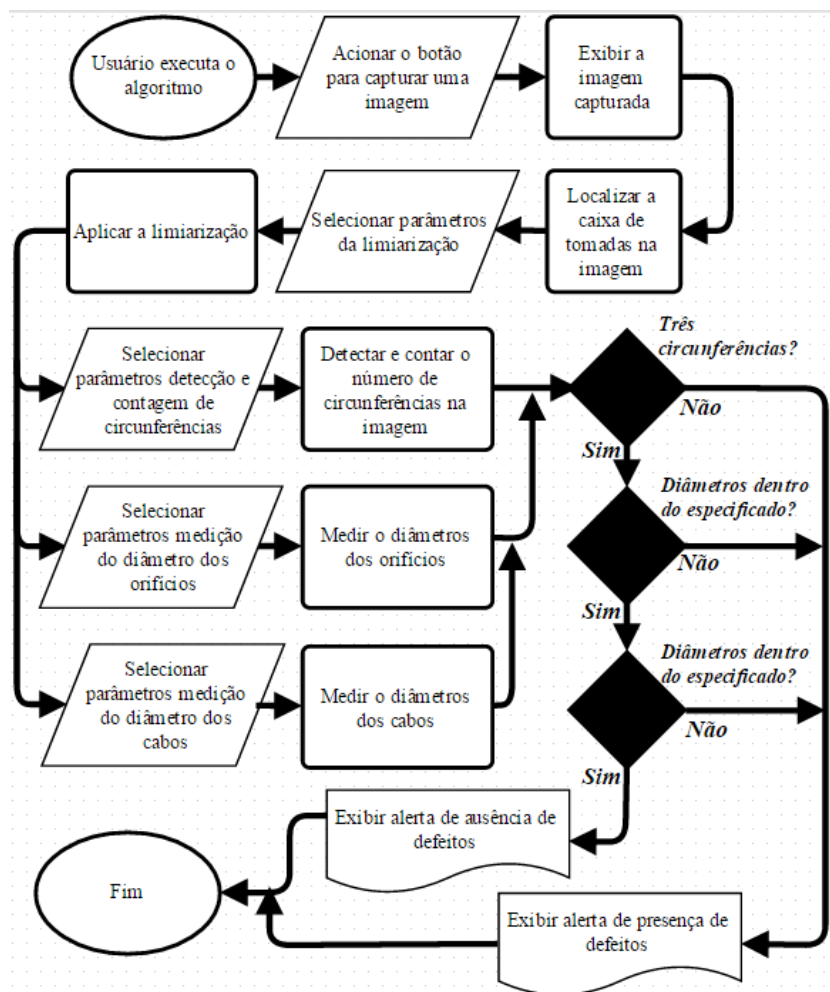
---

<sup>28</sup> Da mesma forma que na situação do comprimento da seção do condutor e do fio de bandagem, mostrada na seção 4.2, as dimensões mostradas pelas ROIs na figura 70 podem não ser diâmetros, já que elas podem ser secantes aos cabos de forma oblíqua. Assim, elas serão chamadas de diâmetro através de um abuso de notação, seguindo a mesma ideia empregada anteriormente.



Com essas três técnicas funcionando de forma redundante, conseguiram-se bons resultados na indicação desse defeito, conforme será mostrado na seção 7.5.

Figura 71 – Etapas do algoritmo de detecção de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas.



Fonte: autor.

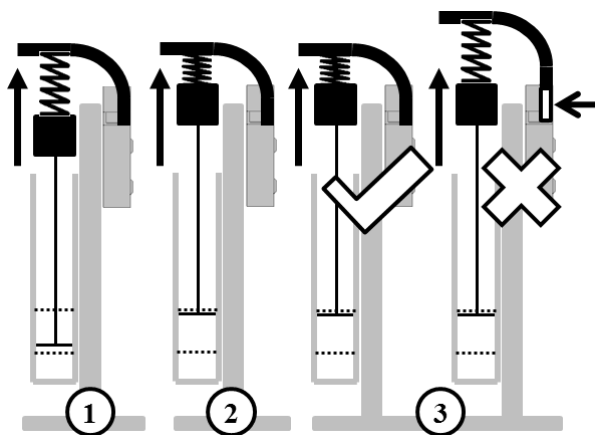
Na figura 71, são vistas as etapas que o algoritmo passa para determinar se os cabos da caixa de tomadas estão fixados corretamente.

## 6.2. BANCADA PARA DETECÇÃO DE CABOS FIXADOS INCORRETAMENTE NA CAIXA DE TOMADAS

Foi desenvolvida uma bancada específica para os testes de detecção desse defeito. Além de facilitar o correto posicionamento relativo entre a caixa de tomadas e a câmera utilizada, ela tinha como requisito mecânico possibilitar a tração correta dos cabos, de forma a evidenciar os defeitos.

O funcionamento do sistema é bastante simples. No início do ensaio, ar comprimido entra no pistão fazendo com que ele inicie um movimento ascendente. Quando a estrutura de suspensão começa a entrar em contato com os cabos, tracionando-os, os cliques reagem ao movimento, comprimindo as molas. O sistema foi dimensionado para que no final do curso permitido para o pistão, a força de tração em cada cabo seja um pouco menor que a força máxima que um clipe bem preso aguenta sem se soltar da caixa de tomadas. Dessa forma, ao final do curso, os cabos bons continuam comprimindo suas respectivas molas, enquanto os cabos com cliques com defeito já se soltaram da caixa e descomprimiram sua mola. Na figura 72, o funcionamento é ilustrado.

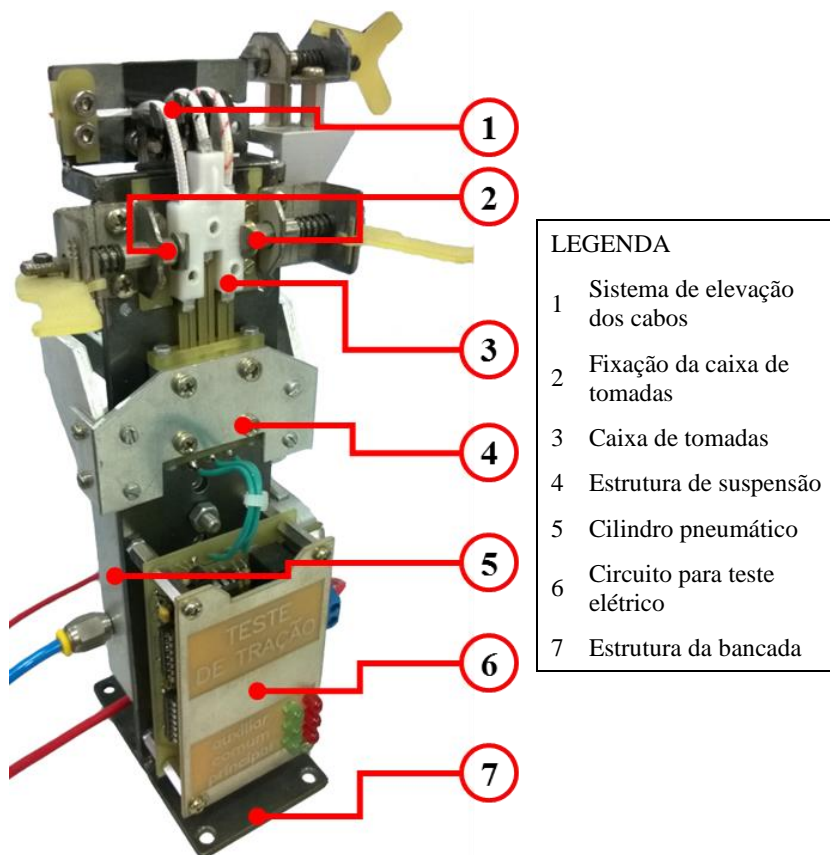
Figura 72 – Funcionamento da bancada de tração.



Fonte: autor.

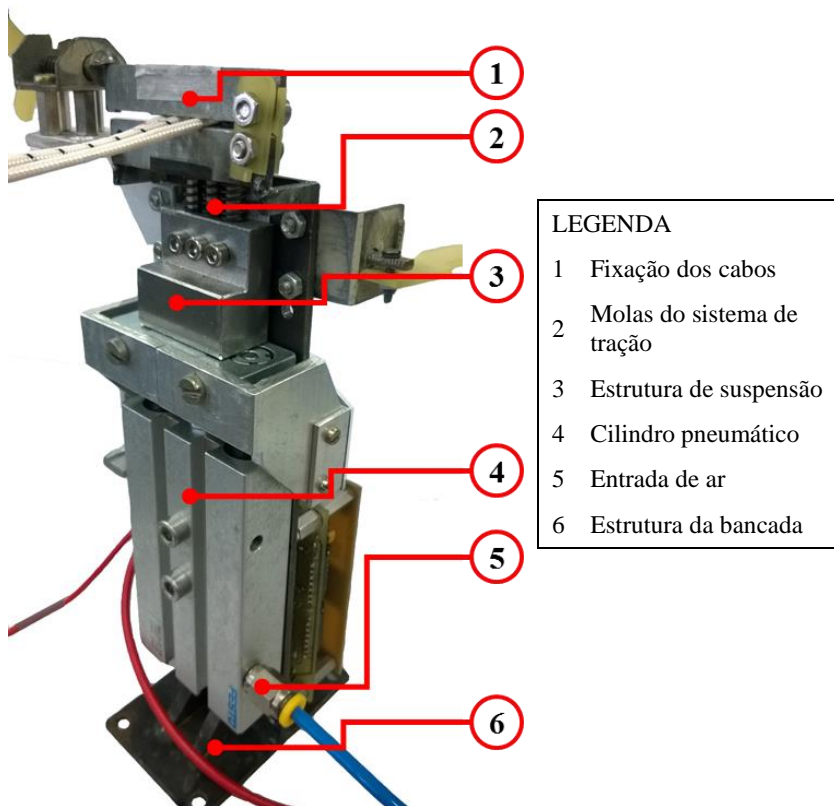
Na figura 73 e na figura 74, imagens da bancada são mostradas, indicando suas partes principais. Vê-se também na figura 73 o circuito que faz o teste de continuidade na caixa de tomada. Conforme falado anteriormente, o ensaio elétrico e o com VC são testes executados de forma redundante para aumentar o índice de sucesso na detecção de defeitos, sendo somente a parte de visão o foco desse trabalho.

Figura 73 – Bancada de tração (frente).



Fonte: autor.

Figura 74 – Bancada de tração (trás).



Fonte: autor.

Por fim, a câmera foi acoplada numa estrutura metálica a fim de deixá-la centralizada em relação à posição da caixa de tomadas na bancada. Foi utilizada uma webcam da Logitech, modelo Pro 9000, mostrada na figura 75. Nota-se na imagem que algumas fitas isolantes foram utilizadas de forma a cobrir partes reflexivas tanto da câmera quanto da estrutura que a sustenta, para evitar que reflexos prejudicassem a qualidade das imagens adquiridas.

Figura 75 – Webcam Logitech Pro 9000.



Fonte: autor.



## 7. ESTUDOS DE CASOS

Para avaliar o desempenho dos algoritmos descritos nas seções 4.1, 4.2, 5.2 e 6.1, foram desenvolvidos testes na fábrica da empresa parceira, fabricante de motores elétricos. Testes desse tipo são interessantes para aproximar os desenvolvimentos de laboratório das situações reais a serem enfrentadas.

Na maioria das vezes, as condições de ensaio em laboratório são melhores do que as encontradas em ambiente fabril. Isso acontece porque o ambiente de laboratório em geral tem variáveis ambientais controladas, tais como temperatura, umidade, iluminação, entre outros. Adicionalmente, em laboratório há muito mais flexibilidade para a montagem do experimento, enquanto que em ambiente fabril é necessário levar em consideração a existência de outros elementos que não podem ser adaptados ao ensaio e que muitas vezes geram empecilhos.

Contudo, a situação desse trabalho é diferente. No presente caso, os testes em fábrica proporcionam duas vantagens em relação aos ambientes de laboratório. A primeira é a maior disponibilidade de estatores e ERB para capturar imagens, visto que a princípio toda a linha de montagem está disponível para inspeções. A segunda tem relação com a oxidação. Os estatores disponíveis no laboratório foram fabricados para trabalhar sem contato praticamente com oxigênio, de maneira que a exposição deles a condições fora das quais eles foram especificados para trabalhar causa oxidação nas paredes internas das peças, prejudicando o funcionamento correto dos algoritmos.

Pensando no defeito de condutores na trajetória, foram desenvolvidos três estudos de caso na linha de produção da empresa parceira, visando analisar o desempenho dos algoritmos com casos reais de estatores e ERB. São eles os estudos de caso com:

- estatores do modelo  $\Sigma$ ;
- estatores do modelo  $\Omega$  e
- ERB do modelo  $\Omega$ .

A detecção diretamente no estator foi dividida entre modelos  $\Sigma$  e  $\Omega$  de estator da empresa parceira, tendo em vista que essas peças têm dimensões diferentes como, por exemplo, o diâmetro do furo interno, tipicamente maior no modelo  $\Omega$ , o que poderia significar comportamentos diferentes do algoritmo. De qualquer forma, a ideia do algoritmo para cada um é a mesma, mudando apenas alguns parâmetros internos. Já com os ERB, testes com diferentes modelos foram

considerados desnecessários, pois os testes em laboratório com conjuntos de diferentes modelos apresentam resultados similares.

Já para o monitoramento de altura de isolantes, dois estudos foram realizados:

- estatores do modelo  $\Sigma$  e
- estatores do modelo  $\Omega$ .

Por fim, para o defeito de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas foi desenvolvido um ensaio em laboratório com tomadas enviadas da fábrica.

Vale lembrar aqui que, nas linhas de produção da empresa parceira, os defeitos aparecem com baixa frequência, de forma que alguns defeitos foram produzidos através da inserção de um condutor, simulando um defeito real.

Na seção 7.1, será visto o estudo de caso do defeito “condutores na trajetória nos estatores do modelo  $\Sigma$ ”. Depois, na seção 7.2, o mesmo defeito, mas em estatores do modelo  $\Omega$ . Na seção 7.3, serão investigados casos do defeito “condutores na trajetória no ERB do modelo  $\Omega$ ”. Após isso, testes em fábrica de monitoramento da altura de isolantes serão discutidos na seção 7.4. Por fim, na seção 7.5 tratar-se-á do defeito envolvendo a caixa de tomadas.

## 7.1. CONDUTORES NA TRAJETÓRIA NOS ESTADORES DO MODELO $\Sigma$

### 7.1.1. Características do ensaio com modelo $\Sigma$

O ensaio para esse modelo foi dividido em duas situações. Na primeira, denominada experimento com modelo  $\Sigma$  situação A ( $\Sigma A$ ), foram capturadas 25 imagens, sendo quatro delas de estatores com condutores na trajetória do rotor<sup>29</sup>, e tensão de 13,5 V na fita de LED. A fita de LED em questão é o item 2 da figura 44, e tem por objetivo iluminar a parte interna do estator durante o ensaio. Na segunda situação, denominada experimento com modelo  $\Sigma$  situação B ( $\Sigma B$ ), foram capturadas também 25 imagens, também sendo quatro de estatores com condutores na trajetória do rotor, e com tensão de 16,5 V nos LEDs. A única diferença entre a situação A e B foi a luminosidade, que era um fator importante de ser testado. Os estatores utilizados foram os mesmos para ambas as situações.

---

<sup>29</sup> Os defeitos nesse caso foram simulados, tendo em vista a difícil obtenção de peças com defeito em linha.



Na figura 76, podem-se comparar duas imagens do mesmo estator  $\Sigma$ , a primeira na situação A e a segunda na situação B. Pode-se perceber que os isolantes e a parede interna do estator na imagem (a) estão com níveis de cinza de menor valor em relação aos da imagem (b).

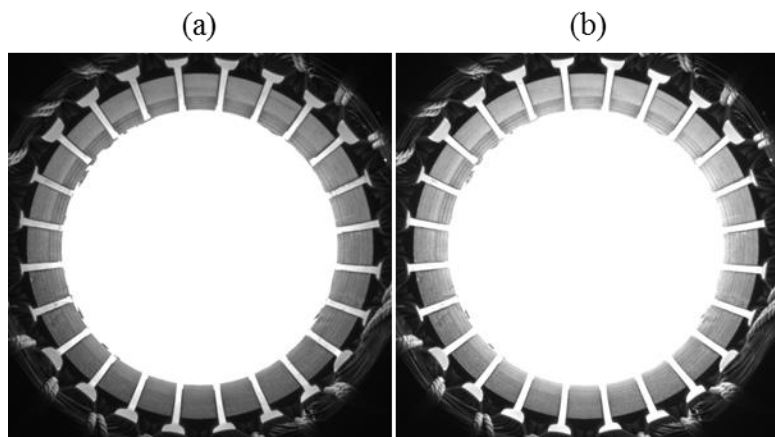
O algoritmo descrito na seção 4.1 foi utilizado para determinar a existência de condutores na trajetória e os resultados são mostrados na seção 7.1.2.

### 7.1.2. Resultados e discussões dos ensaios $\Sigma A$ e $\Sigma B$

Os resultados dos ensaios  $\Sigma A$  e  $\Sigma B$  apresentados foram muito bons. Como a iniciativa desses testes em fábrica tem sentido de avaliar o desempenho do algoritmo para melhorá-lo, as falsas indicações merecem atenção especial. Assim, essas indicações foram classificadas de duas formas: falso positivo (FP), quando indicou a presença de defeito sem haver um defeito; e falso negativo (FN), quando não indicou a presença de um defeito quando ele de fato existia.

Ainda, foi identificado através de análise do comportamento do algoritmo qual o motivo da detecção errada, nos casos em que ela ocorreu. Para esses ensaios, dois motivos principais foram identificados

Figura 76 – Diferenças de iluminação da situação A e da situação B em um estator  $\Sigma$ .



Fonte: autor.

previamente como possíveis causadores de problemas, baseado em testes anteriores, sendo eles sujeira nas paredes internas ou ranhuras dos isolantes e problemas nos parâmetros escolhidos para executar o algoritmo.

Os resultados do ensaio  $\Sigma A$  e  $\Sigma B$  são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios  $\Sigma A$  e  $\Sigma B$ , em porcentagem do total de casos.

		$\Sigma A$		$\Sigma B$	
		FP	FN	FP	FN
<b>Indicações incorretas</b>	<b>Sujeira</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
	<b>Algoritmo</b>	20,0	0,0	0,0	0,0
<b>Indicações corretas</b>		80,0		100,0	

Os resultados mostram que a configuração  $\Sigma B$ , com mais luz, se mostrou melhor, acertando todas as indicações, sendo considerado um ótimo desfecho, alcançando a meta de 95% de indicações corretas.

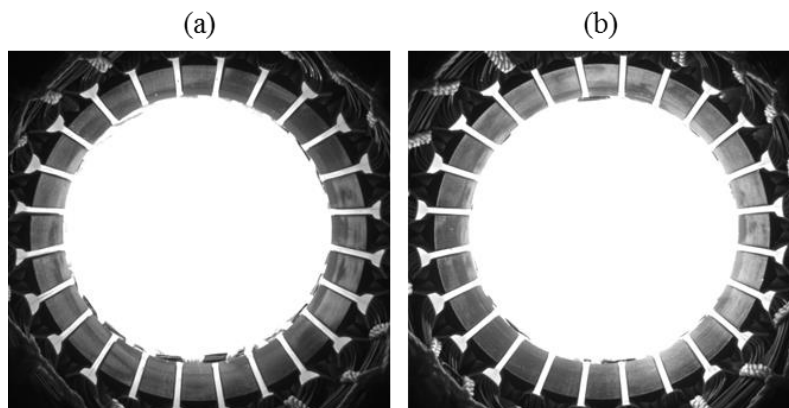
Mesmo assim, vê-se a possibilidade de aumentar o número de amostras testadas e de inserção no algoritmo uma parte de identificação de diâmetros de condutores e fios para diferenciá-los como possibilidades interessantes para aumentar ainda mais a confiabilidade do ensaio.

## 7.2. CONDUTORES NA TRAJETÓRIA NOS ESTADORES DO MODELO $\Omega$

### 7.2.1. Características do ensaio com modelo $\Omega$

Da mesma forma que para o modelo  $\Sigma$ , o ensaio foi dividido em duas situações: experimento com modelo  $\Omega$  situação A ( $\Omega A$ ) e experimento com modelo  $\Omega$  situação B ( $\Omega B$ ). Na primeira situação, foram capturadas 52 imagens, sendo oito com condutores na trajetória do rotor, e tensão de 13,5 V na fita de LED. E no segundo foram capturadas também 52 imagens, também com oito com condutores na trajetória, e com tensão de 16,5 V nos LEDs. Da mesma forma que a situação descrita na seção 7.1.1, as situações A e B diferem apenas na luminosidade, sendo utilizados os mesmos estadores para ambas as situações. Veem-se duas imagens do mesmo estator  $\Omega$ , a primeira na situação A e a segunda na situação B, na figura 77. As diferenças de iluminação existem principalmente na intensidade de luz nos isolantes e na parede interna do estator, diferentes em (a) e em (b).

Figura 77 – Diferenças de iluminação da situação A e da situação B em um estator  $\Omega$ .



Fonte: autor.

De maneira análoga, o algoritmo da seção 4.1 foi aplicado com estatores  $\Omega$  e os resultados são mostrados na seção 7.2.2.

### 7.2.2. Resultados e discussões do ensaio $\Omega A$ e $\Omega B$

Os resultados de  $\Omega A$  e  $\Omega B$  também foram classificados em FP e FN. Contudo, outros motivos além dos indicados para os ensaios com o modelo  $\Sigma$  causaram erros de detecção do algoritmo, conforme visto na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios  $\Omega A$  e  $\Omega B$ , em porcentagem do número total de casos.

		$\Omega A$		$\Omega B$	
		FP	FN	FP	FN
<b>Indicações incorretas</b>	<b>Sujeira</b>	3,85	0,00	0,00	0,00
	<b>Posicionamento</b>	5,77	0,00	9,62	0,00
	<b>Iluminação</b>	7,69	0,00	7,69	0,00
	<b>Algoritmo</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Indicações corretas</b>		82,69		82,69	

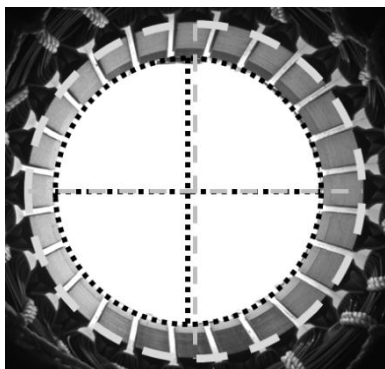
É perceptível a diferença de desempenho do ensaio com a mudança entre os modelos de estator. Antes mesmo do processamento das imagens capturadas em fábrica, já era possível perceber que o resultado não se mostraria tão bom quanto o do outro modelo. Isso porque a distância entre os centros das circunferências superior e inferior evidenciava esse possível comportamento e a diferença de iluminação em setores diferentes de algumas imagens. Na figura 78 e na figura 79, exemplifica-se isso.

Conclui-se que o posicionamento e a iluminação foram fatores críticos para os resultados dos ensaios em modelos  $\Omega$ .

Com base na figura 78 e na figura 79, poderia ser levantado o questionamento sobre a precisão do posicionamento feito nos ensaios. A posição da câmera em relação ao estator foi sempre a mesma para todos os estatores  $\Omega$ , de forma que esse erro de posicionamento deveria se repetir em outras imagens, o que não aconteceu. Outra possibilidade seria que o palete de estatores, item 1 da figura 44, estivesse sofrendo algum tipo de retroação na hora de encaixar as peças nela, mas essa hipótese foi desconsiderada, tendo em vista que sua estrutura é consideravelmente mais robusta que o necessário. Mesmo assim, sugere-se o desenvolvimento de um sistema de posicionamento mais robusto em trabalhos futuros.

Outra possibilidade que foi levantada para explicar os problemas encontrados é a de um problema, chamado defasagem das lâminas do

Figura 78 – Diferenças entre as posições dos centros das circunferências superior e inferior, causadas pelo mau posicionamento do estator.



Fonte: autor.

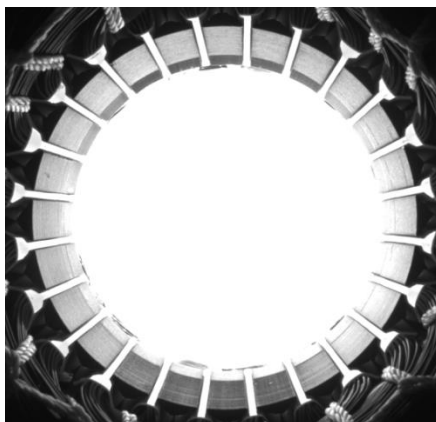
pacote do estator, que se trata de uma leve rotação relativa entre as lâminas que compõem o pacote do estator. Esse problema não é muito relevante para o funcionamento do estator, mas pode significar um problema para o funcionamento do algoritmo aqui utilizado. Sugere-se inclusive que a defasagem possibilite um pequeno desalinhamento axial entre as lâminas, fazendo com que o furo interno do estator não seja um cilindro reto e sim um cilindro oblíquo. Um sistema de posicionamento mais robusto proposto no parágrafo anterior poderia averiguar essa situação.

Conforme mostrado na figura 78, a iluminação também se mostrou problemática em alguns casos. Como o modelo  $\Omega$  tem diâmetro do furo interno maior que o modelo  $\Sigma$  e o sistema de iluminação empregado em ambos os casos é idêntico, o modelo  $\Omega$  permite maior incidência de luz na câmera, conforme mostrado na figura 80.

Uma solução para o problema é desenvolver um circuito para controlar a luminosidade nos LEDs. Com isso, passa a ser possível dividir a imagem em setores e controlar a iluminação em cada trecho com base na análise de níveis de cinza na própria imagem. A ilustração dessa proposta pode ser vista na figura 81. Sugere-se, pois, o emprego desse circuito em trabalhos futuros.

Ainda assim, consideram-se os resultados como bons por ser um

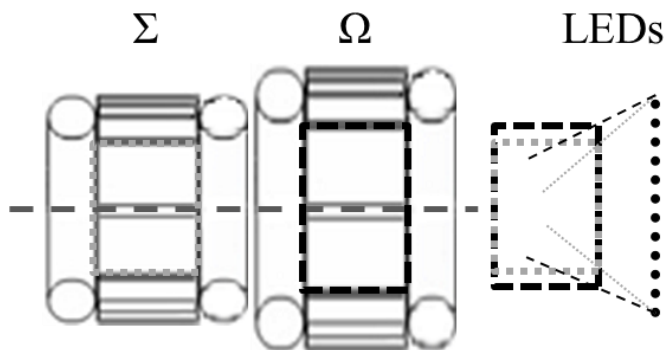
Figura 79 – Estator  $\Omega$  com problemas de iluminação na parte inferior da parede interna, à esquerda e à direita.



Fonte: autor.

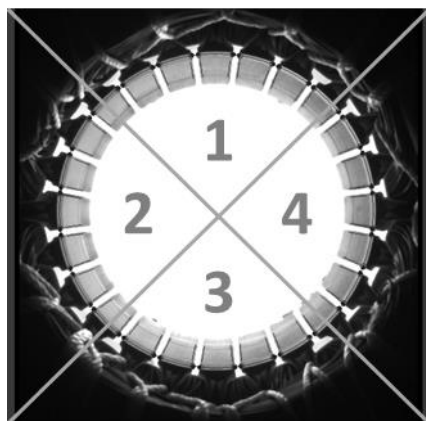
estudo exploratório. Contudo, não foi alcançada a meta de 95% de indicações corretas. Considera-se que os trabalhos futuros sugeridos podem levar o número de indicações corretas ao patamar desejado.

Figura 80 – Exemplificação do porquê, para uma mesma fonte de luz numa mesma posição, a luz recebida pela câmera é diferente.



Fonte: autor.

Figura 81 – Divisão da imagem em setores para controle de iluminação individual.



Fonte: autor.

### 7.3. CONDUTORES NA TRAJETÓRIA NO ERB

#### 7.3.1. Características do ensaio

Esse estudo de caso se divide em dois ensaios, contemplando os testes em fábrica e os testes com a luz azul em laboratório, conforme explicado na seção 4.2.

Conforme visto anteriormente, utilizou-se o próprio transportador do ERB (figura 47) dentro da fábrica como posicionador do conjunto em relação à câmera.

Nos testes em fábrica, foram capturadas 60 imagens de ERB, sendo 15 imagens contendo defeitos artificiais<sup>30</sup>. A tensão utilizada nos LEDs foi de 20 V, com o objetivo de saturar parte da imagem. Para esse caso, a saturação se mostra interessante porque o excesso de luz filtra certas informações contidas na imagem, facilitando seu processamento.

Na figura 82, pode-se ver a diferença entre uma imagem de um ERB capturada com mais e menos luz. Em (a), com pouca, vários detalhes são visíveis, como marcações na parte superior do rotor, contudo eles não só não têm função como atrapalham o processamento. E em (b), com muita luz, esses detalhes desnecessários desaparecem e aumenta-se o contraste do rotor em relação à área de análise.

Para os testes com luz azul, foram feitas 14 capturas, todas com defeitos introduzidos artificialmente. Condutores foram colocados na região onde é esperada a existência do defeito em questão e então o algoritmo foi executado para a situação com luz branca e para a situação com luz azul. A introdução desses condutores foi bem pensada e baseada na experiência com a bancada, de forma que suas localizações foram lugares onde se sabe que a detecção não seria trivial. Como não foram executados em fábrica, seus resultados serão discutidos em seção separada.

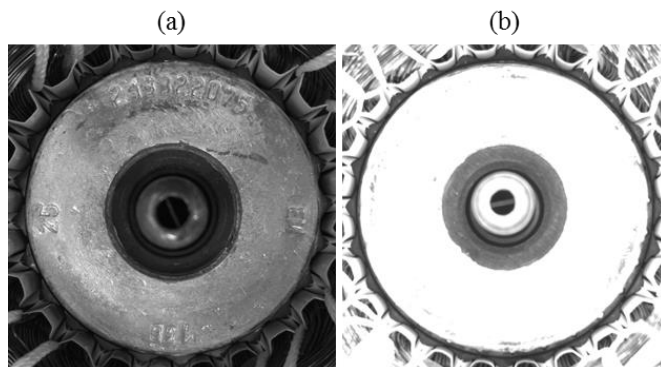
#### 7.3.2. Resultados e discussões dos ensaios com ERB em fábrica

Na tabela 3, veem-se os resultados dos testes. Eles foram organizados de acordo com o pré-processamento utilizado e com os defeitos que poderiam apresentar. Lembrando que as três formas diferentes de tratar a imagem antes do processamento foram o

---

<sup>30</sup> Da mesma forma que no defeito anterior, defeitos foram produzidos devido à sua baixa ocorrência em linha.

Figura 82 – Diferença da iluminação na aquisição de imagens do ERB (vide texto).



Fonte: autor.

alargamento de contraste, filtro de realce de detalhes mais filtro de suavização e sem pré-processamento.

Já os defeitos encontrados foram denominados condutores dobrados, quando o condutor aparece com uma dimensão diferente da esperada (ver seção 4.2), posicionamento e devido ao algoritmo. Assim como os casos acima descritos, os erros foram divididos em falsos negativos e falsos positivos.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios com ERB na fábrica, em porcentagem do total de casos.

			Contraste	Detalhes + suavização	Normal
<b>Indicações erradas</b>	<b>FN</b>	<b>Condutores dobrados</b>	5,00	1,67	1,67
		<b>Posicionamento</b>	0,00	0,00	0,00
		<b>Algoritmo</b>	0,00	0,00	1,67
	<b>FP</b>	<b>Condutores dobrados</b>	0,00	0,00	0,00
		<b>Posicionamento</b>	1,67	1,67	6,67
		<b>Algoritmo</b>	0,00	0,00	3,33
<b>Indicações corretas</b>			93,33	96,67	82,77



Primeiramente, pelos resultados pode se afirmar que o uso do filtro de realce de detalhes em conjunto com o filtro de suavização é a melhor alternativa, tendo em vista que os parâmetros escolhidos para cada um deles criou um resultado bom e único, o que não foi conseguido utilizando nenhum deles individualmente. De maneira simplificada, chegou-se a uma configuração de ambos em que se realçaram os detalhes que precisam ser realçados e se atenuou a presença do que precisa desaparecer na imagem. Essa frente teve erros devidos aos condutores dobrados para FN e posicionamento para FP.

Para o primeiro problema, uma alternativa de solução é utilizar luz azul, conforme já abordado na seção 4.2. Para o segundo, já foram desenvolvidos algoritmos para auxiliar na centralização correta do ERB na imagem, possibilitando a diminuição da influência desse defeito.

De maneira geral, os resultados apresentados por essa alternativa foram muito bons, em especial se for pensado que já existem alternativas de solução para os problemas apontados, e também por eles alcançarem o objetivo proposto de 95% de indicações corretas.

### 7.3.3. Resultados e discussões do ensaio com ERB e luz azul em laboratório

Os resultados do ensaio com ERB e iluminação de cor azul são apresentados na tabela 4. Eles mostram a porcentagem de casos nos quais o condutor introduzido foi detectado pela primeira etapa do algoritmo, isto é, a detecção por seu diâmetro, pela segunda etapa, ou seja, pela comparação entre a imagem com luz branca e a com luz azul, ou se não foi encontrado o defeito.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios com ERB com luz azul, em porcentagem do total de casos testados.

	Causa	[%]
<b>Indicações corretas</b>	<b>Diâmetro</b>	50,0
	<b>Luz azul</b>	35,7
<b>Indicações incorretas</b>	<b>Defeito não encontrado</b>	14,3

Com base nisso, pode-se afirmar que o uso da luz azul aumenta consideravelmente a taxa de acerto do algoritmo. Mas o teste foi importante também por outro motivo: chegou-se à conclusão que existem casos cuja detecção é difícil a ponto de nenhuma das etapas do algoritmo conseguir achar o defeito. Isso aconteceu, de forma simples,

porque o condutor que representa um defeito não ficou suficientemente visível nem com luz branca e nem com luz azul.

Para esses defeitos, sugere-se o uso de uma câmera colorida para detectar na região de interesse pixels com um determinado valor da cor vermelha, o qual representa o tom correto de um condutor, antes da inserção desse equipamento na produção de motores elétricos.

Ainda, sugere-se a avaliação do uso de uma lente telecêntrica para detecção de condutor na trajetória tanto no ERB quanto no estator. Conforme visto, a lente telecêntrica possibilita a captura de uma imagem isométrica, o que pode simplificar a identificação de objetos na imagem.

#### 7.4. MONITORAMENTO DE ALTURA DOS ISOLANTES NOS ESTADORES

Esta seção apresenta os testes desenvolvidos em fábrica e em laboratório de forma a avaliar o desempenho tanto do algoritmo quanto da bancada no monitoramento da altura dos isolantes. Essa avaliação foi importante para os testes em fábrica desenvolvidos nas seções 7.1, 7.2 e 7.3. Contudo, admitiu-se que isso não teria muito sentido para o caso do monitoramento da altura de isolantes, pois não haveria como saber o valor verdadeiro das grandezas medidas por não haver tempo nem disponibilidade da produção para se medirem os isolantes de outra forma. Assim, dois ensaios foram definidos visando avaliar os recursos desenvolvidos para monitoramento de altura de isolante.

Primeiramente, na seção 7.4.1, os resultados e discussões acerca das funções de medição obtidas na seção 5.1 serão mostrados, de forma a fomentar também os estudos de caso que seguem. Após isso, na seção 7.4.3 serão abordados os testes feitos em fábrica com o objetivo de definir a eficiência do algoritmo em determinar corretamente a posição das extremidades dos isolantes. Por fim, na seção 7.4.4, introduzem-se os testes de nível zero, os quais se tratam de testes em laboratório com estadores cujos isolantes estão todos com altura igual a zero milímetro.

##### **7.4.1. Resultados acerca das funções de medição e incertezas para determinação da altura dos isolantes**

Os parâmetros encontrados utilizando o software MATLAB, conforme abordado na seção 5.1, para os coeficientes do modelo *pinhole*,  $R$  e  $D$ , são:

$$R = (29,0 \pm 3,1) \text{ mm}$$

$$D = (166,8 \pm 9,3) \text{ mm}$$

E para os coeficientes do modelo exponencial,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , são:

$$\alpha = (93,6 \pm 6,8) \text{ mm}$$

$$\beta = (396 \pm 28) \text{ pixels}$$

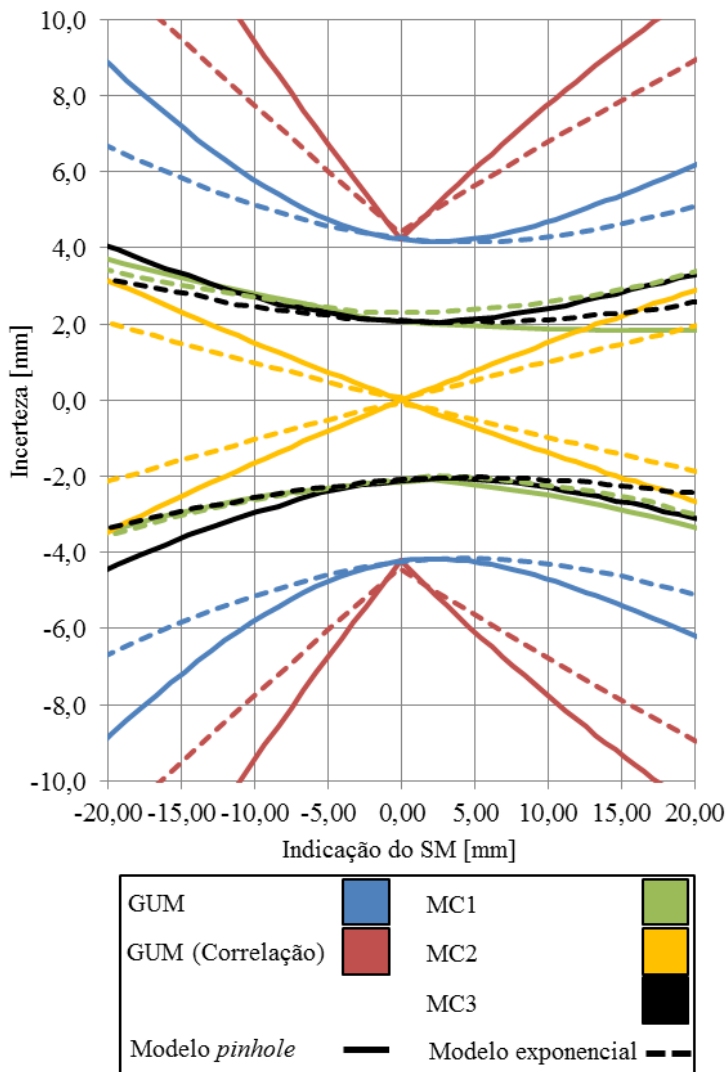
$$\gamma = (-0,143 \pm 0,079) \text{ mm}$$

Os resultados obtidos para os ajustes foram bons, tendo ambos os modelos um coeficiente de correlação aproximadamente igual a 0,99. A comparação entre os coeficientes de correlação do modelo *pinhole* e do modelo exponencial é importante no sentido de verificar a adequação das equações propostas aos dados obtidos com o experimento. Dessa forma, vê-se que ambos se comportaram de maneira similar, se ajustando bem às medições. Esperava-se que o modelo *pinhole* tivesse um bom resultado tendo em vista que ele é baseado na situação física de fato. O fato de o segundo modelo ter chegado a um resultado tão bom quanto o alcançado com o modelo *pinhole* mostra que a escolha do formato exponencial como forma da função de medição foi coerente. Vê-se, portanto, que as variações naturais das grandezas envolvidas afetaram ambos os modelos de maneira parecida.

Em relação às curvas com as incertezas obtidas com diferentes modelos e métodos, na figura 83 veem-se elas dispostas para comparação. No eixo x, tem-se a indicação do sistema de medição em milímetros, isto é, a altura do isolante. No y, a incerteza correspondente a uma determinada indicação.

Primeiramente, como no resultado do ajuste, as incertezas de ambos os modelos se comportaram de forma similar, com modelo *pinhole* apresentando a incerteza um pouco maior que o exponencial de maneira geral. Para ambos também, os métodos analíticos desenvolvidos com as equações 7 e 8, na seção 2.8, chegaram a incertezas maiores do que os outros métodos. Parte disso se dá pela característica não linear das funções de medição, o que faz com que a aproximação de primeira ordem da série de Taylor do GUM não seja tão boa quanto poderia ser para os resultados serem mais próximos. Além disso, as incertezas dos coeficientes das funções, R, D,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são relativamente altas, o que caracteriza uma situação para a qual se indica o uso de simulações de Monte Carlo para calcular a incerteza. Suas parcelas de contribuição na incerteza podem ser vistas no Apêndice A.

Figura 83 – Incertezas de medição de altura de isolante para os vários métodos desenvolvidos.



Fonte: autor.

De maneira geral, os métodos MC1 e MC3 apresentaram comportamentos parecidos, isso porque ambos consideram parcelas de incerteza tanto do próprio uso de método no cálculo de erros aleatórios quanto do ajuste de curvas utilizado. Algo parecido ocorre com os métodos do GUM. Isso, contudo, não ocorre com MC2, o qual só considera a incerteza do ajuste, resultando em valores de incerteza muito mais baixos e com um formato diferente. As parcelas de incerteza do uso dos métodos são dominantes em relação às incertezas do ajuste de curvas na região em torno da altura zero no gráfico e essas incertezas são praticamente constantes ao longo de todo o intervalo de medição. Isso justifica, por exemplo, o método MC3 ter apresentado incerteza muito maior que o método MC2 em torno da origem e ainda o fato das curvas desses dois métodos tenderem a se aproximar nos limites do gráfico.

A não consideração de um erro sistemático aconteceu devido à dificuldade em se determinar um padrão para poder se comparar as grandezas medidas conforme proposto faz com que, caso existisse erro sistemático a correção desse erro se tornasse um pouco difícil.

Há ainda considerações de incerteza em relação à própria formação da imagem as quais não foram consideradas aqui, como erro de quantização do pixel, calibrações do sensor da câmera e uso de algoritmos de correção para diminuir erros devido a distorções da lente. Em uma continuação do desenvolvimento desse equipamento, esse tipo de consideração deveria ser levado em conta para poder se avaliar de forma completa a incerteza.

A comparação entre esses resultados e as medições com estatores é feita na seção 7.4.4.

#### **7.4.2. Análise da variação da altura do isolante a partir de uma variação em seu raio**

Na seção 5.1.3 foi mostrado o desenvolvimento da análise da variação da altura de isolante com base em uma variação no seu raio. Nessa seção são mostrados os resultados dos testes feitos com essa análise. Foi proposta uma variação  $\Delta R$  igual a 0,4 mm, esperada comumente nos estatores. Considerando projeções de altura de isolante no intervalo de -24 mm a +18 mm, obtiveram-se os resultados mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Análise da variação da altura de isolante com base na variação de seu raio.

<b>P [mm]</b>	<b>H [mm]</b>	<b><math>\Delta H</math> [mm]</b>
<b>0,189</b>	18,0	2,00
<b>0,166</b>	16,0	2,03
<b>0,148</b>	14,0	2,05
<b>0,125</b>	12,0	2,07
<b>0,108</b>	10,0	2,09
<b>0,085</b>	8,0	2,12
<b>0,067</b>	6,0	2,15
<b>0,045</b>	4,0	2,18
<b>0,029</b>	2,0	2,20
<b>0,005</b>	0,0	2,23
<b>-0,015</b>	-2,0	2,26
<b>-0,038</b>	-4,0	2,29
<b>-0,054</b>	-6,0	2,32
<b>-0,073</b>	-8,0	2,34
<b>-0,089</b>	-10,0	2,37
<b>-0,107</b>	-12,0	2,40
<b>-0,122</b>	-14,0	2,42
<b>-0,139</b>	-16,0	2,45
<b>-0,154</b>	-18,0	2,48
<b>-0,170</b>	-20,0	2,50
<b>-0,184</b>	-22,0	2,53
<b>-0,198</b>	-24,0	2,56

Com isso, vê-se que uma variação de 2 mm no raio do isolante pode levar a uma variação de até 12,1 mm na altura do isolante medido pelo dispositivo proposto. Desta forma, conclui-se que é vital o conhecimento e controle do parâmetro  $\Delta R$ . O sistema somente obterá resultados confiáveis se a variação de R for muito pequena ou igual a zero, ou ainda se for medida e compensada.

### 7.4.3. Ensaios de detecção de extremidade de isolante em fábrica

Os ensaios de detecção de extremidade de isolante foram feitos com as mesmas imagens utilizadas nos estudos de caso da seção 7.1, como visto no início da seção 7.4. Isso é bem coerente com o objetivo de unificar todos os testes em somente um momento, com uma única imagem capturada. Portanto, os ensaios foram divididos primeiramente nos modelos  $\Sigma$  e  $\Omega$ . Para o primeiro, 25 imagens foram utilizadas na situação A (13,5 V de iluminação) e 25 imagens na situação B (16,5 V de iluminação). Já para o segundo, foram 52 imagens obtidas para a situação A e 52 para a B. Lembrando que, tanto para o modelo  $\Sigma$  quanto para o  $\Omega$ , as imagens continham estatores com condutores na trajetória, de forma que, conforme será visto mais a frente, esse defeito influenciou a capacidade do algoritmo de detectar corretamente as extremidades dos isolantes, como era esperado.

Além da divisão em situação A e B, com cada imagem o algoritmo era executado com filtro e sem, sendo o filtro usado o de suavização, como visto na seção 4.1.

Num primeiro momento, foram feitos os testes com as imagens do modelo  $\Sigma$  utilizando quatro séries de parâmetros diferentes no algoritmo, tais como a força de detecção de funções de detecção de borda e nível de cinza de corte para criação do gabarito virtual, descrito na seção 4.1, de forma a determinar a melhor delas, utilizando-a posteriormente nos modelos  $\Omega$ .

Na tabela 6 veem-se os resultados, os quais indicam a porcentagem que extremidades de isolantes foram detectadas de forma errada, conforme falado anteriormente. As linhas contendo #1, #2, #3 e #4 indicam a série de parâmetros utilizada. A primeira linha contém os motivos pelos quais houve falha na detecção, de maneira que a tabela informa a quantidade de extremidades erroneamente detectadas e o porquê.

Conseguiu-se chegar a bons resultados, e a configuração #4 B apresentou melhor desempenho, tanto com filtro quanto sem, atingindo o índice de 99,33% de indicações corretas, dentro da meta estipulada. Assim, os parâmetros utilizados nesse caso foram os usados para os testes com os estatores de modelo  $\Omega$ .

Na tabela 7, são mostrados os resultados com os estatores do modelo  $\Omega$ . Erros de posicionamento e devido à iluminação são os mesmo descritos na seção 7.2.2.

Da mesma forma que no caso de condutor na trajetória de estatores do modelo  $\Omega$ , na seção 7.2.2, é notável a mudança de

desempenho com a alteração dos modelos, mesmo aqui também sendo atingida a meta de indicações corretas. Igualmente, as soluções proposta nessa seção são as mesmas recomendadas aqui para melhorar o desempenho do sistema de medição.

Tabela 6 – Indicações incorretas da detecção de extremidades de isolantes de estatores de modelo  $\Sigma$ .

		Sujeira <sup>31</sup>	Algoritmo <sup>32</sup>	Condutor na trajetória <sup>33</sup>	TOTAL	
#1	A	Sem filtro	0,50%	0,17%	0,33%	<b>1,00%</b>
		Com filtro	0,50%	0,33%	0,33%	<b>1,17%</b>
	B	Sem filtro	0,50%	0,00%	0,50%	<b>1,00%</b>
		Com filtro	0,83%	0,83%	0,33%	<b>2,00%</b>
#2	A	Sem filtro	0,00%	0,33%	0,50%	<b>0,83%</b>
		Com filtro	0,00%	2,33%	0,33%	<b>2,67%</b>
	B	Sem filtro	0,00%	0,67%	0,50%	<b>1,17%</b>
		Com filtro	0,00%	3,00%	0,50%	<b>3,50%</b>
#3	A	Sem filtro	0,00%	2,83%	0,33%	<b>3,17%</b>
		Com filtro	0,00%	1,50%	0,50%	<b>2,00%</b>
	B	Sem filtro	0,00%	0,17%	0,50%	<b>0,67%</b>
		Com filtro	0,00%	1,67%	0,50%	<b>2,17%</b>
#4	A	Sem filtro	0,50%	0,00%	0,33%	<b>0,83%</b>
		Com filtro	0,50%	0,33%	0,33%	<b>1,17%</b>
	B	Sem filtro	0,00%	0,17%	0,50%	<b>0,67%</b>
		Com filtro	0,00%	0,17%	0,50%	<b>0,67%</b>

<sup>31</sup> A presença de sujeiras no estator faz com que a função de detecção de borda indique a sujeira como sendo a extremidade do isolante.

<sup>32</sup> Erro por processamento errado de alguma parte do algoritmo.

<sup>33</sup> Um fio na trajetória faz com que a função de detecção de borda indique a sujeira como sendo a extremidade do isolante.



Tabela 7 – Indicações incorretas da detecção de extremidades de isolantes de estatores de modelo  $\Omega$ .

	A		B	
	Sem filtro	Com filtro	Sem filtro	Com filtro
<b>Posicionamento</b>	3,61%	3,61%	3,93%	3,69%
<b>Iluminação</b>	0,32%	0,32%	3,21%	3,21%
<b>Condutor na trajetória</b>	0,48%	0,48%	0,48%	0,48%
<b>Sujeira</b>	0,24%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>Algoritmo</b>	0,56%	0,56%	0,32%	0,32%
<b>TOTAL</b>	<b>5,21%</b>	<b>4,97%</b>	<b>7,93%</b>	<b>7,69%</b>

#### 7.4.4. Testes de nível zero em laboratório

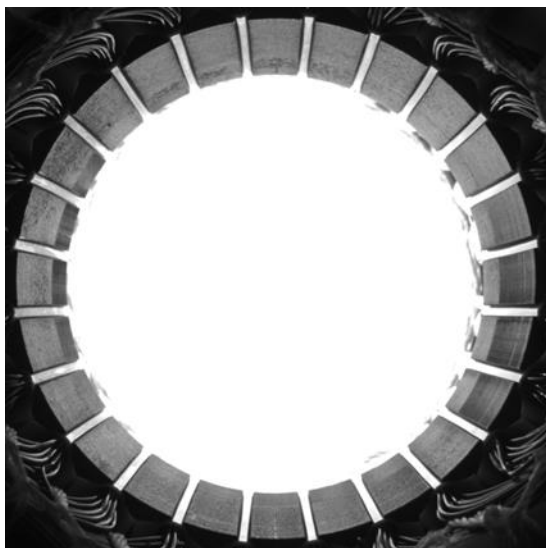
Para avaliar resultados metrológicos do sistema de medição proposto, foram desenvolvidos os chamados testes de nível zero. Esses se tratam de medições feitas em estatores cujos isolantes foram todos colocados na altura 0 mm, ou seja, rentes à face superior do estator.

Esse tipo de abordagem é pertinente, pois o nível zero é a altura mais crítica para um isolante, tendo em vista que qualquer movimentação dele pode permitir que os condutores passem a poder entrar em contato com a carcaça, caracterizando um defeito. Por essa razão, o teste de nível zero pode ser considerado como a parte mais relevante para uma fábrica de estatores, pois representa a avaliação do limite de aceitação da posição do isolante. Além disso, é um teste de fácil de ser realizado em laboratório, pois basta alinhar os isolantes com a face superior do estator para sua reprodução.

Na figura 84, é mostrada uma imagem capturada de um estator cujos isolantes estão em nível zero. Atenção para a pequena projeção de altura na imagem projetada pelos isolantes.

Os testes foram realizados da seguinte maneira: 80 imagens de estatores com isolantes em nível zero foram capturadas e para cada posição de isolante foi calculada uma média e uma incerteza padrão, considerando tanto o modelo *pinhole* quanto o modelo exponencial. Cada posição de isolante tem um número para denominá-lo, conforme está na figura 85.

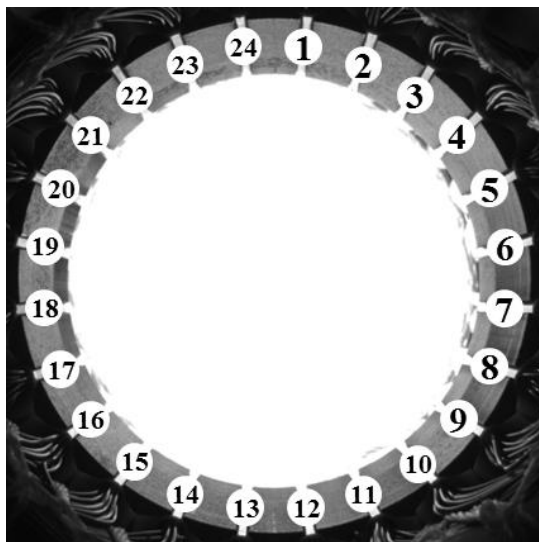
Figura 84 – Estator com isolantes no nível zero.



Fonte: autor.

Era esperado que três características fossem determinantes no cálculo da incerteza de medição de altura de isolantes: o alinhamento entre o estator e câmera, o afastamento do isolante em relação ao centro do estator e as distorções da lente próximas às bordas da imagem. O alinhamento correto faz com que todos os isolantes tenham a mesma posição em relação ao centro da imagem, o que caso não aconteça pode garantir projeções maiores de alguns isolantes que em outros, prejudicando a medição. O afastamento dos isolantes é uma característica dos estatores utilizados para os testes, intrínseca a essas peças, que é a diferença de distância dos isolantes ao centro do estator, o que representa uma diferença de medição, conforme já abordado na seção 5.2. Finalmente, as distorções na lente podem fazer com que cada isolante se apresente de uma forma diferente na imagem, maior ou menor do que o esperado, mesmo que o alinhamento esteja perfeito.

Figura 85 – Denominação de cada posição de isolante.



Fonte: autor.

Em ambos os modelos, para cada medição e em cada posição de isolante foram determinadas somente as parcelas aleatórias desses desvios, tendo em vista que não houve parcelas sistemáticas significativas e os desvios-padrão das medições foram expressivos. Abaixo, na tabela 8 e na tabela 9, são mostradas as incertezas obtidas experimentalmente para cada posição de isolante em cada modelo, determinadas com base no desvio-padrão das medições.

Uma informação importante que pode ser obtida com esses resultados é a incerteza de 2,4 mm na tabela 8 e de 2,1 mm na tabela 9, as maiores incertezas medidas nos testes. Elas foram expandidas considerando um intervalo de confiança de 95%. Para um ambiente industrial que trabalhe com defeitos em ppm, um intervalo de confiança maior deveria ser utilizado a fim de garantir a confiabilidade desse resultado. Para um intervalo de 99,9999%, a incerteza da tabela 8 passa a ser igual a 7,5 mm e a da tabela 9 igual a 6,4 mm, valores os quais podem ser encarados como limites mínimos para avaliação na linha de produção. Quando uma medição de altura de isolante na linha de montagem resultasse num valor igual ou menor que o pior caso, o SM pode emitir um alerta, indicando que algum isolante está potencialmente

numa posição não conforme, levando o estator para ser analisado com mais cuidado.

Os resultados se mostraram importantes para retirada de conclusões acerca do equipamento de monitoramento de altura de isolantes. As posições dos isolantes, conforme mostrado na figura 85, não se mostraram tão importantes na determinação da incerteza de medição, pois os resultados da tabela 9 mostram que a incerteza não teve grandes variações com a mudança da localização da medição. Mesmo assim, recomenda-se o melhor alinhamento das partes através do aumento da robustez da bancada utilizada e o uso de algoritmos de compensação de distorção de lentes para minimizar esses efeitos nas medições.

Tabela 8 – Incertezas de medição para cada posição de isolante na imagem (modelo *pinhole*).

<b>Posições</b>	<b>u [mm]</b>	<b>Posições</b>	<b>u [mm]</b>	<b>Posições</b>	<b>u [mm]</b>
<b>1</b>	1,8	<b>9</b>	1,3	<b>17</b>	2,1
<b>2</b>	1,7	<b>10</b>	1,7	<b>18</b>	1,4
<b>3</b>	1,4	<b>11</b>	2,4	<b>19</b>	1,7
<b>4</b>	1,6	<b>12</b>	1,4	<b>20</b>	1,7
<b>5</b>	1,9	<b>13</b>	1,7	<b>21</b>	1,2
<b>6</b>	1,4	<b>14</b>	1,9	<b>22</b>	1,9
<b>7</b>	1,8	<b>15</b>	1,2	<b>23</b>	2,0
<b>8</b>	1,8	<b>16</b>	2,2	<b>24</b>	1,4

Tabela 9 – Incertezas de medição para cada posição de isolante na imagem (modelo exponencial).

<b>Posições</b>	<b>u [mm]</b>	<b>Posições</b>	<b>u [mm]</b>	<b>Posições</b>	<b>u [mm]</b>
<b>1</b>	1,6	<b>9</b>	1,1	<b>17</b>	1,8
<b>2</b>	1,4	<b>10</b>	1,5	<b>18</b>	1,2
<b>3</b>	1,2	<b>11</b>	2,1	<b>19</b>	1,5
<b>4</b>	1,4	<b>12</b>	1,2	<b>20</b>	1,5
<b>5</b>	1,7	<b>13</b>	1,4	<b>21</b>	1,0
<b>6</b>	1,2	<b>14</b>	1,7	<b>22</b>	1,6
<b>7</b>	1,5	<b>15</b>	1,0	<b>23</b>	1,7
<b>8</b>	1,6	<b>16</b>	1,9	<b>24</b>	1,2

A comparação entre esses resultados e as incertezas obtidas para medição de altura de isolante com métodos analíticos e numéricos na seção 7.4.1 será feita na seção 7.4.5.

#### **7.4.5. Comparação entre os resultados das medições em nível zero e as incertezas obtidas**

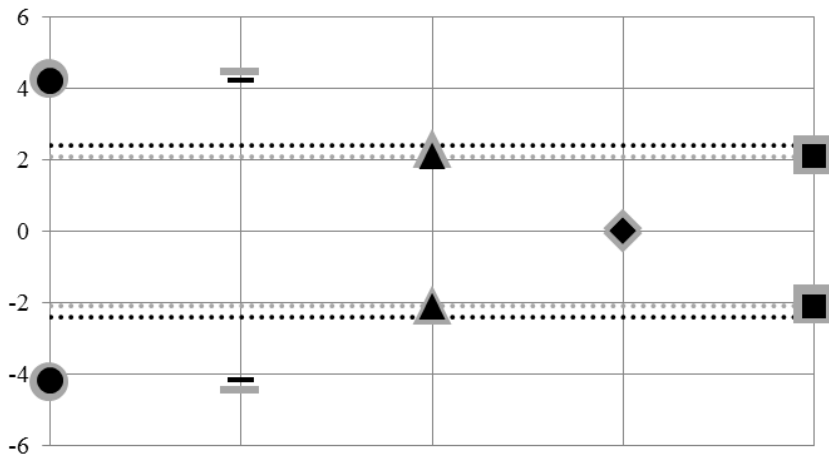
Nesta seção, faz-se a comparação entre os resultados obtidos na seção 7.4.1 e na seção 7.4.4, o que é importante para avaliar se a avaliação experimental da incerteza do processo de medição valida as curvas obtidas de ambos os modelos com emprego dos métodos analíticos e numéricos.

Na figura 86, é mostrada a comparação entre os resultados de incertezas para o ponto 0 mm de altura de isolante para todos os modelos e métodos, tanto analíticos quanto numéricos, e as maiores incertezas conseguidas nas medições de nível zero, representadas pelas linhas. Percebe-se que os métodos MC1 e MC3 apresentarem resultados bastante semelhantes aos obtidos experimentalmente nos testes de nível zero. Adicionalmente, pode-se perceber que o método MC2 apresenta uma estimativa de incerteza que não é condizente com a realidade, justamente por considerar apenas as parcelas de incerteza referentes ao ajuste de curva realizado para determinar a função de medição. Os métodos analíticos, por sua vez, apresentam uma estimativa exagerada da incerteza de medição, com valores que são praticamente o dobro dos valores obtidos experimentalmente. Por fim, vê-se uma diferença entre os valores superiores e inferiores dos métodos numéricos, ao contrário dos analíticos, os quais resultaram numa distribuição simétrica, por considerarem que a distribuição resultante é uma distribuição normal.

Com base nos dados disponíveis, tanto o método MC1 quanto o método MC3 ficaram muito próximos às indicações dos testes de nível zero. Isso mostra que as incertezas, pelo menos no ponto que representa a altura zero milímetro, obtiveram bom desempenho, caracterizando bem o comportamento observado experimentalmente. Contudo, é importante ressaltar que existem variáveis arbitradas nos métodos, como as incertezas de pixel e de altura, e esses valores escolhidos podem não corresponder exatamente com os valores reais para o fenômeno. Indica-se realizar uma avaliação mais criteriosa para validação dos métodos, com a medição de isolantes em outras alturas visando fazer uma melhor comparação dos métodos numéricos em todo o intervalo de medição.

Figura 86 – Comparação entre incertezas.

Incertezas  
[mm]



..... Incerteza Nível Zero (exponencial) ..... Incerteza Nível Zero (pinhole)

● GUM (exponencial)

● GUM (pinhole)

— GUM Correlação (exponencial)

— GUM Correlação (pinhole)

▲ MC1 (exponencial)

▲ MC1 (pinhole)

◆ MC2 (exponencial)

◆ MC2 (pinhole)

■ MC3 (exponencial)

■ MC3 (pinhole)

Fonte: autor.

Por fim, com essa última comparação pode-se dizer que os modelos *pinhole* e exponencial são equivalentes, mostrando resultados bastante parecidos. O *pinhole* chegou a incertezas um pouco maiores, contudo, como ele parte de uma dedução baseada na física do processo e não em um ajuste de curvas, acredita-se que ele seja mais apropriado para ser utilizado na medição de altura de isolantes.

## 7.5. CAIXA DE TOMADAS

O caso da caixa de tomadas teve um estudo de caso considerando tanto a parte de visão quanto a parte de continuidade descrita na seção 3.4.3, mesmo o teste elétrico não pertencendo ao escopo deste trabalho. Isso foi relevante, pois permitiu a possibilidade de avaliação do teste de visão com algum outro tipo de teste.

O estudo se deu através do ensaio de 21 caixas de tomada, sendo 9 com defeito na fixação do clipe. Utilizou-se a bancada de tração nelas e avaliaram-se os resultados apresentados por ambos os testes. Numa tabela feita para anotação dos resultados, as tomadas foram enumeradas, os cabos foram divididos em grupos, conforme a função que exercem no estator: auxiliar, comum e principal, e foi analisado se os métodos obtiveram sucesso ou não em seu funcionamento, conforme visto abaixo na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios nas caixas de tomada.

<b>Tomada</b>	<b>Auxiliar</b>	<b>Comum</b>	<b>Principal</b>	<b>Elétrico detectou?</b>	<b>Visão detectou?</b>
<b>01</b>	correto	correto	DEFEITO	sim	sim
<b>02</b>	DEFEITO	DEFEITO	correto	sim	sim
<b>03</b>	correto	DEFEITO	correto	sim	sim
<b>04</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>05</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>06</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>07</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>08</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>09</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>10</b>	correto	DEFEITO	correto	NÃO	sim
<b>11</b>	DEFEITO	correto	correto	sim	sim
<b>12</b>	DEFEITO	DEFEITO	correto	sim	sim
<b>13</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>14</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>15</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>16</b>	correto	DEFEITO	correto	sim	sim
<b>17</b>	DEFEITO	correto	correto	sim	sim
<b>18</b>	correto	DEFEITO	correto	sim	sim
<b>19</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>20</b>	correto	correto	correto	sim	sim
<b>21</b>	correto	correto	correto	sim	sim

Como visto, o teste elétrico falhou em uma detecção, enquanto que o teste com visão não falhou. De qualquer forma, o resultado foi bastante bom, tendo em vista que ambos os testes devem funcionar de forma conjunta na aplicação final. Pode se dizer que esse teste está pronto para ser avaliado na linha de montagem, em especial pela sua excelente taxa de acerto com as amostras ensaiadas. Para inserção em linha para avaliação, entretanto, será necessária a construção de uma bancada final que empregue os conceitos do protótipo desenvolvido, porém que seja adequada à realidade industrial.



## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Soluções em inspeção de estatores de motores elétricos baseadas em visão computacional foram desenvolvidas. Dos estudos preliminares aos resultados dos estudos de casos, várias conclusões puderam ser tomadas, e as frentes de trabalho que não puderam ser levadas a frente serão propostas como possibilidades de trabalhos futuros.

### 8.1. CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos na revisão da literatura, é possível dizer que a visão computacional como uma vertente da inspeção industrial é um nicho de mercado com muito ainda a ser explorado. Muitas frentes nas mais diversas áreas de conhecimento têm optado pelo uso de visão computacional para suprir as falhas intrínsecas à inspeção visual humana. Algo similar pode ser dito a respeito da simulação de Monte Carlo voltada à Metrologia. Muitos artigos já citam sua utilização tanto para comparação de resultados em medições em condições adversas, como fenômenos não lineares e incertezas muito grandes das grandezas de entrada, quanto em experimentos nas quais a única possibilidade viável de avaliação de incerteza de medição seja a utilização de um método numérico. Os resultados obtidos aqui contribuem para a utilização tanto da visão computacional quanto de simulações de Monte Carlo no meio industrial.

Três frentes de trabalho para identificação de defeitos em estatores foram abordadas: a detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor e em contato com o rotor, o monitoramento de posição de isolantes e a detecção de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas. Em suas respectivas seções, cada problema foi descrito, bem como o algoritmo proposto para detecção de defeitos e a bancada necessária para a captura das imagens. Ainda, cada frente teve seus estudos de caso, de forma a validar as propostas de solução de cada inspeção tanto no ambiente fabril como em laboratório.

Os testes de detecção de condutores na trajetória de inserção rotor e em contato com o rotor foram divididos em casos com e sem o rotor inserido na peça, sendo este último subdividido em modelos  $\Omega$  e  $\Sigma$ , para ser possível uma melhor avaliação do problema como um todo. Para cada divisão, um algoritmo específico foi desenvolvido. Visando a simplicidade, uma bancada própria para as duas situações foi projetada.

Quatro estudos de casos foram criados para avaliar a proposta de inspeção: uma para o modelo  $\Sigma$ , uma para o modelo  $\Omega$  e dois para o

conjunto com o rotor montado. No primeiro estudo, os resultados foram muito bons, chegando numa configuração que indicou corretamente a presença ou ausência de defeitos em todos os casos testados. No segundo, a alteração no desempenho devido à mudança no modelo foi bem perceptível, apresentando um resultado pior. No terceiro e quarto estudos, o uso do filtro de realce de detalhes em conjunto com o filtro de suavização foi a melhor alternativa, chegando a uma configuração com os realces e atenuações necessários. Existiram erros devidos a condutores dobrados, cuja solução foi a utilização de luz azul para iluminação, a qual melhorou consideravelmente a taxa de acerto do programa, e ao posicionamento do ERB, para o qual já foram desenvolvidos algoritmos para auxiliar na centralização. O teste de luz azul foi importante também, pois mostrou que para alguns casos é possível que o uso de uma câmera colorida seja a única alternativa de detecção viável. De maneira geral, os resultados aqui apresentados foram considerados bons e concluiu-se que o posicionamento e a iluminação foram fatores críticos para os resultados.

Na segunda frente de trabalho, o monitoramento de posição de isolantes, dois modelos matemáticos diferentes para criação da função de medição foram usados, um exponencial e outro o modelo *pinhole*. Em cada um deles, métodos para avaliação da incerteza de medição foram desenvolvidos, tanto analíticos quanto numéricos, e dois estudos de caso, um visando avaliar o desempenho do algoritmo de detecção de extremidade de isolantes e outro medindo altura de isolantes em nível zero, isto é, altura igual a 0 mm.

Primeiramente, os modelos propostos foram ajustados aos dados obtidos em experimentos. O resultado desse procedimento foi bom, tendo ambos os modelos um coeficiente de correlação aproximadamente igual a 0,99, mostrando que eles se comportaram de maneira similar, se ajustando bem às medições. O modelo exponencial ter se ajustado tão bem quanto o modelo *pinhole* mostra que a forma da forma exponencial para ele foi coerente.

As incertezas de ambos os modelos se comportaram de forma similar, com modelo *pinhole* apresentando a incerteza um pouco maior que o exponencial de maneira geral. Os métodos analíticos chegaram a incertezas maiores que os outros métodos desenvolvidos, principalmente devido à não linearidade da função de medição e à alta incerteza dos coeficientes dessa função. Os métodos numéricos propostos MC1 e MC3 tiveram comportamento semelhante, pois consideram parcelas de incerteza de forma parecida, apesar de o tratamento estatístico ser diferente. O método proposto MC2 resultou em uma curva com forma

diferente e com valores de incerteza subavaliados, justamente por não considerar essas incertezas da mesma maneira. Com base nos métodos numéricos e nos dados experimentais, chegou-se à altura de 6,4 mm como um ponto de risco, abaixo do qual o isolante medido em fábrica pode estar abaixo do nível, com confiança de 99,9999%.

As curvas ajustadas com as incertezas obtidas, pelo menos no ponto que representa a altura zero milímetro, obtiveram bom desempenho, caracterizando bem o comportamento observado experimentalmente.

Ainda, foi feito um estudo em relação ao efeito da variação do raio  $R$  do isolante na variação da altura  $H$ . Concluiu-se que o sistema somente obterá resultados confiáveis se a variação de  $R$  for muito pequena ou igual a zero, ou ainda se for medida e compensada.

Por fim, a terceira frente, a da caixa de tomadas, teve um estudo de caso o qual considerou tanto a parte de visão quanto o teste elétrico, mesmo esse último não pertencendo ao escopo deste trabalho, de forma a permitir a comparação dos testes. O resultado dos testes em conjunto foi muito bom, não havendo falhas.

Em suma, olhando para a questão de aplicação industrial, pode-se dizer que o dispositivo de detecção de cabos fixados incorretamente na caixa de tomadas já pode ser usado em aplicações industriais. Para o problema de condutores na trajetória, é necessário ainda o estudo do desempenho do teste com o melhoramento da bancada e com a câmera colorida para se passar para uma etapa seguinte na evolução do conceito de detecção. No monitoramento de altura de isolantes, chegou-se a um valor para ser empregado como limite de aceitação, o qual pode ser utilizado em testes iniciais numa linha de montagem, de forma a se avaliar o equipamento na situação na qual ele é mais importante, ou seja, em torno da posição de altura nula. Entretanto, é necessário também se avaliar seu desempenho metrológico para outros pontos além do nível zero, comparando inclusive com as incertezas obtidas através dos métodos analíticos e numéricos.

É possível afirmar, com o exposto, que todos os objetivos foram alcançados.

## 8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nas conclusões dos estudos de caso, foram elaboradas propostas para obtenção de resultados além dos expostos aqui. Propõe-se, pois, para oportunidades de trabalho futuros:

- aumento do número de amostras no teste de detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor com estatores dos modelos  $\Sigma$  e  $\Omega$ , a fim de melhorar a confiabilidade dos ensaios;
- adição de uma parte para diferenciação entre condutores da bobina e fios de bandagem no algoritmo de detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor com estatores do modelo  $\Sigma$  e  $\Omega$ ;
- desenvolvimento de um sistema de posicionamento mais robusto para a bancada de detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor e monitoramento de posição de isolante, para diminuir ocorrências de erros de detecção por problemas com desalinhamentos;
- desenvolvimento de um circuito para controlar a luminosidade nos LEDs a ser adicionado à bancada de detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor e monitoramento de posição de isolante, para evitar excessos de luminosidade;
- utilização de uma câmera colorida na detecção de condutores na trajetória de inserção do rotor com o ERB, visando eliminar os erros que restaram na identificação de condutores;
- utilização de lente telecêntrica para detecção de condutores na trajetória do rotor;
- criação de um padrão para altura de isolantes que permita a avaliação da incerteza de medição em todo o intervalo de medição proposto, inclusive com a comparação das medições desse padrão com os valores obtidos numericamente pelos métodos MC1, MC2 e MC3;
- utilização de lente com distância focal menor que 8 mm para medição de altura de isolante; e

## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André R. de. **Fundamentos de metrologia**. Barueri: Manole Ltda., 2008.

AYYUB, Bilal M.; KLIR, George J. **Uncertainty modelling and analysis in engineering and the sciences**. Boca Raton: Chapman & Hall, 2006.

BELLON, Olga Regina Pereira. **Visão computacional: Um sistema para localização de objetos poliédricos no espaço 3D**. 1990. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Unicamp, Campinas, 1990.

BRANDÃO, Eric et al. Estimation of pressure-particle velocity impedance measurement uncertainty using the Monte Carlo method. **Journal Of The Acoustical Society Of America**. Florianópolis, p. 27-31. jul. 2011.

BRAYER, John M. **Introduction to Fourier transforms for image processing**. Disponível em: <<https://www.cs.unm.edu/~brayer/vision/fourier.html>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

BURIN, Eduardo Lucas Konrad. **Estudo da aplicabilidade de um sistema estereoscópico para a monitoração de pêndulos em barragens**. 2010. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CALVERT, J B. **Salient-Pole Machines**. Disponível em: <<http://mysite.du.edu/~jcalvert/tech/salpomo.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

CANO, Luis. **Noções básicas de perspectiva**. Disponível em: <<http://www.ipb.pt/~luiscano/Perspectivalinear/Nocoebasicas.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2015.

CMS. Universidade de Lund. **Lecture 1: The pinhole camera model**. Disponível em: <<http://www.maths.lth.se/matematiklth/personal/calle/datorseende13/notes/forelas1.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

COMPUTAR. **Technical Guide for Lenses**. Disponível em: <[http://computar.com/misc/Computar\\_Lens\\_Guide\\_1014.pdf](http://computar.com/misc/Computar_Lens_Guide_1014.pdf)>. Acesso em: 11 dez. 2014

CORDERO, Raul R et al. Monte Carlo-based uncertainty analysis of UV array spectroradiometers. **Metrologia**. Santiago, p. 745-755. 22 out. 2012.

CORE OPTICAL INC. **Otsu thresholding operation**. Disponível em: <[http://www.coreoptical.com/API\\_Documentation/OtsuDocImage2.bmp](http://www.coreoptical.com/API_Documentation/OtsuDocImage2.bmp)>. Acesso em: 24 jan. 2015.

EDMUND OPTICS. **What is telecentricity**. Disponível em: <[www.edmundoptics.com/technical-resources-center/imaging/what-is-telecentricity](http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/imaging/what-is-telecentricity)>. Acesso em: 15 dez. 2014.

EICHSTÄDT, S. et al. Efficient implementation of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation in dynamic measurements. **Metrologia**. Berlin, p. 401-410. 24 abr. 2012.

ELMASRY, Gamal et al. In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system. **Journal Of Food Engineering**, Ismailia, p. 60-68. 7 jan. 2012.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Electric Generator**. Disponível em: <<http://www.britannica.com/eb/article-45811/electric-generator>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

EXOTO 118 **1963 Shelby Cobra 289 Hardtop**. Disponível em: <[http://www.autoorb.com/exoto-118-1963-shelby-cobra-289-hardtop-diecast-car/diecast.org\\*data\\*sac\\_cars\\*ex19120.jpg/](http://www.autoorb.com/exoto-118-1963-shelby-cobra-289-hardtop-diecast-car/diecast.org*data*sac_cars*ex19120.jpg/)>. Acesso em: 20 jan. 2015.

FELICIANO, Flávio F.; SOUZA, Igor L. de; LETA, Fabiana R.. Visão computacional aplicada à metrologia dimensional automatizada. **Engvista**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 2, p.38-50, dez. 2005.

FIGLIOLA, Richard S.; BEASLEY, Donald E. **Theory and design for mechanical measurements**. 3. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons Inc., 2000.

FISHER, Robert B. et al. **Dictionary of Computer Vision and Image Processing**. 2. ed. West Sussex: Wiley, 2014.

GILL, Gagandeep Singh; KUMAR, Amod; AGARWAL, Ravinder. Nondestructive grading of black tea based on physical parameters by texture analysis. **Sciverse Sciencedirect**, [s.l.], p.198-204, 31 ago. 2013.

GIROLAMI, Antonio et al. Measurement of meat color using a computer vision system. **Meat Science**.Potenza, p. 111-118. 10 ago. 2012.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

HAERTEL, Maryah Elisa Morastoni. **Perfilômetro Óptico Externo para Dutos Expostos à Corrosão**. Florianópolis, 2009. 79p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Curso de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina.

HOFMANN, Allan Charles Henri. **Sistema endoscópico estereoscópico para medição geométrica de uniões soldadas de dutos**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<http://www.posmci.ufsc.br/dis74.htm>>. Acesso em: 05 jan. 2012.

HORNE, K. et al. Monte Carlo uncertainty estimation for an oscillating-vessel viscosity measurement. **Metrologia**. Logan, p. 577-582. 5 jul. 2012.

INMETRO. **Guia para expressão da incerteza de medição 2008**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2008.

INMETRO. **Vocabulário internacional de metrologia 2012**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. 2012. Disponível em: <[www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim\\_2012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2014.

JAMPANA, Phanindra; SHAH, Sirish L.; KADALI, Ramesh. Computer vision based interface level control in separation cells. **Control Engineering Practice**. Edmonton, p. 349-357. 18 jan. 2010.

JCGM. Bureau International des Poids et Mesures. **Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”**: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. 2008. Disponível em: <[www.bipm.org/utls/.../JCGM\\_101\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utls/.../JCGM_101_2008_E.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2014.

MEYER, C. et al. Uncertainty propagation through polynomial fitting and integration procedures with GUM and Monte Carlo applied to x-ray streak camera yield measurements. **Metrologia**. Le Barp, p. 16-27. 22 dez. 2010.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2003.

NAGARAJAN, R et al. A real time marking inspection scheme for semiconductor industries. **Advanced Manufacturing Technology**. Londres, p. 926-932. 18 ago. 2006.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI Vision 2010 for LabVIEW Help**. Disponível em: < <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370281M-01/>>. Acesso em: 05 jan. 2015.

NEEDHAM, Joseph. **Science and Civilization in China**. Taipei: Caves Books Ltd., 1986.

OLIVEIRA, João Gabriel Souza Martins de. **Materiais usados na construção de motores elétricos**. Disponível em: <[http://www.motoreletrico.net/upload/materiais\\_motores.pdf](http://www.motoreletrico.net/upload/materiais_motores.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2015.

PINTO, Tiago Loureiro Figaro da Costa. **Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão**. 2010. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

POINT GREY. **Selecting a Lens for your Camera**. Disponível em: <<http://www.ptgrey.com/tan/10694>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

RAMOS, Mário Cesar do Espírito Santo. **Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais**. 2009. 246 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.



RUDEK, Marcelo; COELHO, Leandro Dos Santos; CANGIOLIERI JUNIOR, Osiris. **Visão computacional aplicada a sistemas produtivos**: Fundamentos e estudo de caso. Disponível em: <<http://www.las.pucpr.br/rudek/pdf/Enegepxxi.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2011.

SALICONE, Simona. **Measurement Uncertainty**: An Approach via the Mathematical Theory of Evidence. Milão: Springer, 2007.

SCOTT, David M.; MCCANN, Hugh. **Process imaging for automatic control**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005.

SCUSSEL, Júlio Nelson. **Propostas de ações para reduzir o tempo demandado por ensaio de desempenho de compressores herméticos**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

ŠEBŮK, Milan; GUTTEN, Miroslav; KUČERA, Matej. **Diagnostics of electric equipments by means of thermovision**. Przegład Elektrotechniczny, Žilina, n. , p.313-317, out. 2011.

SHAFEEK, H. I. et al. Assessment of welding defects for gas pipeline radiographs using computer vision. **Science Direct**. Mansoura, p. 291-299. 15 out. 2003.

SPATIAL resolution. Disponível em: <[https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/sites/www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/files/image/res\\_spatial.gif](https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/sites/www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/files/image/res_spatial.gif)>. Acesso em: 06 fev. 2015.

STEGER, Carsten; ULRICH, Markus; WIEDERMANN, Christian. **Machine Vision Algorithms and Applications**. Weinheim: Wiley, 2008.

TRACER: técnicas de optimización avanzadas para problemas complejos. **The Median Filter Problem**. Disponível em: <<http://tracer.lcc.uma.es/problems/mfp/SpatialFiltering.jpg>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

UNBELIEVABLE examples of forced perspective. Disponível em: <<http://mybroadband.co.za/vb/attachment.php?s=9ca9796ee298d8136d7d5a888ca3bf6f&attachmentid=67139&d=1377466022>>. Acesso em: 06 jan. 2015.

**USPTO. US381968 A.** Disponível em:

<<http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/381968>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

**VALCO. Rotor.** Disponível em:

<[http://www.valco.eu/sitemanager/file/r\\_4\\_Stator--winding.jpg](http://www.valco.eu/sitemanager/file/r_4_Stator--winding.jpg)>. Acesso em: 02 fev. 2015.

**WEG. Manual de motores elétricos.** Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

## APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DA INCERTEZA PELOS MÉTODOS ANALÍTICOS

Neste apêndice, são mostradas as parcelas que compõem a incerteza de medição calculada pelos métodos analíticos.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), as equações utilizadas para se chegar à incerteza de medição em medições indiretas analiticamente são as seguintes:

a) considerando as grandezas estatisticamente independentes

$$u(G)^2 = \left[ \frac{\partial G}{\partial X_1} u(X_1) \right]^2 + \left[ \frac{\partial G}{\partial X_2} u(X_2) \right]^2 + \dots + \left[ \frac{\partial G}{\partial X_n} u(X_n) \right]^2$$

onde

$u(G)$	incerteza combinada máxima da grandeza G
$X_i$	i-ésima grandeza de entrada
$\frac{\partial G}{\partial X_i}$	coeficiente de sensibilidade relacionada à i-ésima grandeza de entrada
$u(X_i)$	incerteza padrão da i-ésimo grandeza de entrada que está sendo combinada

b) considerando as grandezas estatisticamente dependentes, com correlação desconhecida, supondo, portanto, a incerteza máxima

$$(G) = \left| \frac{\partial G}{\partial X_1} \right| u(X_1) + \left| \frac{\partial G}{\partial X_2} \right| u(X_2) + \dots + \left| \frac{\partial G}{\partial X_n} \right| u(X_n)$$

onde

$u(G)$	incerteza combinada máxima da grandeza G
$X_i$	i-ésima grandeza de entrada
$\frac{\partial G}{\partial X_1}$	coeficiente de sensibilidade relacionada à i-ésima grandeza de entrada
$u(X_i)$	incerteza padrão da i-ésimo grandeza de entrada que está sendo combinada

Lembrando que as funções de medição utilizadas para os modelos *pinhole* e exponencial têm as formas das equações abaixo.

$$H = \frac{PD^2}{PD + Rf}$$

onde

$R$	raio do isolante, em mm
$D$	altura entre o centro óptico e a face superior do pacote de lâminas do estator, em mm

$H$	altura do isolante, em mm
$P$	projeção da altura do isolante no sensor da câmera, em mm
$f$	distância focal, em mm

$$H = \alpha \left( 1 - e^{-\frac{p}{\beta}} \right) + \gamma$$

onde

$H$	altura do isolante, em milímetros
$p$	comprimento da projeção do isolante, em pixels
$\alpha, \beta$ e $\gamma$	os coeficientes da equação

Considerando  $f$  o valor fornecido pelo fabricante da lente (9 mm), com incerteza desprezível, os valores para os coeficientes  $R$ ,  $D$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  encontrados foram:

$$\begin{aligned} R &= (29,0 \pm 3,1) \text{ mm} \\ D &= (166,8 \pm 9,3) \text{ mm} \\ \alpha &= (93,6 \pm 6,8) \text{ mm} \\ \beta &= (396 \pm 28) \text{ pixels} \\ \gamma &= (-0,143 \pm 0,079) \text{ mm} \end{aligned}$$

### I. Modelo *pinhole*

Aplicando as equações de incerteza para grandezas estatisticamente independentes à função de medição do modelo *pinhole*, chega-se à seguinte expressão:

$$u(H)^2 = \left[ \frac{\partial H}{\partial P} u(P) \right]^2 + \left[ \frac{\partial H}{\partial D} u(D) \right]^2 + \left[ \frac{\partial H}{\partial R} u(R) \right]^2$$

onde

$u(H)$	incerteza combinada da grandeza H
$u(P)$	incerteza da grandeza P
$u(D)$	incerteza da grandeza D
$u(R)$	incerteza da grandeza R
$\frac{\partial H}{\partial P}$	coeficiente de sensibilidade da grandeza P
$\frac{\partial H}{\partial D}$	coeficiente de sensibilidade da grandeza D
$\frac{\partial H}{\partial R}$	coeficiente de sensibilidade da grandeza R

Visando facilitar a visualização da influência da cada grandeza na incerteza combinada de H, a última equação foi dividida da seguinte maneira:

$$u(H)^2 = P_i^2 + D_i^2 + R_i^2$$

onde

$$P_i = \frac{\partial H}{\partial P} u(P)$$

$$D_i = \frac{\partial H}{\partial D} u(D)$$

$$R_i = \frac{\partial H}{\partial R} u(R)$$

As incertezas obtidas são mostradas na tabela 11:

Tabela 11 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo *pinhole*, considerando as grandezas estatisticamente independentes.

<b>p [pixel]</b>	<b>P<sub>i</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>D<sub>i</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>R<sub>i</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>u(H) [mm]</b>	<b>U(H) [mm]</b>
<b>-0,300</b>	10,44	35,78	27,38	8,6	17,2
<b>-0,293</b>	10,19	33,07	25,42	8,3	16,6
<b>-0,285</b>	9,96	30,54	23,57	8,0	16,0
<b>-0,278</b>	9,73	28,16	21,83	7,7	15,5
<b>-0,270</b>	9,50	25,93	20,19	7,5	14,9
<b>-0,263</b>	9,29	23,84	18,65	7,2	14,4
<b>-0,255</b>	9,08	21,89	17,20	6,9	13,9
<b>-0,248</b>	8,87	20,07	15,84	6,7	13,4
<b>-0,240</b>	8,67	18,36	14,56	6,4	12,9
<b>-0,233</b>	8,48	16,78	13,36	6,2	12,4
<b>-0,225</b>	8,29	15,29	12,23	6,0	12,0
<b>-0,218</b>	8,11	13,91	11,18	5,8	11,5
<b>-0,210</b>	7,93	12,63	10,19	5,5	11,1
<b>-0,203</b>	7,76	11,43	9,27	5,3	10,7
<b>-0,195</b>	7,59	10,33	8,41	5,1	10,3
<b>-0,188</b>	7,42	9,30	7,61	4,9	9,9
<b>-0,180</b>	7,26	8,35	6,86	4,7	9,5
<b>-0,173</b>	7,11	7,47	6,16	4,6	9,1
<b>-0,165</b>	6,96	6,66	5,52	4,4	8,7

<b>-0,158</b>	6,81	5,91	4,92	4,2	8,4
<b>-0,150</b>	6,67	5,22	4,37	4,0	8,1
<b>-0,143</b>	6,53	4,60	3,86	3,9	7,7
<b>-0,135</b>	6,39	4,02	3,39	3,7	7,4
<b>-0,128</b>	6,26	3,50	2,97	3,6	7,1
<b>-0,120</b>	6,13	3,02	2,57	3,4	6,8
<b>-0,113</b>	6,00	2,59	2,21	3,3	6,6
<b>-0,105</b>	5,88	2,20	1,89	3,2	6,3
<b>-0,098</b>	5,76	1,85	1,60	3,0	6,1
<b>-0,090</b>	5,65	1,54	1,33	2,9	5,8
<b>-0,083</b>	5,53	1,26	1,10	2,8	5,6
<b>-0,075</b>	5,42	1,01	0,89	2,7	5,4
<b>-0,068</b>	5,31	0,80	0,71	2,6	5,2
<b>-0,060</b>	5,21	0,62	0,55	2,5	5,0
<b>-0,053</b>	5,11	0,46	0,41	2,4	4,9
<b>-0,045</b>	5,01	0,33	0,30	2,4	4,7
<b>-0,038</b>	4,91	0,22	0,20	2,3	4,6
<b>-0,030</b>	4,81	0,14	0,13	2,3	4,5
<b>-0,023</b>	4,72	0,08	0,07	2,2	4,4
<b>-0,015</b>	4,63	0,03	0,03	2,2	4,3
<b>-0,008</b>	4,54	0,01	0,01	2,1	4,3
<b>0,000</b>	4,45	0,00	0,00	2,1	4,2
<b>0,008</b>	4,37	0,01	0,01	2,1	4,2
<b>0,015</b>	4,29	0,03	0,03	2,1	4,2
<b>0,023</b>	4,21	0,07	0,06	2,1	4,2
<b>0,030</b>	4,13	0,12	0,11	2,1	4,2
<b>0,038</b>	4,05	0,18	0,17	2,1	4,2
<b>0,045</b>	3,98	0,25	0,23	2,1	4,2
<b>0,053</b>	3,90	0,33	0,31	2,1	4,3
<b>0,060</b>	3,83	0,42	0,40	2,2	4,3
<b>0,068</b>	3,76	0,52	0,50	2,2	4,4
<b>0,075</b>	3,69	0,63	0,61	2,2	4,4
<b>0,083</b>	3,63	0,74	0,72	2,3	4,5

<b>0,090</b>	3,56	0,86	0,84	2,3	4,6
<b>0,098</b>	3,50	0,99	0,97	2,3	4,7
<b>0,105</b>	3,44	1,12	1,10	2,4	4,8
<b>0,113</b>	3,37	1,26	1,24	2,4	4,8
<b>0,120</b>	3,31	1,40	1,39	2,5	4,9
<b>0,128</b>	3,26	1,55	1,54	2,5	5,0
<b>0,135</b>	3,20	1,69	1,70	2,6	5,1
<b>0,143</b>	3,14	1,84	1,86	2,6	5,2
<b>0,150</b>	3,09	2,00	2,03	2,7	5,3
<b>0,158</b>	3,04	2,15	2,19	2,7	5,4
<b>0,165</b>	2,98	2,31	2,37	2,8	5,5
<b>0,173</b>	2,93	2,47	2,54	2,8	5,6
<b>0,180</b>	2,88	2,63	2,72	2,9	5,7
<b>0,188</b>	2,83	2,79	2,90	2,9	5,8
<b>0,195</b>	2,78	2,95	3,09	3,0	5,9
<b>0,203</b>	2,74	3,12	3,27	3,0	6,0
<b>0,210</b>	2,69	3,28	3,46	3,1	6,1
<b>0,218</b>	2,65	3,44	3,65	3,1	6,2
<b>0,225</b>	2,60	3,60	3,84	3,2	6,3
<b>0,233</b>	2,56	3,76	4,03	3,2	6,4
<b>0,240</b>	2,52	3,92	4,23	3,3	6,5
<b>0,248</b>	2,48	4,08	4,42	3,3	6,6
<b>0,255</b>	2,44	4,24	4,62	3,4	6,7
<b>0,263</b>	2,40	4,39	4,81	3,4	6,8
<b>0,270</b>	2,36	4,55	5,01	3,5	6,9
<b>0,278</b>	2,32	4,70	5,20	3,5	7,0
<b>0,285</b>	2,28	4,86	5,40	3,5	7,1
<b>0,293</b>	2,24	5,01	5,60	3,6	7,2
<b>0,300</b>	2,21	5,15	5,79	3,6	7,3

---

Para a situação com grandezas estatisticamente dependentes, obtém-se a seguinte expressão:

$$u(H) = \left| \frac{\partial H}{\partial P} \right| u(P) + \left| \frac{\partial H}{\partial D} \right| u(D) + \left| \frac{\partial H}{\partial R} \right| u(R)$$

onde

$u(H)$	incerteza combinada da grandeza H
$u(P)$	incerteza da grandeza P
$u(D)$	incerteza da grandeza D
$u(R)$	incerteza da grandeza R
$\frac{\partial H}{\partial P}$	coeficiente de sensibilidade da grandeza P
$\frac{\partial H}{\partial D}$	coeficiente de sensibilidade da grandeza D
$\frac{\partial H}{\partial R}$	coeficiente de sensibilidade da grandeza R

Também visando facilitar a visualização da influência da cada grandeza na incerteza combinada de H, a última equação foi dividida da seguinte maneira:

$$u(H)^2 = P_d^2 + D_d^2 + R_d^2$$

onde

$$P_d = \frac{\partial H}{\partial P} u(P)$$

$$D_d = \frac{\partial H}{\partial D} u(D)$$

$$R_d = \frac{\partial H}{\partial R} u(R)$$

Os valores de incerteza para esse caso são mostrados na tabela 12:

Tabela 12 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo *pinhole*, considerando as grandezas estatisticamente dependentes.

p [pixel]	$P_d^2$ [mm]	$D_d^2$ [mm]	$R_d^2$ [mm]	u(H) [mm]	U(H) [mm]
<b>-0,300</b>	3,23	5,98	5,23	14,4	28,9
<b>-0,293</b>	3,19	5,75	5,04	14,0	28,0
<b>-0,285</b>	3,16	5,53	4,86	13,5	27,1
<b>-0,278</b>	3,12	5,31	4,67	13,1	26,2
<b>-0,270</b>	3,08	5,09	4,49	12,7	25,3
<b>-0,263</b>	3,05	4,88	4,32	12,2	24,5
<b>-0,255</b>	3,01	4,68	4,15	11,8	23,7
<b>-0,248</b>	2,98	4,48	3,98	11,4	22,9



<b>-0,240</b>	2,94	4,29	3,82	11,0	22,1
<b>-0,233</b>	2,91	4,10	3,65	10,7	21,3
<b>-0,225</b>	2,88	3,91	3,5	10,3	20,6
<b>-0,218</b>	2,85	3,73	3,34	9,9	19,8
<b>-0,210</b>	2,82	3,55	3,19	9,6	19,1
<b>-0,203</b>	2,78	3,38	3,04	9,2	18,4
<b>-0,195</b>	2,75	3,21	2,9	8,9	17,7
<b>-0,188</b>	2,72	3,05	2,76	8,5	17,1
<b>-0,180</b>	2,70	2,89	2,62	8,2	16,4
<b>-0,173</b>	2,67	2,73	2,48	7,9	15,8
<b>-0,165</b>	2,64	2,58	2,35	7,6	15,1
<b>-0,158</b>	2,61	2,43	2,22	7,3	14,5
<b>-0,150</b>	2,58	2,29	2,09	7,0	13,9
<b>-0,143</b>	2,55	2,14	1,97	6,7	13,3
<b>-0,135</b>	2,53	2,00	1,84	6,4	12,8
<b>-0,128</b>	2,50	1,87	1,72	6,1	12,2
<b>-0,120</b>	2,48	1,74	1,6	5,8	11,6
<b>-0,113</b>	2,45	1,61	1,49	5,5	11,1
<b>-0,105</b>	2,43	1,48	1,37	5,3	10,6
<b>-0,098</b>	2,40	1,36	1,26	5,0	10,0
<b>-0,090</b>	2,38	1,24	1,15	4,8	9,5
<b>-0,083</b>	2,35	1,12	1,05	4,5	9,0
<b>-0,075</b>	2,33	1,01	0,94	4,3	8,6
<b>-0,068</b>	2,31	0,90	0,84	4,0	8,1
<b>-0,060</b>	2,28	0,79	0,74	3,8	7,6
<b>-0,053</b>	2,26	0,68	0,64	3,6	7,2
<b>-0,045</b>	2,24	0,58	0,54	3,4	6,7
<b>-0,038</b>	2,22	0,47	0,45	3,1	6,3
<b>-0,030</b>	2,19	0,37	0,36	2,9	5,8
<b>-0,023</b>	2,17	0,28	0,26	2,7	5,4
<b>-0,015</b>	2,15	0,18	0,17	2,5	5,0
<b>-0,008</b>	2,13	0,09	0,09	2,3	4,6
<b>0,000</b>	2,11	0,00	0	2,1	4,2

<b>0,008</b>	2,09	0,09	0,08	2,3	4,5
<b>0,015</b>	2,07	0,17	0,17	2,4	4,8
<b>0,023</b>	2,05	0,26	0,25	2,6	5,1
<b>0,030</b>	2,03	0,34	0,33	2,7	5,4
<b>0,038</b>	2,01	0,42	0,41	2,8	5,7
<b>0,045</b>	1,99	0,50	0,48	3,0	6,0
<b>0,053</b>	1,98	0,57	0,56	3,1	6,2
<b>0,060</b>	1,96	0,65	0,63	3,2	6,5
<b>0,068</b>	1,94	0,72	0,71	3,4	6,7
<b>0,075</b>	1,92	0,79	0,78	3,5	7,0
<b>0,083</b>	1,90	0,86	0,85	3,6	7,2
<b>0,090</b>	1,89	0,93	0,92	3,7	7,5
<b>0,098</b>	1,87	1,00	0,98	3,8	7,7
<b>0,105</b>	1,85	1,06	1,05	4,0	7,9
<b>0,113</b>	1,84	1,12	1,12	4,1	8,1
<b>0,120</b>	1,82	1,18	1,18	4,2	8,4
<b>0,128</b>	1,80	1,24	1,24	4,3	8,6
<b>0,135</b>	1,79	1,30	1,3	4,4	8,8
<b>0,143</b>	1,77	1,36	1,36	4,5	9,0
<b>0,150</b>	1,76	1,41	1,42	4,6	9,2
<b>0,158</b>	1,74	1,47	1,48	4,7	9,4
<b>0,165</b>	1,73	1,52	1,54	4,8	9,6
<b>0,173</b>	1,71	1,57	1,59	4,9	9,8
<b>0,180</b>	1,70	1,62	1,65	5,0	9,9
<b>0,188</b>	1,68	1,67	1,7	5,1	10,1
<b>0,195</b>	1,67	1,72	1,76	5,1	10,3
<b>0,203</b>	1,65	1,76	1,81	5,2	10,5
<b>0,210</b>	1,64	1,81	1,86	5,3	10,6
<b>0,218</b>	1,63	1,85	1,91	5,4	10,8
<b>0,225</b>	1,61	1,90	1,96	5,5	10,9
<b>0,233</b>	1,60	1,94	2,01	5,5	11,1
<b>0,240</b>	1,59	1,98	2,06	5,6	11,2
<b>0,248</b>	1,57	2,02	2,1	5,7	11,4

<b>0,255</b>	1,56	2,06	2,15	5,8	11,5
<b>0,263</b>	1,55	2,10	2,19	5,8	11,7
<b>0,270</b>	1,54	2,13	2,24	5,9	11,8
<b>0,278</b>	1,52	2,17	2,28	6,0	11,9
<b>0,285</b>	1,51	2,20	2,32	6,0	12,1
<b>0,293</b>	1,50	2,24	2,37	6,1	12,2
<b>0,300</b>	1,49	2,27	2,41	6,2	12,3

## II. Modelo exponencial

Agora aplicando as equações de incerteza para grandezas estatisticamente independentes à função de medição do modelo exponencial, chega-se à seguinte expressão:

$$u(H)^2 = \left[ \frac{\partial H}{\partial \alpha} u(\alpha) \right]^2 + \left[ \frac{\partial H}{\partial \beta} u(\beta) \right]^2 + \left[ \frac{\partial H}{\partial \gamma} u(\gamma) \right]^2 + \left[ \frac{\partial H}{\partial p} u(p) \right]^2$$

onde

$u(H)$  incerteza combinada da grandeza H

$u(\alpha)$  incerteza da grandeza  $\alpha$

$u(\beta)$  incerteza da grandeza  $\beta$

$u(\gamma)$  incerteza da grandeza  $\gamma$

$u(p)$  incerteza da grandeza p

$\frac{\partial H}{\partial \alpha}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza  $\alpha$

$\frac{\partial H}{\partial \beta}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza  $\beta$

$\frac{\partial H}{\partial \gamma}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza  $\gamma$

$\frac{\partial H}{\partial p}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza p

Para facilitar a visualização da influência da cada grandeza na incerteza combinada de H, a última equação foi dividida como segue:

$$u(H)^2 = A_i^2 + B_i^2 + C_i^2 + P_i^2$$

onde

$$A_i = \frac{\partial H}{\partial \alpha} u(\alpha)$$

$$B_i = \frac{\partial H}{\partial \beta} u(\beta)$$

$$C_i = \frac{\partial H}{\partial \gamma} u(\gamma)$$

$$P_i = \frac{\partial H}{\partial p} u(p)$$

Os valores encontrados para incerteza são mostrados na tabela 13:

Tabela 13 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo exponencial, considerando as grandezas estatisticamente independentes.

<b>p</b> [pixel]	<b>A<sub>i</sub><sup>2</sup></b> [mm]	<b>B<sub>i</sub><sup>2</sup></b> [mm]	<b>C<sub>i</sub><sup>2</sup></b> [mm]	<b>P<sub>i</sub><sup>2</sup></b> [mm]	<b>u(H)</b> [mm]	<b>U(H)</b> [mm]
<b>-200</b>	19,96	30,68	0,0062	12,43	7,9	16
<b>-190</b>	17,53	26,32	0,0062	11,81	7,5	15
<b>-180</b>	15,31	22,46	0,0062	11,23	7,0	14
<b>-170</b>	13,29	19,05	0,0062	10,68	6,6	13
<b>-160</b>	11,46	16,04	0,0062	10,15	6,1	12
<b>-150</b>	9,81	13,41	0,0062	9,65	5,7	12
<b>-140</b>	8,32	11,10	0,0062	9,18	5,3	11
<b>-130</b>	6,98	9,10	0,0062	8,73	5,0	10
<b>-120</b>	5,79	7,37	0,0062	8,30	4,6	9,3
<b>-110</b>	4,74	5,89	0,0062	7,89	4,3	8,6
<b>-100</b>	3,82	4,63	0,0062	7,50	4,0	8,0
<b>-90</b>	3,01	3,56	0,0062	7,13	3,7	7,4
<b>-80</b>	2,32	2,68	0,0062	6,78	3,4	6,9
<b>-70</b>	1,73	1,95	0,0062	6,44	3,2	6,4
<b>-60</b>	1,24	1,36	0,0062	6,13	3,0	5,9
<b>-50</b>	0,84	0,90	0,0062	5,83	2,8	5,5
<b>-40</b>	0,52	0,55	0,0062	5,54	2,6	5,1
<b>-30</b>	0,29	0,29	0,0062	5,27	2,4	4,8
<b>-20</b>	0,12	0,12	0,0062	5,01	2,3	4,6
<b>-10</b>	0,03	0,03	0,0062	4,76	2,2	4,4
<b>0</b>	0,00	0,00	0,0062	4,53	2,1	4,3
<b>10</b>	0,03	0,03	0,0062	4,30	2,1	4,2
<b>20</b>	0,11	0,10	0,0062	4,09	2,1	4,2

<b>30</b>	0,25	0,22	0,0062	3,89	2,1	4,2
<b>40</b>	0,43	0,37	0,0062	3,70	2,1	4,2
<b>50</b>	0,65	0,54	0,0062	3,52	2,2	4,3
<b>60</b>	0,91	0,74	0,0062	3,34	2,2	4,5
<b>70</b>	1,21	0,96	0,0062	3,18	2,3	4,6
<b>80</b>	1,55	1,19	0,0062	3,02	2,4	4,8
<b>90</b>	1,91	1,44	0,0062	2,87	2,5	5,0
<b>100</b>	2,30	1,69	0,0062	2,73	2,6	5,2
<b>110</b>	2,72	1,94	0,0062	2,60	2,7	5,4
<b>120</b>	3,16	2,19	0,0062	2,47	2,8	5,6
<b>130</b>	3,62	2,45	0,0062	2,35	2,9	5,8
<b>140</b>	4,10	2,70	0,0062	2,23	3,0	6,0
<b>150</b>	4,60	2,95	0,0062	2,12	3,1	6,2
<b>160</b>	5,11	3,19	0,0062	2,02	3,2	6,4
<b>170</b>	5,63	3,42	0,0062	1,92	3,3	6,6
<b>180</b>	6,17	3,65	0,0062	1,82	3,4	6,8
<b>190</b>	6,72	3,86	0,0062	1,73	3,5	7,0
<b>200</b>	7,27	4,07	0,0062	1,65	3,6	7,2

Então, para a situação que considera as grandezas estatisticamente dependentes, tem-se a seguinte expressão:

$$u(H) = \left| \frac{\partial H}{\partial \alpha} \right| u(\alpha) + \left| \frac{\partial H}{\partial \beta} \right| u(\beta) + \left| \frac{\partial H}{\partial \gamma} \right| u(\gamma) + \left| \frac{\partial H}{\partial p} \right| u(p)$$

onde

$u(H)$  incerteza combinada da grandeza H

$u(\alpha)$  incerteza da grandeza  $\alpha$

$u(\beta)$  incerteza da grandeza  $\beta$

$u(\gamma)$  incerteza da grandeza  $\gamma$

$u(p)$  incerteza da grandeza p

$\frac{\partial H}{\partial \alpha}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza  $\alpha$

$\frac{\partial H}{\partial \beta}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza  $\beta$

$\frac{\partial H}{\partial \gamma}$  coeficiente de sensibilidade da grandeza  $\gamma$

$\frac{\partial H}{\partial p}$       coeficiente de sensibilidade da grandeza p

Da mesma forma que o caso anterior, para facilitar a visualização da influência da cada grandeza na incerteza combinada de H, foi utilizada a seguinte nomenclatura:

$$u(H)^2 = A_d^2 + B_d^2 + C_d^2 + P_d^2$$

onde

$$A_d = \left| \frac{\partial H}{\partial \alpha} \right| u(\alpha)$$

$$B_d = \left| \frac{\partial H}{\partial \beta} \right| u(\beta)$$

$$C_d = \left| \frac{\partial H}{\partial \gamma} \right| u(\gamma)$$

$$P_d = \left| \frac{\partial H}{\partial p} \right| u(p)$$

Por fim, na tabela 14, são mostrados os valores encontrados para a incerteza nesse caso.

Tabela 14 – Termos da equação analítica da incerteza combinada de H para o modelo exponencial, considerando as grandezas estatisticamente dependentes.

<b>p [pixel]</b>	<b>A<sub>d</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>B<sub>d</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>C<sub>d</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>P<sub>d</sub><sup>2</sup> [mm]</b>	<b>u(H) [mm]</b>	<b>U(H) [mm]</b>
<b>-200</b>	4,47	5,54	0,079	3,53	13,6	27
<b>-190</b>	4,19	5,13	0,079	3,44	12,8	26
<b>-180</b>	3,91	4,74	0,079	3,35	12,1	24
<b>-170</b>	3,65	4,36	0,079	3,27	11,4	23
<b>-160</b>	3,39	4,01	0,079	3,19	10,7	21
<b>-150</b>	3,13	3,66	0,079	3,11	10,0	20
<b>-140</b>	2,88	3,33	0,079	3,03	9,3	19
<b>-130</b>	2,64	3,02	0,079	2,95	8,7	17
<b>-120</b>	2,41	2,72	0,079	2,88	8,1	16
<b>-110</b>	2,18	2,43	0,079	2,81	7,5	15
<b>-100</b>	1,95	2,15	0,079	2,74	6,9	14
<b>-90</b>	1,74	1,89	0,079	2,67	6,4	13
<b>-80</b>	1,52	1,64	0,079	2,60	5,8	12
<b>-70</b>	1,31	1,40	0,079	2,54	5,3	11

<b>-60</b>	1,11	1,17	0,079	2,48	4,8	9,7
<b>-50</b>	0,92	0,95	0,079	2,41	4,4	8,7
<b>-40</b>	0,72	0,74	0,079	2,35	3,9	7,8
<b>-30</b>	0,54	0,54	0,079	2,29	3,4	6,9
<b>-20</b>	0,35	0,35	0,079	2,24	3,0	6,0
<b>-10</b>	0,17	0,17	0,079	2,18	2,6	5,2
<b>0</b>	0,00	0,00	0,079	2,13	2,2	4,4
<b>10</b>	0,17	0,16	0,079	2,07	2,5	5,0
<b>20</b>	0,33	0,32	0,079	2,02	2,8	5,5
<b>30</b>	0,50	0,46	0,079	1,97	3,0	6,0
<b>40</b>	0,65	0,60	0,079	1,92	3,3	6,5
<b>50</b>	0,81	0,74	0,079	1,87	3,5	7,0
<b>60</b>	0,96	0,86	0,079	1,83	3,7	7,5
<b>70</b>	1,10	0,98	0,079	1,78	3,9	7,9
<b>80</b>	1,24	1,09	0,079	1,74	4,2	8,3
<b>90</b>	1,38	1,20	0,079	1,69	4,4	8,7
<b>100</b>	1,52	1,30	0,079	1,65	4,5	9,1
<b>110</b>	1,65	1,39	0,079	1,61	4,7	9,5
<b>120</b>	1,78	1,48	0,079	1,57	4,9	9,8
<b>130</b>	1,90	1,56	0,079	1,53	5,1	10
<b>140</b>	2,03	1,64	0,079	1,49	5,2	10
<b>150</b>	2,14	1,72	0,079	1,46	5,4	11
<b>160</b>	2,26	1,79	0,079	1,42	5,5	11
<b>170</b>	2,37	1,85	0,079	1,38	5,7	11
<b>180</b>	2,48	1,91	0,079	1,35	5,8	12
<b>190</b>	2,59	1,97	0,079	1,32	6,0	12
<b>200</b>	2,70	2,02	0,079	1,28	6,1	12

---