UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

VINÍCIUS CARDOSO BOFF

SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO SEM CONTATO DAS DIMENSÕES DE CAPACITORES

CAXIAS DO SUL

2020

VINÍCIUS CARDOSO BOFF

SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO SEM CONTATO DAS DIMENSÕES DE CAPACITORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação na Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. André Gustavo Adami

CAXIAS DO SUL

2020

VINÍCIUS CARDOSO BOFF

SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO SEM CONTATO DAS DIMENSÕES DE CAPACITORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação na Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 03/12/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Gustavo Adami Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa Universidade de Caxias do Sul - UCS

Me. Wenderson Nicanor de Oliveira Universidade de Caxias do Sul - UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família pelo apoio dado durante a graduação.

Agradeço ao professor Dr. André Gustavo Adami pelas ideias, correções e apoio para o desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas e professores do curso pelo companheirismo e troca de conhecimento.

RESUMO

O processamento de imagens e a visão computacional vêm sendo amplamente utilizados em aplicações inovadoras na área de medicina, robótica, agricultura, aeronáutica e automação de processos. Na automação industrial tem grande utilização na inspeção dos componentes produzidos. A utilização de equipamentos automáticos para a soldagem de placas eletrônicas gera a necessidade de padronização dimensional dos componentes eletrônicos, no caso abordado neste trabalho, capacitores eletrolíticos. Dentre as ferramentas utilizadas para realizar este controle têm-se os sistemas de visão computacional. O presente trabalho visa propor um sistema de visão computacional para um equipamento automático de soldagem de capacitores. Este sistema será o responsável por verificar se todas as dimensões dos capacitores estão dentro dos parâmetros especificados. No desenvolvimento do trabalho serão abordados os hardwares utilizados e estudos acerca das técnicas e ferramentas de processamento de imagens mais adequadas. O sistema foi avaliado com base nos resultados obtidos na análise de 500 imagens de capacitores. O processo de avaliação do desempenho ocorreu em duas etapas: primeiramente foram verificadas as medidas de 100 capacitores com o auxílio de instrumentos de medição. A raiz do erro quadrático médio foi de 0,11 mm no sistema industrial e 0,13 mm no sistema proposto, estando ambos dentro das especificações requeridas no projeto. A segunda etapa consistiu em analisar as 500 imagens e classificá-las em aprovadas ou reprovadas de acordo com os limites das dimensões que estavam sendo inspecionadas. O sistema proposto obteve uma taxa de acerto de 100% comparado com a classificação realizada pelo sistema de visão computacional industrial.

Palavras-chaves: Visão Computacional, Capacitor, Medição sem Contato, Imagem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Gabarito de Verificação	10
Figura 2 –	Capacitor	14
Figura 3 –	Relógio comparador	15
Figura 4 –	Sensor LVDT	16
Figura 5 –	Perfilômetro a LASER	16
Figura 6 –	Micrômetro óptico	17
Figura 7 –	Sistema de visão computacional utilizado na inspeção de aparelhos celulares	18
Figura 8 –	Máquina automatizada de soldagem de capacitores	22
Figura 9 –	Medidas a serem inspecionadas	23
Figura 10 –	Componentes do sistema de visão	24
Figura 11 –	Comparativo entre câmeras do fabricante Omron	25
Figura 12 –	Módulo de iluminação	25
Figura 13 –	Tela do sistema	27
Figura 14 –	Ferramenta de detecção de borda	28
Figura 15 –	Configuração da macro de cálculo	28
Figura 16 –	Fluxograma do sistema proposto	29
Figura 17 –	Exemplo de imagem do capacitor capturada pelo sistema de aquisição de	
	imagem da Omron	30
Figura 18 –	Região de interesse selecionada a partir da imagem original	30
Figura 19 –	Parâmetros da reta no plano xy	33
Figura 20 –	Picos de votação da Transformada de Hough	33
Figura 21 –	Linhas detectadas	34
Figura 22 –	Cálculo das cotas a partir dos parâmetros das linhas, onde $L_{referencia}$ é a linha	
	do corpo do capacitor, $L_{negativo}$ é a linha do terminal negativo e $L_{positivo}$ é a	
	linha do terminal positivo	35
Figura 23 –	Capacitor sem terminal negativo (a), capacitor com terminal negativo torto	
	(b) e capacitor mal posicionado (c)	38
Figura 24 –	Capacitor mal posicionado aprovado	38

LISTA DE TABELAS

	23
medidas	
	37
	38
tizada	39
3	 medidas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD: Analógico digital
CLP: Controlador lógico programável
CMOS: Complementary metal-oxide-semicondutor
GMAW: Gas metal arc welding
LASER: Light amplification by stimulated emission of radiation
LED: Light emitting diode
LVDT: Linear variable differential transformer
PWM: Pulse width modulation
SCARA: Selective compliance assembly robot arm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo	11
1.2	Limites do Trabalho	11
1.3	Estrutura do Trabalho	12
2	METROLOGIA EM PROCESSOS DE MANUFATURA	13
2.1	Capacitores	13
2.2	Inspeção manual de capacitores	14
2.2.1	Transformador diferencial linear variável	14
2.2.2	Perfilômetro a LASER	16
2.2.3	Micrômetro óptico	17
2.3	Inspeção automatizada via visão computacional	17
2.3.1	Câmera	18
2.3.2	Sistemas de visão computacional para inspeção dimensional	19
3	ARQUITETURA DO SISTEMA EXISTENTE	21
3.1	Máquina automatizada de soldagem de capacitores	21
3.2	Sistema de visão para medição de capacitores	23
3.2.1	Sistema mecânico de posicionamento	23
3.2.2	Câmera e sistema de iluminação	24
3.2.3	Controlador do sistema de visão e software	26
4	SISTEMA PROPOSTO PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE CAPA-	
	CITORES	29
4.1	Arquitetura do Sistema	29
4.1.1	Captura da imagem	30
4.1.2	Detecção das linhas de referência	31
4.1.3	Cálculo das medidas e classificação das imagens	34
4.2	Avaliação do Desempenho	36
4.3	Resultado da Estimação Automática de Medições	36
4.4	Resultado da Classificação dos Capacitores	37
4.5	Custo atualizado do sistema completo	39
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Nos processos de manufatura, produtos podem apresentar diversos problemas de qualidade (por exemplo, medidas fora da especificação). A inspeção de qualidade de peças produzidas por meio de processos automatizados é muito importante para a padronização dimensional e para atender aos requisitos de qualidade dos produtos, tornando-os competitivos e economicamente viáveis.

A garantia da qualidade dos processos de produção depende diretamente da qualidade dos sistemas de medição empregados. Mesmo em um ambiente industrial, onde diversos fatores de influência podem provocar incertezas nas medições, os sistemas de medição precisam fornecer dados confiáveis ao longo do tempo (FABRE, 2019). Segundo Faruolo & Fernandes (2005), a metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em qualquer campo da ciência ou tecnologia. A metrologia pode ser vista como o desafio para garantir a qualidade das peças. Cada vez mais, é necessário rigor para controlar 100% da produção e com a flexibilidade necessária para adaptar o sistema às diferentes formas dos componentes de produção (ALONSO *et al.*, 2019).

Dentre os diversos fatores que podem afetar o processo de inspeção da qualidade de peças, os operadores humanos estão sujeitos a fadiga visual devido à execução do processo por longas horas (GARRETT; MELLOY; GRAMOPADHYE, 2001). Affonso (2018) afirma que a avaliação da qualidade por operadores humanos adiciona um fator subjetivo ao processo e, devido a problemas como distração, estresse e fadiga, pode-se selecionar produtos cuja qualidade está abaixo do nível desejado.

Os operadores humanos têm a vantagem de apresentar uma boa adaptação e decisão, são também criativos e flexíveis, podendo detectar e solucionar problemas nos procedimentos de inspeção (JIANG; GRAMOPADHYE; KHASAWNEH, 2003). No trabalho de Vailati (2016) são citadas as desvantagens do operador humano:

- fadiga, causada por desconforto ou cansaço;
- a falta de atenção ou desinteresse, causados por problemas pessoais ou distrações;
- baixa velocidade de inspeção;
- sujeito a influências do ambiente fabril, como ruídos sonoros, vibrações e acidentes.

Outro fator que atrapalha o processo de inspeção é a manipulação de peças com pequenas dimensões. No caso de peças como capacitores, foco do estudo deste trabalho, a inspeção dimensional realizada por humanos se torna lenta e onerosa (sendo que a própria manipulação

dos capacitores pode causar danos, inutilizando-o para o uso). Além disso, a tomada da medida também está sujeita a erros devido a imperícia do operador (FELICIANO; SOUZA; LETA, 2005). Wahab, Khalid & Nawaz (2014) afirmam que métodos convencionais de inspeção metrológica não se adéquam em precisão com a escala de tamanho desses produtos.

Visão computacional tem sido empregada de forma crescente na indústria para auxiliar no processo de inspeção da qualidade de peças produzidas (GONZALEZ; WOOODS, 2010). Gadelmawla & Elewa (2001) afirmam que o desenvolvimento da tecnologia de visão de máquina desencadeou uma série de novas aplicações para esta tecnologia na manufatura. As principais aplicações de visão computacional incluem inspeção e medição, análise de localização, reconhecimento de peças, análise de superfície e orientação de robô (VIANNA, 2009). Entre as vantagens da utilização dessa ferramenta pode-se citar a maior velocidade, maior repetibilidade da operação e a possibilidade de que tarefas perigosas, insalubres ou repetitivas não sejam executadas por um humano.

O sistema de medição automatizado utilizando visão computacional visa tornar mais ágil a realização dessa tarefa, impedir a manipulação das peças a fim de evitar que danos sejam gerados em seus terminais, além de fazer com que essa tarefa exaustiva deixe de ser realizada por um humano. No processo de soldagem de capacitores, o processo de inspeção tem sido realizado de forma manual. O processo de soldagem de capacitores eletrolíticos exige que suas dimensões e paralelismo de seus terminais sejam controladas para permitir seu uso nas placas eletrônicas a que se destinam e garantem o seu correto funcionamento. A inspeção de capacitores é dificultada pela pequena dimensão que eles apresentam e o seu grande volume de produção. Terminais tortos podem ser mal inseridos nas placas eletrônicas e terminais curtos podem inviabilizar seu uso. É possível ainda verificar as condições de algumas ferramentas utilizadas no processo de fabricação, como por exemplo se as estações da máquina automatizada estão cortando e alinhando corretamente seus terminais. Desta forma, é imprescindível a verificação de todos os capacitores produzidos. A Figura 1 ilustra um gabarito utilizado na empresa para realizar a verificação manual de um capacitor.





Fonte: Autor, (2020)

Assim, sistemas de visão computacional podem ser aplicados na melhoria da capacidade produtiva e na maior qualidade dos terminais, garantindo suas dimensões e alinhamento. Por exemplo, na empresa AumaqRS o sistema de visão computacional é utilizado em uma máquina de soldagem automatizada de capacitores. A visão computacional é utilizada no sistema de alimentação dos capacitores e dos terminais negativos onde um robô do tipo SCARA (do inglês *Selective Compliance Assembly Robot Arm* ou Braço Robótico para Montagem de Conformidade Seletiva) busca as peças em uma bandeja vibratória seguindo as coordenadas que foram definidas por uma câmera localizada no topo da bandeja vibratória. Em outra estação as dimensões dos terminais dos capacitores e o seu alinhamento são verificados por meio de um sistema de visão que está integrado ao sistema de controle da máquina, fazendo com que peças que não estejam dentro das especificações sejam descartadas.

Na empresa em que o trabalho foi desenvolvido, o equipamento em questão tem uma produtividade média de 20 peças por minuto, o que acaba tornando inviável a inspeção dimensional caso ela venha a ser feita sem o uso da visão computacional.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de visão computacional que realize automaticamente a detecção, medição e avaliação dos terminais de capacitores a partir de imagens produzidas por uma câmera instalada em uma máquina automática de soldagem de capacitores.

Para alcançar o objetivo proposto será necessário:

- produzir uma base de imagens para avaliação do sistema proposto;
- desenvolver um algoritmo para detectar os terminais do capacitor e produzir as medidas dimensionais necessárias para a avaliação da qualidade de fabricação do componente;
- realizar um comparativo entre os resultados do equipamento existente com os resultados da solução proposta neste.

1.2 LIMITES DO TRABALHO

Não serão abordados neste trabalho a construção dos dispositivos responsáveis pelo posicionamento mecânico dos capacitores na máquina de soldagem automatizada. A solução proposta não substituirá o sistema de visão industrial que coletou os dados nem será integrada com a máquina automatizada.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será desenvolvido em cinco capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os principais métodos utilizados na obtenção das medidas dos terminais dos capacitores e como essas medidas são realizados na empresa em que o trabalho foi desenvolvido. O Capítulo 3 apresenta uma abordagem mais detalhada do problema, apresentando características do processo, do equipamento e especificando as cotas necessárias. O Capítulo 4 apresenta o sistema proposto, e os resultados da implementação. Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais e perspectivas para trabalhos futuros.

2 METROLOGIA EM PROCESSOS DE MANUFATURA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os métodos e sensores utilizados para metrologia de produtos manufaturados. Na Seção 2.1, são apresentadas características dos capacitores, componentes que devem ser inspecionados. A Seção 2.2 descreve o processo de metrologia manual e exemplos de sensores que podem ser utilizados no auxílio desta operação. A Seção 2.3 descreve o processo de metrologia automática que utiliza visão computacional, com a descrição de alguns trabalhos realizados na inspeção automatizada de produtos.

2.1 CAPACITORES

Capacitores são dispositivos que armazenam energia elétrica através do campo elétrico criado entre dois condutores. A energia elétrica pode ser armazenada devido a presença de cargas elétricas de sinais opostos em cada condutor. Dentre os diversos tipos de capacitores tem-se o eletrolítico (CERNIAK, 2012).

Os capacitores eletrolíticos se diferenciam dos demais por causa da espessura do seu dielétrico, que tende a ser menor que os demais. Geralmente, capacitores eletrolíticos oferecem alguns dos valores de capacitância mais altos, apesar de seus níveis de tensão de trabalho serem limitados. Valores típicos de capacitância variam de 0,1 uF a 15.000 uF, com tensões de trabalho de 5 a 450 V (BOYLESTAD, 2004). Outra característica dos capacitores eletrolíticos é que eles possuem terminais unilaterais, chamada montagem radial ou com os terminais ao longo do seu eixo chamados axiais (MEHL, 2000). O capacitor eletrolítico tem algumas vantagens como por exemplo a sua capacidade de prover alta capacitância em um pequeno volume, o que se torna muito importante quando a aplicação exigir pouco espaço. Os capacitores são empregados em equipamentos industriais, de telecomunicações e automóveis, temporizadores, filtragem, acoplamento, fontes de alimentação entre outras (CERNIAK, 2012).

A construção básica do capacitor eletrolítico usa o processo de enrolamento (Figura 2) no qual um rolo de folha de alumínio (placa positiva) é revestido de um lado com óxido de alumínio (dielétrico). Uma camada de papel ou de gaze saturada com um eletrólito (solução ou pasta que forma o meio condutor entre os eletrodos do capacitor) é colocada sobre o revestimento de óxido de alumínio da placa positiva. Outra camada de alumínio sem o revestimento de óxido é então colocada sobre essa camada para assumir o papel da placa negativa. Na maioria dos casos, a placa negativa está conectada diretamente ao recipiente de alumínio, o qual então serve como terminal negativo para as conexões externas (BOYLESTAD, 2004).

Para que o capacitor atenda os requisitos de qualidade necessários para sua utilização as seguintes condições devem ser satisfeitas:



Figura 2 – Capacitor

Fonte: Boylestad, (2004)

- 1. comprimento dos terminais dentro das especificações do fabricante;
- 2. alinhamento dos terminais (terminais tortos);
- 3. distância entre os terminais (ângulo).

A inspeção de capacitores além de garantir a qualidade dos componentes facilita o diagnóstico de falhas no equipamento responsável pelo processo de soldagem automatizada. A inspeção pode ser realizada de forma manual ou automática.

2.2 INSPEÇÃO MANUAL DE CAPACITORES

Na empresa em que o trabalho foi desenvolvido a inspeção dimensional no processo final de fabricação dos capacitores faz uso de duas principais ferramentas: o paquímetro digital e o relógio comparador. O paquímetro digital verifica as dimensões das distâncias entre os terminais e o relógio comparador afere os comprimentos dos terminais. Essas medidas só podem ser verificadas após a retirada dos capacitores do equipamento. A Figura 3 ilustra o processo de medida de um terminal utilizando um relógio comparador.

Outros sensores podem ser utilizados para auxiliar o operador humano na tomada das medidas dos capacitores, tais como, o transformador diferencial linear variável, o perfilômetro a LASER e o micrômetro óptico. Nas próximas seções serão exploradas as suas principais características.

2.2.1 Transformador diferencial linear variável

Utilizado para medir o comprimentos dos terminais, o LVDT (do inglês *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Variável Linear) realiza medições lineares

Figura 3 - Relógio comparador



Fonte: Autor, (2020)

de deslocamento com contato. O LVDT é um tipo de transformador elétrico que possui três bobinas colocadas ponta a ponta em torno de um tubo de material isolante (Figura 4). A bobina central é a primária e as duas bobinas externas são secundárias. Um núcleo ferromagnético cilíndrico é ligado ao objeto cuja posição pretende ser medida e essa desliza ao longo do eixo do tubo. Uma fonte de tensão alternada é aplicada à bobina primária, gerando uma corrente a ser induzida em cada bobina secundária que é proporcional à sua indutância mútua com a bobina primária. A frequência de operação geralmente está na faixa entre 1 e 10 kHz (COOMBS Jr., 1995).

O comprimento dos terminais é medido posicionando a haste do sensor no início do terminal do capacitor e deslocando-a até o final do terminal. A variação do sinal elétrico é adquirida por um conversor AD (analógico digital) e após isso processada por um microcontrolador que converte o sinal digital em um valor correspondente em milímetros. Graças as suas boas características em termos de linearidade, resolução, repetibilidade e confiabilidade teve uso amplamente difundido em aplicações industriais.

As desvantagens da aplicação do LVDT para realizar a inspeção dimensional dos terminais dos capacitores são:

- 1. dificuldade de implementação mecânica devido às dimensões dos componentes (as medidas a serem verificadas estão entre 5 e 10 milímetros);
- 2. pode sofrer a influência de outros equipamentos geradores de campo magnético, interferindo na tomada correta de medida.

¹ https://akron.be/product/lvdt-displacement-transducer/?lang=en

Figura 4 - Sensor LVDT



Fonte: Akron¹

2.2.2 Perfilômetro a LASER

Os perfilômetros a LASER (Figura 5) são utilizados nos mais variados processos de fabricação tais como medição de espessura de chapas metálicas, inspeção dimensional em componentes eletrônicos e controle dimensional de lingotes de aço (SILVA, 2011). Seu funcionamento consiste em um plano com raio LASER (do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation* ou amplificação de luz por emissão estimulada de radiação) que é projetado em uma superfície e uma câmera digital para captar a intersecção entre a superfície de contato e o raio LASER . As coordenadas dos pontos da superfície são determinadas por triangulação. De acordo com Marinho & Silva (2009), os sistemas que utilizam LASER em equipamentos de medição são cada vez mais empregados na indústria.





Fonte: Keyence²

A utilização do perfilômetro a LASER para medição das dimensões dos terminais dos capacitores requer a manipulação das peças por um operador humano e não é viável para

² https://www.keyence.com.mx/products/measure/laser-1d/lk-g5000/features/feature-02.jsp

verificar todas as dimensões necessárias na inspeção. Eles podem ser empregados na verificação da espessura dos terminais dos capacitores.

2.2.3 Micrômetro óptico

O micrômetro óptico (Figura 6) utiliza a técnica de medição por escaneamento de luz. A medição é realizada com a varredura de um feixe estreito de LASER. Neste caso a varredura é realizada com o desvio do feixe por um prisma de 5 lados girando a uma rotação contínua, uma lente de colimação especial produz raios paralelos que varre o espaço de trabalho a uma taxa linear proporcional à velocidade de rotação do prisma (DOEBELIN; MANIK, 2007).

O fabricante Keyence fabrica os micrômetros ópticos da série LS-7000 que apresentam um sistema óptico com LED (do inglês *Light Emitting Diode* ou diodo emissor de luz) verde e lente telecêntrica. Ajudando a obter velocidade e precisão duplas quando comparado a micrômetros convencionais.



Figura 6 – Micrômetro óptico

O micrômetro óptico pode ser utilizado para medir o alinhamento e diâmetro dos terminais dos capacitores. Entretanto, a verificação da medida do comprimento dos terminais teria que ser realizada utilizando outro instrumento.

2.3 INSPEÇÃO AUTOMATIZADA VIA VISÃO COMPUTACIONAL

Na inspeção visual automatizada, a visão de máquina é utilizada para detectar possíveis falhas nos produtos ou nos processos de um sistema de produção (FABRE, 2019). Segundo Batchelor (2012), a visão de máquina trata do projeto de engenharia de sistemas ópticos, mecânicos, eletrônicos e de *software* de modo integrado para análise de objetos e processos de manufatura, de modo a detectar defeitos e melhorar a qualidade e a segurança dos produtos e processos.

Fonte: Keyence³

³ https://www.keyence.com.sg/products/measure/micrometer/tm-3000/features/feature-03.jsp

Com a vantagem de não realizar a manipulação de peças e permitir a inspeção em peças de tamanhos diferentes, a visão computacional tende a produzir um resultado consistente em comparação ao operador humano (Figura 7).



Figura 7 – Sistema de visão computacional utilizado na inspeção de aparelhos celulares

Fonte: Cognex⁴

2.3.1 Câmera

A aquisição de imagens tem como função converter uma imagem em uma representação numérica adequada para o processamento digital subsequente. Este processo compreende dois elementos principais. O primeiro é um dispositivo físico sensível a uma faixa de energia no espectro eletromagnético (como raio X, ultravioleta, espectro visível ou raios infravermelhos), que produz na saída um sinal elétrico proporcional ao nível de energia detectado. O segundo é o digitalizador propriamente dito que converte o sinal elétrico analógico em informação digital (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

O sensor utilizado por sistemas de visão computacional para adquirir as imagens é a câmera. O tipo de câmera de projeção de perspectiva mais citado na literatura é a *pinhole*, também conhecida por estenopeica, no qual a dimensão do pixel na matriz de imagem do sensor pode ser desconsiderada ou, em alguns casos, considerada unitária tanto na vertical quanto na horizontal (FABRE, 2019).

Os dois principais modelos de lente são: lentes com distância focal menor que o normal, chamadas lentes grande angulares, e as com distância maior, denominadas lentes teleobjetivas (OLIVEIRA, 2015). As lentes convencionais (grande angulares) têm campos de visão angulares de modo que, à medida que a distância entre a lente e o objeto aumenta, a ampliação diminui

⁴ https://www.cognex.com/pt-br/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-8000series/applications

(OPTICS, 2020). Outros tipos de câmeras utilizam as lentes telecêntricas, onde uma pequena abertura está localizada em um ponto focal da lente fazendo com que apenas os raios de luz que são aproximadamente paralelos ao eixo óptico da lente sejam captados. Como a imagem é formada pela projeção paralela do objeto sobre o plano da imagem, a ampliação da imagem não depende da distância do objeto (LI; TIAN, 2013).

2.3.2 Sistemas de visão computacional para inspeção dimensional

Fabre (2019) desenvolveu um sistema de visão computacional para inspeção de defeitos geométricos automatizada de peças na indústria cerâmica. O método realiza a triangulação ativa por projeção de plano de luz. Utiliza um emissor de linha LASER em conjunto com uma câmera em ângulo. Essa configuração possibilita a caracterização da forma tridimensional dos objetos. O sistema proposto foi avaliado de duas formas. Primeiro, os autores avaliaram a confiabilidade do sistema realizando as medições (largura, espessura e comprimento) dentro das condições de fabricação. Foram realizadas 10 medidas de uma placa de cerâmica aferida em laboratório e seus resultados foram avaliados para uma produção de 10, 20 e 35 peças por minuto. A segunda avaliação do sistema de medição desenvolvido analisou seu desempenho na tarefa de classificação das placas cerâmicas. A forma de avaliação adotada se baseia em comparar os resultados de classificação de peças efetuados pelo equipamento aos resultados de classificação efetuados por um especialista humano. Para tanto foram selecionadas 10 peças classificadas pelo especialista como de classe A, ou seja, que não apresentam defeitos geométricos dimensionais, e 10 peças classificadas pelo mesmo especialista como de classe C, onde há algum defeito como espessura, largura e ou comprimento. Foram analisadas 20 peças por meio da elaboração da matriz de confusão e o sistema apresentou uma acurácia de 100%.

Zatočilová, Paloušek & Brandejs (2016) apresentaram um sistema de medição composto por duas câmeras de lente única de alta resolução e um *software*, que é projetado para a medição rápida de formas e dimensões de peças forjadas. O *software* calcula o comprimento, diâmetro e retidão do eixo, com base em um modelo 3D construído a partir de quatro linhas limites do forjamento capturadas em duas imagens. Medições experimentais executadas em 7 amostras mostraram um erro de até 2% para a medição do comprimento e 1% para a medição do diâmetro. Os autores concluíram que abordagem de medição proposta mostra um grande potencial para uso prático em plantas de forjamento.

Marcotuli *et al.* (2020) descrevem um sistema baseado em visão para medir as dimensões de um cilindro semiacabado produzido por meio do processo de forjamento. Para avaliar o desempenho do sistema, foram executados testes em ambiente laboratorial utilizando um cilindro padronizado em temperatura ambiente, com um diâmetro de aproximadamente 70 mm que gira em torno de um eixo horizontal. Uma única câmera captura a imagem do cilindro giratório e detecta simultaneamente o diâmetro e o ângulo de rotação. As imagens foram adquiridas com diferentes resoluções, bem como em diferentes distâncias do cilindro. Os testes mostraram que a

uma distância de 0,7 m o erro sistemático de medição na estimativa de diâmetro é de 0,22 mm enquanto a incerteza do ângulo de rotação foi próxima a 5 °.

Martins & Pizolato Jr. (2011) propõem a aplicação de um sistema de visão computacional para a medição e análise da secção transversal de chapas metálicas unidas sob a ação do processo de soldagem industrial. O sistema de inspeção proposto quantifica o material depositado em filetes de solda de junções tipo T obtidos em processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). O algoritmo utilizado no sistema de inspeção automática apresenta as seguintes características: analisa quantitativamente a solda independentemente do formato da secção, realiza medições sem a necessidade de instrumentos convencionais mecânicos e profissional com qualificação operacional avançada. O sistema proposto foi submetido a testes experimentais que foram realizados num lote de corpos de prova (25 unidades) de um centro de soldagem industrial. Uma comparação entre os desempenhos dos sistemas proposto e tradicional de inspeção de soldagem foi realizada. Cada secção do corpo de prova foi analisada por um grupo de profissionais de inspeção obtendo-se a média de valores dos parâmetros quantitativos. A automatização proposta apresentou exatidão em torno de 94% comparado ao índice de 62% das medições realizadas por operadores de soldagem.

3 ARQUITETURA DO SISTEMA EXISTENTE

Este capítulo apresenta a máquina automatizada de soldagem de capacitores e o sistema de visão presente na máquina utilizado para classificar os capacitores. Na Seção 3.1, a máquina automatizada de soldagem de capacitores é descrita. Na Seção 3.2, o sistema de visão utilizado para medição e classificação dos capacitores é descrito. Este sistema é o estado da arte no que tange a inspeção sem contato por meio de visão computacional.

3.1 MÁQUINA AUTOMATIZADA DE SOLDAGEM DE CAPACITORES

A máquina automatizada de soldagem de capacitores (Figura 8) tem por objetivo realizar as últimas tarefas do processo de fabricação do capacitor:

- cortar o terminal positivo;
- soldar o terminal negativo;
- retirar as impurezas provenientes dos processos anteriores de corte;
- inspecionar as características elétricas e dimensionais;
- acomodar os capacitores em bandejas.

O processo de soldagem dos capacitores pode ser dividido em diversas etapas. Os capacitores chegam até a máquina automatizada acomodados dentro de cestos plásticos flexíveis. O operador retira o cesto com os capacitores e insere-os em uma bandeja vibratória onde um robô orientado por um sistema de visão irá posicionar os capacitores nas posições de entrada do equipamento (Figura 8-A). O mesmo processo é feito com os terminais negativos e, novamente, um robô orientado por visão será o responsável por posicionar os terminais na posição correta da máquina (Figura 8-B). Após ser posicionado pelo robô, o capacitor entra em uma esteira acionada por um servomotor que transporta-o entre estações que alinham e cortam seus terminais (Figura 8-C). Após essas estações, ele é transportado por um conjunto *Pick and Place* até uma mesa indexadora de 4 posições onde na estação anterior foi posicionado o terminal negativo pelo robô (Figura 8-B). Sobre esse terminal negativo é inserido o capacitor que na terceira posição da mesa indexadora é soldado pela máquina de solda (Figura 8-D).

Depois de ter o terminal negativo soldado na carcaça o capacitor é retirado por outro sistema *Pick and Place* onde os capacitores passam pelo processo de limpeza por meio de uma escova giratória e com sopros de ar direcionados (Figura 8-E). Nessa etapa também são realizados o teste de curto-circuito dos capacitores e um pré-posicionamento do capacitor para a etapa posterior.

O capacitor é inspecionado por meio de um sistema de visão industrial (Figura 8-F). As dimensões de seus terminais são inspecionadas a fim de verificar se todas estão dentro dos parâmetros especificados (os quais estão armazenados no banco de dados da empresa). Posteriormente as medidas obtidas pelo sistema de visão são enviadas para o CLP (Controlador lógico programável) que controla toda a automação da máquina e são arquivadas para uma posterior análise. Nessa etapa o CLP memoriza o resultado final da inspeção da peça em questão e passa essas informações para as etapas posteriores. Logo após a inspeção dimensional utilizando o sistema de visão, um robô equipado com um sistema de vácuo retira o capacitor da posição e posiciona-o em uma bandeja plástica com divisões entre os capacitores (Figura 8-G). Caso o capacitor tenha sido reprovado no teste de curto-circuito ou na inspeção feita pelo sistema de visão computacional ele é descartado nas caixas (Figura 8-H).



Figura 8 – Máquina automatizada de soldagem de capacitores

Fonte: Autor, (2020)

As medidas que devem ser realizadas nos capacitores eletrolíticos (Figura 9) são:

- Ângulo terminal negativo (Figura 9 Cota 1) em relação a corpo do capacitor;
- Ângulo terminal positivo (Figura 9 Cota 2) em relação a corpo do capacitor;
- Comprimento terminal negativo (Figura 9 Cota 3);
- Comprimento terminal positivo (Figura 9 Cota 4);
- Distância entre terminais (Figura 9 Cota 5).

A Tabela 1 apresenta as medidas e os respectivos limites tolerados para a utilização do capacitor na soldagem.





Fonte: Autor, (2020)

Cota	Descrição	Valor mínimo	Valor máximo
Cota 1	Ângulo terminal negativo	88,00°	91,00°
Cota 2	Ângulo terminal positivo	88,00°	91,00°
Cota 3	Comprimento terminal negativo	4,30 mm	5,30 mm
Cota 4	Comprimento terminal positivo	9,80 mm	10,20 mm
Cota 5	Distância entre terminais	6,47 mm	7,17 mm

Tabela 1 – Limites das medidas a serem inspecionadas.

3.2 SISTEMA DE VISÃO PARA MEDIÇÃO DE CAPACITORES

Nesta seção serão apresentados os componentes que fazem parte do sistema de visão utilizado na máquina automatizada de soldagem de capacitores.

3.2.1 Sistema mecânico de posicionamento

A estação de monitoramento das medidas dos terminais dos capacitores (Figura 10) conta com os seguintes componentes mecânicos que são responsáveis por realizar o correto posicionamento do capacitor:

 Ventosa pneumática (Figura 10-A): responsável por transportar o capacitor da estação anterior para a estação do sistema de visão;

- Cilindro pneumático (Figura 10-B): tem por função apoiar o capacitor assim que a ventosa pneumática soltar o capacitor;
- Garra pneumática (Figura 10-C): responsável por prender o capacitor logo após ele ser apoiado pelo cilindro pneumático;
- Servomotor (Figura 10-D): dispositivo unido à garra pneumática por meio de uma correia. É o responsável por girar o capacitor até a posição programada para permitir que a foto analisada pelo sistema de visão seja capturada na posição correta.



Figura 10 - Componentes do sistema de visão

Fonte: Autor, (2020)

3.2.2 Câmera e sistema de iluminação

A câmera utilizada para a aquisição das imagens é a FH-SC05R com sensor Digital CMOS (do inglês *Complementary Metal Oxide Semiconductor* ou Metal Óxido Semicondutor Complementar), colorida, com resolução de 5 MP e tempo de aquisição de imagem de 71,7 ms. Foi acoplada à câmera uma lente do tipo telecêntrica que tem por função não alterar a relação pixel por milímetro quando a distância entre a peça e a lente são alteradas.

Essa câmera foi escolhida por apresentar uma boa relação entre tempo de aquisição da imagem e resolução. A Figura 11 apresenta um quadro comparativo entre algumas câmeras disponibilizadas pelo fabricante Omron. É possível notar que quanto maior a resolução da câmera maior também será o tempo de aquisição da imagem.

Um módulo de iluminação traseira ou *backlight* (Figura 12) é utilizado para salientar o perfil da peça a ser inspecionada. Trata-se de um módulo de LEDs acondicionados em uma

Aparência	Descrição	Tempo de Aquisição	Modelo
	5 megapixels	71.7 ms	FH-SC05R
			FH-SM05R
	5 megapixels	38.2 ms	FZ-SC5M3
			FZ-S5M3
	2 megapixels	33.3 ms	FZ-SC2M
			FZ-S2M
	0.3 megapixels	12.5 ms	FZ-SC
			FZ-S
	0.3 megapixels	4.9 ms	FZ-SHC
			FZ-SH

Figura 11 - Comparativo entre câmeras do fabricante Omron

Fonte: Adaptado de Omron (2020)

caixa de alumínio com uma placa dissipadora de calor. O acionamento é feito pelo controlador do sistema de visão, fazendo com que a iluminação seja ligada somente nos momentos em que a imagem é capturada. O módulo de iluminação é alimentado por uma tensão contínua de 24V, apresenta um consumo de energia de 29,4W e pode ter a sua intensidade de iluminação controlada por meio do controle PWM (do inglês *Pulse Width Modulation* ou Modulação por largura de pulso) da tensão. Dentre as aplicações recomendadas pelo fabricante para a utilização deste módulo estão a realização de medidas de peças, detecção de formas de componentes eletrônicos e detecção de impurezas em garrafas de água.





Fonte: Adaptado de Omron, (2020)

3.2.3 Controlador do sistema de visão e software

O controlador do sistema de visão é o responsável por processar as imagens adquiridas pela câmera e executar as funções programadas pelo projetista do sistema. Ele é também responsável por salvar as imagens e realizar a troca de informações com outros dispositivos. O modelo utilizado foi o FH-1050 da fabricante Omron, o qual possui um processador com dois núcleos de processamento e capacidade de realizar tarefas paralelamente. Ele conta também com duas portas de conexão para monitores a fim de realizar a programação e visualização dos processos e três portas de comunicação onde são disponibilizados os protocolos Ethernet IP (uma porta) e EtherCAT (duas portas) para a integração com com CLPs ou sistemas de controle baseados em PC. Podem ser conectadas até duas câmeras simultaneamente além de um *encoder* para aplicações que envolvam sincronismo com dispositivos como esteiras ou robôs.

O *software* com os quais controladores de visão da linha FH estão equipados faz com que a sua configuração e utilização seja fácil e prática. É possível personalizar a interface operacional a fim de corresponder às necessidades do utilizador, por exemplo, eliminando botões e outros elementos que não sejam necessários. O *software* também permite interfaces com arranjo diferente entre o projetista e o utilizador final. Além disso, a configuração, inclusive para tarefas complexas, é simplificada mediante a disponibilização de bibliotecas integradas sobre funções como a filtragem das imagens e a execução de inspeções.

O *software* trabalha respeitando um fluxo de processamento onde cada ferramenta é executada em sequência. A Figura 13 apresenta a tela que o usuário tem acesso durante a execução das inspeções nos capacitores. Nela, o operador pode visualizar em tempo real as medidas obtidas e os resultados das inspeções.

A seguir são apresentadas as ferramentas utilizadas no sistema de visão computacional existente da máquina automatizada de soldagem de capacitores:

- Entrada da Imagem (Figura 13-A): essa ferramenta do *software* seleciona a fonte da imagem que será analisada, no caso será utilizada uma imagem digitalizada pela câmera conectada ao controlador FH;
- Ferramenta de detecção de borda (Figura 13-B): essa ferramenta detecta uma borda na imagem e disponibiliza as suas coordenadas cartesianas;
- Macro de cálculo (Figura 13-C): aqui são realizados os cálculos baseados nas coordenadas cartesianas obtidas com o uso das ferramentas anteriores;
- Exibição dos resultados (Figura 13-D): com o uso deste recurso o projetista da aplicação seleciona e posiciona os campos de dados que serão exibidos ao usuário durante a execução do programa;

- Tempo de execução e resultado da inspeção (Figura 13-E): nessa área o usuário pode verificar o tempo que o processamento das ferramentas levou para ser executado e também o resultado da inspeção do capacitor analisado;
- Caixas de exibição (Figura 13-F): os dados obtidos por meio da macro de cálculo são exibidos.

FZ-PanDA							
File Function Tool Window							
0.SA6 4 SS11 Diam18 Sc2	Edit flow	Data save	Scene switch		Camera image	meas. Image file meas.	
	Lavout0 Switch layou				Select imag	e Re-meas.	
B Result Display	Layout0 Switch layou Angulo Terminal Angulo Terminal Comp. Terminal Distancia entre t	Negativo: Positivo: Negativo: Positivo: erminais:	88.106 88.907 4.846 9.982 6.671		Select imag USBDisk202 Auto Re-me The judgme 1st. NG unit 0.Camera Image Input F OK 2.Ang_Term_Neg OK 2.Ang_Term_Neg OK 3.Ang_Ter_Pos OK 4.Comp_Term_Pos OK 5.Comp_Term_Neg OK	e Re-meas. 0-09-22 10-26-12-6300.0fz as. nt result monitor. NG ↓ Next NG unit H	D
					6.Dist_Entre_Teminais OK 7.Unit Calculation Macro OK		•
			•		8.Result Display OK 9.Fieldbus Data Output OK)

Figura 13 – Tela do sistema

A ferramenta de detecção de borda é utilizada para encontrar os pontos de referência da imagem. A construção da ferramenta se dá da seguinte forma: um retângulo é feito abrangendo a área em que se deseja detectar uma borda, desta forma o *software* extrai as coordenadas cartesianas da borda encontrada por meio da análise dos pixels vizinhos. No exemplo apresentado na Figura 14, os dois procedimentos utilizados para o cálculo do comprimento do terminal positivo são apresentados. Na imagem é evidenciado o valor de pico da coordenada *X*, valor esse que será utilizado posteriormente. O valor do comprimento do terminal positivo é encontrado no resultado da subtração dos valores 10,2267 e 0,2449.

Com a ferramenta macro de cálculo (Figura 15) o projetista da aplicação utiliza as coordenadas cartesianas obtidas pelas ferramentas de detecção de bordas para calcular as medidas desejadas. No exemplo em questão é feita a subtração dos valores cartesianos de *X* de duas bordas para que seja obtido o comprimento do terminal positivo. Nesta ferramenta também são configurados os valores máximos e mínimos de cada cálculo, resultados estes que irão influenciar no resultado final da inspeção.

Fonte: Autor, (2020)



Figura 14 - Ferramenta de detecção de borda



Figura 15 – Configuração da macro de cálculo

_					_							
7.	Unit Calcula	ation Macro										
	No.	Judgement upper	Judgement lower	Comment								^
	DT0	95	85	Angulo Terminal Neg	gati	vo						
	DT1	95	85	Angulo terminal Posi	itivo	0						
	DT2	5.3	4.3	Comprimento Termir	nal	Negativo						
	DT3	10.2	9.8	Comprimento Termir	nal	Positivo						
	DT4	999999.9999	-999999.9999									
	DT5	999999.9999	-999999.9999									
L						1 march 1		Deferration		Label		
	7480	RESULTDATA#(3) =MED_X	CENTRAL@-REE_MED_X@			Input	runction	Reference v	alue	Label		
	7490				1							r
	7500					pe	Parameter	0	Param	ieter 1	Value	
	7510					it	2.Ang_Ter	m_Neg	Angle		0.330384	
	7520					it	5.Comp_T	erm_Neg	Peake	edge positio	5.091222	
	7530					it	3.Ang_Ter	_Pos	Angle		1.132013	
	7550					it	1.Ref_Terr	n_Neg	Peak	edge positio	0.244928	
	7560					IT III	1.Ref_Terr	n_Neg	Angle		-87.775214	
	7570					11 10	2.Ang_Ten	m_iveg	Peake	edge positio	1.2000/2	
	7580					it	6 Dist Ent		Botton	adge positio	0.583072	
1	7590					P ⁿ	0.DISI_EIII	re_reminals	Dollon	reuge posi	0.303372	

Fonte: Autor, (2020)

4 SISTEMA PROPOSTO PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE CAPA-CITORES

Este capítulo descreve a proposta de um sistema para medição sem contato e avaliação da qualidade de capacitores que utiliza visão computacional. Na Seção 4.1, a arquitetura do sistema proposto é apresentada. A Seção 4.2 descreve a base de dados coletada para avaliar o sistema de medição e classificação. As Seções 4.3 e 4.4 apresentam e discutem os resultados das medições e classificação dos capacitores realizados pelo sistema proposto. Todos os resultados são comparados com o sistema de referência utilizado atualmente. A Seção 4.5 mostra a redução do custo ao substituir o sistema atual pelo sistema proposto.

4.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

Como as medidas de interesse do capacitor são estimadas com base nos terminais, o sistema utiliza linhas de borda detectadas no corpo do capacitor e nos seus terminais como referência. A partir destas linhas detectadas, pode-se obter as informações necessárias à inspeção dos terminais dos capacitores.

O sistema de visão computacional para a medição sem contato das dimensões dos capacitores consiste de 4 etapas (Figura 16): captura da imagem, detecção das linhas de referência, cálculo das medidas das cotas e por fim a classificação da imagem de acordo com os parâmetros limites das cotas.





Fonte: Autor, (2020)

4.1.1 Captura da imagem

O sistema de captura de imagens atualmente instalado na máquina de soldagem automatizada é utilizado para coletar as imagens dos capacitores. A calibração da câmera foi realizada no sistema de visão industrial utilizando um padrão de calibração quadriculado onde a distância em milímetros entre cada ponto na imagem é conhecida. Desta forma pode-se estabelecer a relação pixel/mm. Realizado este procedimento obteve-se uma relação de 46,6 pixels por milímetro.

Com o objetivo de reduzir o processamento da imagem e simplificar o processo de medição, uma região de interesse é selecionada a partir da imagem capturada (WANG; FU; GAO, 2019). A Figura 17 mostra um exemplo de imagem capturada pelo sistema. Como as medidas de inspeção são estimadas a partir do corpo do capacitor e o posicionamento é fixo pela garra pneumática, é possível fixar uma região da imagem para selecionar a região de interesse. A Figura 18 mostra a região de interesse extraída da imagem da Figura 17.



Figura 17 – Exemplo de imagem do capacitor capturada pelo sistema de aquisição de imagem da Omron

Fonte: Autor, (2020)

Figura 18 - Região de interesse selecionada a partir da imagem original



Fonte: Autor, (2020)

4.1.2 Detecção das linhas de referência

O processo de detecção das linhas de referência é composto por 3 etapas: binarização da imagem, detecção das bordas da imagem e aplicação da transformada de Hough. Essas etapas serão apresentadas a seguir.

A etapa de binarização tem por objetivo reduzir os pixels da imagem a dois valores válidos a fim de facilitar o processo de separação de estruturas de interesse do fundo da imagem (NUNES, 2006). Gonzalez & Wooods (2010) definem o processo de binarização da seguinte forma: deve-se atribuir o valor 1 (branco) a todo pixel cujo valor seja maior que o limiar. A todos os outros são atribuídos o valor 0 (preto). Este processo permite a aplicação de algoritmos mais simples para detecção de bordas.

A detecção de bordas é um dos métodos usados para segmentar as imagens com base nas variações abruptas de intensidade (GONZALEZ; WOOODS, 2010). É importante que a imagem passe por esse processo pois sem ele as bordas podem ser detectadas nos pixels incorretos ou mesmo resultar em bordas incompletas (SALES, 2008). A detecção de bordas foi utilizada no intuito de ressaltar as características das linhas necessárias para a detecção das retas. Alguns filtros podem ser utilizados para a detecção de bordas de uma imagem entre eles:

- Prewitt: utiliza duas máscaras 3x3 que são convoluídas com a imagem original para calcular as derivadas nas direções vertical e horizontal. É apropriado para estimar a magnitude e orientação das bordas. Segundo Gonzalez & Wooods (2010) esse operador é mais simples de ser implementado que o filtro de Sobel, porém apresenta menor imunidade a ruídos.
- Roberts: faz o gradiente cruzado, isto é, em vez de calcular as diferenças de valores de brilho na direção vertical e horizontal, o faz numa direção rotacionada de 45° (QUEIROZ; GOMES, 2006).
- Sobel: utiliza duas máscaras deslocadas em 90° para encontrar os gradientes vertical e horizontal das bordas. A formulação matemática para encontrar o gradiente e o ângulo são as mesmas do operador de Roberts, entretanto, o operador Sobel é muito menos sensível ao ruído devido às máscaras serem de 3x3 ao invés de 2x2. As máscaras de Sobel apresentam melhor supressão de ruído (suavização), isso faz com que sejam preferíveis (GONZALEZ; WOOODS, 2010). O filtro de Sobel foi o que apresentou os melhores resultados na elaboração do trabalho, por esse motivo foi o escolhido.

Para determinar as linhas de referência a serem utilizadas para realizar as medidas das cotas do capacitor, utilizou-se a transformada de Hough. Foi originalmente concebido para detectar linhas e foi posteriormente modificado para detectar formas como curvas e círculos (KRIG, 2014). A transformada de Hough consiste em analisar os pixels de uma borda e armazenar

seus parâmetros nas chamadas células acumuladoras, os pontos em que os parâmetros se repetem vão incrementando seus valores de votação. Os chamados picos de votação são utilizados na construção das retas. Gonzalez & Wooods (2010) definem esse processo em quatro etapas:

- 1. obter uma imagem de borda binária;
- 2. especificar as subdivisões no plano;
- 3. examinar a contagem das células acumuladoras para as concentrações elevadas de pixels;
- 4. examinar a relação de continuidade entre os pixels de uma célula escolhida.

Inicialmente a descrição das retas na transformada de Hough foi proposta por meio da equação geral de uma reta na forma inclinação-intersecção:

$$Y_i = ax_i + b \tag{4.1}$$

Uma dificuldade prática desta abordagem é que o termo *a* (inclinação da reta) se aproxima do infinito conforme a reta se torna mais vertical. A forma encontrada para contornar esse problema foi representar as retas por meio de coordenadas polares (GONZALEZ; WOOODS, 2010):

$$x\cos\theta + y\sin\theta = \rho \tag{4.2}$$

Cada reta pode ser descrita com dois parâmetros em relação a origem do plano cartesiano: θ é o ângulo em relação ao eixo X e ρ o afastamento da reta em relação a origem do plano. Além disso, as retas encontradas possuem os valores iniciais e finais dos eixos do plano *xy*, valores estes que podem ser utilizados para estimar o comprimento das retas. Os parâmetros das linhas obtidos por meio da transformada de Hough são (Figura 19):

- a : origem do plano *xy*;
- θ : ângulo em relação a origem;
- ρ: distância em relação a origem;
- (x_i, x_i) : coordenadas do ponto inicial da reta;
- (x_j, x_j) : coordenadas do ponto final da reta.

Cada curva senoidal na Figura 20 representa a família de retas que passam por um determinado ponto (x_k, y_k) no plano xy (GONZALEZ; WOOODS, 2010). As retas detectadas na imagem do capacitor pela transformada de Hough são representadas na Figura 20 tendo θ como eixo X e ρ como eixo Y.

Figura 19 – Parâmetros da reta no plano xy



Fonte: (GONZALEZ; WOOODS, 2010)

Figura 20 - Picos de votação da Transformada de Hough



Para realizar o cálculo das medidas dos terminais dos capacitores, foram selecionadas as 5 retas mais votadas (picos de votação). A linha de referência do corpo do capacitor é definida pelo parâmetro θ com valores entre 0° e 20°, diferente das outras 4 linhas que possuem ângulos entre

70° e 100°. A sobreposição das retas encontradas pelas transformada na imagem apresentada na Figura 21 mostra que os terminais negativo e positivo possuem duas linhas cada. As linhas que são de interesse para a realização dos cálculos são as internas. Essas linhas podem ser selecionas por meio da distância em relação a origem do sistema de coordenadas, representado pelo parâmetro ρ . A linha do terminal negativo selecionada é uma das duas linhas com maior valor de ρ . Isso significa que será utilizada a linha inferior do terminal negativo. A linha do terminal positivo selecionada é uma das duas linhas do terminal positivo com menor valor de ρ . Isso significa que será utilizada a linha superior do terminal positivo. As linhas correspondentes aos terminais que são utilizados nos cálculos das cotas são exibidas nas cores azul para o terminal negativo, vermelho para o terminal positivo e amarelo para a linha de referência do corpo do capacitor. As linhas verdes não são utilizadas na estimação das medidas, mas são detectadas pois fazem parte das 5 retas mais votadas pela transformada de Hough. A detecção das linhas é um fator de sucesso na execução do sistema. Capacitores aprovados devem ter as linhas citadas, caso contrário o cálculo das medidas não é possível.

Figura 21 – Linhas detectadas



Fonte: Autor, (2020)

4.1.3 Cálculo das medidas e classificação das imagens

As medidas de interesse são estimadas a partir das linhas encontradas pela transformada de Hough (Figura 22). O ângulo do terminal negativo (Cota 1) é calculado realizando a subtração do ângulo θ da linha correspondente ao terminal negativo (azul) pelo ângulo θ da linha de referência do capacitor (amarelo). O ângulo do terminal positivo (Cota 2) é obtido da mesma forma bastando utilizar o ângulo θ do terminal positivo.

O comprimento do terminal negativo (Cota 3) é obtido subtraindo a coordenada *X* do ponto final da linha azul pela coordenada *X* do ponto final da linha de referência do capacitor (linha amarela).

O comprimento do terminal positivo (Cota 4) é obtido subtraindo a coordenada X do ponto final da linha vermelha pela coordenada X do ponto final da linha de referência do capacitor (linha amarela). Isso é necessário devido a interrupção da linha correspondente ao terminal positivo (vermelho) devido as características construtivas do capacitor.

A distância entre os terminais (Cota 5) pode ser estimada pela subtração do parâmetro ρ das retas correspondentes aos terminais negativo e positivo. Porém o método que obteve uma medida mais assertiva foi realizando a subtração dos pontos finais da coordenada *Y* dos terminais positivo e negativo.

Com as medidas realizadas, as imagens são classificadas de acordo com as tolerâncias para cada medida (Tabela 1). O resultado desta classificação determina se o capacitor está aprovado (dentro da tolerância) ou reprovado.

Figura 22 – Cálculo das cotas a partir dos parâmetros das linhas, onde $L_{referencia}$ é a linha do corpo do capacitor, $L_{negativo}$ é a linha do terminal negativo e $L_{positivo}$ é a linha do terminal positivo



Fonte: Autor, (2020)

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Como o objetivo deste trabalho envolve a medição e avaliação dimensional de capacitores para soldagem, dois tipos de avaliações devem ser realizadas. A primeira trata de avaliar a medição realizada com base nas imagens capturadas pela máquina. A segunda trata da avaliação da qualidade dos capacitores com base nas medidas estimadas. Por isso, uma base que permita realizar tais avaliações foi construída.

A base de dados de imagens foi construída utilizando o mesmo sistema de aquisição atualmente instalado na máquina automatizada de soldagem de capacitores (Capítulo 3). Assim, foi possível realizar comparações com o sistema de visão computacional atualmente em uso. A base possui 500 imagens com resolução de 1944 x 2592 pixels. Todas as imagens foram gravadas no formato bitmap sem compressão. Para fins de comparação, as cotas estimadas pelo sistema de visão atual foram também armazenadas para cada imagem.

Destas 500 imagens, foram separados e identificados 100 capacitores, esses tiveram as suas medidas inspecionadas. As medidas dos ângulos (Cota 1 e Cota 2) foram verificadas utilizando um gabarito de verificação. Por se tratar de um gabarito mecânico não são obtidos valores numéricos, apenas é verificado se os terminais do capacitor encontram-se dentro das tolerâncias. As medidas de comprimento dos terminais negativo e positivo (Cota 3 e Cota 4) foram inspecionadas com o uso de um relógio comparador digital. A medida da distância entre os terminais positivo e negativo foram inspecionadas com o uso de um paquímetro digital (Cota 5). Todos os instrumentos utilizados na verificação destas medidas encontravam-se com certificados de calibração válidos.

Para a avaliação das medidas geradas pelo sistema proposto, foi estimada a raiz do erro quadrático médio, descrito por:

$$REQM = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\hat{x}_i - x_i)^2}}{N}$$
(4.3)

onde N é o número de amostras, x_i é o valor real medido pelos instrumentos e \hat{x}_i é o valor estimado pelo sistema.

4.3 RESULTADO DA ESTIMAÇÃO AUTOMÁTICA DE MEDIÇÕES

A primeira etapa do teste do sistema proposto consistiu em soldar 100 capacitores na máquina automatizada. Todos os capacitores foram aprovados pelo sistema de visão computacional integrado ao equipamento.

A medida raiz do erro quadrático médio (Equação 4.3) foi estimada para ambos os sistemas e é apresentada na Tabela 2. É possível observar que ambos os sistemas apresentaram erros semelhantes na casa de 0,1 mm paras as cotas 3, 4 e 5. Este erro é tolerável uma vez que a

cota com menor tolerância (Cota 4) tem 0,4 mm de intervalo entre o valor mínimo e o máximo. O sistema proposto teve um desempenho igual ao sistema de visão computacional presente na máquina automatizada de soldagem de capacitores. Desta forma, pode ser uma alternativa para a redução de custo de implantação quando utilizado em mais de um equipamento, uma vez que desenvolvido o sistema pode ser utilizado em outras máquinas sem a necessidade de aquisição do controlador do sistema de visão industrial do fabricante Omron.

	Cota 3	Cota 4	Cota 5
Sistema industrial	0,11 mm	0,09 mm	0,11 mm
Sistema proposto	0,09 mm	0,13 mm	0,13 mm

Tabela 2 – Erros dos sistemas de referência e proposto em comparação com as medidas verificadas por instrumentos.

4.4 RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO DOS CAPACITORES

Para avaliar a classificação dos capacitores, foram utilizadas as 500 imagens coletadas. Das 500 imagens analisadas 26 foram reprovadas pelos sistema de visão industrial utilizado na máquina automatizada. Estas 26 peças também foram descartadas pelo sistema proposto, resultando em uma taxa de acerto de 100%.

Os motivos que reprovaram os capacitores foram:

- **Terminal negativo não soldado**: isto ocorre devido a falha na soldagem dos terminais (Figura 23-a);
- Ângulo do terminal negativo: o ângulo não atendeu as especificações da Cota 1 (Figura 23-b);
- **Comprimento do terminal positivo**: o comprimento não atendeu as especificações da Cota 4;
- Mal posicionamento do capacitor: capacitores estavam mal posicionados no berço da máquina automatizada. Estes capacitores mal posicionados resultam em reprovação pela distância dos terminais positivo e negativo (Cota 5) ou não permitem que todas as linhas de referência sejam detectadas (Figura 23-c).

As quantidades de capacitores separados por tipo de reprovação são apresentadas na Tabela 3. Não foram encontradas nenhuma reprovação por conta das Cotas 2 (ângulo terminal positivo) e 3 (comprimento terminal negativo).

As 474 imagens restantes que foram aprovadas pelo sistema de visão industrial também foram classificadas como imagens aprovadas pelo sistema proposto resultando em uma taxa de acerto de 100%.

Cota	Descrição	Quantidade
	Terminal negativo não soldado	07
1	Ângulo terminal negativo	01
4	Comprimento terminal positivo	10
5	Distância entre terminais ou mal posicionados	08

Tabela 3 – Motivos de reprovação dos capacitores analisados.

Figura 23 – Capacitor sem terminal negativo (a), capacitor com terminal negativo torto (b) e capacitor mal posicionado (c).



Fonte: Autor, (2020)

Para o correto funcionamento do sistema proposto é necessário que os capacitores estejam perfeitamente alinhados no berço onde a câmera adquire as imagens, caso contrário as linhas serão detectadas erroneamente prejudicando o cálculo das medidas. Durante a aquisição das imagens pôde-se verificar que a oscilação da pressão pneumática que alimenta a máquina automatizada de soldagem de capacitores influencia diretamente no bom posicionamento das peças na estação de inspeção por visão computacional. Mesmo com esse problema o sistema proposto teve um bom desempenho e conseguiu aprovar imagens que não estavam com um posicionamento adequado, assim como o sistema de visão industrial (Figura 24).

Figura 24 – Capacitor mal posicionado aprovado.



Fonte: Autor, (2020)

4.5 CUSTO ATUALIZADO DO SISTEMA COMPLETO

O custo total do sistema de visão existente na máquina automatizada de soldagem de capacitores (Tabela 4) é de R\$ 69.208,70. Com o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho é possível retirar o controlador do sistema de visão (FH-1050) resultando em uma economia de R\$ 31.782,45 (46% do custo de implantação do sistema de visão computacional). Neste caso, a execução do sistema deverá ser feita no computador industrial que executa as funções de CLP da máquina automatizada de soldagem de capacitores. Esse equipamento já está presente na máquina, fato que propiciará uma redução do custo financeiro na construção de um novo equipamento.

Item	Descrição	Valor em Reais	
FH-SC05R	Câmera digital CMOS 5MP	15.885,60	
3Z4S-LE VS-0814H1	Lente baixa distorção	4.680,50	
FH-1050 3	Controlador para sistema de visão	31.782,45	
FLV-DB212152W	Iluminação direta backlight	16.860,15	
	Total	69.208,70	

Tabela 4 – Custo financeiro do sistema de visão existente na máquina automatizada.

5 CONCLUSÃO

A detecção de defeitos em processo de manufatura visa aumentar a qualidade dos produtos e evitar que peças fora das dimensões sejam enviadas ao cliente final. Uma das formas mais eficientes de verificar a dimensão de capacitores eletrolíticos é a visão computacional. Esse método permite que as dimensões sejam verificadas sem a necessidade de contato com as peças a serem medidas, proporcionando maior agilidade e evitando a manipulação que pode gerar defeitos e contaminação.

Dentre os objetivos propostos pelo trabalho estavam: produzir uma base de imagens para avaliação do sistema proposto, desenvolver um algoritmo para detectar os terminais do capacitor produzindo as medidas dimensionais necessárias para a avaliação da qualidade de fabricação do componente, e, finalmente, realizar um comparativo entre os resultados do equipamento existente com os resultados da solução proposta neste.

Foram adquiridas 500 imagens com um sistema de visão integrado em uma máquina automatizada de soldagem de capacitores. Essas imagens foram armazenadas em formato bitmap e os valores das medidas inspecionadas foram salvas em um arquivo. A técnica escolhida para a construção do sistema proposto que atendesse aos objetivos consiste em encontrar as linhas que representam os terminais do capacitor e também a linha de referência de seu corpo. Dessa forma as medidas necessárias poderiam ser inspecionadas. Essa tarefa foi realizada com o uso da transformada de Hough que além de identificar as linhas também fornece os parâmetros necessários para a execução dos cálculos que irão gerar as medidas.

Foram verificadas as medidas de 100 capacitores com o auxílio de instrumentos de medida devidamente calibrados. A raiz do erro quadrático médio destas medidas foram comparadas com o sistema de visão industrial (câmera, controlador e *software*). Também foram comparados com os resultados obtidos na análise das imagens utilizando o sistema proposto pelo autor. Os maiores erros obtidos foram de 0,11 mm no sistema industrial e 0,13 mm no sistema proposto, estando ambos dentro das especificações requeridas no projeto.

Outro procedimento feito para verificar o desempenho do sistema proposto foi analisar 500 imagens e classificá-las em aprovadas ou reprovadas de acordo com os limites das dimensões que estavam sendo inspecionadas. As 500 imagens dos capacitores foram executadas no sistema de visão industrial e no sistema proposto. A classificação foi idêntica para a totalidade das amostras. Este resultado torna evidente que o sistema proposto pode ser implementado no âmbito industrial.

Como sugestão para um futuro trabalho pode-se desenvolver um sistema completo que possua comunicação com a máquina automatizada de soldagem de capacitores e um *software* com interface para monitoramento das inspeções.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, C. de O. Adaptive visual inspection methodologies for low cost high performance systems. [S.1.], 2018.

ALONSO, V. *et al.* Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 41, p. 359–366, 2019.

BATCHELOR, B. G. Machine Vision Handbook. Londres: Springer-Verlag, 2012.

BOYLESTAD, R. L. Introdução à análise de circuitos . 10. ed. São Paulo: Pearson Educación, 2004. 828 p.

CERNIAK, S. N. **Estudo e desenvolvimento de um capacitor eletrolítico de nióbio**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

COOMBS Jr., C. F. Electronic instrument handbook. New York: McGraw-Hill, 1995. v. 3.

DOEBELIN, E. O.; MANIK, D. N. **Measurement systems: application and design**. New Delhi (India): Tata McGraw Hill Education, 2007.

FABRE, D. T. **Desenvolvimento de um sistema de visão para inspeção automatizada de peças da indústria cerâmica**. 89 p. Tese (Doutorado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina., Florianópolis, 2019.

FARUOLO, L. B.; FERNANDES, J. L. A importância do ensino de metrologia, com foco na incerteza de medição, na formação de engenheiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 33., 2005, Campina Grande. Anais... [S.1.], 2005.

FELICIANO, F. F.; SOUZA, I. L. de; LETA, F. R. Visão computacional aplicacada à metrologia dimensional automatizada: considerações sobre sua exatidão. **Engevista**, v. 7, n. 2, 2005.

GADELMAWLA, E. S.; ELEWA, I. On-line measurement of product dimensions using computer vision. In: IMEKO SYMPOSIUM METROLOGY FOR QUALITY CONTROL IN PRODUCTION, 9., 2001, Cairo, Egypt. **Proceedings...** [S.I.], 2001. p. IV–1.

GARRETT, S. K.; MELLOY, B. J.; GRAMOPADHYE, A. K. The effects of per-lot and per-item pacing on inspection performance. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Elsevier, v. 27, n. 5, p. 291–302, 2001.

GONZALEZ, R. C.; WOOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 624 p.

JIANG, X.; GRAMOPADHYE, A.; KHASAWNEH, M. T. Evaluating the role of humans in hybrid inspection systems. In: THE 15TH TRIENNIAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION AND THE 7TH JOINT CONFERENCE OF THE ERGONOMICS SOCIETY OF KOREA AND THE JAPAN ERGONOMICS SOCIETY, ERGO, 15., 2003. **Proceedings...** [S.1.], 2003.

KRIG, S. Computer vision metrics: Survey, taxonomy, and analysis. Berlin: Springer Nature, 2014.

LI, D.; TIAN, J. An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 51, n. 5, p. 538–541, 2013.

MARCOTULI, V. *et al.* A vision-based measurement system for semi-finished cylindrical geometries. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR INDUSTRY 4.0 & IOT, 2020, Rome, Italy. **Proceedings...** [S.1.], 2020. p. 288–292.

MARINHO, E. C.; SILVA, J. B. A. Medição de superfícies de formas livres: Um estudo comparativo com uso de medição com contato e sem contato para fins de uso de inspeção e engenharia reversa. In: CONGRESSO DE METROLOGIA, 5., 2009, Salvador. **Anais...** [S.1.], 2009.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 406 p.

MARTINS, A. P.; Pizolato Jr., J. C. Inspeçao de solda utilizando visao computacional. Anais do 100 Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente–X SBAI, São João Del Rey, Minas gerais, p. 444–449, 2011.

MEHL, E. L. M. Capacitores Eletrolíticos de Alumínio: Alguns cuidados e considerações práticas. [S.1.], 2000.

NUNES, F. L. Introdução ao processamento de imagens médicas para auxílio a diagnóstico–uma visão prática. **Livro das Jornadas de Atualizações em Informática**, p. 73–126, 2006.

OLIVEIRA, B. C. F. d. **Desenvolvimento de sistemas de visão computacional para medição e inspeção de estatores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

OPTICS, E. **The Advantages of Telecentricity**. 2020. Disponível em: https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/ Acesso em: 21 ago 2020.

QUEIROZ, J. E. R. D.; GOMES, H. M. Introdução ao processamento digital de imagens. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v. 13, p. 11–42, 2006.

SALES, U. G. d. **Criação de um software, baseado em um sistema de visão, para reconhecimento da posição do veículo na rodovia**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Computação) — Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), Brasília, 2008.

SILVA, R. F. A. **Projeto e desenvolvimento de um sistema de medição sem contato aplicado ao processo de torneamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

VAILATI, L. G. **Desenvolvimento de sistema de visão de m aquina para medição folga radial em motores de indução**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

VIANNA, M. E. Calibração de Sistemas de Visão Computacional para Aplicação em Automação e Robótica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

WAHAB, A.; KHALID, A.; NAWAZ, R. Non-contact metrology inspection system for precision micro products. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND EMERGING ALLIED TECHNOLOGIES IN ENGINEERING (ICREATE), 2014, Islamabad, Pakistan. **Proceedings...** [S.1.], 2014. p. 151–156.

WANG, J.; FU, P.; GAO, R. X. Machine vision intelligence for product defect inspection based on deep learning and hough transform. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 51, p. 52–60, 2019.

ZATOČILOVÁ, A.; PALOUŠEK, D.; BRANDEJS, J. Image-based measurement of the dimensions and of the axis straightness of hot forgings. **Measurement**, Elsevier, v. 94, p. 254–264, 2016.