



GABRIEL RAMOS TEIXEIRA

**PROPOSTA DE SISTEMA EMBARCADO PARA
IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA BIOSPECKLE LASER**

LAVRAS – MG

2021

GABRIEL RAMOS TEIXEIRA

**PROPOSTA DE SISTEMA EMBARCADO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA
BIOSPECKLE LASER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Automação e Instrumentação de Sistemas, para obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Teixeira, Gabriel Ramos.

Proposta de sistema embarcado para implementação da técnica
biospeckle laser / Gabriel Ramos Teixeira. - 2021.

55 p. : il.

Orientador(a): Roberto Alves Braga Júnior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Biospeckle. 2. Raspberry Pi. 3. Sistemas Embarcados. I.
Júnior, Roberto Alves Braga. II. Título.

GABRIEL RAMOS TEIXEIRA

**PROPOSTA DE SISTEMA EMBARCADO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA
BIOSPECKLE LASER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Automação e Instrumentação de Sistemas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de Agosto de 2021.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Júnior	UFLA
Profa. DSc. Juliana Vilela Lourençoni Botega	CEFET-MG
Prof. DSc. Dimitri Campos Viana	UFLA

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Júnior
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

Aos meus pais e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida e por me manter firme nos momentos difíceis. Aos meus pais, Edgar e Maria Angélica, por todo amor, apoio e dedicação que sempre me deram. Aos meus irmãos, João Paulo e Lucas, por todo incentivo. Aos colegas do CEDIA, pela ajuda e troca de experiências. Ao professor Roberto, pelas orientações e pela compreensão. À todos os colegas e professores do PPGESISA pelo companheirismo e contribuições. Aos membros da banca pela disponibilidade. E à todos que estiveram comigo durante este processo, muito obrigado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

*"Caminhante, são tuas pegadas
o caminho e nada mais;
caminhante, não há caminho,
se faz caminho ao andar."
(Antônio Machado)*

RESUMO

O *biospeckle* laser é uma técnica cuja efetividade já foi comprovada em diversos experimentos e pesquisas, se mostrando uma ferramenta útil para a observação e análise de fenômenos de forma não invasiva. Contudo, devido às suas características de execução e sensibilidade à natureza dos fenômenos envolvidos e dos objetos de estudo, a implementação e uso dessa técnica ainda se mostram desafiadores. Para ser executada, ela necessita de uma câmera para capturar as imagens da estrutura analisada e de um computador para processá-las. Nos últimos tempos, o desenvolvimento tecnológico permitiu o aperfeiçoamento dos dispositivos de captura e dos sistemas computacionais, possibilitando inclusive que eles fossem apresentados sob a forma de estruturas com *hardware* e *software* embarcados e com dimensões reduzidas. Alguns trabalhos têm feito uso desses sistemas com o intuito de apresentar abordagens mais portáteis, com baixo-custo e com uso dedicado. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar a viabilidade de uma plataforma embarcada para se desenvolver um sistema que seja capaz de realizar a aquisição, o processamento e as análises do *biospeckle* laser, de modo a atender aos requisitos e particularidades da técnica.

Palavras-chave: *Biospeckle*. Raspberry Pi. Sistemas Embarcados.

ABSTRACT

The biospeckle laser is a technique whose effectiveness has already been proven in several experiments and research, proving to be a useful tool for the observation and analysis of non-invasive phenomena. However, due to its execution characteristics and sensitivity to the nature of the phenomena involved and the objects of study, the implementation and use of this technique are still challenging. To be executed, it needs a camera to capture the images of the analyzed structure and a computer to process them. In recent times, technological development has allowed the improvement of capture devices and computational systems, even allowing them to be presented in the form of structures with embedded hardware and software and with reduced dimensions. Some works have made use of these systems in order to present more portable approaches, with low cost and with dedicated use. Thus, this paper aimed to evaluate the feasibility of an embedded platform to develop a system capable of performing the acquisition, processing and analysis of the biospeckle laser, in order to meet the requirements and particularities of the technique.

Keywords: Biospeckle. Raspberry Pi. Embedded systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Exemplo de configuração para análise do <i>biospeckle</i> laser.	15
Figura 3.2 – Esquema de construção da matriz THSP e COM.	17
Figura 3.3 – Mapa de atividade de uma semente obtido pelos métodos gráficos.	18
Figura 3.4 – Curva de secagem de corretivo apresentada.	20
Figura 3.5 – Protótipo de dispositivo para análises SLD.	21
Figura 3.6 – Aplicativo Portable Speckle	22
Figura 3.7 – Exemplos de computadores de placa única usados na construção de sistemas embarcados.	23
Figura 3.8 – Esquemático do sistema de medição.	24
Figura 3.9 – Representação da montagem do interferômetro (a) e exemplo de uma imagem obtida após a projeção das franjas sobre o objeto (b).	25
Figura 4.1 – Suporte da câmera.	27
Figura 4.2 – Esquema do sistema proposto.	28
Figura 5.1 – Seção de pré-visualização.	32
Figura 5.2 – Visualização em tons de cinza e o seu respectivo histograma.	33
Figura 5.3 – Definição do ROI para ajuste da captura.	34
Figura 5.4 – Tela da aba de captura	35
Figura 5.5 – Seção de processamento.	36
Figura 5.6 – Tela do resultado numérico.	37
Figura 5.7 – Tela do resultado gráfico	38
Figura 5.8 – Teste de secagem do esmalte.	40
Figura 5.9 – Comparação gravimetria x SLD.	41
Figura 5.10 – Teste de secagem do corretivo.	42
Figura 5.11 – Comparação gravimetria x SLD.	43
Figura 5.12 – Amostra de semente de soja germinada.	44
Figura 5.13 – Método GAVD.	45
Figura 5.14 – Método SD.	45
Figura 5.15 – Método FUJII.	45
Figura 5.16 – Etapas da análise numérica	46
Figura 5.17 – Métodos de análise numérica.	47

Figura 5.18 – Análise numérica pontual. 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Testes de iluminação de superfície inerte	39
Tabela 5.2 – Tempo de processamento nos métodos gráficos	49
Tabela 5.3 – Tempo de processamento nos métodos numéricos.	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Fundamentação teórica	14
3.1.1	<i>Speckle</i> Laser Dinâmico	14
3.1.2	Processamento e análise dos padrões <i>speckle</i>	15
3.2	Estado da arte	19
3.2.1	Desenvolvimento tecnológico do <i>biospeckle</i>	19
3.2.2	Sistemas embarcados	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1	Desenvolvimento do sistema	27
4.2	Ajuste da câmera e dos parâmetros de captura	28
4.3	Testes de funcionamento e validação do sistema	28
4.3.1	Iluminação de superfície inerte	29
4.3.2	Teste de secagem de pintura	29
4.3.3	Análise de sementes	30
5	RESULTADO E DISCUSSÕES	31
5.1	Interface do sistema	31
5.1.1	Seção de pré-visualização	31
5.1.2	Seção de captura	34
5.1.3	Seção de processamento	35
5.2	Testes da captura	38
5.2.1	Iluminação de superfície inerte	38
5.2.2	Secagem de pintura	39
5.3	Testes de processamento	44
5.3.1	Análise de sementes	44
5.3.2	Análise numérica	46
5.3.3	Tempo de processamento	49

6	CONCLUSÃO	51
6.1	Otimização e trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Desde a criação do primeiro laser (do inglês, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), ocorrida por volta dos anos de 1960, o uso destes dispositivos se desenvolveu nas mais diversas áreas da ciência e tecnologia. Devido às suas propriedades características de emissão controlada de luz com alta coerência e direcionalidade, o laser se faz presente em aplicações que vão desde a leitura de códigos de barras até análises mais minuciosas associadas aos fenômenos ópticos, como é o caso daquelas relacionadas ao *Speckle Laser Dinâmico* (SLD).

O SLD é um fenômeno interferométrico que se forma pela dispersão da luz em uma dada superfície e cuja ocorrência foi considerada como ruído em suas primeiras observações. As diferentes direções que a luz assume ao se difundir num material geram padrões visuais, caracterizados pela formação de pontos claros e escuros e que, ao serem capturados por uma câmera e devidamente processados, podem apresentar informações sobre a superfície ou amostra em questão. Quando a área iluminada se modifica ao longo do tempo, observa-se também a alteração dos padrões formados. Essa interação possibilita, por exemplo, a observação de processos biológicos de forma não destrutiva e sem contato direto com o objeto de estudo. Por causa dessas características, o SLD se destaca em áreas como medicina e agricultura, onde se desenvolveu como uma técnica relevante, sendo conhecida mais comumente como *Biospeckle Laser* (BSL).

A observação de fluxo sanguíneo, a identificação de danos em frutos e a análise da viabilidade de sementes são alguns exemplos de aplicações onde o BSL vem sendo usado como método de estudo e/ou como ferramenta de análise.

Para se obter resultados, a análise do BSL exige processamento de imagens associado a abordagens matemáticas e estatísticas. Nas últimas décadas, o aumento da capacidade de processamento dos computadores modernos e da disponibilidade de câmeras com alta qualidade e eficiência contribuíram para o desenvolvimento da técnica. Por outro lado, entende-se que alguns dos desafios para a implementação da técnica são as suas particularidades de execução, a sensibilidade às interferências e perturbações externas e as diversas características dos fenômenos e objetos estudados.

Assim como já vem sendo feito em outros campos de pesquisa, como em telecomunicações, robótica e em sistemas automotivos, a associação de conceitos de eletrônica e computação embarcadas pode facilitar a implementação de novas ferramentas e dispositivos. Nos últimos

anos, a disponibilidade e popularização de plataformas que integram *hardware* e *software* de uma forma compacta e robusta auxiliaram o desenvolvimento de diversas pesquisas, atribuindo a elas características mais portáteis, acessíveis e com custo reduzido.

Com base nisso, surge a hipótese de que a utilização de uma plataforma embarcada para o desenvolvimento de um sistema voltado a implementação do BSL tende a facilitar o seu uso prático e tornar a técnica mais acessível e portátil.

Sendo assim, o presente trabalho trata da implementação de tal sistema, tendo como objetivo avaliar a sua capacidade de realizar a aquisição e o processamento dos padrões do speckle laser, bem como apresentar os resultados obtidos e identificar suas limitações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar o estudo da viabilidade de um sistema embarcado que realize as análises associadas ao *biospeckle* laser, identificando suas contribuições e limitações para o desenvolvimento da técnica.

2.2 Objetivos específicos

- a) Propor um sistema miniaturizado com *hardware* e *software* embarcado para as análises do BSL.
- b) Avaliar a capacidade de uma câmera embarcada quanto à aquisição dos padrões *speckle* laser.
- c) Avaliar a capacidade de processamento dos métodos de análise *online* e *offline* pelo sistema proposto.
- d) Desenvolver uma IHM para permitir o ajuste e controle das capturas, bem como a escolha dos métodos de análise a serem realizados e dos seus respectivos resultados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Fundamentação teórica

3.1.1 *Speckle* Laser Dinâmico

O *speckle* laser dinâmico (SLD), ou ainda *biospeckle* laser (BSL) pode ser entendido, em linhas gerais, como um fenômeno de natureza interferométrica, provocado pela dispersão da luz laser quando esta incide sobre uma superfície. O modo com que essa luz coerente se dispersa num dado material provoca padrões de observação característicos, onde se identificam áreas claras e escuras. Ao longo do tempo, a observação das possíveis mudanças nesses padrões pode ser usada para se obter informações sobre a estrutura iluminada ou ser associada a outros fenômenos que nela ocorram. (PRA; PASSONI; RABAL, 2009; BRAGA; RIVERA; MOREIRA, 2016).

Por causa disso, o BSL tem sido amplamente usado para descrever e mensurar a atividade biológica de forma não destrutiva, já que não interfere na estrutura das amostras (ZDUNEK et al., 2014). Somado a isso, destaca-se outra relevante vantagem que consiste na sua capacidade de medir a atividade biológica usando índices indiretos que superam o consumo de tempo e de julgamento humano que normalmente são associados às análises convencionais (BRAGA, 2017). Isso significa que o uso desta técnica se torna muito interessante em áreas como medicina, agricultura e biologia, auxiliando na observação e avaliação de fenômenos e processos associados a elas.

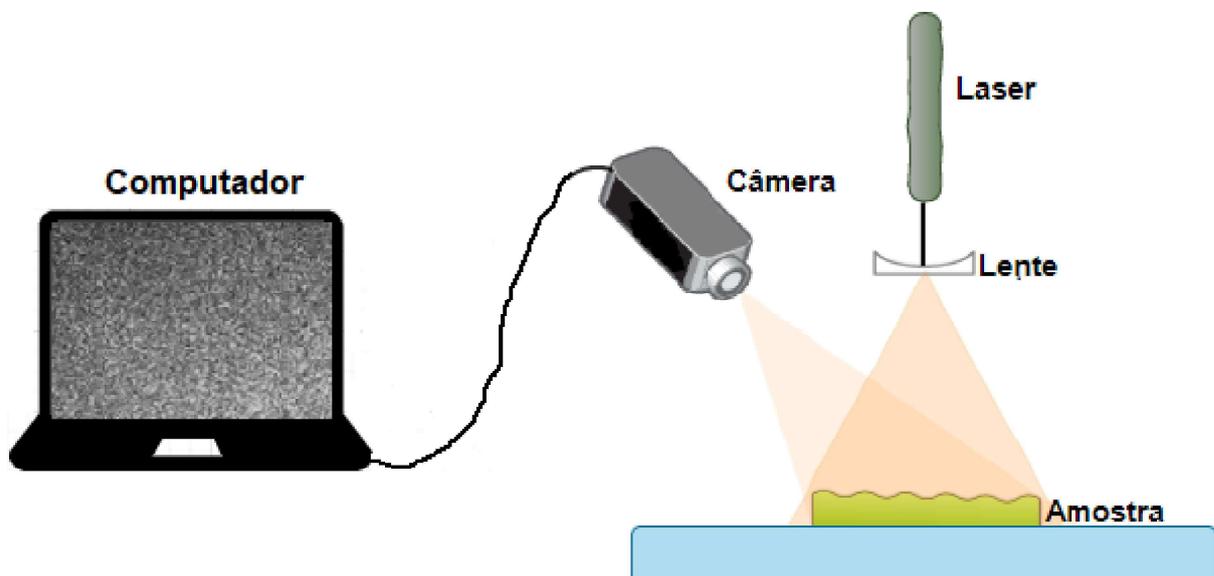
Na medicina, as primeiras aplicações do BSL remontam o próprio desenvolvimento da técnica, sendo muito utilizada como ferramenta de visualização do fluxo sanguíneo (AIZU; ASAKURA, 1991), (AIZU et al., 1996), (KUMARI; NIRALA, 2019). Outros estudos também se destacam por usar o *biospeckle* na análise de tecidos celulares (NIERI et al., 2009), (BRAGA et al., 2012), (GONZÁLEZ-PEÑA et al., 2014; MAKSYMENKO; MURAVSKY; BEREZYUK, 2015), e de bactérias e parasitas (GRASSI et al., 2016), (RAMÍREZ-MIQUET et al., 2017).

Por sua vez, na agricultura, identificam-se diversas pesquisas envolvendo o uso do *biospeckle*. Conforme Zdunek et al. (2014) apresentam em sua revisão, esse método é amplamente usado para avaliar a qualidade de culturas agrícolas uma vez que é capaz de associar e quantificar alguns processos biológicos por meio de níveis de atividade aparente. As aplicações se

apresentam, por exemplo, na análise de sementes (SINGH et al., 2018), (VIVAS et al., 2017), (MOURA et al., 2015), (FRACAROLLI, 2011); na identificação do estado de maturação e detecção de defeitos em frutos (MOURA et al., 2015), (RETHEESH et al., 2016), (AREFI et al., 2016), (RETHEESH et al., 2018), (KUMARI; NIRALA, 2016); no estudo do crescimento de raízes (BRAGA et al., 2009), (RIBEIRO et al., 2013); e em outras pesquisas.

Como existe grande variabilidade de aplicações, as análises do BSL podem ser realizadas de diversas formas. De forma simplificada, o aparato básico necessário para a execução das análises é constituído por um laser, uma câmara para capturar as imagens dos padrões gerados e um computador para armazená-las e processá-las. Diversas configurações desses elementos podem ser construídas de forma a atender às necessidades de uso da técnica. A Figura 3.1 ilustra um exemplo simples da forma como eles podem ser dispostos. Nela é representada a iluminação de uma amostra de interesse pela luz laser e o resultado dos padrões *speckle* capturados pela câmara.

Figura 3.1 – Exemplo de configuração para análise do *biospeckle* laser.



Fonte: Do autor (2021)

3.1.2 Processamento e análise dos padrões *speckle*

Com o auxílio do computador, os padrões capturados podem ser processados e apresentados de forma a se obter as informações de interesse. Ao longo do desenvolvimento da técnica do SLD, diversos métodos de análise foram sendo criados, de acordo com as necessidades de

cada aplicação. Quanto à temporalidade da resposta, eles podem ser realizados de forma online ou off-line. (BRAGA; RIVERA; MOREIRA, 2016).

A análise online é vantajosa para a verificação de fenômenos em tempo real, ou ainda para avaliação da qualidade das aquisições, permitindo ajustes de posicionamento, contraste e saturação das imagens e evitando futuras inconsistências durante o processamento. As pesquisas realizadas por Godinho et al. (2012) e Pieczywek et al. (2017) tratam desse contexto e apresentam exemplos de métodos de análise em tempo real.

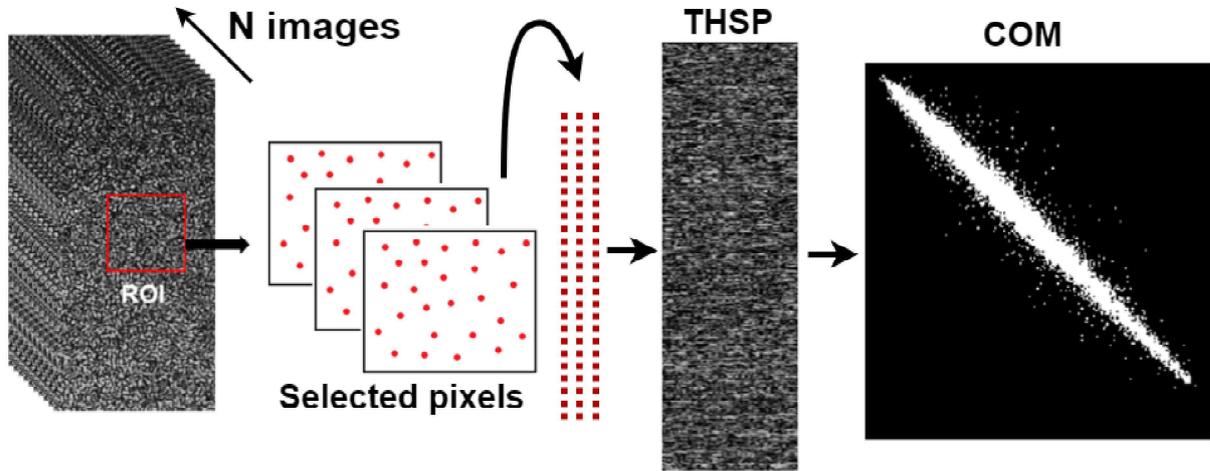
Por sua vez, a análise offline é realizada por meio do processamento dos conjuntos de imagens previamente capturadas. Assim como a análise online, ela também contempla uma gama de métodos estatísticos e matemáticos que permitem a obtenção de resultados numéricos e/ou gráficos, de acordo com o que se deseja analisar.

Os métodos numéricos se mostram interessantes quando se deseja quantificar a atividade relativa de uma determinada estrutura, possibilitando assim uma resposta mais objetiva das análises. Um meio para se realizar essa quantificação é avaliar as mudanças ocorridas ao longo do tempo num determinado conjunto de imagens. A seleção e organização de alguns pontos que representem cada um dos padrões obtidos resultam numa nova figura capaz de traduzir essas mudanças e facilitar a análise. Tal processo foi proposto inicialmente por Oulamara, Tribillon e Duvernoy (1989) e produz uma matriz de pixels chamada de THSP (do inglês *Time History Speckle Pattern*).

Com o intermédio da matriz THSP, uma nova matriz pode ser construída para se correlacionar as variações ocorridas. Trata-se da chamada matriz de coocorrência (COM), proposta por Arizaga, Trivi e Rabal (1999) e que contabiliza a dispersão dos valores de intensidade dos *pixels* consecutivos da matriz THSP, como expressa a Equação 3.1. Nela, M representa a quantidade de pontos amostradas em cada imagem e N o número de imagens. Assim, $COM_{(i,j)}$ representa o somatório das transições dos níveis de intensidade em escala de cinza obtidos pela varredura da matriz THSP. A Figura 5.16(b) esquematiza os processos para a construção da matriz THSP e mostra um exemplo de matriz COM.

$$COM_{(i,j)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N-1} \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ se } THSP(m,n)=i \text{ e } THSP(m,n+1)=j \\ 0, \text{ caso contrario} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Figura 3.2 – Esquema de construção da matriz THSP e COM.



Fonte: Adaptada de Pérez et al. (2018)

A partir da matriz de coocorrência é possível estabelecer métricas para mensurar as variações observadas. O método chamado Momento de Inércia (IM, Inertia Moment) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999), por exemplo, leva em consideração o quadrado das diferenças entre os índices da matriz COM. A Equação 3.2 apresenta a definição básica desse método.

$$IM = \sum_i \sum_j \frac{COM(i,j)}{Norm} |i-j|^2 \quad (3.2)$$

Como uma modificação do anterior, o método AVD (Absolute Value of the Differences) utiliza apenas a diferença absoluta entre os índices, sendo dado assim pela Equação 3.3

$$AVD = \sum_i \sum_j \frac{COM(i,j)}{Norm} |i-j| \quad (3.3)$$

Em situações onde se busca identificar áreas com diferentes níveis de atividade, os métodos gráficos são mais aplicáveis, já que se apresentam na forma de um mapa indicativo com diferentes escalas em nível de cinza ou em pseudo-cor. São exemplos de alternativas para esse tipo de observação o Método Fujji (FUJII et al., 1985), o Método SD (*Standard Deviation*) (BLOTTA et al., 2011) e o Método GAVD (*Gráfico Average Value of Difference*) (BRAGA et al., 2011)

O método Fujji pode ser expresso pela Equação 3.4. Nela, N representa o número de imagens a serem analisadas e $I_k(x,y)$ o valor da intensidade do pixel no ponto (x,y) .

$$Fujji_{(x,y)} = \sum_{k=1}^N \left| \frac{I_k(x,y) - I_{k+1}(x,y)}{I_k(x,y) + I_{k+1}(x,y)} \right| \quad (3.4)$$

O método SD, por sua vez, é representado pela Equação 3.5 , sendo que nela o termo $E [I_k]$ é o valor médio temporal de $I_k(x,y)$, para todo k .

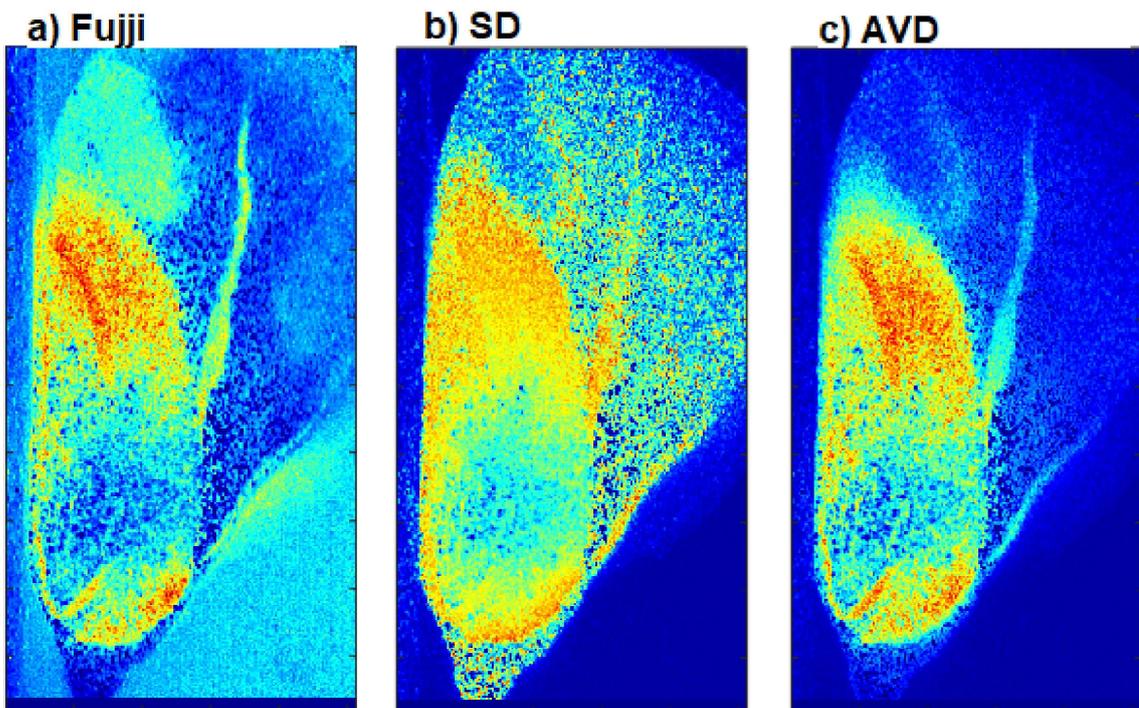
$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k^N |I_k - E [I_k]|^2} \quad (3.5)$$

O método GAVD é uma adaptação do método AVD numérico para fornecer uma saída gráfica e pode ser expressado pela Equação 3.6

$$AVD_{(x,y)} = \sum_{k=1}^{N-1} |I_k(x,y) - I_{k+1}(x,y)| \quad (3.6)$$

A Figura 3.3 apresenta uma comparação entre as respostas gráficas obtidas para cada um dos métodos mencionados. O conjunto de imagens utilizado se refere à iluminação de uma semente de milho e foi disponibilizado por Braga, Rivera e Moreira (2016) .

Figura 3.3 – Mapa de atividade de uma semente obtido pelos métodos gráficos.



Fonte: Do autor (2021)

3.2 Estado da arte

3.2.1 Desenvolvimento tecnológico do *biospeckle*

Assim como outras técnicas de análise científica, o *biospeckle* apresenta um processo de desenvolvimento que se estabelece à medida que suas aplicações são testadas e comprovadas. No que se refere à efetividade das análises, existe na literatura uma gama de trabalhos que dão respaldo ao seu uso.

Sobre esse assunto, em seu trabalho, Braga (2017) apresenta o contexto histórico do desenvolvimento do BSL, desde as tentativas iniciais de observação do fenômeno até os dias atuais, e por fim, sugere o potencial desenvolvimento de equipamentos mais acessíveis e portáteis.

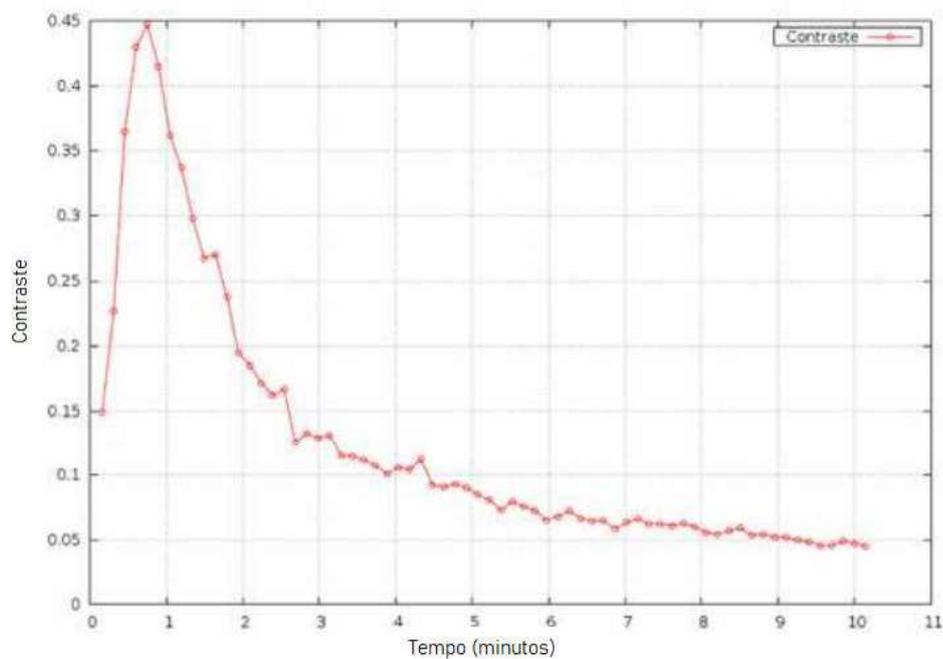
Como um primeiro olhar sobre o uso de novas alternativas para o desenvolvimento da técnica, o trabalho de Chaves (2011) buscou avaliar a possibilidade de se substituir as câmeras do tipo CCD por outros dispositivos mais portáteis e com menor custo financeiro, como *mouse* óptico, *webcam* e mini-microscópio. A verificação mostrou que essas alternativas são viáveis para a aquisição das imagens de padrões *speckle*, com destaque para o uso da *webcam*.

Quanto ao tipo de laser, o diodo laser se apresenta como uma alternativa de substituição aos de He-Ne, muito utilizados nas pesquisas. Com o intuito de confirmar essa possibilidade, González-Peña, Braga e Pujaico-Rivera (2018) realizaram em sua pesquisa alguns testes de comparação entre os dois tipos de fonte emissora. Foi avaliada a estabilidade dos lasers de diodo nas análises, tendo como referência os valores obtidos com lasers de He-Ne. Os experimentos mostraram que o laser de diodo é estável no que se refere à intensidade da luz, e pode ser usado em aplicações do *biospeckle*. Por sua vez, o trabalho de Gomes et al. (2018) comprovou que o laser de diodo pode ser alimentado por uma bateria recarregável sem perdas na intensidade luminosa gerada, o que incentiva a sua utilização em aplicações portáteis.

Um sistema de medição baseado em SLD com características de um instrumental sensível e de baixo custo foi testado no trabalho realizado por Hanisch et al. (2015). O protótipo de um dispositivo portátil para análise de padrões de *speckle* laser foi elaborado, sendo composto por um minicomputador Raspberry Pi como elemento de controle e processamento, uma *webcam* (com conexão USB), para a aquisição das imagens, e um monitor VGA. Os testes preliminares foram feitos pela análise de processo de secagem de pintura e um dos resultados obtidos

foi dado pela curva de secagem de corretivo líquido mostrada na Figura 3.4. De acordo com os autores, a curva obtida representa o comportamento esperado para esse tipo de experimento, apesar de, nos primeiros instantes da análise tenha apresentado alguns valores discrepantes, os quais foram atribuídos às características da *webcam* utilizada, presumindo falhas no controle e perdas de informação.

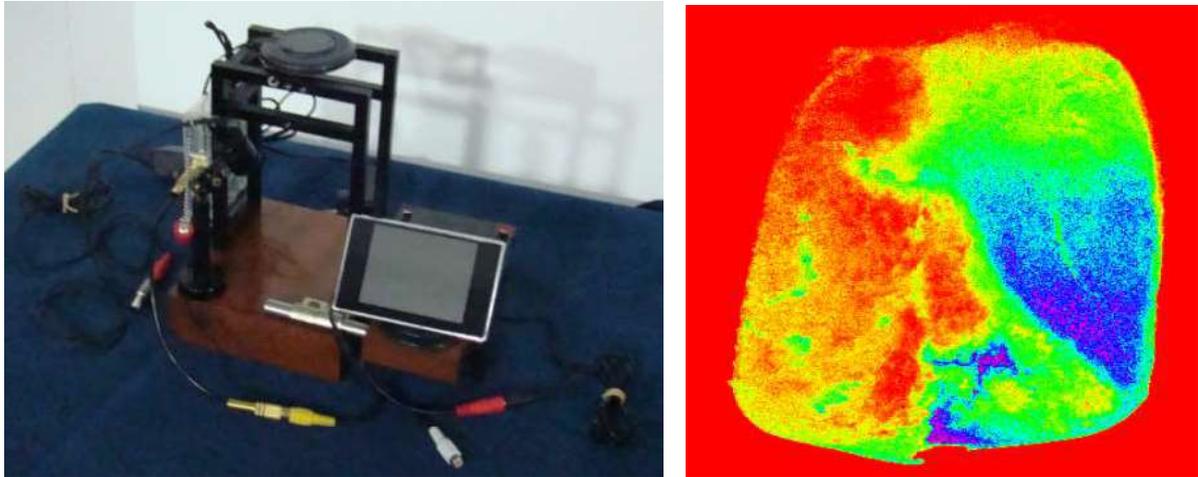
Figura 3.4 – Curva de secagem de corretivo apresentada.



Fonte: (HANISCH et al., 2015)

Como seguimento da pesquisa anterior, o protótipo do sistema desenvolvido foi ilustrado no trabalho apresentado por Trivi et al. (2017). A imagem do dispositivo é mostrada na Figura 3.5(a). Os autores também realizaram a análise de uma semente de milho, conforme ilustra a Figura 3.5(b), sendo que o resultado obtido destaca as áreas com maior atividade da amostra.

Figura 3.5 – Protótipo de dispositivo para análises SLD.



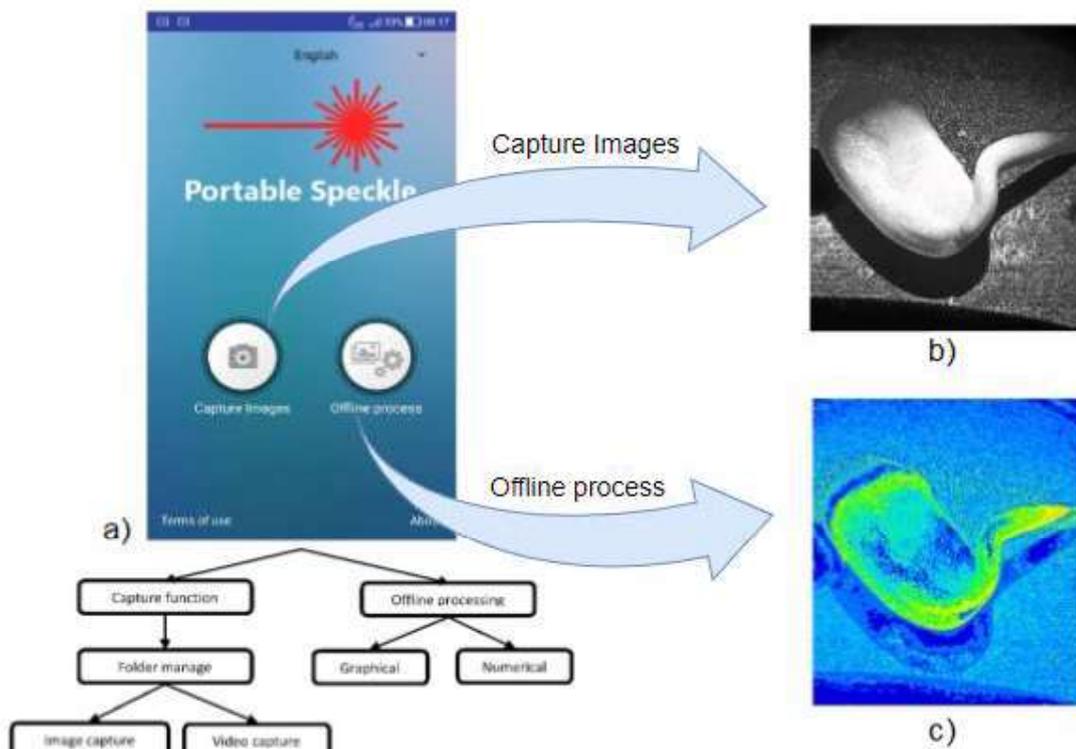
(a) Protótipo.

(b) Análise de semente de milho obtida.

Fonte: (TRIVI et al., 2017)

A pesquisa realizada por Catalano, Rivera e Braga (2019) também representa uma forma interessante de tornar a técnica do *biospeckle* mais acessível, uma vez que utiliza um *smartphone* como alternativa para implementá-la. No trabalho, os autores desenvolveram um aplicativo para o sistema operacional Android capaz de capturar, armazenar e processar imagens dos padrões *speckle*. Além disso, o aplicativo possibilita ao usuário a escolha da análise mais apropriada, podendo ser pelo método gráfico ou numérico. A Figura 3.6(a) ilustra uma das telas do aplicativo desenvolvido. Já o resultado de uma captura do padrão *speckle* e um exemplo da análise gráfica de uma semente são apresentados nas Figuras 3.6(b) e 3.6(c), respectivamente. Apesar de os resultados apresentados indicarem a viabilidade de implementação da técnica em smartphones, a grande variabilidade desses dispositivos e a existência de parâmetros da câmera cujo controle não foi possível, como tempo de exposição, podem limitar o uso da ferramenta desenvolvida em aplicações mais exigentes.

Figura 3.6 – Aplicativo Portable Speckle .



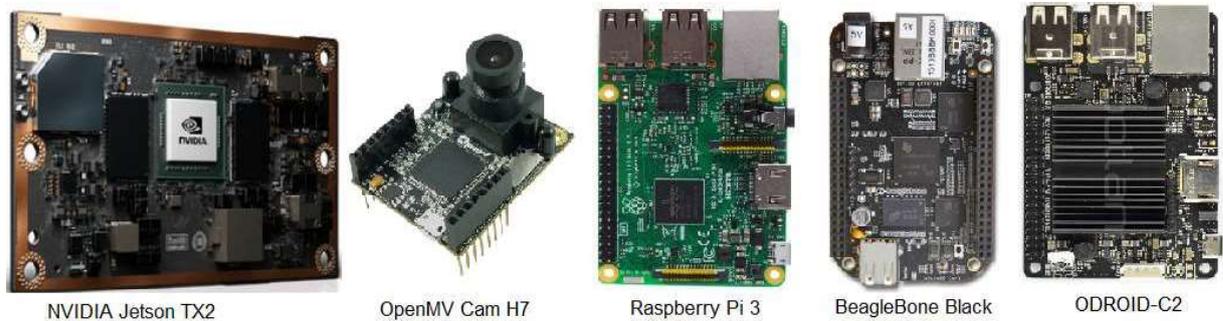
Fonte: Adaptado de Catalano, Rivera e Braga (2019)

3.2.2 Sistemas embarcados

Segundo Wolf (2012), um sistema embarcado pode ser entendido como qualquer dispositivo que possua um elemento computacional programável, mas que não se destine a ser um computador de uso geral. Assim, eles se diferenciam pela capacidade de executarem uma ou mais tarefas pré-definidas, para as quais são devidamente programados.

Atualmente, sistemas embarcados baseados no processador ARM estão se tornando populares devido ao seu custo mais baixo, menor consumo de energia e desempenho comparável aos das CPUs de uso geral (MISHRA et al., 2019). Diversas plataformas de desenvolvimento para soluções embarcadas estão disponíveis no mercado, a preços razoáveis, o que tem impulsionado o crescimento das aplicações embarcadas no campo de processamento de imagens. Dentre elas, destaca-se as plataformas NVIDIA Jetson, OpenMV, Raspberry Pi, BeagleBoard e ODROID. A Figura 3.7 apresenta algumas versões de computadores de placa única que fazem parte dos produtos dessas plataformas.

Figura 3.7 – Exemplos de computadores de placa única usados na construção de sistemas embarcados.



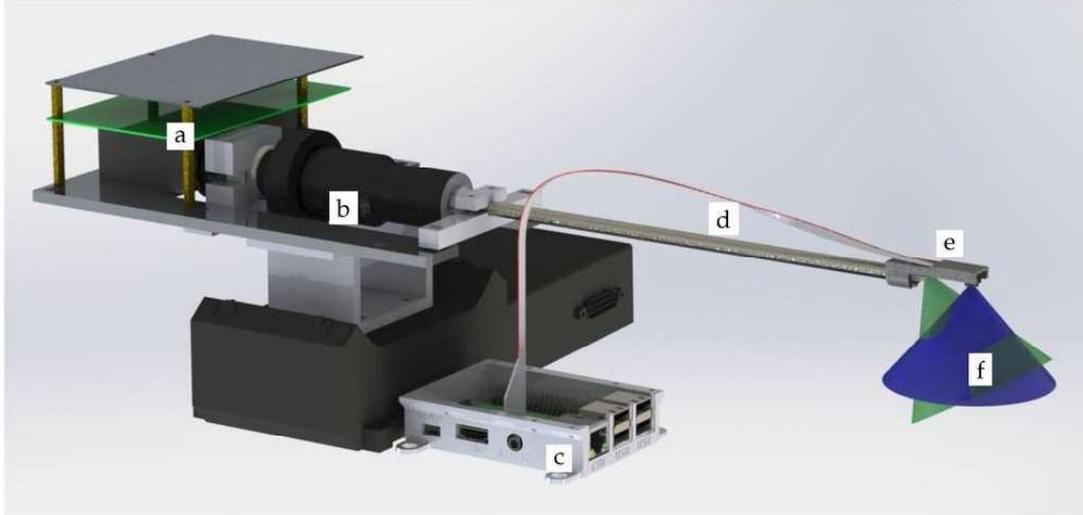
Fonte: Do autor (2021)

Dentre as plataformas existentes, a Raspberry Pi tem se popularizado e o seu uso se faz presente em diversas áreas. Conforme afirmam Johnston e Cox (2017), a grande relevância dessa plataforma consiste em sua acessibilidade, representando não apenas um computador com custo reduzido, mas um dispositivo que permite a conexão de outros componentes eletrônicos, sendo capaz de controlá-los por meio de um sistema operacional. Isso faz com que essa ferramenta se torne uma alternativa altamente relevante para a construção de protótipos e implementação de sistemas funcionais. Tais motivos justificam a sua escolha para a investigação realizada neste trabalho.

Muitos trabalhos têm usado a plataforma Raspberry Pi para testar e validar suas pesquisas, agregando a elas características que os computadores de uso geral não conseguem prover de forma adequada, como uso portátil e execução de forma dedicada, sendo que alguns exemplos são apresentados a seguir.

O trabalho de Schlobohm, Pösch e Reithmeier (2016) representa uma aplicação do Raspberry Pi para a construção de um sistema de medição portátil, esquematizado na Figura 3.8. Trata-se de um endoscópio 3D elaborado para medir as partes internas de máquinas montadas, o qual se utiliza de uma placa Raspberry em conjunto com um pequeno projetor de LED para gerar padrões de projeção de franjas e em seguida adquirir imagens da parte observada e reconstruir a sua geometria.

Figura 3.8 – Esquemático do sistema de medição.



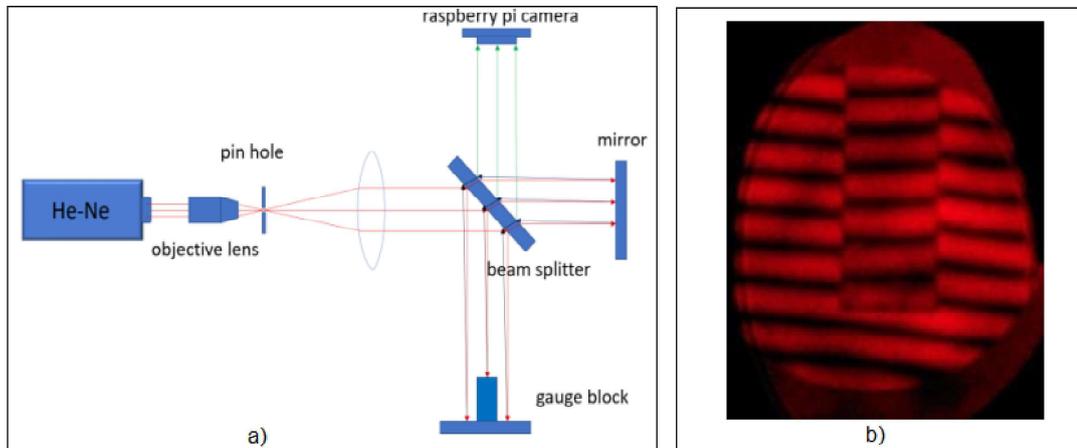
Legenda: (a) projetor; (b) adaptador da câmera; (c) Raspberry Pi 2; (d) eixo do endoscópio; (e) câmera
(f) campos de visão do projetor (verde) e da câmera (azul).

Fonte: (SCHLOBOHM; PÖSCH; REITHMEIER, 2016)

Segundo Schlobohm, Pösch e Reithmeier (2016), o sistema desenvolvido se destaca por permitir a análise de componentes em locais onde o espaço é limitado e ainda oferecer uma qualidade de medição superior em comparação aos produtos disponíveis no mercado, embora isso gere um tempo maior de execução das análises. Além disso, acrescentam que o Raspberry Pi mostrou-se muito útil para a geração dos padrões do projetor, para o controle deste último e da câmera e para o processamento das imagens.

Outro exemplo de um sistema de medição óptica é apresentado por Chomkokard, Jinuntuya e Wongkokua (2017). Neste caso, os autores desenvolveram um dispositivo para coletar e analisar as imagens de padrões de franjas de um interferômetro do tipo Twyman-Green. O objetivo do estudo consiste na medição de blocos-padrão, usados na calibração de instrumentos de medição de comprimento. O sistema de processamento foi baseado na plataforma Raspberry Pi, contando com programação em linguagem Python e com o auxílio da biblioteca de processamento de imagens OpenCV. As imagens foram gravadas pela câmera Raspberry Pi com resolução de cinco megapixels. A configuração dos elementos é ilustrada na Figura 3.9-a), e um exemplo de imagem dos padrões de franjas obtidos é apresentado na Figura 3.9-b).

Figura 3.9 – Representação da montagem do interferômetro (a) e exemplo de uma imagem obtida após a projeção das franjas sobre o objeto (b).



Fonte: (CHOMKOKARD; JINUNTUYA; WONGKOKUA, 2017)

4 MATERIAL E MÉTODOS

Durante a execução deste trabalho, foram realizados testes e investigações a fim de se propor um sistema embarcado para a realização das análises associadas ao SLD. As tarefas executadas envolvem tanto a montagem dos dispositivos e seus devidos ajustes quanto a elaboração da parte computacional necessária para aquisição e processamento das imagens.

O desenvolvimento da pesquisa aconteceu no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA) da Universidade Federal de Lavras. A seguir são apresentados o material utilizado e os procedimentos realizados.

- Itens usados na implementação do sistema:
 - a) Raspberry Pi 3 Modelo B, juntamente com os demais acessórios necessários para seu funcionamento e programação;
 - b) display Touchscreen 7" Raspberry Pi;
 - c) câmera Raspberry Pi v2 8MP;
 - d) módulo Laser Diode, vermelho (632 nm) e 3,5 mW;
 - e) notebook ACER Aspire F5-573-521B com processador Intel® Core™ i5-6200U (2,3 GHz até 2,8 GHz), memória de 8 GB DDR4, 3 portas USB e sistema operacional Windows 10 Home Single Language - 64 bits.

- Itens usados nos testes:
 - f) lamínulas de vidro (18 x 18 mm).
 - g) balança de precisão Marte modelo BL-320H, sensibilidade de 0,001 g;
 - h) esmalte cremoso para unhas, de cor vermelha;
 - i) corretivo branco a base de água;
 - j) sementes de soja (*Glycine max*)

Para a fixação da câmera Raspberry Pi foi desenvolvido um suporte em material plástico. Tal suporte é composto por 4 peças construídas por impressão 3D (FIGURA 4.2(a)) e que posteriormente foram unidas e presas a uma base de MDF (FIGURA 4.2(b)).

Figura 4.1 – Suporte da câmera.



Fonte: Do autor (2021)

4.1 Desenvolvimento do sistema

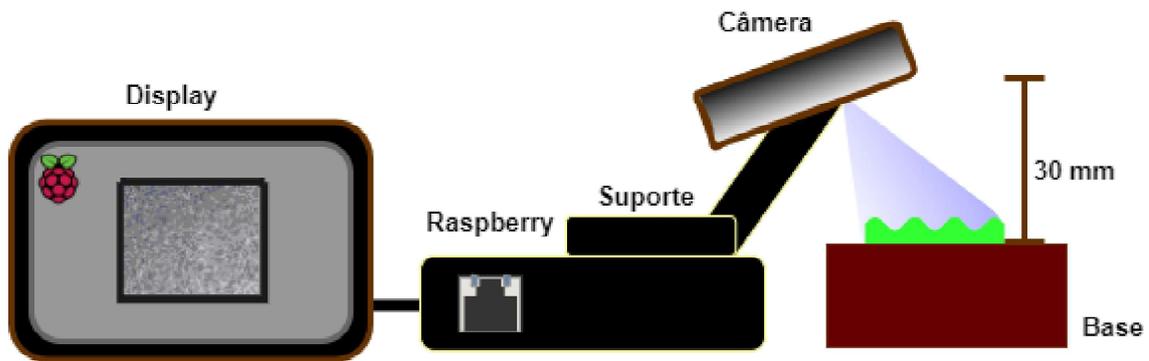
A parte de *software* do sistema proposto foi construída tendo como base o ambiente de desenvolvimento integrado Qt Creator. Essa ferramenta possibilita a criação de aplicações multiplataforma e de interfaces gráficas e possui como opção a programação em linguagem C++. As funcionalidades básicas do Qt Creator apresentam vantagens como distribuição gratuita e versões de código aberto, além de compatibilidade com outras bibliotecas. As bibliotecas complementares utilizadas no funcionamento da aplicação são:

- OpenCV: é uma biblioteca de código aberto que apresenta suporte para aplicações em linguagem C++ e que foi projetada para uma alta eficiência computacional com foco em aplicações de tempo real. Ela apresenta funções que englobam manipulação e processamento de imagens, podendo ser utilizada em implementações voltadas à visão de máquina, como identificação e rastreamento de objetos em vídeos, por exemplo.
- RaspCam: essa biblioteca permite o acesso a câmera Raspberry Pi, fornecendo o controle de suas funcionalidades e parâmetros, com a vantagem de poder ser usada em associação a biblioteca OpenCV. Ela possui código aberto e é disponibilizada por Salinas (2020) .
- BSL Tool Library: consiste num conjunto de funções desenvolvidas para o processamento de imagens de padrões speckle laser. O desenvolvimento dos códigos é voltado para o uso

nos *softwares* OCTAVE e MATLAB e apresenta rotinas que vão desde o carregamento e manipulação das imagens até a análise gráfica e numérica das mesmas.

Por sua vez, a configuração adotada para a montagem do sistema é representada pela Figura 3.1.

Figura 4.2 – Esquema do sistema proposto.



Fonte: Do autor (2021)

4.2 Ajuste da câmera e dos parâmetros de captura

O controle e ajuste dos parâmetros de funcionamento da câmera se fazem necessários para a devida aquisição dos padrões de speckle. Tais ajustes dependem das particularidades do sensor utilizado e dos comandos cuja manipulação é possível.

No caso da câmera Raspberry, o ajuste do foco apenas pode ser realizado fisicamente enquanto que os demais parâmetros são estipulados via *software*. Para estes, a configuração pode se dar de forma automática, de acordo com as condições da captura realizada e/ou a escolha de faixas de valores predefinidos, ou assumindo os valores fixados pelo usuário antes do início da aquisição. Foram avaliados e configurados os parâmetros: exposição da câmera, balanço de branco, sensibilidade ISO, velocidade do obturador.

4.3 Testes de funcionamento e validação do sistema

Os testes de funcionamento do sistema foram feitos de forma a se verificar tanto a capacidade de aquisição e processamento das imagens de padrões speckle quanto a conformidade das informações obtidas por meio delas. Para isso, buscou-se a realização de experimentos conhecidos na literatura, cuja associação ao SLD é comprovada. São eles:

4.3.1 Iluminação de superfície inerte

Em um primeiro momento, a análise de uma superfície inerte foi realizada para a verificação e controle das capturas. Uma folha de papel sulfite branca, colada sobre uma base de madeira do tipo MDF, foi iluminada a fim de se identificar a influência dos parâmetros de captura na qualidade das imagens capturadas. Nessa condição, entende-se que as variações observadas podem ser associadas aos níveis de ruído do equipamento.

As capturas para esta condição foram feitas a 15 FPS, formando conjuntos com 100 imagens cada um. Foram escolhidos

4.3.2 Teste de secagem de pintura

O teste de secagem é um meio conhecido de se verificar a efetividade das observações envolvendo o SLD, visto que apresenta níveis de atividade distintas ao longo do tempo e pode ser repetido facilmente. Diversas pesquisas apresentaram esse tipo de experimento como forma de validação e desenvolvimento da técnica.

Para a validação do sistema proposto foram realizados testes de dois tipos de produtos: esmalte para unhas de cor vermelha e corretivo líquido branco. Em cada repetição do experimento, uma camada homogênea do produto em questão foi aplicada sobre uma lamínula de vidro e esta iluminada pelo laser. Cerca de 1 minuto após a aplicação, iniciou-se a aquisição dos padrões speckle. As capturas foram feitas a 15 FPS, de forma a se obter sequências contendo 100 imagens cada uma. Alterando-se o intervalo entre as sequências pôde-se analisar cada aplicação de duas formas distintas, sendo elas:

- Início da secagem: Foram capturadas 40 sequências, com intervalo de 15 segundos entre elas, contemplando assim os 11 primeiros minutos da secagem. O procedimento foi repetido de forma a se obter 4 repetição para cada produto.
- Secagem completa: Após a aplicação do produto, foram capturadas sequências de imagens a cada minuto, totalizando 40 sequências. O mesmo número de repetições da condição anterior foi efetuado.

A fim de comparação também foi realizada a pesagem de um conjunto lâmina-produto após a aplicação. Durante o processo de secagem, os valores referentes à massa do conjunto foram anotados a cada 2 minutos durante 40 minutos.

4.3.3 Análise de sementes

Foram iluminadas sementes de soja viáveis e submetidas ao processo de germinação. Para isso, duas amostras foram selecionadas e colocadas em papel próprio para a germinação e umedecidas com água destilada. Em seguida, foram aclimatadas em uma câmara de germinação do tipo B.O.D (do inglês, *Biochemical Oxygen Demand*, à uma temperatura de 25°C, por um período de 16 horas. Após o período de germinação, o tegumento das sementes foi retirado e os cotilédones foram separados por meio de uma pequena incisão, de forma que o embrião permanecesse em uma das partes, a qual foi selecionada para a iluminação da sua parte interna.

Para a análise das sementes foram capturadas sequências compostas por duzentas imagens, a 15 FPS. Os conjuntos de imagens foram submetidos aos métodos de análise gráfica e numérica.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados o sistema proposto e os resultados dos ajustes da câmera, dos testes de captura e do processamento dos padrões armazenados.

5.1 Interface do sistema

A interface do sistema foi dividida em três seções, de acordo com as funcionalidades e tipos de processos envolvidos numa análise típica do BSL, sendo elas: "Preview", "Capture" e "Process". Elas foram alocadas numa mesma janela da aplicação e o acesso a elas pode ser alternado de acordo com o interesse do usuário.

5.1.1 Seção de pré-visualização

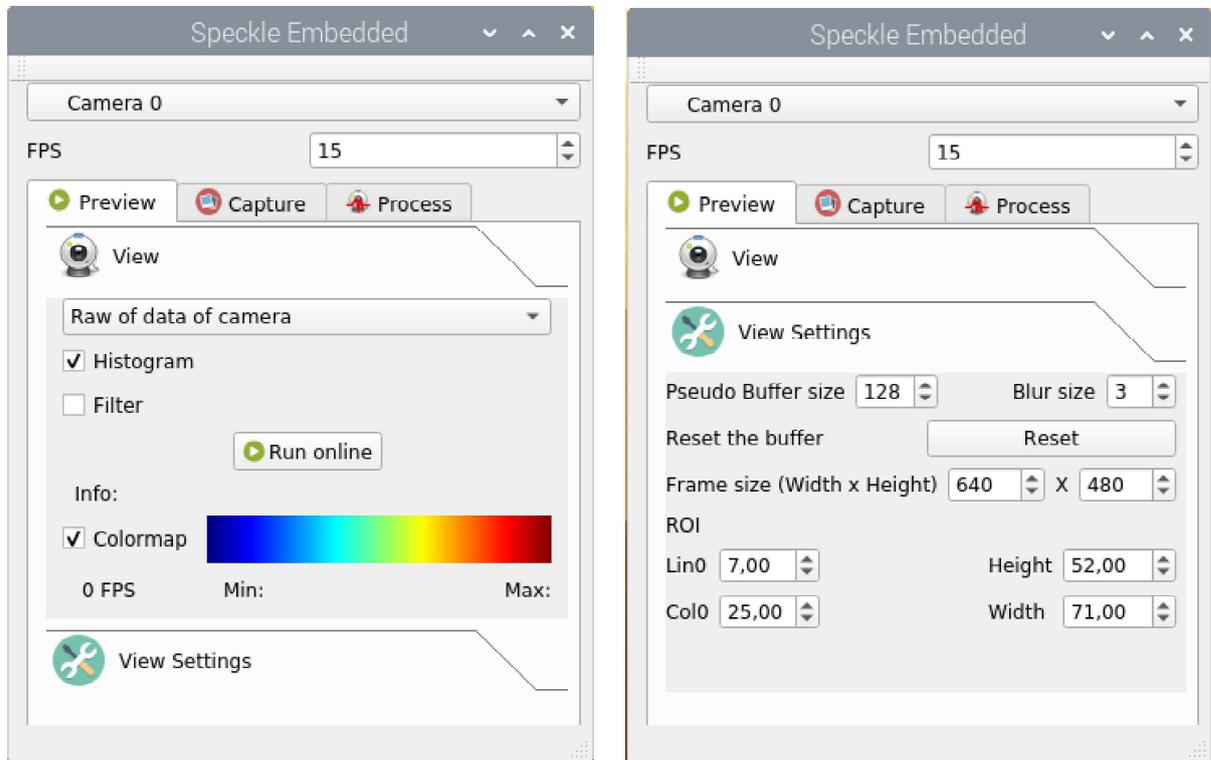
Esta seção, apresentada na Figura 5.1, representa a fase inicial de uma análise, permitindo ao usuário realizar os ajustes na câmera e ter uma visão prévia da amostra observada (FIGURA 5.1(a)), bem como as configurações para que as capturas sejam realizadas da melhor forma possível (FIGURA 5.1(b)).

Na parte superior da tela, é possível a entrada do valor referente à velocidade de atualização dos frames usados na visualização, indicando portanto o FPS (frames por segundo) da análise.

A caixa de seleção principal permite escolher o modo de visualização desejado, sendo que as opções são enumeradas a seguir. Apenas um deles pode ser selecionado por vez e a visualização é dada em uma janela independente.

- 1 - Rolo da câmera : Visualização normal em cores;
- 2 - Escala de cinza : Visualização em tons de cinza;
- 3 - Média da intensidade : Permite a visualização de um mapa em pseudo-cor da intensidade média dos pixels;
- 4 - Desvio Padrão: Como o anterior, apresenta o desvio padrão da intensidade dos pixels dos quadros capturados;
- 5 - AVD : Cria uma prévia do método gráfico AVD;

Figura 5.1 – Seção de pré-visualização.



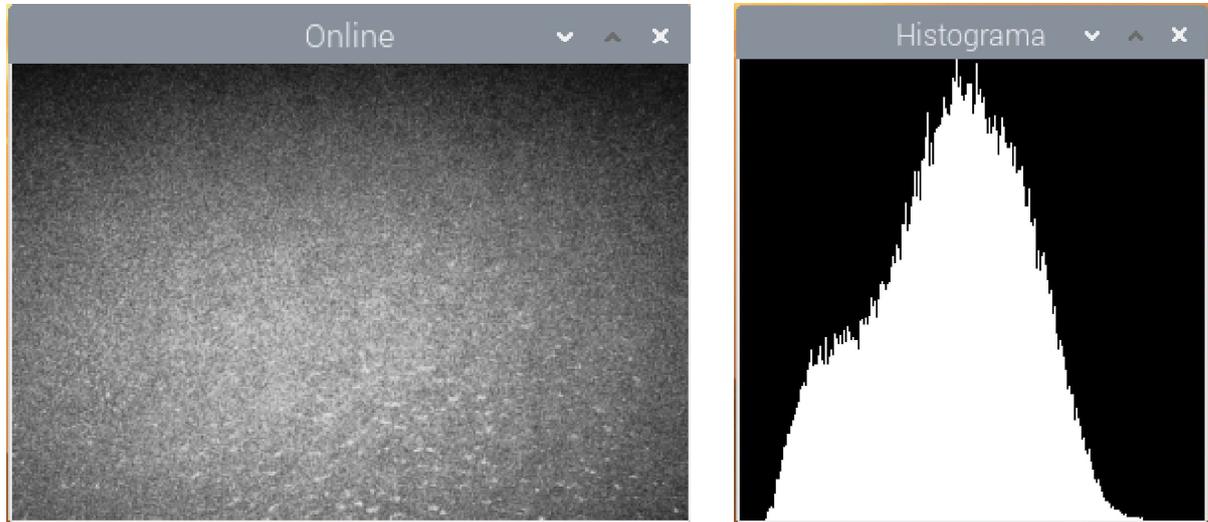
(a) Seleção do modo de visualização.

(b) Configurações da visualização.

Fonte: Do autor (2021)

Ainda no contexto dos modos de visualização, foram desenvolvidas ferramentas auxiliares para a análise. Para o modo de visualização em escala de cinza é possível gerar um gráfico do tipo histograma representando a distribuição dos níveis entre 0 e 255. A Figura 5.2 apresenta a visualização em tons de cinza de um padrão speckle obtido pela iluminação de uma superfície inerte e o seu respectivo histograma é mostrado na Figura 5.2(b).

Figura 5.2 – Visualização em tons de cinza e o seu respectivo histograma.



(a) Padrão speckle.

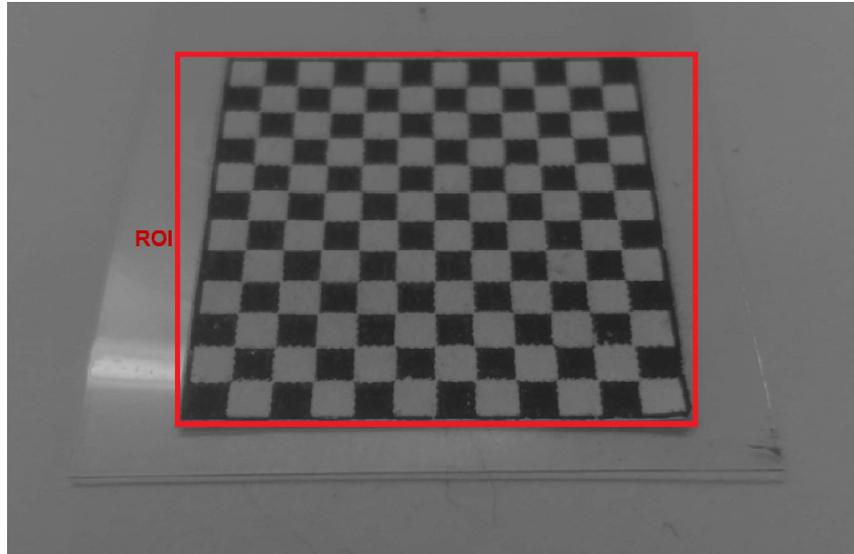
(b) Histograma gerado.

Fonte: Do autor (2021)

Outra opção é a aplicação de um filtro passa-baixa do tipo média para eventuais problemas com ruído durante a visualização. A definição das características desse filtro é realizada na segunda parte da seção ("View Settings"). Além dessa entrada, é possível definir também o pseudo-buffer a ser usado nos modos 3, 4 e 5, cujo valor representa o peso das alterações mais antigas perante aos novos quadros capturados. Para atualizar o processamento dos modos deve-se acionar o botão "Reset".

As dimensões do quadro capturado também podem ser definidas e ajustadas de forma a se delimitar apenas o objeto de interesse, ou ROI (do inglês, *Region of interest*), conforme ilustra a Figura 5.3. Esses ajustes podem ser aplicados durante a pré-visualização e, uma vez que tenham sido alterados, servirão também para definir as novas dimensões das imagens que venham a ser capturadas.

Figura 5.3 – Definição do ROI para ajuste da captura.

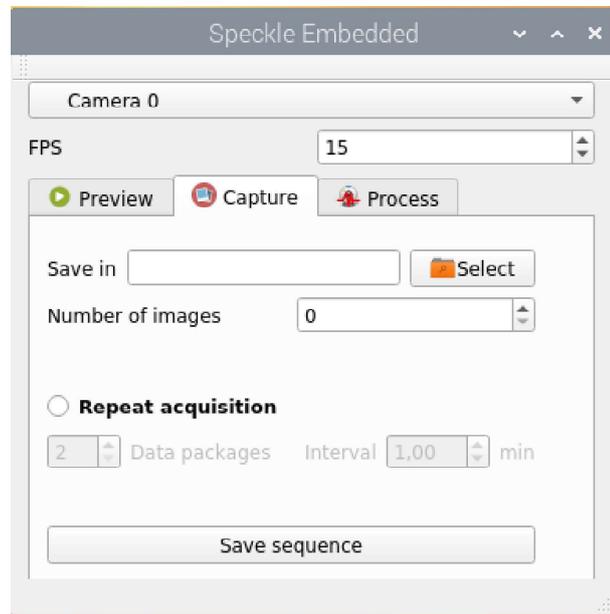


Fonte: Do autor (2021)

5.1.2 Seção de captura

Após os ajustes iniciais, a seleção da aba de captura (FIGURA 5.4) possibilita a escolha do diretório para o armazenamento e do número de imagens a serem salvas. O intervalo entre cada captura também é definido pelo valor definido na entrada FPS. Caso se deseje obter novos conjuntos de imagens a espaços de tempo definidos, é dada ao usuário a opção de que o sistema repita a operação automaticamente.

Figura 5.4 – Tela da aba de captura .



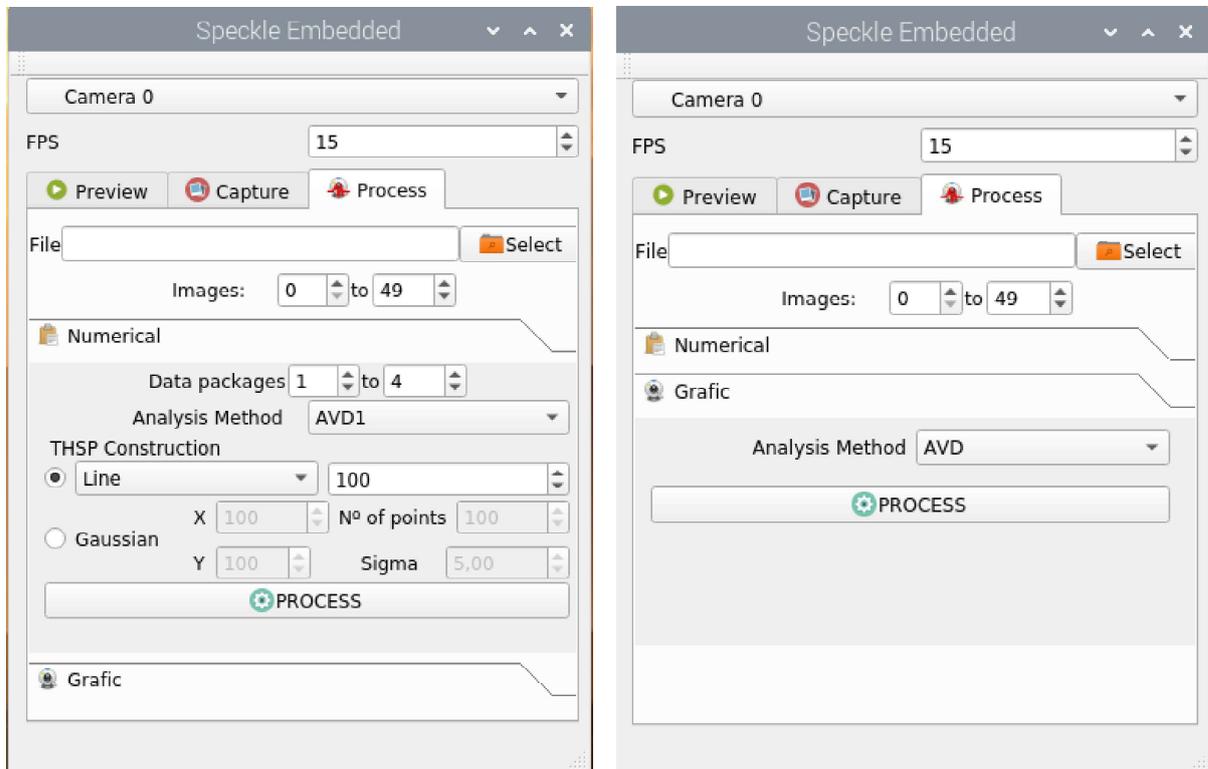
Fonte: Do autor (2021)

Após a captura, as imagens são armazenadas em uma nova pasta criada no diretório indicado. Cada imagem é salva em formato bitmap (.bmp), recebendo como identificação apenas o número a que se referem dentro da sequência de capturas. Para o caso de repetição do processo, as novas pastas também são numeradas em ordem crescente.

5.1.3 Seção de processamento

De posse das imagens capturadas, a etapa de processamento pode ser realizada na aba "Process"(FIGURA 5.5). Nela o usuário deve indicar o diretório onde estão armazenadas as imagens, bem como a identificação das imagens que se deseja analisar. Foram desenvolvidas rotinas que permitem realizar os métodos numéricos e gráficos de forma independente, sendo que todos tem como base a biblioteca BSL Library Tools.

Figura 5.5 – Seção de processamento.



(a) Seleção do método numérico.

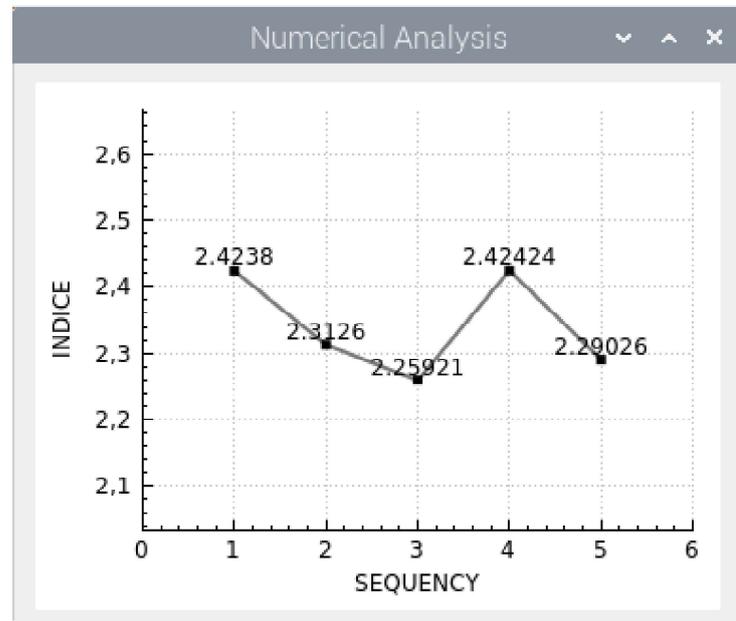
(b) Seleção do método gráfico.

Fonte: Do autor (2021)

Para a análise numérica, é permitida a escolha de uma ou mais sequências para serem analisadas de uma só vez. Após indicar o método de análise desejado e os arquivos a serem utilizados, o usuário deve estabelecer a forma de construção da matriz THSP, sendo por meio do uso de uma linha ou coluna de cada imagem, ou ainda a partir de um conjunto de pixels selecionados randomicamente ao redor de um ponto específico, considerando uma distribuição gaussiana com desvio padrão definido.

A apresentação do resultado se dá na forma de um plano cartesiano, onde o valor calculado é dado pelo eixo das ordenadas e o índice do pacote de imagens no eixo das abscissas. A Figura 5.6 ilustra o resultado de uma análise realizada em cinco conjuntos de imagens obtidas pela iluminação de uma superfície inerte. Foi utilizado o método AVD1 para os cálculos, e a construção da matriz THSP foi realizada pela amostragem da linha da número 100 em cada uma das imagens.

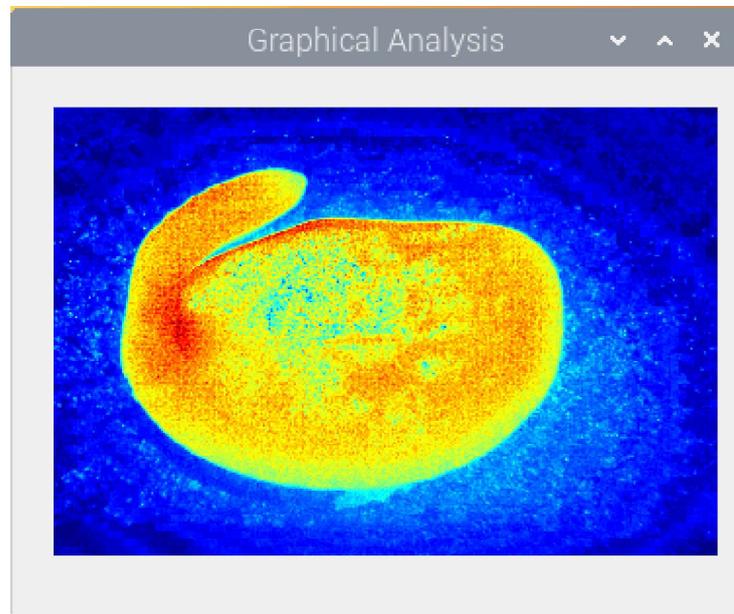
Figura 5.6 – Tela do resultado numérico.



Fonte: Do autor (2021)

Já a análise gráfica necessita apenas da escolha do método para o processamento. O resultado dessa análise é apresentado em uma janela independente, na qual é mostrado o mapa em pseudo-cores calculado com base no método escolhido. A Figura 5.7 apresenta o resultado da análise pelo método GAVD aplicado a um conjunto de imagens obtidas pela iluminação de uma semente de soja.

Figura 5.7 – Tela do resultado gráfico .



Fonte: Do autor (2021)

5.2 Testes da captura

Os testes de captura realizados foram feitos com o intuito de avaliar o funcionamento da câmera, identificando sua capacidade e limitações como sensor dos fenômenos associados ao SLD. A seguir são apresentados os resultados dos testes realizados.

5.2.1 Iluminação de superfície inerte

Os testes envolvendo a iluminação de uma superfície inerte buscaram identificar as possíveis variações causadas por ruído mecânico da câmera e a margem de referência para os valores dos índices calculados em uma análise típica.

A Tabela 5.1 apresenta informações estatísticas sobre as capturas obtidas para o teste mencionado. Nela são indicados os valores médios para análise numérica usando o índice AVD. As capturas foram feitas alterando-se as dimensões dos frames capturados e conseqüentemente o tamanho das imagens processadas.

Pelos valores apresentados na Tabela 5.1 é possível perceber que o índice AVD médio calculado sofre alterações ao se aumentar a resolução das imagens capturadas. Por sua vez, nas análises das imagens de mesmas dimensões, a variância e desvio padrão encontrados são relativamente baixos, significando uma estabilidade na resposta numérica avaliada.

Tabela 5.1 – Testes de iluminação de superfície inerte

Resolução(Pixels)	ROI(Pixels)	AVD Médio	Variância	Desvio Padrão
480x640	340x232	2,42995	0,13223	0,01748
720x960	511x348	3,3885	0,15268	0,02331
960x1280	681x464	3,85213	0,13528	0,01830

Fonte: Do autor(2021)

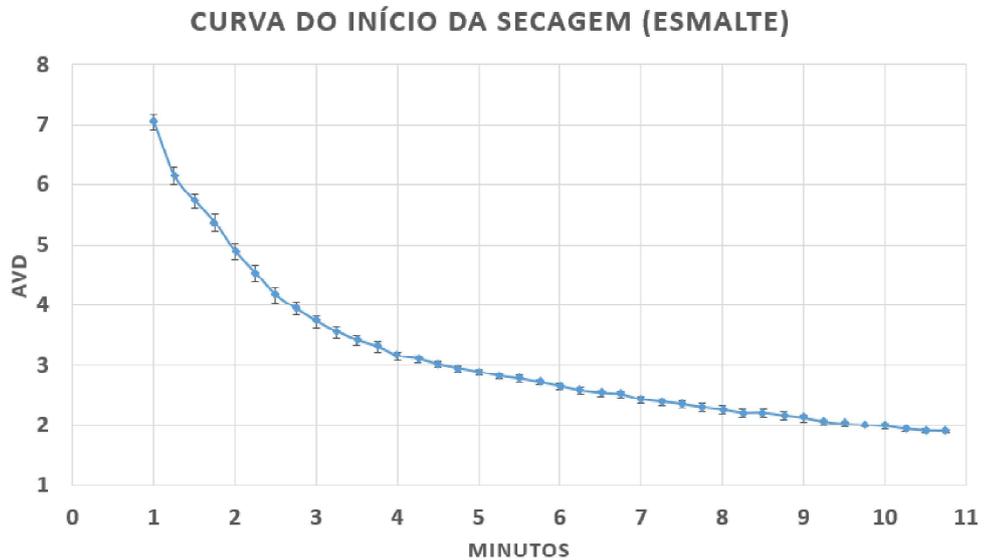
5.2.2 Secagem de pintura

Os testes de secagem de pintura foram realizados utilizando dois produtos distintos. A seguir são apresentados os resultados obtidos na análise das imagens capturadas após a aplicação do esmalte para unhas e do corretivo.

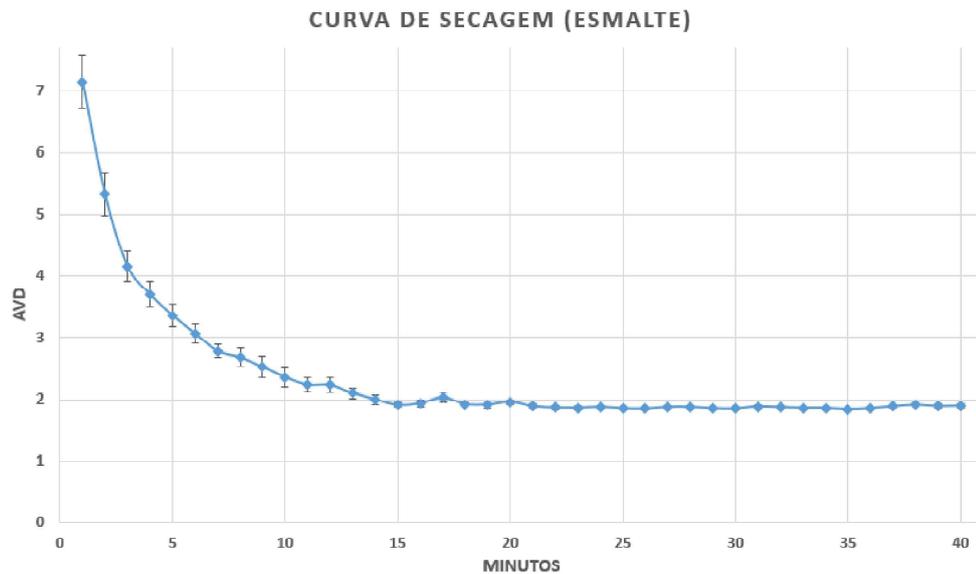
- Secagem do esmalte para unhas:

A Figura 5.8 apresenta os gráficos obtidos pela análise numérica dos conjuntos de imagens capturadas ao longo do tempo após a aplicação do produto em uma lâmina de vidro. O gráfico da Figura 5.8(a) mostra uma representação da curva de secagem construída pelos valores médios do índice AVD para cada um dos pacotes de imagens adquiridos na parte inicial do processo de secagem do esmalte. Já a Figura 5.8(b) representa o processo de secagem completo. Para cada ponto dos gráficos é apresentada uma barra de erro padrão, informando assim o desvio padrão percebido entre as quatro réplicas de cada análise.

Figura 5.8 – Teste de secagem do esmalte.



(a) Curva do início da secagem do esmalte.



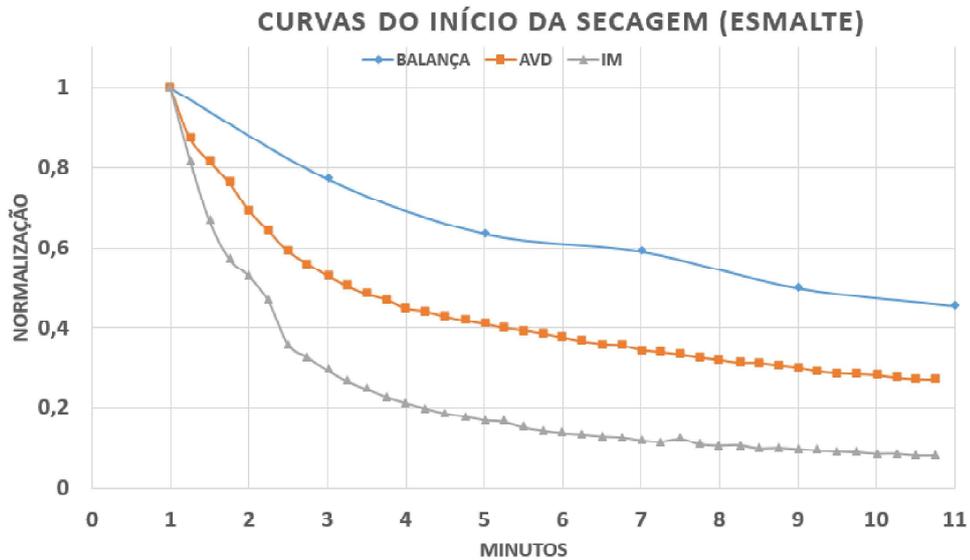
(b) Curva da secagem completa do esmalte.

Fonte: Do autor (2021)

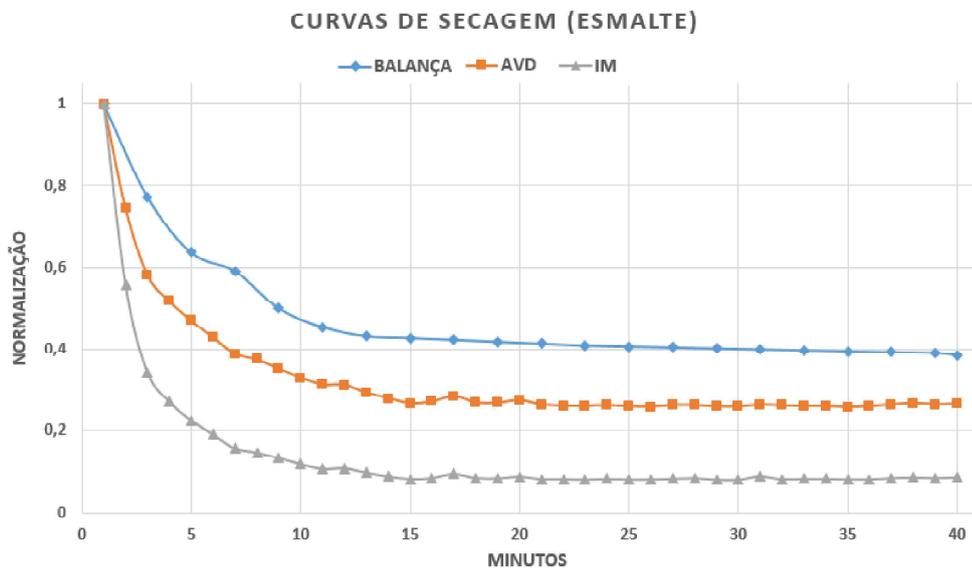
Conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 5.8, os valores obtidos para a curva de secagem do esmalte apresentaram um comportamento condizente com o que se espera para este tipo de experimento. A diminuição do índice calculado ao longo do tempo pode ser associada aos processos envolvidos. Para a confirmação da tendência observada, a comparação com curvas de secagem provenientes de um teste de gravimetria é apresentada na Figura 5.9. Além do método numérico AVD, o método de segunda ordem Inertia Moment (IM) também foi

usado para gerar uma nova curva de secagem. As três curvas foram normalizadas a fim permitir a comparação.

Figura 5.9 – Comparação gravimetria x SLD.



(a) Comparação do início da secagem do esmalte.



(b) Comparação das curvas de secagem completa do esmalte.

Fonte: Do autor (2021)

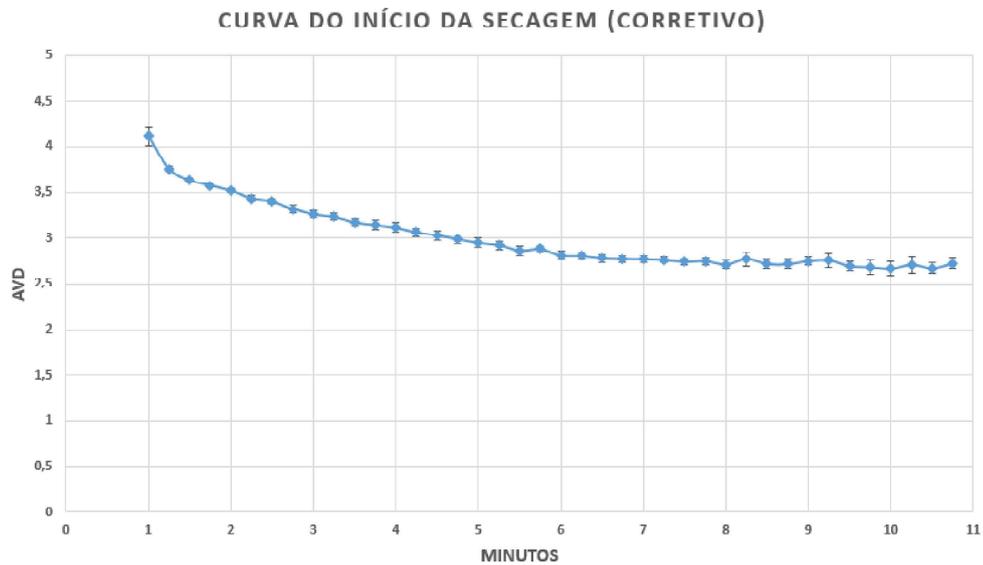
Percebe-se pelas curvas mostradas na Figura 5.9, que as análises provenientes das capturas fornecem resultados que podem ser associados à diminuição da massa do conjunto lamínula-esmalte ao longo do tempo. Embora os valores normalizados das curvas apresentem variações dis-

tintas, a tendência de diminuição percebida nos primeiros minutos da secagem e a estabilização ao fim da mesma comprovam a relação entre o fenômeno observado e as imagens capturadas.

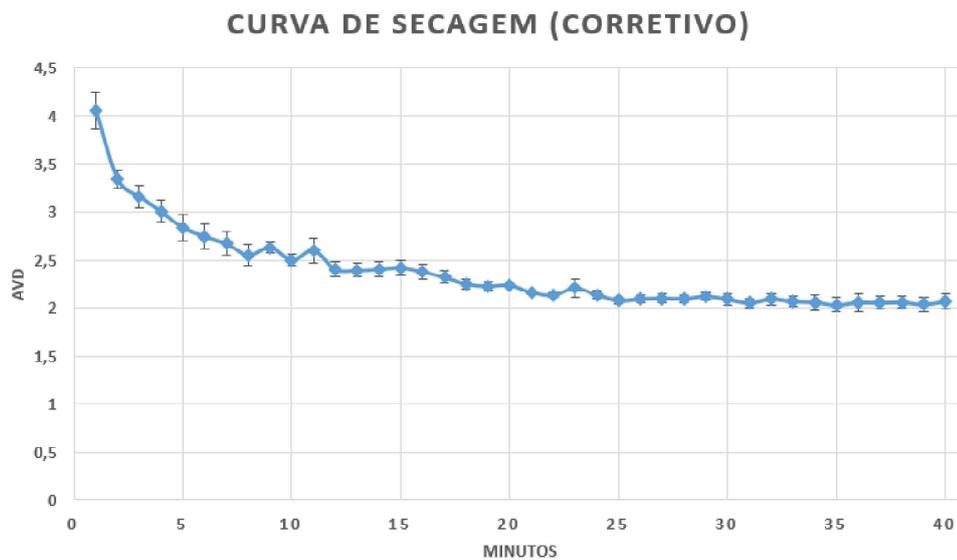
- Secagem do corretivo a base de água:

De forma semelhante aos resultados apresentados para a secagem de esmalte, a Figura 5.10 representa as análises obtidas pelas capturas durante a secagem do corretivo.

Figura 5.10 – Teste de secagem do corretivo.



(a) Curva do início da secagem do corretivo.

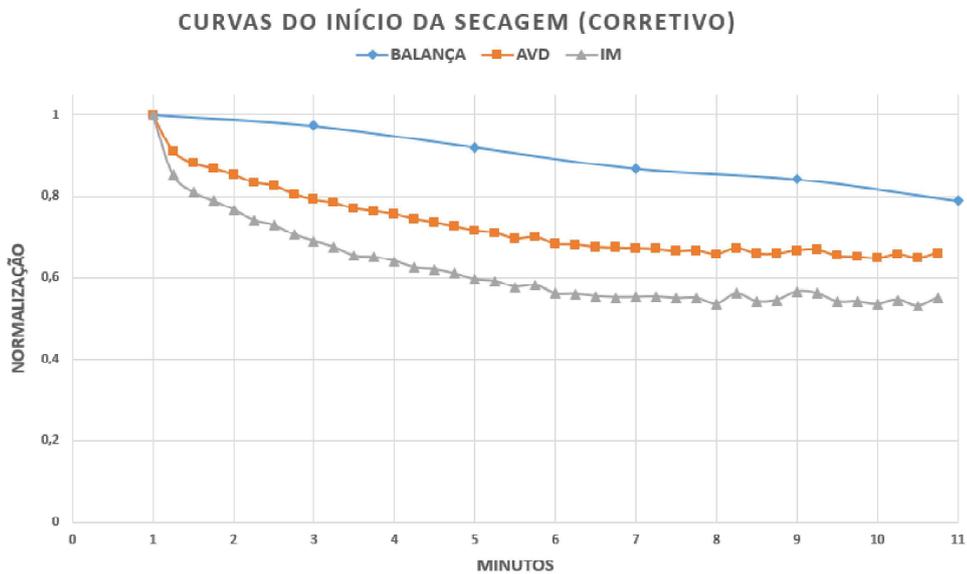


(b) Curva da secagem completa do corretivo .

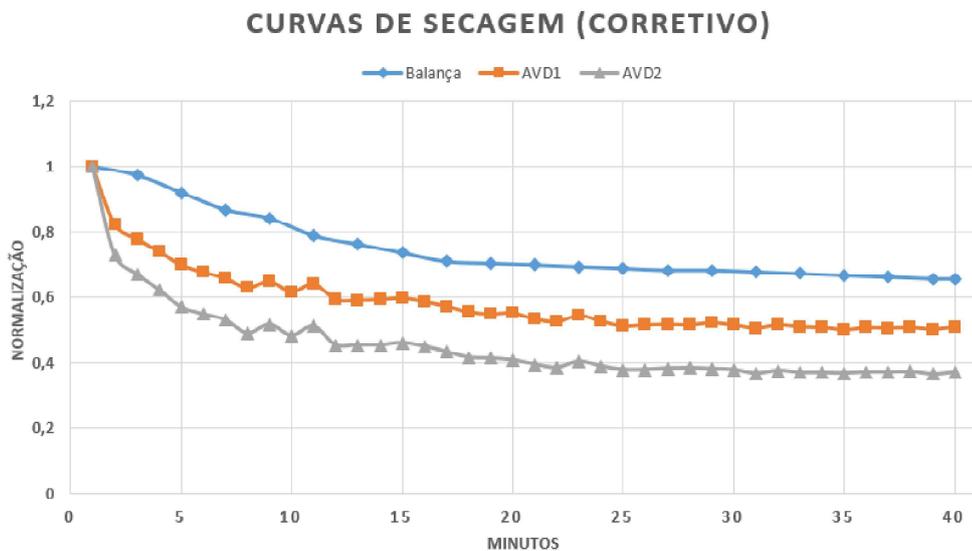
Fonte: Do autor (2021)

Para a secagem do corretivo, a análise usando o índice AVD também foi capaz de representar o processo de diminuição da atividade ao longo do tempo. Diferentemente da reposta obtida na secagem do esmalte, para este caso, a variação entre os valores dados para os primeiros instantes e aqueles observados ao final da análise foi menor. De forma a comparar esse resultado com o processo de secagem do corretivo observado pela variação de massa do conjunto a Figura 5.11 é apresentada.

Figura 5.11 – Comparação gravimetria x SLD.



(a) Comparação do início da secagem do corretivo.



(b) Comparação das curvas de secagem completa do corretivo.

Fonte: Do autor (2021)

A comparação das curvas de secagem do corretivo mostra o comportamento mais lento do processo visto na análise gravimétrica. Em termos qualitativos, os índices AVD e IM foram capazes de representar a tendência da variação ao longo do tempo.

5.3 Testes de processamento

Uma vez que a validação das capturas tenha sido realizada, os testes seguintes tiveram o objetivo de avaliar os resultados do processamento das imagens utilizando o sistema proposto. A presente seção contempla tanto a resposta direta dos processos disponíveis quanto uma análise do tempo gasto na computação dos mesmos.

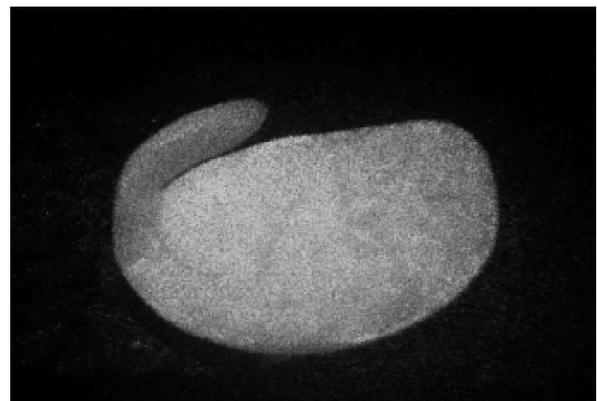
5.3.1 Análise de sementes

Os métodos gráficos de análise foram testados pelo processamento das imagens obtidas na iluminação das sementes de soja. A imagem de uma amostra preparada para a iluminação e o padrão capturado durante a análise são exemplificados na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Amostra de semente de soja germinada.



(a) Amostra preparada para a iluminação.

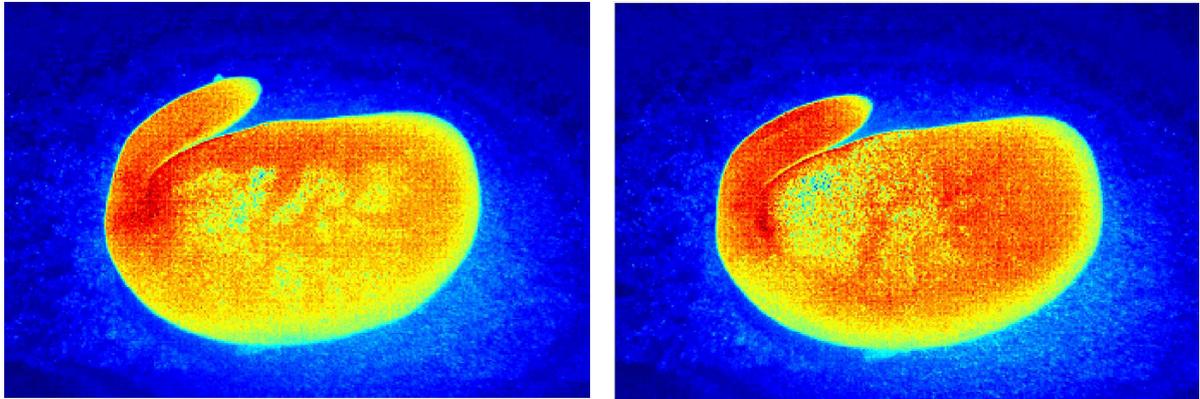


(b) Padrão obtido durante a análise.

Fonte: Do autor (2021)

A seguir são apresentados os mapas de atividade em pseudo-cor de duas amostras distintas, sendo que foram utilizados os métodos GAVD (FIGURA 5.13), SD (FIGURA 5.14) e Fujii (FIGURA 5.15) para o processamento das imagens.

Figura 5.13 – Método GAVD.

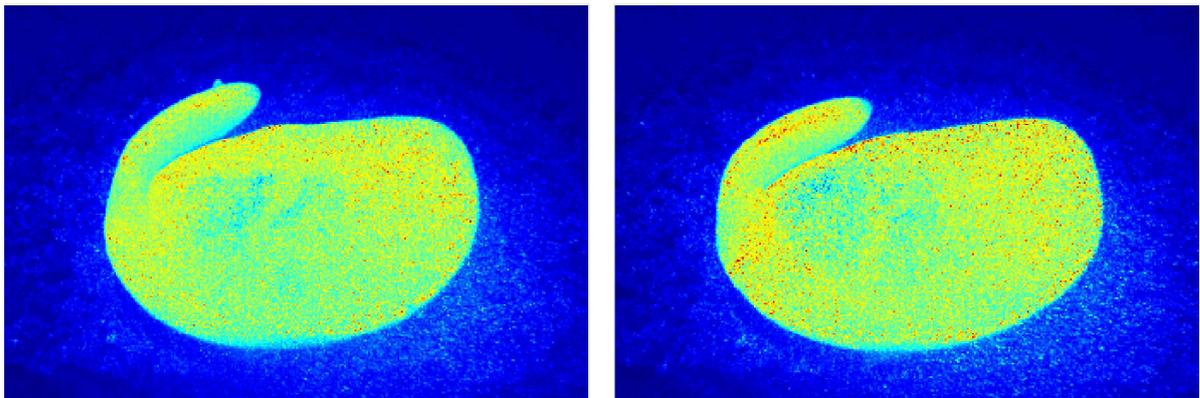


(a) Amostra 1.

(b) Amostra 2.

Fonte: Do autor (2021)

Figura 5.14 – Método SD.

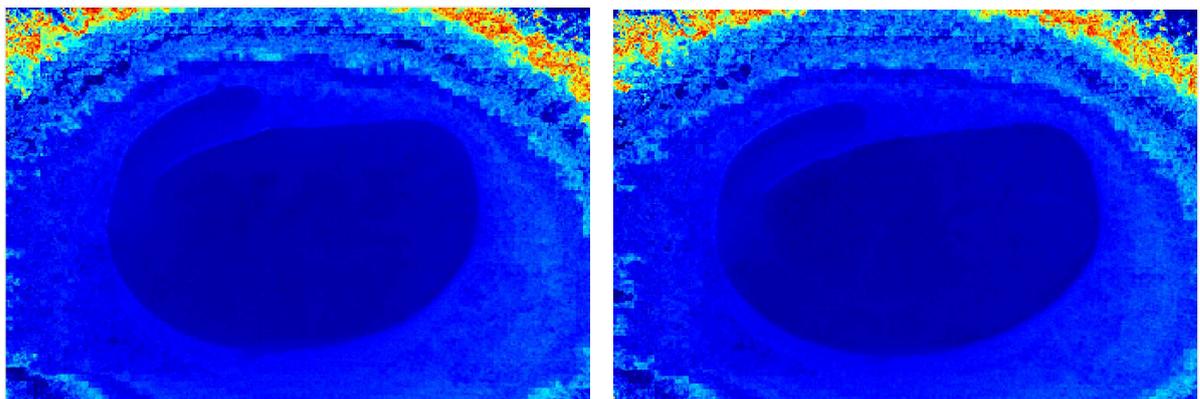


(a) Amostra 1.

(b) Amostra 2.

Fonte: Do autor (2021)

Figura 5.15 – Método FUJII.



(a) Amostra 1.

(b) Amostra 2.

Fonte: Do autor (2021)

Dentre os métodos apresentados, o Método GAVD foi o que apresentou um resultado mais satisfatório, sendo capaz de representar diferentes níveis de atividade na estrutura e destacando principalmente a parte referente à base do embrião e o próprio embrião.

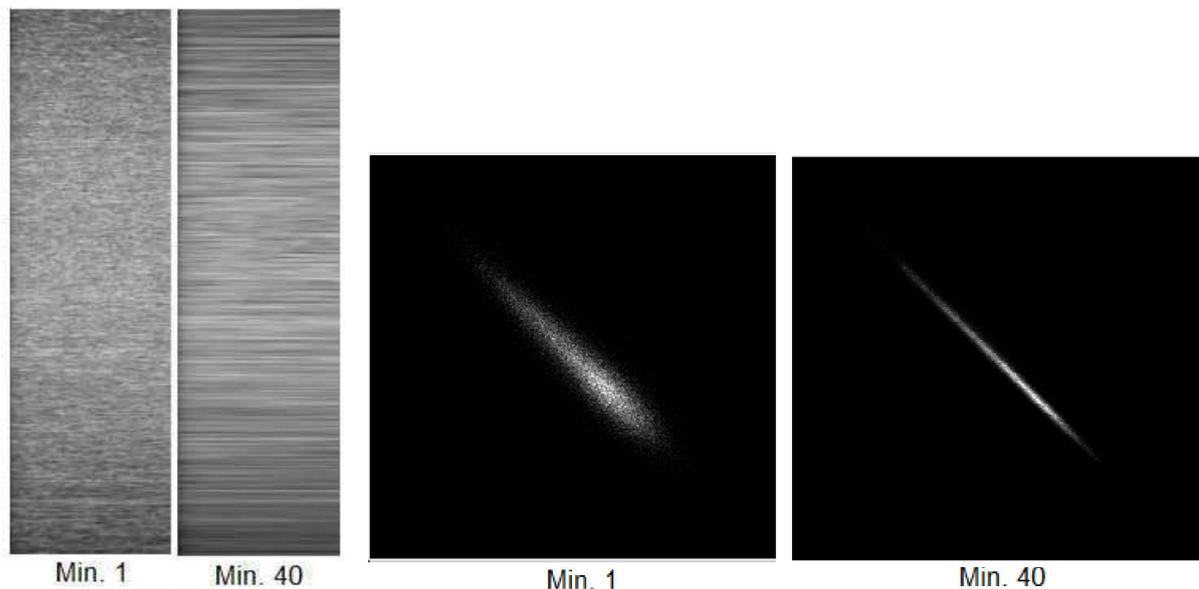
Por sua vez, o método SD gerou resultados menos representativos e com pouca definição, ainda que tenha sido capaz de diferenciar a amostra da base onde foi apoiada.

Com um desempenho pouco significativo para o experimento desenvolvido, o Método Fujji não foi capaz de representar a atividade na semente, evidenciando apenas o ruído presente nas capturas.

5.3.2 Análise numérica

Utilizando-se as mesmas imagens dos testes de secagem de pintura, foram realizados alguns dos métodos numéricos desenvolvidos. A Figura 5.16 mostra as etapas intermediárias do processo de cálculo. São representados nela os pacotes de imagens referentes ao início e ao fim da secagem, sendo que, de cada imagem, uma linha foi amostrada.

Figura 5.16 – Etapas da análise numérica .



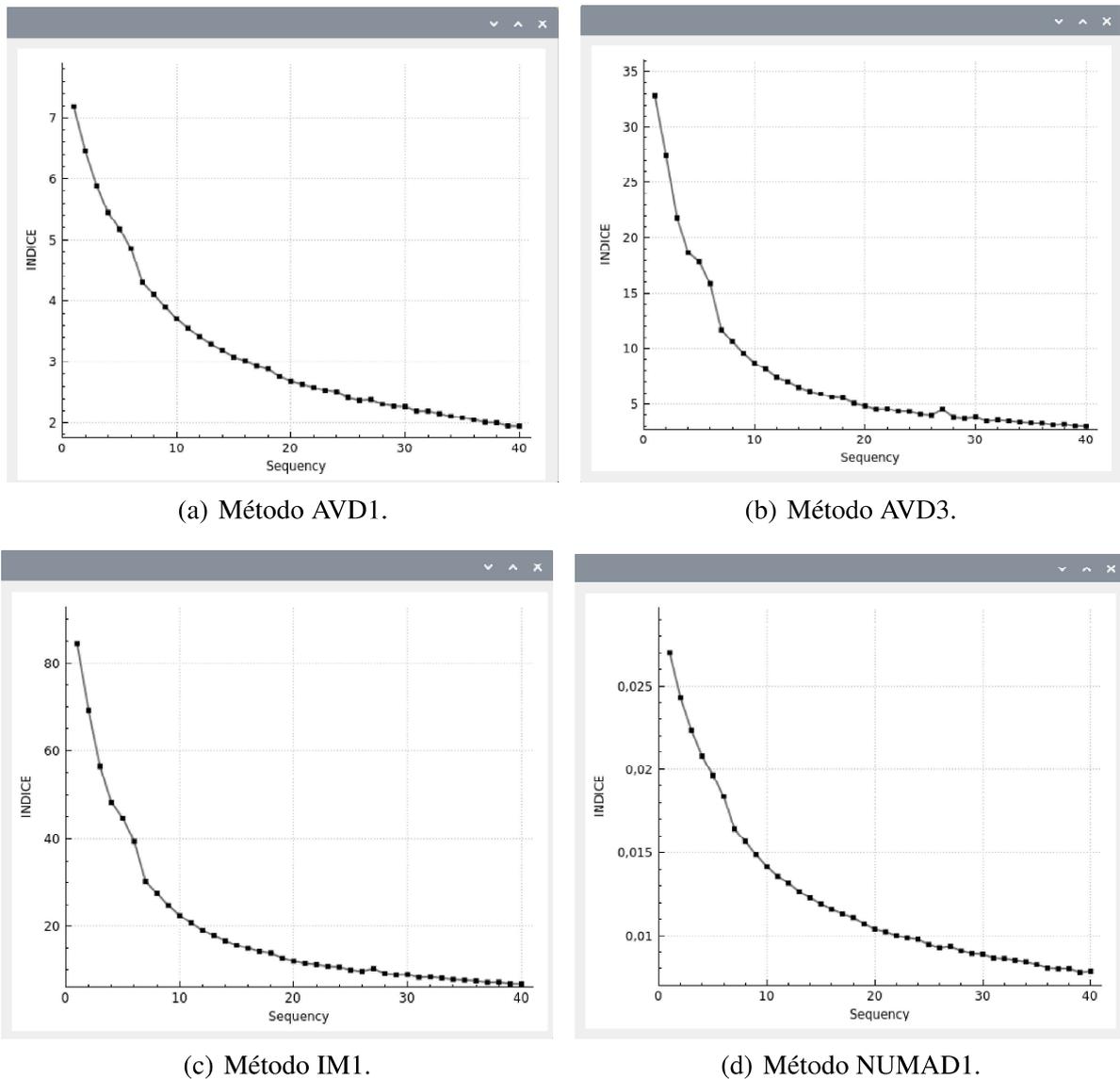
(a) Matriz THSP (Início e fim da secagem).

(b) Matriz de Coocorrência (Início e fim da secagem).

Fonte: Do autor (2021)

O resultado final da análise numérica do processo de secagem do esmalte é apresentado na Figura 5.17. O conjunto de imagens selecionado foi usado para o processamento de três métodos distintos, sendo eles AVD, IM e NUMAD.

Figura 5.17 – Métodos de análise numérica.

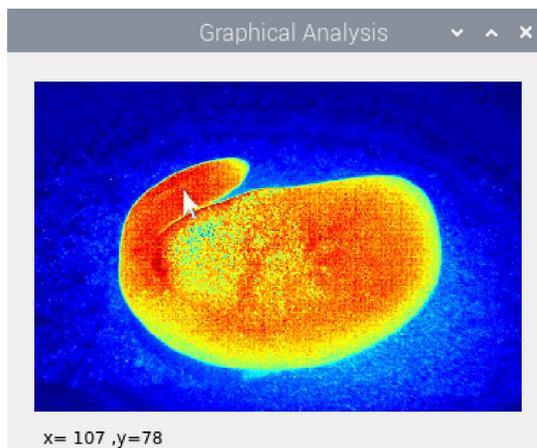


Fonte: Do autor (2021)

Como se vê na Figura 5.17, os métodos numéricos executados conseguem traduzir o processo de secagem de pintura ao longo do tempo, apresentando a tendência de diminuição dos seus valores após a aplicação. Por causa das particularidades de cálculo de cada um dos métodos, as curvas obtidas se diferenciam pelas escalas dos valores encontrados e pelas suas inclinações de decaimento e estabilização.

Outra questão relacionada à análise numérica é a escolha de um ponto de referência nas imagens capturadas, em torno do qual se faz a amostragem de um número definido de pixels para a construção da matriz THSP. A Figura 5.18 exemplifica esse procedimento de escolha de uma área específica na análise de uma semente de soja. A partir do mapa de atividade obtido pelo método gráfico GAVD (FIGURA 5.18(a)), as coordenadas de um ponto de interesse foram identificadas. De acordo com área definida pelo usuário e a quantidade de pixels a serem amostrados (FIGURA 5.18(b)), uma resposta numérica é obtida (FIGURA 5.18(c)), podendo ser associada à atividade relativa no local observado.

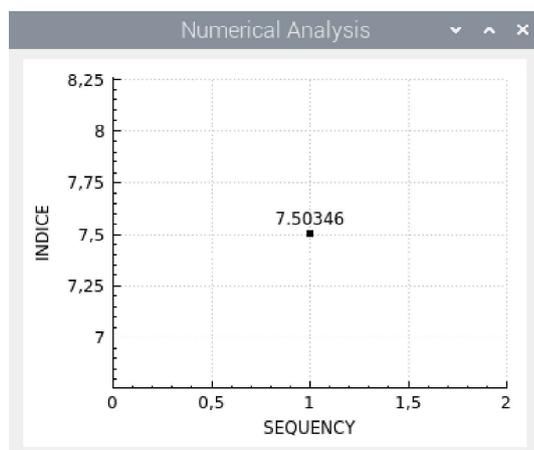
Figura 5.18 – Análise numérica pontual.



(a) Janela com resultado do processamento gráfico.



(b) Distribuição dos pontos selecionados.



(c) Resultado numérico do processamento.

Fonte: Do autor (2021)

5.3.3 Tempo de processamento

O desempenho do sistema foi avaliado no quesito tempo de processamento das imagens. A Tabela 5.2 apresenta uma relação do tempo gasto para a obtenção dos mapas de atividade pelos métodos gráficos desenvolvidos, de acordo com as dimensões das capturas.

Tabela 5.2 – Tempo de processamento nos métodos gráficos

Frame	ROI	Método	Nº de imagens	Tempo (s)
640x480	340x232	Grafic AVD	200	3,13
640x480	340x232	Stardard Deviation	200	3,88
640x480	340x232	Fujii	200	4,58
960x720	511x348	Grafic AVD	200	5,67
960x720	511x348	Stardard Deviation	200	7,71
960x720	511x348	Fujii	200	9,37
1280x960	681x484	Grafic AVD	200	23,27
1280x960	681x484	Stardard Deviation	200	27,7
1280x960	681x484	Fujii	200	30,42

Fonte: Do autor(2021)

Conforme a Tabela 5.2, a resposta de execução dos métodos gráficos apresenta dependência direta com as dimensões dos frames processados. Além disso, mesmo para as imagens com maior resolução, o sistema permite a obtenção dos mapas de atividade num espaço de tempo relativamente curto.

Já os métodos numéricos possuem um processamento ainda mais ágil, uma vez que são realizados pela amostragem dos padrões capturados. Entre os métodos numéricos desenvolvidos, apesar de possuírem fórmulas de cálculo distintas, poucas diferenças foram percebidas quanto ao tempo necessário para o processamento de cada um. Buscou-se avaliar então o desempenho para esse tipo de análise variando-se a quantidade de pixels amostrados e o número de imagens utilizadas para a construção da matriz THSP. Os resultados obtidos para os casos avaliados são dados na Tabela 5.3

Tabela 5.3 – Tempo de processamento nos métodos numéricos.

Pixels	Nº de imagens	Tempo (s)
680	200	1,32
680	400	2,66
960	200	3,26
960	400	4,36
1280	200	5,03
1280	400	8,76

Fonte: Do autor(2021)

6 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida apresentou a proposta de um sistema embarcado para análises do fenômeno *biospeckle* laser. Além do *hardware* com dimensões reduzidas, o sistema possui uma interface que permite ao usuário realizar as observações iniciais, as capturas e o processamento das mesmas por meio dos métodos gráficos e numéricos.

A plataforma utilizada foi avaliada quanto a sua capacidade de captura e de processamento das imagens obtidas durante os testes realizados, sendo que estes envolveram a iluminação de superfície inerte, secagem de pintura e análise de sementes. Os resultados alcançados atestam a viabilidade de uso do sistema em aplicações de natureza semelhante.

Devido à grande variedade de áreas onde o BSL pode ser usado e das suas possíveis configurações, a ferramenta foi desenvolvida de forma a permitir adaptações para atender as necessidades de cada uso. O ajuste fino dos parâmetros da câmera depende das características de cada objeto de estudo e da iluminação do laser.

6.1 Otimização e trabalhos futuros

Alguns seguimentos para próximas pesquisas são dados a seguir:

- Otimização da interface: A entrada de dados e de comandos da interface pode ser melhorada e adaptada para fornecer resultados específicos e/ou comparações entre as análises.
- Melhoria nas aquisições: Durante a realização da pesquisa, nenhuma lente ou aparato adicional foi utilizado. Para aplicações onde se necessite de capturas com maior nível de detalhamento e com ajuste de foco, a adição de lentes macros ou outros dispositivos semelhantes pode contribuir para a melhoria do sistema.
- Testes em campo: Embora não tenham sido realizados testes fora do ambiente laboratorial, entende-se que o sistema proposto pode ser utilizado em aplicações nos mais diversos ambientes, desde de que não haja interferências externas durante as análises.

REFERÊNCIAS

- AIZU, Y.; ASAKURA, T. Biospeckle phenomena and their applications to blood-flow measurements. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Time-Resolved Spectroscopy and Imaging of Tissues**. [S.l.], 1991. v. 1431, p. 239–250.
- AIZU, Y. et al. Measurements of retinal blood flow using biospeckles: experiments with glass capillaries and in the normal human retina. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Optical Diagnostics of Living Cells and Biofluids**. [S.l.], 1996. v. 2678, p. 360–371.
- AREFI, A. et al. Non-destructive identification of mealy apples using biospeckle imaging. **Postharvest Biology and Technology**, Elsevier, v. 112, p. 266–276, 2016.
- ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 163–169, 1999.
- BLOTTA, E. et al. Evaluation of speckle-interferometry descriptors to measuring drying-of-coatings. **Signal Processing**, Elsevier, v. 91, n. 10, p. 2395–2403, 2011.
- BRAGA, R. et al. Biospeckle numerical values over spectral image maps of activity. **Optics Communications**, Elsevier, v. 285, n. 5, p. 553–561, 2012.
- BRAGA, R. et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. **Optics Communications**, Elsevier, v. 284, n. 2, p. 646–650, 2011.
- BRAGA, R.; RIVERA, F.; MOREIRA, J. A practical guide to biospeckle laser analysis: Theory and software. **Lavras: Editora UFLA**, 2016.
- BRAGA, R. A. When noise became information: State-of-the-art in biospeckle laser. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 41, n. 4, p. 359–366, 07 2017. ISSN 1413-7054. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542017000400359&nrm=iso>.
- BRAGA, R. A. et al. Live biospeckle laser imaging of root tissues. **European biophysics journal**, Springer, v. 38, n. 5, p. 679–686, 2009.
- CATALANO, M. D.; RIVERA, F. P.; BRAGA, R. A. Viability of biospeckle laser in mobile devices. **Optik**, Elsevier, v. 183, p. 897–905, 2019.
- CHAVES, M. J. Desenvolvimento de uma metodologia para análise do biospeckle laser com portabilidade, acessibilidade e robustez. 2011.
- CHOMKOKARD, S.; JINUNTUYA, N.; WONGKOKUA, W. Development of measurement system for gauge block interferometer. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2017. v. 901, n. 1, p. 012064.
- FRACAROLLI, J. A. Utilização do biospeckle laser na avaliação do potencial germinativo de sementes de ipê-roxo (tabebuia heptaphylla)(vellozo) toledo. Tese Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas-UNICAMP. Universidade de Campinas-UNICAMP, Campinas-SP, 2011.

- FUJII, H. et al. Blood flow observed by time-varying laser speckle. **Optics letters**, Optical Society of America, v. 10, n. 3, p. 104–106, 1985.
- GODINHO, R. et al. Online biospeckle assessment without loss of definition and resolution by motion history image. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 50, n. 3, p. 366–372, 2012.
- GOMES, J. E. S. et al. Avaliação da estabilidade e desenvolvimento de um sistema portátil de alimentação para um laser aplicado em análises biospeckle laser em processos agropecuários. In: XLVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2018, BRASÍLIA - DF. **A produção do Conhecimento nas Ciências Agrárias e Ambientais**. Ponta Grossa (PR): Atena, 2018.
- GONZÁLEZ-PEÑA, R. J. et al. Monitoring of the action of drugs in melanoma cells by dynamic laser speckle. **Journal of biomedical optics**, International Society for Optics and Photonics, v. 19, n. 5, p. 057008, 2014.
- GONZÁLEZ-PEÑA, R. J.; BRAGA, R. A.; PUJAICO-RIVERA, F. Diode laser reliability in dynamic laser speckle application: Stability and signal to noise ratio. **Optics & Laser Technology**, Elsevier, v. 108, p. 279–286, 2018.
- GRASSI, H. C. et al. Quantitative laser biospeckle method for the evaluation of the activity of trypanosoma cruzi using vdr1 plates and digital analysis. **PLOS neglected tropical diseases**, Public Library of Science, v. 10, n. 12, 2016.
- HANISCH, E. et al. Instrumental de bajo costo para análisis de procesos dinámicos con técnicas speckle optodigitales. In: **III Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 2015)**. [S.l.: s.n.], 2015.
- JOHNSTON, S. J.; COX, S. J. The raspberry pi: A technology disrupter, and the enabler of dreams. **Electronics**, v. 6, n. 3, 2017. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/6/3/51>>.
- KUMARI, S.; NIRALA, A. Biospeckle technique for the non-destructive differentiation of bruised and fresh regions of an indian apple using intensity-based algorithms. **Laser Physics**, IOP Publishing, v. 26, n. 11, p. 115601, 2016.
- KUMARI, S.; NIRALA, A. K. Monitoring of functional blood flow on human hand due to effect of different treatments by laser biospeckle imaging. **Lasers in medical science**, Springer, p. 1–10, 2019.
- MAKSYMENKO, O. P.; MURAVSKY, L. I.; BEREZYUK, M. I. Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue. **Journal of biomedical optics**, International Society for Optics and Photonics, v. 20, n. 9, p. 095006, 2015.
- MISHRA, V. et al. Development of low-cost embedded vision system with a case study on 1d barcode detection. In: **Information and Communication Technology for Intelligent Systems**. [S.l.]: Springer, 2019. p. 505–513.

- MOURA, M. et al. Biospeckle as tool auxiliary in evaluation dormancy overcoming araçá-boi seeds. **Embrapa Roraima-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, International Journal of Agricultural Research and Review: v. 3, n. 7, p . . . , 2015.
- NIERI, T. M. et al. The optical analysis of the abdominal wall using the biospeckle after implants of polypropylene mesh in rats. **Acta cirurgica brasileira**, SciELO Brasil, v. 24, n. 6, p. 442–448, 2009.
- OULAMARA, A.; TRIBILLON, G.; DUVERNOY, J. Biological activity measurement on botanical specimen surfaces using a temporal decorrelation effect of laser speckle. **Journal of Modern Optics**, Taylor & Francis, v. 36, n. 2, p. 165–179, 1989.
- PÉREZ, A. J. et al. A portable dynamic laser speckle system for sensing long-term changes caused by treatments in painting conservation. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 1, p. 190, 2018.
- PIECZYWEK, P. M. et al. Exponentially smoothed fujii index for online imaging of biospeckle spatial activity. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 142, p. 70–78, 2017.
- PRA, A. L. D.; PASSONI, L. I.; RABAL, H. Evaluation of laser dynamic speckle signals applying granular computing. **Signal Processing**, Elsevier, v. 89, n. 3, p. 266–274, 2009.
- RAMÍREZ-MIQUET, E. E. et al. Digital imaging information technology for biospeckle activity assessment relative to bacteria and parasites. **Lasers in medical science**, Springer, v. 32, n. 6, p. 1375–1386, 2017.
- RETHEESH, R. et al. Use of laser biospeckle for the evaluation of fruit ripening. **Journal of Pure Applied and Industrial Physics**, v. 6, n. 5, p. 65–70, 2016.
- RETHEESH, R. et al. Application of laser biospeckle technique for the analysis of artificially introduced local dynamics in apple fruit. **Laser Physics**, IOP Publishing, v. 28, n. 11, p. 115601, 2018.
- RIBEIRO, K. et al. Continuous, high-resolution biospeckle imaging reveals a discrete zone of activity at the root apex that responds to contact with obstacles. **Annals of botany**, Oxford University Press, v. 113, n. 3, p. 555–563, 2013.
- SALINAS, R. M. Raspicam – c++ api for using raspberry camera with/without opencv. **Aplicaciones de la Vision Artificial**, 2020. Disponível em: <<http://https://github.com/rmsalinas/raspicam>>.
- SCHLOBOHM, J.; PÖSCH, A.; REITHMEIER, E. A raspberry pi based portable endoscopic 3d measurement system. **Electronics**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 3, p. 43, 2016.
- SINGH, P. et al. Application of laser biospeckle analysis for assessment of seed priming techniques. 2018.
- TRIVI, M. R. et al. Técnicas de speckle dinámico: desarrollos y perspectivas. In: **IV Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 2017)**. [S.l.: s.n.], 2017.

VIVAS, P. et al. Biospeckle activity in coffee seeds is associated non-destructively with seedling quality. **Annals of Applied Biology**, Wiley Online Library, v. 170, n. 2, p. 141–149, 2017.

WOLF, M. **Computers as components: principles of embedded computing system design**. [S.l.]: Elsevier, 2012.

ZDUNEK, A. et al. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 52, p. 276 – 285, 2014. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613002030>>.