



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

Tese de Doutorado

**Desenvolvimento de um multianalisador automático
baseado em visão de máquina e processamento de vídeo
para determinação sequencial do teor de sólidos
suspensos totais e sedimentáveis em águas residuárias**

Railson de Oliveira Ramos

SAPIENTIA AEDIFICAT

João Pessoa – PB – Brasil
Setembro/2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

**Desenvolvimento de um multianalisador automático
baseado em visão de máquina e processamento de vídeo
para determinação sequencial do teor de sólidos
suspensos totais e sedimentáveis em águas residuárias**

Railson de Oliveira Ramos

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, área de concentração Química Analítica.

Orientador: **Prof. Dr. Mário César Ugulino de Araújo**

SAPIENTIA AEDIFICAT

João Pessoa – PB – Brasil
Setembro/2021

Catlogação na publicação
Seção de Catlogação e Classificação

R175d Ramos, Railson de Oliveira.

Desenvolvimento de um multianalisador automático baseado em visão de máquina e processamento de vídeo para determinação sequencial do teor de sólidos suspensos totais e sedimentáveis em águas residuárias / Railson de Oliveira Ramos. - João Pessoa, 2021.
98 f. : il.

Orientação: Mário Cesar Ugolino Araújo.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

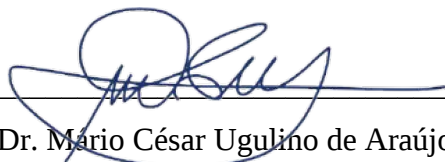
1. Química analítica. 2. Sistema de visão. 3. Águas residuais - Análise. 4. Sólidos suspensos. 5. Sólidos sedimentáveis. I. Araújo, Mário Cesar Ugolino. II. Título.

UFPB/BC

CDU 543 (043)

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências, área de concentração Química Analítica.

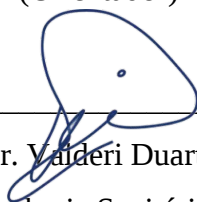
Avaliada pela banca examinadora:



Prof. Dr. Mario César Ugulino de Araújo

Departamento de Química – UFPB

(Orientador)



Prof. Dr. Valderi Duarte Leite

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental– UEPB

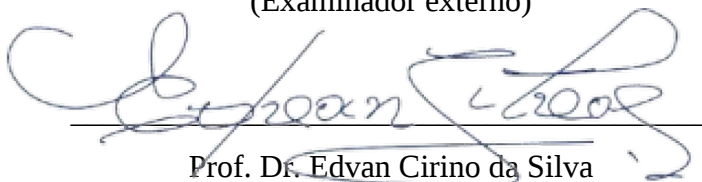
(Examinador externo)



Prof. Dr. Aldre Jorge Moraes Barros

Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos – UFCG

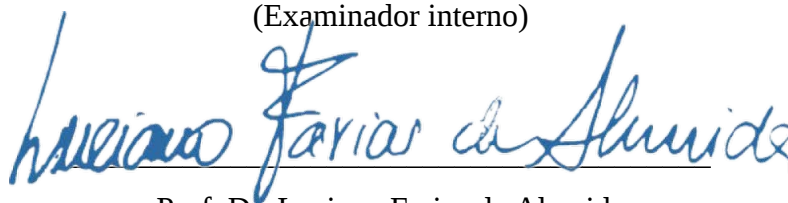
(Examinador externo)



Prof. Dr. Edvan Cirino da Silva

Departamento de Química – UFPB

(Examinador interno)



Prof. Dr. Luciano Farias de Almeida

Departamento de Química – UFPB

(Examinador interno)

Sumário

Lista de figuras	V
Lista de tabelas	VI
Lista de siglas e abreviaturas.....	VII
Resumo	IX
Abstract	X
1. INTRODUÇÃO	2
1.1. Caracterização geral da proposta	2
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1. Material Sólido em águas e efluentes	7
2.1.1. Material sólidos suspensos totais (SST)	7
2.1.2. Metodologia padrão para determinação de sólidos suspensos totais.....	8
2.1.3. Métodos alternativos para determinação de sólidos suspensos totais	10
2.1.4. Sólidos sedimentáveis (SS).....	14
2.1.5. Metodologia padrão para determinação de sólidos sedimentáveis.....	15
2.1.6. Métodos alternativos para determinação de sólidos sedimentáveis.....	16
2.2. Visão de Máquina	18
2.2.1 Aquisição de imagem digitais.....	20
2.2.2 Espaços de cores	22
2.2.3 Pré-processamento de imagem	25
2.2.5. Segmentação de objetos.....	27
3. EXPERIMENTAL	32
3.1. Instrumentação.....	33
3.1. Software de controle	34
3.2. Processamento de vídeo.....	36
3.3. Procedimentos analíticos	40

3.4.	Métodos de referência e amostras.....	40
3.4.1	Determinação de sólidos sedimentáveis	41
3.4.2	Determinação de sólidos suspensos totais	41
3.4.3	Testes de predição e determinação do tempo de análise	42
4.	Resultados e Discussão.....	44
4.1.	Sólidos sedimentáveis.....	44
4.2.	Sólidos suspensos Totais	48
4.3.	Determinação do tempo de Análise	54
5.	Conclusão	55
6.	Outros Resultados obtidos ao longo do curso de doutorado	57
7.	Referências bibliográficas	59
7.	Apêndice.....	67

Lista de figuras

Figura 1. Fluxograma resumido das etapas de processamento de um sistema de visão de máquina.	20
Figura 2. Representação espacial dos espaços de cores RGB (a), HSL (b), HSV (c) e HSI (d)	23
Figura 3. Ilustração dos planos de cor R, G, B, I, V e I a partir de uma imagem RGB	25
Figura 4. Exemplificação do processo de segmentação de uma imagem. a-imagem original; b-imagem com objetos segmentados a partir de uma valor de <i>threshold</i> adequado; c- imagem com objetos segmentados a partir de uma valor de <i>threshold</i> baixo; d- imagem segmentada a partir de um valor de <i>threshold</i> alto.....	29
Figura 5. Ilustração do processo de segmentação de uma imagem empregando a técnica <i>Threshold Otsu</i>	31
Figura 6. Multianalisador com amostrador automático. a – gabinete externo; b – tampa frontal; c – leds de iluminação interna; d – janela da cela de detecção; e – webcam; f – gabinete da webcam; g – porta USB; h – cabo usb; i – laser interno; j – servo motor; l – plano de fundo preto ou branco; m – motor de passo; n – tampa superior; o – bandeja de amostras; p e q – parafuso e tampa de fixação da bandeja de amostras.....	32
Figura 7. Estrutura de <i>frontend</i> do software de processamento de vídeo e controle do multianalisador.	34
Figura 8. Fluxograma das rotinas de aquisição e amostragem de vídeo, pré-processamento de vídeo e algoritmo de visão de máquina.....	37
Figura 9. Etapas de processamento de vídeo para determinação de SST e SS empregando sistema de visão de máquina.	39
Figura 10. Imagens das Amostras durante ensaio de calibração para determinação da concentração de SSed com identificação da área de sedimento formado após centrifugação. a) 0,68 mg L ⁻¹ ; b) 1,36 mg L ⁻¹ ; c) 2,05 mg L ⁻¹ ; d) 2,87 mg L ⁻¹ ; e) 3,36 mg L ⁻¹ ; f) 4,32 mg L ⁻¹ ; g) 5,04 mg L ⁻¹ ; h) 5,67 mg L ⁻¹	44
Figura 11. Teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR) dos modelos para determinação de SS empregando MVA associado a diferentes planos de cor.....	46
Figura 12. Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor R. a- Curva analítica; b- gráfico dos resíduos.....	47
Figura 13. Imagens das Amostras durante ensaio de calibração para determinação da concentração de SST, com identificação da área de espalhamento laser causado pelas	

partículas em suspensão. a - 30.23 mg L⁻¹; b - 60.09 mg L⁻¹; c - 89.65 mg L⁻¹; d - 124.59 mg L⁻¹; e - 150.22 mg L⁻¹; f - 187.07 mg L⁻¹; g - 219.67 mg L⁻¹; h - 249.47 mg L⁻¹. 49

Figura 14.. Teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR) dos modelos para determinação de SST empregando MVA e modelos baseados em intensidade de pixel. 51

Figura 15 Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST empregando MVA associado ao plano de cor R. a- Curva analítica; b- gráfico dos resíduos..... 52

Figura 16 Ilustração do procedimento de operação padrão (POP) para determinação sequencial de sólidos suspensos totais e sedimentáveis. 55

Lista de tabelas

Tabela 1. Resultados de regressão e calibração dos modelos empregando algoritmo de visão de máquina para determinação de sólidos sedimentáveis..	45
Tabela 2. Comparativo de desempenho entre o método proposto e os métodos já relatados para determinação de SS.....	48
Tabela 3. Resultados de calibração e predição dos modelos obtidos para determinação de sólidos suspensos totais..	51
Tabela 4. Comparativo de desempenho entre o método proposto e os métodos já relatados para determinação de SST..	53

Lista de siglas e abreviaturas

ANOVA - análise de variância (do inglês: “*Analysis of Variance*”).

EJCR – Região elíptica de confiança conjunta (do inglês: “*Elliptical Joint Confidence Region*”).

F – F de Fisher-Snedecor.

HSI – Espaço de cores Matriz (que significa gradação de uma cor) Saturação Intensidade (do inglês: “*Hue, Saturation, Intensity*”).

HSL – Espaço de cores Matriz (que significa gradação de uma cor) Saturação Luminosidade (do inglês: “*Hue, Saturation, Lightnes*”).

HSV – Espaço de cores Matriz (que significa gradação de uma cor) Saturação Valor (do inglês: “*Hue, Saturation, Value*”).

IVS – Índice de volume do lodo.

MVA – Algoritmo de visão de máquina (do inglês: “*Machine Vision Algorithm*”).

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez (do inglês: “*Turbidity Nephelometric Unit*”).

p – Nível descritivo ou probabilidade de significância

R² - Coeficiente de determinação.

RGB – Espaço de Cores Vermelho Verde Azul (do inglês: “*Red Green Blue*”).

RMSEP – Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático de Validação (do inglês: “*Root Mean Square Erros of Validation*”).

ROI – Região de Interesse (do inglês: “*Region of Interest*”).

SS – Sólidos Sedimentáveis.

SST – Sólidos Suspensos Totais.

t – t de Student.

Resumo

O monitoramento de Sólidos suspensos (SST) e sedimentáveis (SS) em águas e efluentes é de grande importância para o controle de processos e gestão qualidade em sistemas ambientais. Não obstante, os métodos padrão para determinação destes parâmetros compreende uma marcha analítica laboriosa, com elevado tempo de resposta e instrumentação de elevado custo. Em atenção a isso, no presente estudo foram propostos dois métodos analíticos com características de rapidez e sensibilidade, desenvolvidos para determinação sequencial da concentração de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos sedimentáveis (SS). Para tanto, foi desenvolvido um multianalisador equipado com amostrador automático, controle de iluminação, fonte de radiação laser e sistema de captura de filmes digitais. Além disso, também foi desenvolvido um software de controle, que contou com sistema de amostragem de frames de vídeo, recursos para análise colorimétricas por imagens digitais e análise de visão de máquina. Os espaços de cores RGB, HSL, HSV e HSI foram avaliados na fase de pré-processamento de vídeo. Amostras de água residuária foram empregadas nos testes de calibração e predição. Na determinação da concentração de SS, o sistema de visão de máquina foi empregado para reconhecimento e determinação da área formada pelos sedimentos. Nas determinações da concentração de SST, o sistema de visão de máquina foi empregado para reconhecimento e determinação da área de luz espalhada pelas partículas suspensas. O algoritmo de visão de máquina acoplado ao plano de cor vermelha (derivado de histogramas de cores no sistema *Red-Green-Blue* (RGB)) apresentou os melhores resultados com R^2 de 0,997 e 0,988 e RMSEP de 3,188 mg L⁻¹ e 0,300 mL L⁻¹ para a determinação de SST e SS, respectivamente. Os modelos construídos foram validados por Análise de Variância (ANOVA) e a acurácia das predições confirmada pelo teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR). Em relação ao método de referência, o método proposto reduziu o volume de amostra de 3,5 L para apenas 15 mL e o tempo de análise de 12 horas para 24 segundos por amostra. Portanto, os métodos que foram desenvolvidos podem ser considerados uma alternativa importante para a determinação de SST e SS em águas residuárias, como uma forma automática, rápida e de baixo custo, alinhada aos princípios da Química Verde e explorando recursos da Indústria 4.0 como processamento inteligente, miniaturização e visão de máquina.

Palavras-chave: Visão de máquina; processamento de vídeo; instrumentação; análise de águas residuais; sólidos suspensos; sólidos sedimentáveis.

Abstract

The monitoring of suspended solids (SST) and sedimentable solids (SS) in water and effluents is of great importance for process control and quality management in environmental systems. Nevertheless, the standard methods for determining these parameters comprise a laborious analytical gait, with a high response time and costly instrumentation. In view of this, in the present study, two analytical methods with characteristics of speed and sensitivity were proposed, developed for sequential determination of the concentration of total suspended solids (SST) and sedimentable solids (SS). Therefore, a multianalyzer equipped with an automatic sampler, lighting control, laser radiation source and digital film capture system was developed. In addition, a control software was also developed, which included a video frequency sampling system, resources for colorimetric analysis by digital images and machine vision analysis. RGB, HSL, HSV and HSI color spaces were evaluated in the video pre-processing phase. Wastewater samples were used in the calibration and prediction tests. In determining the SS concentration, the machine vision system was used to recognize and determine the area formed by the sediments. In determining the concentration of SST, the machine vision system was used to recognize and determine the area of light scattered by the suspended particles. The machine vision algorithm coupled to the red color plane (derived from color histograms in the Red-Green-Blue (RGB) system) showed the best results with R^2 of 0.997 and 0.988 and RMSEP of 3.188 mg L⁻¹ and 0.300 mL L⁻¹ for the determination of SST and SS, respectively. The constructed models were validated by Analysis of Variance (ANOVA) and the accuracy of the predictions confirmed by the joint confidence elliptical region test (EJCR). In relation to the reference method, the proposed method reduced the sample volume from 3.5 L to just 15 mL and the analysis time from 12 hours to 24 seconds per sample. Therefore, the methods that were obtained can be considered an important alternative for the determination of SST and SS in wastewater, as an automatic, fast and low-cost way, in line with the principles of Green Chemistry and exploiting Industry 4.0 resources such as intelligent processing , miniaturization and machine vision.

Keywords: Machine vision; video processing; instrumentation; wastewater analysis; suspended solids; settleable solids.

Capítulo 1.

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização geral da proposta

A determinação de sólidos suspensos totais (SST) e sedimentáveis (SS) em águas é de fundamental importância para os setores de gestão industrial e pública de águas e efluentes. SST e SS dois dos principais parâmetros de entrada para dimensionamento de sistemas de tratamento de resíduos líquidos, são também parâmetros de qualidade para controle de processos, além de serem relevantes para a biota aquática, não só em termos de alcance e penetração de luz, mas também para o transporte de poluentes e compostos orgânicos insolúveis (Giardino et al. 2017; Villa et al. 2019). No entanto, os métodos padrão de referência para a determinação desses parâmetros exigem significativo volume de amostra (geralmente 3,5 litro ou mais), instrumentação de alto custo e etapas analíticas laboriosas. Além disso, um elevado tempo é demandado para realização das análises: cerca de 1 hora para SS e cerca de 4–12 horas para SST (APHA, 2017).

Para superar isso, métodos alternativos já foram desenvolvidos e apresentados. Villa et al. (2019), Oliveira et al. (2018), Rügne et al. (2013) e Schwarz et al. (2011) estimaram a correlação entre turbidez e SST. No entanto, como essa relação depende do tamanho, densidade, forma e tipo das partículas em suspensão, nenhum desses estudos apresentou resultados satisfatórios do ponto de vista analítico. Eles utilizaram apenas amostras sintéticas com cor e tamanho de partícula controlados, não sendo apresentados testes em amostras reais (Hakim et al., 2019). Outras alternativas para a determinação de SST também foram propostas usando difração a laser acoplada a um sistema de fotodetecção (Santos et al., 2018), sensoriamento remoto por satélite com radiômetro de varredura multiespectral (Shahzad et al., 2018; Isidro et al., 2018; Ganesan et al., 2014) e sistema baseado em atenuação ultrassônica (Magalhães et al., 2016).

Por outro lado, poucos métodos alternativos para determinação de SS foram estudados até o momento. Jenné et al. (2015) aplicaram análise de imagens digitais para determinar o tamanho do filamento do lodo, estabelecendo uma relação entre este parâmetro e o índice de volume do lodo (IVS). Os resultados da calibração indicaram uma baixa correlação entre o sinal analítico e o método de referência. Mullins et al. (2018) registraram imagens digitais de 1 litro de lodo após 30 minutos de sedimentação em um tanque *Settleometer*. Neste estudo, um algoritmo baseado na análise de histograma foi utilizado para identificar o limiar entre a água clarificada e o sedimento, exigindo um tempo total de 20 minutos para o processamento da imagem. Eles descreveram que a

espuma e os flocos de lodo em suspensão prejudicaram a capacidade discriminativa do algoritmo. Quando essas interferências não estavam presentes, no entanto, seu método apresentou resultados que demonstram resolução analítica adequada, embora o tempo de processamento dos dados tenha aumentado significativamente.

Apesar dos esforços e contribuições dos estudos acima mencionados, nenhuma das metodologias analíticas já relatadas resolve o problema de determinação de SST e SS por meio de uma validação analítica adequada. Além disso, a instrumentação analítica abordada nos referidos estudos não foi pensada para o novo ambiente tecnológico industrial, que apontam para novas estratégias como a miniaturização de testes, processamento inteligente e sistemas de automação ([Cheng et al., 2020](#); [Andrade et al., 2020](#); [Tótolli et al., 2020](#)). Tais requisitos são demandas do processo de modernização dos sistemas de produção intitulado Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial.

Neste contexto da revolução 4.0, a visão de máquina tornou-se uma importante ferramenta utilizada no setor de instrumentação ([Alonso et al., 2019](#)), com aplicabilidade industrial na avaliação da qualidade de produtos ([Kaur et al., 2018](#); [Zhang et al., 2020](#)), na orientação do controle robótico ([Lins et al., 2020](#)), na colheita da produção agrícola ([Williams et al., 2019](#)) e nos sistemas de seleção de frutas e vegetais ([Płotka-Wasyłka et al., 2019](#)). Portanto, é uma poderosa ferramenta de metrologia com ampla gama de aplicações, baixo tempo de resposta, alta precisão e eficiência, além de ser não destrutiva e promover testes automáticos sem contato com amostras ([Williams et al., 2019](#)).

Diante do exposto, este estudo desenvolveu um instrumento baseado em visão de máquina que acopla um amostrador automático e um software para captura de vídeo digital em tempo real para quantificar sequencialmente os conteúdos de SST e SS em amostras de águas residuais. Este novo instrumento emprega sinais analíticos derivados de vídeo digital, visando a elaboração de uma ferramenta analítica eficiente, rápida e de baixo custo alinhada aos princípios da Química Verde.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Desenvolvimento de um multianalisador automático baseado em visão de máquina e processamento de vídeo para determinação sequencial do teor de sólidos suspensos totais e sedimentáveis em águas residuárias

1.2.2. Objetivos específicos

- Construir um multianalisador com amostrador automático, controle de luminosidade e ajuste do plano de fundo da cela de detecção para ser empregado em análises baseadas em processamento de vídeo e visão de máquina.
- Desenvolver uma interface de controle para o multianalisador compreendendo funções de alinhamento e seleção de posição da bandeja do amostrador automático, ajuste de iluminação e acionamento de fontes de radiação e seleção do plano de fundo da sela de detecção.
- Desenvolver um software de processamento de vídeo em tempo real para ser aplicado em análises colorimétricas e análises baseadas em visão de máquina.
- Avaliar diferentes espaços de cores no pré-processamento de vídeo, a fim de se otimizar a performance das análises colorimétricas e análises baseadas em visão de máquina.
- Desenvolver e validar um método analítico para determinação sequencial de sólidos suspensos totais e sedimentáveis em águas residuárias.

Capítulo 2.

FUNDAMENTACÃO TEÓRICA

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A assembleia geral da ONU reconheceu em 2010 que o acesso ao saneamento básico são direitos humanos essenciais, universais e indispensáveis à vida com dignidade (ONU, 2010). Apesar dos inúmeros esforços para garantia destes direitos, muitos países têm enfrentado limitações técnicas inerentes ao tratamento e controle da qualidade de águas e efluentes. A Agenda 2015 da ONU tratou de tais desafios tecnológicos e implementou ferramentas para que as metas de desenvolvimento sustentável relacionados ao saneamento fossem alcançadas (ONU, 2015). Dentre as metas desta agenda, estão a identificação e desenvolvimento de soluções tecnológicas para modernização do gerenciamento, tratamento e monitoramento da água e efluentes (ONU, 2015). Em 2018, a 30ª reunião ÁGUA-ONU direcionou a implementação das questões de saneamento nos principais acordos da agenda ONU-2030 (ONU, 2019). Uma das vertentes na busca pela modernização desta área do saneamento aponta para a adesão de conceitos e tecnologias da indústria 4.0 (Kotzé et al., 2019).

Algumas destas limitações associadas ao saneamento são as etapas de controle e monitoramento dos processos de tratamento de águas e efluentes (Chew et al., 2016; Metcalf & Eddy, 2016). Nestes processos, etapas de coleta e transporte de amostras e as metodologias convencionais de análise exigem uma série de aparatos, equipamentos e procedimentos, elevando o tempo de resposta e os custos de operação (Metcalf & Eddy, 2016; Moreno, 2015).

Tanto nos processos de tratamento de água quanto nos de efluentes, o monitoramento das frações de sólidos se mostram indispensáveis. De maneira mais geral, as concentrações de sólidos suspensos e sedimentáveis são empregados como dados de entrada para projetos de estações de tratamento de águas e efluentes. Esses parâmetros são monitorados de modo periódico, além de serem indicadores de qualidade obrigatórios para emissão de efluentes tratados em corpos de água (APHA, 2017; Metcalf & Eddy, 2016). Não obstante, conforme será discutido neste capítulo, os métodos convencionais para determinação destes parâmetros são demorados, demandam de elevado volume de amostra e, no caso de dos sólidos suspensos, envolve uma série de aparatos que tornam o método caro e laborioso. Por este motivo, também neste capítulo foram reunidas informações sobre sistemas de visão de máquina, a fim de fundamentar a base teórica

para o desenvolvimento de um método analítico alternativo, objetivando a determinação de sólidos suspensos e sedimentáveis, conforme proposto na seção 1.2.1.

2.1. Material sólido em águas e efluentes

Os sólidos referem-se à matéria suspensa ou dissolvida presente em águas e efluentes, que permanecem como resíduo após evaporação, secagem ou calcinação da amostra em uma determinada temperatura e após um tempo pré-estabelecido. O *Standard Methods* (APHA, 2017) divide as frações caracterizáveis de sólidos em totais, suspensos, dissolvidos, fixos, voláteis e sedimentáveis. (i) Sólidos totais compreendem as frações de sólidos suspensos totais e a porção de sólidos totais dissolvidos. (ii) Sólidos suspensos representam a porção dos sólidos totais referidos por um filtro que propicia a retenção de partículas de diâmetro maior ou igual a 1,2 μm . (iii) Sólidos totais dissolvidos englobam a porção dos sólidos que passam pelo referido filtro. (iv) Os sólidos voláteis são a porção dos sólidos (sólidos totais, suspensos ou dissolvidos) que se perde de uma amostra após a ignição ou calcinação a 550-600°C durante uma hora. (v) Sólidos fixos são a porção dos sólidos que restam em uma amostra após a ignição ou calcinação a 550-600°C durante uma hora. (vi) sólidos sedimentáveis compreende a fração dos sólidos de uma amostra que sedimentam sob a ação da gravidade, após uma hora de descanso em cone Imhoff (APHA, 2017).

No presente estudo, as frações de sólidos abordadas foram (ii) sólidos suspensos totais e (vi) sólidos sedimentáveis. Apesar da importância das demais frações de sólidos na caracterização de águas residuárias, pontua-se que apenas as frações em suspensão e sedimentáveis são passíveis de determinação pelas técnicas baseadas em visão computacional que foram investigadas.

2.1.1. Sólidos suspensos totais (SST)

Os SST podem incluir uma ampla variedade de materiais orgânicos e inorgânicos, compreendendo lodo, matéria vegetal e animal em decomposição, resíduos industriais e de esgoto doméstico, micro plásticos, dentre outros.

Altas concentrações de sólidos suspensos estão associados a prejuízos para biota aquática. Sólidos em suspensão podem dificultar o alcance da luz sobre a vegetação submersa, limitando a fotossíntese, o que afeta os níveis naturais de oxigênio dissolvido na água. Além disso, as partículas em suspensão em elevada concentração absorvem maiores proporções o calor da luz solar, o que resulta no aumento da temperatura superficial da água, que também diminui as concentrações de oxigênio dissolvido (Giardino et al., 2017; Villa et al., 2019). Neste sentido, a diminuição da visibilidade da água causada pelo SST pode afetar a capacidade dos peixes de identificar alimentos, além de provocar a obstrução de guelras, além de reduzir taxas de crescimento e a reprodutibilidade. Os altos níveis de SST em corpos d'água também estão associados a concentrações mais altas de bactérias, nutrientes, pesticidas e metais, uma vez que os aglomerados de partículas facilitam o transporte de poluentes e microrganismos.

Do ponto de vista industrial, monitoramento da concentração de sólidos suspensos é importante para qualquer processo no qual estes estejam presentes ou sejam removidos, como em processos de coagulação e floculação, sedimentação, clarificação, precipitação e filtração, dentre outros (Vadasarukkai et al., 2016). De maneira geral, as concentrações de sólidos em suspensão são medidas importantes no balanço de massa destes processos (Metcalf & Eddy, 2016; Moreno, 2015).

2.1.2. Metodologia padrão para determinação de sólidos suspensos totais

O método padrão para a determinação de sólidos suspensos totais é o gravimétrico (APHA, 2017), descrito pelo *Standard Methods* como 2540 D – Determinação direta de sólidos suspensos totais a 103-105 ° C. De acordo com este método de referência, uma amostra bem misturada é filtrada através de um filtro de fibra de vidro padrão previamente pesado, de modo que o resíduo retido no filtro é seco entre 103 a 105 ° C até um peso constante. O aumento do peso do filtro representa o total de sólidos suspensos. O método 2540 D pontua que se o material em suspensão obstruir o filtro e prolongar a filtração, pode ser necessário aumentar o diâmetro do filtro ou diminuir o volume da amostra.

Com relação aos interferentes para a determinação analítica de sólidos suspensos totais, o *Standard Methods* descreve que água altamente mineralizada, com concentrações significativas de cálcio, magnésio, cloreto e/ou sulfato pode ser higroscópica e requerer

um tempo de secagem prolongada (superior aos 60 minutos descritos pelo método). Para este tipo de amostra também é preconizado a dessecação adequada e pesagem rápida. Também é recomendado a exclusão de grandes partículas flutuantes ou aglomerados submersos de materiais não homogêneos da amostra, considerando a inclusão de determinada partícula possa sobrestimar o resultado da análise. Ainda é recomendado que óleos flutuantes visíveis ou graxas presentes superficialmente na amostra sejam dispersados durante a amostragem, de modo que se evite a presença de tais interferentes na amostra. Por fim, o método destaca que um volume de resíduo excessivo durante a etapa de filtração pode levar a formação de crostas que retém água, portanto, as amostras devem ser ajustadas por diluição para teores de sólidos inferiores a 200 mg de resíduo por filtragem (APHA, 2017).

Os aparatos para determinação de sólidos suspensos compreende: (a) discos de filtro de fibra de vidro sem aglutinante orgânico; (b) Aparelho de filtração a vácuo como suporte do filtro e frasco de sucção, de capacidade suficiente para o tamanho da amostra selecionada; (c) Estufa de secagem, para operação a 180 °C; (d) dessecador com indicador instrumental da umidade; (e) balança analítica, capaz de pesar até 0,1 mg; (f) agitador magnético com barra agitadora TFE; (g) prato de evaporação; e (h) pipetas de calibre largo (APHA, 2017).

A primeira etapa da marcha analítica é a preparação do disco de filtro de fibra de vidro, que é acoplado ao aparelho de filtração a vácuo para ser lavado com água destilada, empregando três volumes sucessivos de 20 mL. A sucção é realizada de modo continuado para que todos os vestígios de água sejam removidos, em seguida, o filtro é levado para um prato de evaporação. A preparação do prato de evaporação contendo o filtro lavado compreende aquecimento de ambos em mufla a 550 °C para limpeza. Após o procedimento de ignição, o prato contendo o filtro é armazenado em dessecador e deve ser pesado imediatamente antes do uso (APHA, 2017).

Durante o procedimento de filtragem, as amostras são mantidas em agitação com auxílio de um agitador magnético, de modo que uma pipeta possa ser empregada para tomar um volume preciso da amostra e, em seguida, transferi-lo para o filtro. Três volumes sucessivos de 10 mL de água destilada são empregados sobre os sólidos retidos no filtro, para completa drenagem de materiais solúveis. Após a lavagem, a sucção segue por mais 3 min para auxiliar a secagem do analito retido no filtro. Em seguida, o filtrado total junto ao filtro é posto no prato de evaporação previamente pesado para ser levado a

estufa de secagem. A amostra deve ser seca por pelo menos 1 hora a 180 ° C e posteriormente resfriada em um dessecador. O ciclo de secagem, dessecação, resfriamento e pesagem é repetido até que um peso constante seja obtido ou até que a mudança de peso seja inferior a 4% do peso anterior. Um tempo de secagem de 12hs geralmente dispensa a repetição do ciclo de secagem até peso constante. As medidas devem ser realizadas, no mínimo em duplicata. A concentração de sólidos suspensos da amostra é obtido pela [Equação 1](#) (APHA, 2017).

$$SST(mgL^{-1}) = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{Volume de amostra (ml)}} \quad (1)$$

Em que: A- peso de resíduo seco por filtro (mg) e B- Peso do filtro. O desvio padrão calculado para este método a partir de 50 repetições da mesma amostra é de 2,5 mg L⁻¹ de sólidos suspenso ([APHA, 2017](#)).

2.1.3. Métodos alternativos para determinação de sólidos suspensos totais

Conforme descrito na seção 2.1.2, a marcha analítica para determinação gravimétrica da concentração de sólidos suspensos totais além de laboriosa e demorada, demandando de uma série de aparatos e equipamentos laboratoriais que elevam significativamente o custo de análise. Ademais, em função da enorme quantidade de equipamentos pesados empregados nesta determinação, as análises de campo são inviáveis. Consoante a esta problemática, uma série de abordagens para concepção de novos métodos analíticos para determinação de SST já foram relatadas na literatura ([Ganesan & Rajini, 2014](#); [Magalhães et al., 2016](#); [Isidro et al., 2018](#); [Shahzad et al., 2018](#); [Santos et al., 2018](#); [Oliveira et al., 2018](#); [Villa et al., 2019](#); [Hakim et al., 2019](#)).

[Villa et al. \(2019\)](#) investigaram uma metodologia para determinação de SST baseada em medidas de turbidez. Os autores constataram que diferentes conjuntos amostrais guardam diferentes correlações entre o nível de turbidez e o nível de sólidos em suspensão ([Villa et al., 2019](#)). Isso ocorre porque as medidas de turbidez baseadas em espalhamento de luz são significativamente influenciadas por fatores de forma e composição de partícula. Deste modo, cada matriz de sólidos suspensos terá um comportamento característico para o espalhamento da luz, resultando em diferentes relações com os níveis de turbidez. Também foi pontuado que um conjunto de calibração

constituído por amostras de diferentes matrizes resultou em uma baixa correlação entre SST e turbidez ($R^2 = 0.53$). Por outro lado, os conjuntos de calibração constituídos por amostras de uma mesma matriz resultou em uma correlação um pouco maior ($R^2 = 0.73$) (Villa et al., 2019). Contudo, além da baixa correlação entre SST e turbidez obtida em ambos os casos, os autores não procederam com testes analíticos auxiliares para atestar a viabilidade de aplicação dos modelos obtidos.

Oliveira et al. (2018) também estudaram a correlação entre os níveis de SST e turbidez para águas de rios. Os autores adotaram modelos de calibração linear e obtiveram valores de R^2 entre 0,54 e 0,87 para diferentes conjuntos de amostras. Uma das principais observações deste estudo foi o fato de que em algumas amostras, embora o valor da turbidez fosse baixo, o valor da concentração de SST foi alto. Isto ocorre porque partículas de maior tamanho podem passar despercebidas pelo sistema de detecção dos turbidímetros convencionais, que empregam um feixe de luz e fotodetector pontuais. Não obstante, tais partículas contribuem para o teor dos sólidos suspenso, determinados de modo gravimétrico. Outrossim, amostras podem conter altos níveis de turbidez e baixos níveis de sólidos suspensos, pois partículas de baixa densidade finamente dispersas elevam o espalhamento de luz em uma amostra, mesmo em baixas concentrações. Em ambos os casos, Oliveira et al. (2018) pontuaram que a razão para esta desproporção entre turbidez e TSS também pode ser o fato de que a turbidez é medida por uma propriedade óptica, sujeita à interferência de forma, tamanho, índice de refração e densidade de partícula. Em linhas gerais, a relação entre TSS e turbidez é dependente das variações nas características espectrais do material suspenso.

De modo similar, Hakim et al. (2019) desenvolveram um estudo para correlacionar os níveis de turbidez de amostras com as respectivas concentrações de sólidos suspensos totais. Nesse estudo, os autores empregaram soluções sintéticas de sólidos suspensos, com diâmetro de partícula padronizado em 60 μm , preparados a partir de areia classificada em três diferentes mesh (45, 60 e 250 μm). Os autores observaram que a relação entre os níveis de turbidez (0 a 1000 NTU) e o sinal analítico apresentou perfil parabólico, contudo, para faixas mais estreitas de concentração, esta relação é linear. Além disso, foi constatado uma relação linear direta entre os níveis de turbidez e as concentrações de sólidos suspensos totais, com R^2 próximo a 1. Pontua-se que a boa correlação entre turbidez e SST só foi alcançada por consequência do controle na composição da matriz, que não possuía interferência de cor e nem mesmo de

composição. Apesar dos resultados promissores, o estudo desenvolvido por [Hakim et al. \(2019\)](#) não procedeu com testes de predição em amostras reais.

Uma outra abordagem foi relatada por [Santos et al. \(2018\)](#), que empregaram uma técnica baseada em Espalhamento Laser e Transmissiometria *in Situ* para quantificação do teor de sólidos suspensos em água fluviais. Neste estudo, os autores empregaram uma sonda submersível LISST-100X, que usa a técnica de difração a laser para obter distribuição de tamanho de partícula, também chamada de distribuição de volume. A correlação entre os níveis de difração laser e a concentração de sólidos suspensos totais forneceu valores R^2 variando entre 0,72 e 0,93, que sofreu influência do tipo de matriz empregada. Nesse contexto, os melhores resultados obtidos para correlação entre os níveis de difração laser e a concentração de sólidos suspensos só foi alcançada quando amostras de uma mesma matriz foram empregadas isoladamente para obtenção do modelo matemático de calibração. Mais uma vez, fica evidenciado que a dinâmica do espalhamento de luz sofre influência do tipo de partícula suspensa, deste modo, a utilização de detectores convencionais como foto-sensores sempre apresentarão limitações para quantificação das concentrações de sólidos suspensos.

Nesse sentido, [Shahzad et al. \(2018\)](#) estudaram a utilização sensoramento por satélite para determinação sólidos suspensos em águas de municipais. A ferramenta utilizada foi um satélite modelo *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +)* e o método de processamento de imagem foi o *Dark Object Subtraction*. O sinal analítico foi obtido por pré-processamento das imagens em escala radiométrica, fornecido pelo próprio software de monitoramento do satélite. Foi obtido um R^2 de 0,89 para a melhor condição de calibração baseada na técnica. Este estudo também apresentou dados de validação, no qual foi obtido intercepto igual 12,0 e angulação 0,94 para acurva de preditos versus observados, além de um RMSE de 64mg/L e $R^2 = 0,88$. De maneira geral, além do elevado custo de aplicação, a técnica baseada em análises por satélite não forneceu bons resultados nas etapas de calibração e validação. Uma das motivações para este insucesso foram as oscilações nos níveis de refletância provocadas pela variação natural da luz do sol, que prejudicaram consideravelmente os modelos de calibração. [Isidro et al. \(2018\)](#), que também empregaram imagens de satélite para determinar o teor de sólidos suspensos em águas superficiais, avaliaram a intensidade de píxel proveniente das componentes de cor R, G e B como sinal analítico. Os autores constataram que os melhores resultados foram obtidos com base na componente de cor R, sendo obtido $R^2 = 0,65$. Além da baixa

correlação entre o sinal analítico e a concentração de SST na etapa de calibração, ensaios de predição não foram realizados.

No geral, a tentativa de estabelecer relações analíticas entre a turbidez de uma amostra e o nível de sólidos em suspensão é fundamentada no princípio de dispersão de Mie, que possibilita estabelecer a relação entre SST e o fluxo de radiação dispersada medida a 90° da luz incidente (Vadasarukkai et al., 2016). Neste sentido, outros estudos empregando análises por imagens digitais abordaram a determinação de sólidos em suspensão empregando amostras sintéticas (tamanho de partícula controlado):

(i) Um método para determinação de turbidez empregando imagens digitais foi proposto por Hamidi et al. (2017). Neste trabalho, os autores obtiveram as imagens de padrões de sulfato de hidrazina em uma câmara escura, com um *LED* branco posicionado a 90° da câmera do *smartphone*. As imagens obtidas tiveram os dados de RGB extraídos e convertidos para escala de cinza. As intensidades de cinza foram adotadas como as intensidades de espalhamento de luz provocada pela amostra. O equipamento desenvolvido resultou numa faixa de trabalho para medidas de turbidez que vai de 0 e 100 NTU ($R^2 = 0,96$).

(ii) Uma outra abordagem utilizando imagens digitais para determinação da concentração de partículas em suspensão foi descrito por Hussain et al. (2016). Os referidos autores descrevem o desenvolvimento de um tubidímetro que utilizou o sensor infravermelho de proximidade de um *smartphone* para realizar medidas de dispersão de luz. Um aplicativo permitiu a aquisição dos dados de irradiância para diferentes padrões de turbidez, resultando em uma faixa de trabalho para medidas de turbidez entre 1 e 400 NTU ($\pm 0,065$ e $R^2 = 0,99$).

Em adição, Magalhães et al., (2016) desenvolveram e avaliaram um sensor ultrasonico para determinação em tempo real da concentração sólidos em suspensão em águas. O sinal analítico utilizado foi o resultado de atenuação ultrasônica, que se mostrou proporcional as concentração de sólidos suspensos. Foi constatado que a relação entre atenuação ultrasônica e a concentração de sólidos suspensos não é linear, porém, dados de calibração não foram apresentados. Para este método foi obtido precisão de 10% e os demais parâmetros de desempenho do modelo não foram divulgados. Os autores relatam que para esta técnica, um dos principais interferentes são as variações de viscosidade da matriz em estudo, que exerceram influência sobre os sinais de atenuação ultrasônica. Neste sentido, considerada a significativa variabilidade de viscosidades em amostras de

efluentes e águas naturais, a técnica se mostra inviável para aplicações na determinação de sólidos suspensos, a menos que um modelo de calibração seja obtido para cada matriz estudada.

Apesar dos muitos esforços relatados por outros autores, nenhuma das metodologias ou técnicas alternativas até então reportadas para determinação de sólidos suspensos gerou resultados satisfatórios do ponto de vista analítico. De modo geral, as técnicas baseadas em turbidimetria ou nefelometria sofreram interferência do tipo de partícula em suspensão, tanto pelo movimento das partículas durante a detecção, quanto pela morfologia das partículas.

Ademais, as técnicas baseadas em processamento de imagens de satélite apresentam um elevado custo operacional e baixíssima resolução analítica. A técnica baseada em sinal ultrassônico sofre considerável efeito da matriz em função da viscosidade da amostra, que oscilam em águas residuárias em função da região, estação do ano e das horas do dia. Uma observação geral é que nenhum dos métodos alternativos já descritos apresentou dados estatísticos satisfatórios que atestem a confiabilidade do método por meio de ensaios de calibração e predição em amostras reais.

2.1.4. Sólidos sedimentáveis (SS)

Os sólidos sedimentáveis são a fração dos sólidos suspensos que se assentam ao longo de um certo período de tempo e são removidos dessa por sedimentação. O teste de sólidos sedimentáveis é feito para medir a quantidade potencial de sedimentos que passam pelas estações de tratamento de águas residuais, incluindo a verificação da quantidade de lodo a entrar durante o processo de tratamento. A depender das propriedades da amostra e do tipo de partículas contidas nas mesmas, os sólidos sedimentáveis podem encontrar-se em suspensão durante determinado período, como é o caso do material floculado em sistemas de tratamento.

Em sistemas de tratamento de águas e efluentes, os sólidos sedimentáveis compreendem a parte mais grosseira dos sólidos suspensos e são os principais constituintes dos lodos. Este volume de sólidos sedimentais definem o tempo de descarga de lodo dos decantadores (Metcalf & Eddy, 2016). Em águas residuárias, os sólidos sedimentáveis podem restringir ou bloquear o fluxo nas linhas de esgoto. O depósito de

sedimentos em mananciais e outros corpos d'água também depende do volume de sólidos sedimentáveis. Além disso, o volume de sólidos sedimentáveis é um dos principais parâmetros de entrada para projetos de decantadores de lodo (Jenné et al., 2005; Mullins et al., 2018). Esta fração dos sólidos é considerada um indicador de poluição e é descrita com parâmetro importante para a legislação e lançamento de efluentes (USEPA, 2008).

2.1.5. Metodologia padrão para determinação de sólidos sedimentáveis

O método padrão para a determinação de sólidos sedimentáveis é o volumétrico (APHA, 2017), descrito pelo *Standard Methods* como 2540 F – Sólidos Sedimentáveis. De acordo com este método de referência, sólidos sedimentáveis em águas superficiais e salinas, bem como resíduos domésticos e industriais, podem ser determinados e relatados em unidade volumétrica (mL L^{-1}). A técnica determina o volume dos sólidos suspensos na amostra que sedimentam em cone *Imhoff* sob a ação da gravidade, com volume de amostra e período de repouso determinado.

Os aparatos utilizados para determinação de sólidos sedimentáveis são o cone *Imhoff* e o respectivo suporte do cone. De acordo com o *Standard Methods*, o cone *Imhoff* é preenchido até a marca de 1 L com uma amostra bem homogeneizada. Na sequência, a amostra deve permanecer em repouso por um período de 45 min, no qual uma primeira etapa de sedimentação irá ocorrer. Em seguida, com auxílio de uma bastão de vidro, os sedimentos próximos as laterais da parede do cone devem ser suavemente deslocados sob agitação. Após 15 min de sedimentação deve ser registrado o volume de sólidos sedimentáveis no cone em mililitros por litro.

Esse método descreve que se a matéria sedimentada contiver bolsões de líquido entre as grandes partículas sedimentadas, o volume destas bolhas deve ser subtraído do volume de sólidos sedimentados. O limite inferior prático de medição depende da composição da amostra e geralmente está na faixa de 0,1 a 1,0 mL L^{-1} . Em algumas determinações é comum uma separação entre materiais sedimentáveis e flutuantes, nesse caso, as partículas e flocos que se desprendem dos sedimentos não devem ser

considerados. São recomendadas no mínimo três determinações para se estimar o volume dos sólidos sedimentáveis, o que consome 3L de amostra.

2.1.6. Métodos alternativos para determinação de sólidos sedimentáveis

Apesar do método volumétrico ser amplamente aceito para determinação dos sólidos sedimentáveis, as limitações associadas a formação de bolsões de ar ou flotação de aglomerados de partículas são os principais interferentes desse procedimento analítico. Neste sentido, o *Standard Methods* apresenta um segundo método baseado em medida gravimétrica para determinar a massa sólidos sedimentáveis. Neste método, uma amostra sedimentada é homogeneizada em um vortex e uma alíquota do sobrenadante é utilizada para determinar a concentração dos sólidos seguindo do procedimento relatado na seção 2.1.2 (Metodologia padrão para determinação de sólidos suspensos totais). A concentração de sólidos sedimentáveis é então expressa em mg L^{-1} .

Diante disso, tanto a metodologia oficial quanto a alternativa descrita pelo *Standard Methods* apresentam limitações explícitas quanto aos procedimentos analíticos. Uma das principais limitações é o volume de amostra, que para o método oficial é 3L considerando a medida em triplicata. Apesar da matriz em questão possuir baixo valor e ser abundante no caso de águas residuárias, o transporte de amostras para o ambiente de análise se torna laborioso. Além disso, os aparatos requeridos pelo método oficial (cone Imhoff e suporte) ocupam um espaço considerável para serem transportados em análises de campo. O método alternativo do *Standard Methods*, por sua vez, compreende outras desvantagens pois é laborioso e demorado, envolvendo uma série de aparatos e equipamentos laboratoriais que elevam significativamente o custo de análise.

Apesar das limitações de ambos os métodos, poucas abordagens na literatura discutiram métodos alternativos para determinação de sólidos sedimentáveis (Jenné et al., 2005; Mullins et al., 2018). A principal limitação para novas abordagens se dá pela natureza do analito, que neste caso, é o volume do sedimento formado após determinado período de repouso da amostra. Quantificar de modo instrumental este sinal analítico é um desafio, de modo que as únicas menções presentes na literatura se resumem a aplicações de visão computacional (Pavanelli & Bigi, 2005).

Jenné et al. (2005) desenvolveram um método baseado em análise de imagens digitais para determinação do índice de sedimentos de lodo ativado. Nesse estudo, os

autores empregaram imagens de flocos de lodo obtidas a partir de um microscópio equipado com câmera fotográfica. As imagens foram binarizadas na etapa de pré-processamento e o reconhecimento do tamanho das partículas de lodo foi feito por um método baseado em um algoritmo de limiar clássico, usando os histogramas das imagens. Conforme [Jenné et al. \(2005\)](#), uma correlação foi estabelecida entre o tamanho dos flocos e lodo e seus respectivos índices de sedimentos de lodo ativado, em que foi obtido R^2 variando entre 0,67 e 0,87, a depender da densidade de lodo da matriz.

[Mullins et al. \(2018\)](#) registraram imagens digitais de 1 litro de lodo após 30 minutos de sedimentação em vaso *Settleometer*. Nesse estudo, um algoritmo baseado em análise de histograma foi empregado para identificar o limiar entre água clarificada e sedimento, com tempo total de 20 minutos para o processamento de imagens. [Mullins et al. \(2018\)](#) descreveram que a espuma e flocos de lodo em suspensão prejudicaram a capacidade discriminante do algoritmo, que estimou erroneamente algumas medidas, contudo, na ausência destes interferentes o método descrito apresentou resultados que demonstram adequada resolução analítica.

[Pavanelli & Bigi \(2005\)](#) avaliaram a correção entre as concentrações de sólidos sedimentáveis e a turbidez de amostras. Os resultados mostram uma alta correlação entre esse dois parâmetros, no entanto, a mudança de matriz mudou completamente a relação estabelecida entre a turbidez e o nível de sedimentos. Esse acontecimento se dá principalmente pelas mudanças nas densidades das partículas suspensas e pelas variações nas propriedades newtonianas do fluido, que afetam a dinâmica de movimento das partículas durante a sedimentação. Os autores concluíram que o método padrão com cone *Imhoff* continua sendo o mais adequado.

Diante das limitações associadas à natureza do sinal analítico, as soluções em instrumentação até então abordadas para determinação de sólidos sedimentáveis não obtiveram bom êxito. Contudo, os resultados obtidos por [Mullins et al. \(2018\)](#) foram satisfatórios do ponto de vista analítico, apesar da instrumentação requerer elevado volume de amostra e o procedimento ser demorado, tal qual o método de referência. Em uma leitura geral das informações, pode-se pontuar que nenhum dos métodos alternativos apresentou resolução analítica ou otimização instrumental para superar as limitações associadas ao método de referência.

2.2. Visão de máquina

A indústria de manufatura é extremamente dependente da habilidade que os seres humanos possuem para analisar cenas visuais complexas. Tal habilidade é explorada em inúmeras tarefas, desde o desenvolvimento de projeto inicial, usinagem, acabamento, montagem e controle de qualidade. A visão é uma técnica de análise que não polui o objeto sob observação e, com poucas exceções, os níveis de luz necessários para inspecionar um objeto industrial não o afetam de forma alguma. A visão fornece uma grande quantidade de informações muito detalhadas sobre uma ampla variedade de características de um objeto, incluindo sua forma, cor, textura, acabamento de superfície, revestimento, contaminação de superfície, etc. (Bruce, 2012; Sergiyenko et al., 2020).

Com base na versatilidade visual, é possível empregar uma ampla gama de técnicas ópticas para ampliar ainda mais a área de aplicação de inspeção visual. Por exemplo, é possível usar fontes de luz estroboscópica, iluminação estruturada, filtros de cor, luz polarizada de iluminação coerente, fluorescência e muitos outros recursos ópticos para detecção de uma gama de propriedades físicas. Em suma, a visão humana é indiscutivelmente notável por sua capacidade de perceber sutilezas e grandes variações de intensidade, cor, forma e textura (Bruce, 2012).

Embora seja evidente o valor da visão humana para a indústria, ela apresenta seus gargalos e limitações. Os fatores que contribuem para isso são principalmente a fadiga física e o desconforto visual, doenças, distração, o uso de álcool/drogas, etc. Além disso, a velocidade de processamento de um observador humano não é suficiente para atender por completo a inspeção dos produtos de muitos processos de fabricação. Muitas tarefas de inspeção requerem medições dimensionais/volumétricas precisas, que as pessoas não podem realizar com precisão e velocidade. Logo, a inspeção humana nem sempre pode aplicar critérios de avaliação objetivos com rigor, principalmente quando as propriedades estéticas de itens altamente variáveis devem ser julgadas. Por essas razões, os engenheiros sonharam há muito tempo em construir uma máquina que possa "ver" (Bruce, 2012).

Neste contexto, os estudos acerca de visão artificial foram alavancados durante as décadas de 1970 e 1980, com o amadurecimento das denominadas aplicações ativas da computação, como sensoriamento remoto, diagnóstico técnico, orientação de veículos autônomos e imagens biomédicas (Sonka et al., 2012).

Nesse campo da visão artificial, a visão de máquina é definida como uma técnica de levantamento de descrições explícitas informativas e significativas de um objeto físico por meio da análise computacional de imagens digitais. Esta técnica envolve integração harmoniosa de manuseio mecânico, iluminação, óptica, câmeras de vídeo, processamento de sinal, processamento de imagem, arquitetura de sistemas de computador, software, engenharia industrial, interface homem-computador e sistemas de controle ([Majid Dowlati et al., 2012](#)).

Portanto, esta ferramenta analítica do ambiente industrial está relacionada ao processamento de imagens, inteligência artificial e reconhecimento de padrões, mas é distinta da Visão Computacional. A visão de máquina é uma engenharia, a visão computacional é uma ciência. Trata-se de uma área da engenharia de sistemas integrados mecânico-ópticos-eletrônicos-sofwares para o exame de objetos e materiais naturais, artefatos humanos e processos de manufatura, a fim de detectar defeitos e melhorar a qualidade, a eficiência operacional e a segurança de produtos e processos ([Bruce, 2012](#)).

De maneira geral, a visão de máquina é estruturada por uma arquitetura piramidal de elementos, cuja base são sistemas de aquisição de imagem ou vídeo (ou seja, iluminação, suportes, dispositivos ópticos e sensores). A sequência de análise de imagens começa na etapa de pré-processamento, visando à eliminação de componentes perturbadores e irrelevantes, como ruídos e inomogeneidades. Como resultado, são obtidos dados de imagem aprimorados, que são separados em regiões significativas (segmentação) ([Bruce, 2012](#); [Majid Dowlati et al., 2012](#)).

Finalmente, as decisões podem ser tomadas com base nessas informações condensadas: detecção (por exemplo, de um defeito), classificação (por exemplo, de objetos diferentes) ou interpretação (por exemplo, inferência de parâmetros físicos e/ou químicos) ([Beyerer et al., 2016](#)). Nestes sistemas, estratégias de busca fina e grosseira que localizem objetos em tempo real podem ser obtidas por meio da análise de quadros de vídeo, em que o algoritmo realiza uma análise quadro a quadro de acordo com a taxa de amostragem ([Arora et al., 2019](#)). A [Figura 1](#) apresenta um fluxograma resumido que ilustra as etapas de processamento de um sistema de visão de máquina.

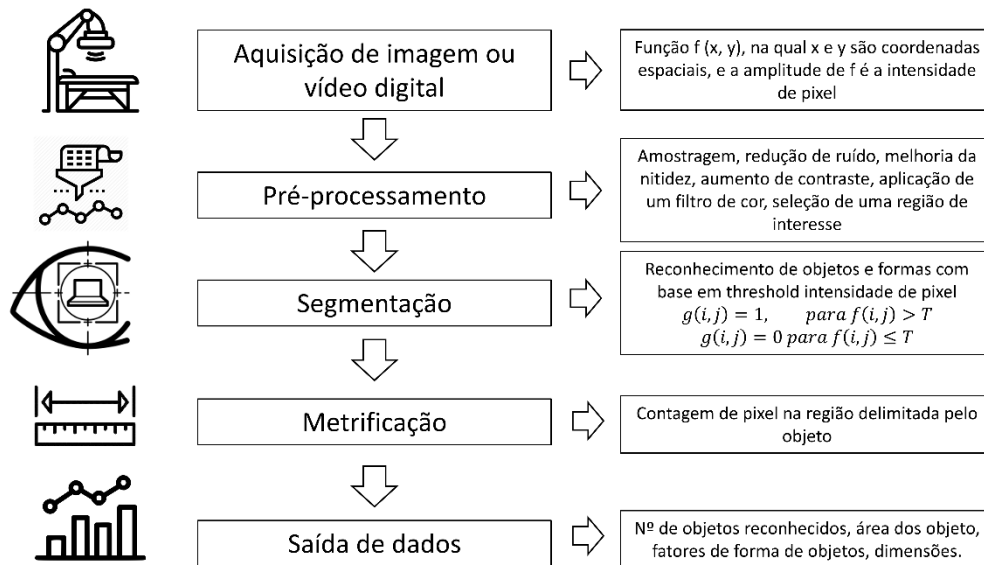


Figura 1 - Fluxograma resumido das etapas de processamento de um sistema de visão de máquina.

As principais etapas da análise de processamento de imagem associadas a visão de máquina são: (i) aquisição de imagens digitais; (ii) pré-processamento; (iii) segmentação de objetos; (iv) obtenção de características dos objetos por meio de metrificação e (v) computação das informações para geração dos dados de saída (Majid Dowlati et al., 2012; Sonka et al., 2012; Beyerer et al., 2016; Arora et al., 2019). Essas etapas de processamento estão associadas a um sinal de saída. O nível de processamento pode ser classificado como baixo, médio e alto, a depender da complexidade das operações. Na próximas seções, cada uma das etapas serão abordadas, discutidas e classificadas.

2.2.1. Aquisição de imagens digitais

A janela de entrada dos sistemas de visão de máquina são dos dispositivos de captura de imagens. Normalmente, existem cinco elementos em um subsistema de aquisição de imagem: fonte de luz, óptica de iluminação, óptica de aprimoramento de imagem, lente principal e sensor. As posições destas em relação umas às outras e ao objeto a ser observado devem ser cuidadosamente selecionadas, para se obter uma imagem digital de fácil processamento eletrônico (Bruce, 2012).

Cada aplicação de visão de máquina requer uma fonte de luz e uma óptica de iluminação específica. A fonte luz pode ser empregada simplesmente para iluminação da amostra, mas também pode ser empregada para testes de espalhamento e refração. Em relação a ótica de iluminação, sombras ou penumbras podem ser empregadas para mensurar alinhamento de objetos. Em outros casos, a necessidade é a obtenção de uma imagem com iluminação planar, livre de sombras ou restas. A óptica de aprimoramento pode utilizar recursos de ampliação de uma imagem para detecção de objetos em escala microscópica, bem como, pode fazer uso de lentes macro para uma visão mais ampla de um objeto (Beyere et al., 2016).

Em relação aos dispositivos de aquisição de imagem ou vídeo, existe uma grande variedade de modelos que estão disponíveis, desde simples webcams, até câmeras de IR com lentes de aumento para detectar objetos microscópicos. Estes dispositivos empregam comumente dois tipos de sensores semicondutores fotoresistivos: CCDs (dispositivos de carga acoplada) e CMOS (semicondutores de óxido de metal complementar), ambos desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970 (Majid Dowlati et al., 2012; Beyere et al., 2016).

Os CCDs se tornaram tecnologicamente maduros inicialmente na década de 1970 e se tornaram os fotossensores mais usados em câmeras. A tecnologia CMOS começou a ser dominada tecnologicamente por volta da década de 1990. Em um sensor CCD, a carga de cada pixel é transferida através de apenas um nó de saída para ser convertida em voltagem. Toda a área de pixels pode ser dedicada à captura de luz. Em um sensor CMOS, cada pixel tem sua própria conversão de carga em voltagem, e o sensor geralmente inclui amplificadores, correção de ruído e circuitos de digitalização, de modo que o chip produz bits (digitais) (Sonka et al., 2012). A vantagem das câmeras CMOS (em oposição ao CCD) é uma faixa mais alta de intensidades de cor detectáveis (cerca de 4 ordens de magnitude), alta velocidade de leitura (cerca de 100 ns) e acesso aleatório a pixels individuais. A desvantagem é um nível mais alto de ruído em aproximadamente um grau de magnitude (Majid Dowlati et al., 2012). Em função do melhor desempenho, as aplicações de visão de máquina industrial empregam comumente sensores do tipo CMOS (Beyere et al., 2016).

As câmeras possuem muitos recursos que devem ser compreendidos a fim de se obter os melhores resultados possíveis, incluindo a redução de ruído. A obtenção de uma imagem com ruídos minimizados é alcançado quando a câmera opera com um nível de

luz ideal. A luz deve ser baixa o suficiente para evitar a saturação, florescimento e "sangramento" de carga de um fotodetector local para outro. Ainda assim, a obtenção de imagens livre de qualquer ruído é um grande desafio (Sergiyenko et al., 2020). No entanto, um algoritmo simples pode compensar isso. Um padrão de ruído fixo é efetivamente sobreposto em cada imagem que a câmera registra (Arora et al., 2019). Isso pode ser removido de forma muito eficaz nas etapas de pré-processamento de imagem, como será discutido na seção 2.2.3.

2.2.2. Espaços de cores

De acordo com a teoria tricromática da percepção, todas as cores monocromáticas (comprimento de onda único) podem ser reproduzidas a partir de uma mistura de três cores primárias adequadamente escolhidas. Na década de 1930, a Comissão Internacional da Escadaria (CIE) padronizou a representação dessas cores primárias como RGB, sendo R (do inglês: “Red”) a cor obtida em 600 nm; G (do inglês: “Green”) a cor obtida em 546,1 nm e; B (do inglês: “Blue”) a cor obtida em 445,8 nm (Gonzalez & Woods, 2008). Por este motivo, as câmeras mais comuns empregam o padrão de filtros de cor Bayer, que é baseado no espaço de cores RGB. Um espaço de cores é a representação matemática das cores que são organizadas em coordenadas cartesianas tridimensionais. Essas representações fornecem informações úteis, como a forma como as cores são compostas, assim, diferentes modelos de cores estão disponíveis para diferentes aplicações (Sergiyenko et al., 2020).

O modelo de cores RGB é representado por um cubo unitário e os eixos são rotulados como R, G e B (Figura 2-a). A origem (0, 0, 0) representa a cor preta e o canto diagonalmente oposto (255,255,255) o branco puro. Qualquer outro espaço de cores pode ser obtido a partir de uma transformação linear ou não linear do RGB, e este recurso é geralmente empregado no processamento de imagem e vídeo, pois as câmeras empregam originalmente o espaço de cores RGB (Diniz et al., 2020).

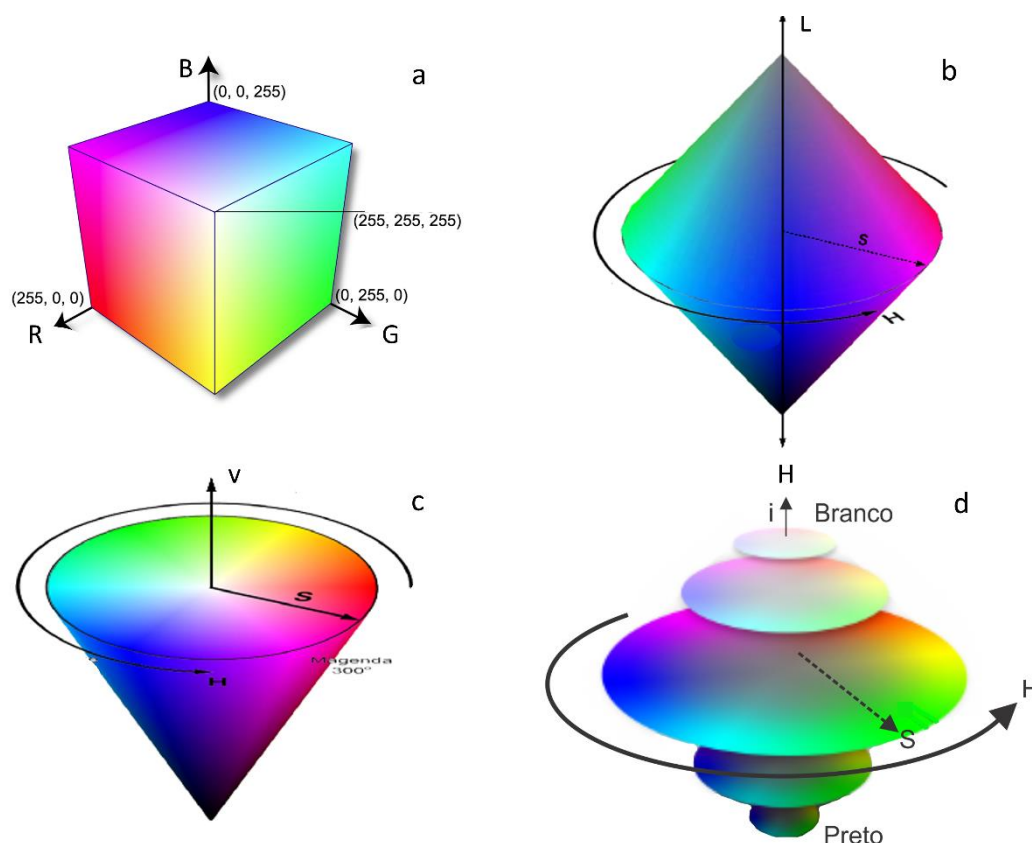


Figura 2 – Representação espacial dos espaços de cores RGB (a), HSL (b), HSV (c) e HSI (d).

O espaço de cores HSL (matiz, saturação, luminosidade, do inglês: “*Hue, Saturation, Lightness*”) possui coordenadas de duplo cone (Figura 2-b) e representa as cores de uma maneira mais intuitiva do que a representação RGB (cartesiana). Neste espaço de cores, as cores são representadas por três componentes diferentes, quer são matiz, saturação e luminosidade. O primeiro componente, Matiz, denota a cor de base em graus ou números. Os graus ou números intermediários refletem tons diferentes. Por sua vez, a saturação, que é o segundo componente, pode ser descrita como a proporção de colorido na imagem. Além disso, a saturação é sempre expressa em termos de porcentagem, ou seja, a saturação de 100% significa que a cor está totalmente saturada. O terceiro componente, a luminosidade, pode ser definido como a média dos maiores e menores componentes de cor.

O HSV (matiz, saturação, valor (bilho), do inglês: “*Hue, Saturation, Value*”) é um espaço de cor representado especialmente por um cone único (Figura 2-c). O HSV rampeia as cores primárias RGB em dimensões que são mais fáceis de entender para os humanos. A Matiz especifica o ângulo da cor no círculo de cores RGB. A

saturação controla a quantidade de cor usada. Já o valor controla o brilho da cor. Uma cor com 0% de brilho é preto puro, enquanto uma cor com 100% de brilho não tem preto misturado à cor. Como essa dimensão costuma ser chamada de brilho, o modelo de cores HSV às vezes é chamado de HSB (Gonzalez & Woods, 2008).

O espaço de cores HSI (matiz, saturação, intensidade, do inglês: “*Hue, Saturation, Intensity*”) é um modelo de cores muito importante para aplicações de processamento de imagens, pois representa as cores da mesma forma que o olho humano percebe as cores. Dentre os modelos abordados neste estudo, o HSI é o mais adequado para reconhecimento do cores. A forma mais comum de representar o modelo HSI é um cone duplo, assim como no HSL, conforme mostrado na Figura 2-d. O centro do cone duplo é uma circunferência dividida em ângulos de tamanhos iguais. Portanto, o valor do componente matiz descreve a cor por seu comprimento de onda. A distância do centro ao exterior da circunferência representa a saturação da cor e assume valores entre 0 e 1. Saturação refere-se à mistura de cor com luz branca. Finalmente, o eixo através dos dois cones corresponde ao componente de intensidade. Terá um valor entre 0 (preto, base do cone) e 1 (branco, topo do cone) e indica a quantidade de luz presente em uma cor. Quando o componente de saturação está próximo de 0, as cores refletem apenas uma mudança entre preto e branco. Deste modo, a saturação máxima está disponível em uma intensidade média de cinza (Sonka et al., 2012; Gonzalez & Woods, 2008).

Em linhas gerais, as componentes L, V e I dos espaços de cores HSL, HSV e HSI, respectivamente, carregam a informação sobre nível de luminosidade ou brilho de uma cena. As intensidade destas componentes podem ser obtidas a partir dos dados de intensidade de pixel do RGB, conforme descrito nas Equações 2, 3 e 4 (Bruce, 2012; Sonka et al., 2012).

$$L = \frac{\left\{ \max\left(\frac{R}{255}, \frac{G}{255}, \frac{B}{255}\right) + \min\left(\frac{R}{255}, \frac{G}{255}, \frac{B}{255}\right) \right\}}{2} \quad (2)$$

$$V = \max\left(\frac{R}{255}, \frac{G}{255}, \frac{B}{255}\right) \quad (3)$$

$$I = \frac{(R + G + B)}{3} \quad (4)$$

Em adição, a partir de uma imagem RGB é possível obter os planos R, G e B separadamente. Deste modo, cada um dos três planos será composto por uma matriz bidimensional contendo apenas a informação de pixel de uma componente, conforme ilustrado na [Figura 3](#).

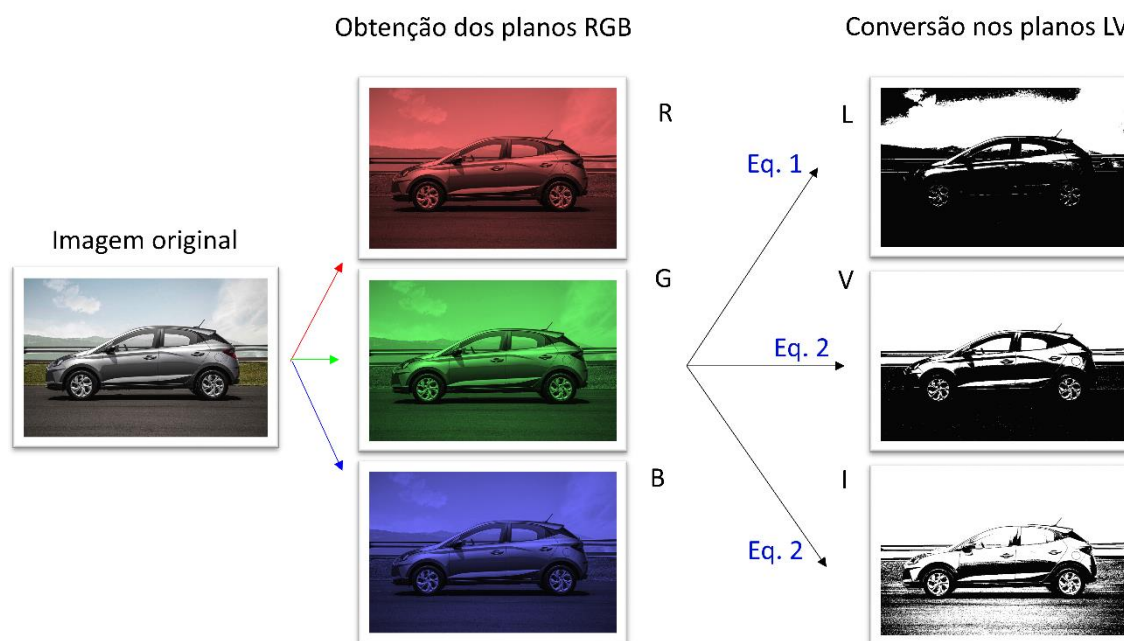


Figura 3 – Ilustração dos planos de cor R, G, B, I, V e I a partir de uma imagem RGB.

A partir dos planos R, G e B de uma imagem, as [Equações 2, 3 e 4](#) podem ser empregadas para obtenção os planos L, V e I, realizando um conversão pixel a pixel. É possível observar que cada plano de cor irá ressaltar uma característica específica da imagem, desse modo, a seleção do plano de cor adequado é fundamental para auxiliar o sistema de visão de máquina a reconhecer o objeto alvo.

2.2.3. Pré-processamento de imagem

A imagem digital é descrita como uma função de duas variáveis, $f(x, y)$, na qual x e y são coordenadas espaciais e a amplitude de f é a intensidade ou nível de cinza nesse ponto. Quando x , y e a intensidade de f são finitos e descritos de modo discreto, a imagem é chamada de digital. Os elementos de imagem tratados no processamento são os pixels ([Boyle & Hlavac, 2014](#); [Beyerer et al., 2016](#)).

Em visão de máquina, as etapas de processamento de imagem pode ser de baixo nível, médio e alto nível. As fase de pré-processamento está enquadrada em processamento de baixo nível. Essas técnicas de baixo nível envolvem operações de processamento primitivas (por exemplo, redução de ruído, nitidez de imagem e aumento de contraste, aplicação de um filtro de cor, seleção de uma região de interesse). Este tipo de processamento é caracterizado por ambas as entradas e saídas serem imagens (Boyle & Hlavac, 2014; Majid Dowlati et al., 2020).

O pré-processamento não aumenta o conteúdo das informações da imagem. No entanto, o pré-processamento é muito útil em uma variedade de situações, pois ajuda a suprimir informações irrelevantes para o processamento específico da imagem ou tarefa de análise (Sonka et al., 2012). Portanto, o objetivo do pré-processamento é uma melhoria dos dados da imagem que suprime distorções indesejadas ou aprimora alguns recursos importantes para processamento posterior.

Os tipos mais simples de transformações de pré-processamento de imagem são operadores de ponto, em que o valor de cada pixel de saída depende apenas do valor do pixel de entrada correspondente. Exemplos de tais operadores incluem ajustes de brilho e contraste. Na literatura de processamento de imagens, tais operações também são conhecidos como processos pontuais (Richard et al., 2012). Por outro lado, pixels vizinhos correspondentes a objetos em imagens reais geralmente têm o mesmo valor de brilho ou semelhante, portanto, se um pixel distorcido pode ser selecionado da imagem, ele pode ser restaurado como um valor médio de pixels vizinhos (Majid Dowlati et al., 2012).

Outras transformações nas propriedades dos pixels pode ser correções de brilho, transformações de escala de cinza ou binarização (Gonzalez & Woods, 2008). A correção de brilho modifica o brilho do pixel levando em consideração seu brilho original e sua posição na imagem. As transformações em escala de cinza ou a binarização alteram o brilho independentemente da posição na imagem. Algoritmos de visão de máquina comuns utilizam limiares de intensidade de pixel para binarizar imagens e então segmentar objetos (Gonzalez & Woods, 2008; Majid Dowlati et al., 2012; Sergiyenko et al., 2020).

As transformações geométricas permitem o redimensionamento de imagens para obtenção de uma nova imagem com escala ou região de interesse ajustada. Quando

sistemas de visão de máquina são calibrados para realizar medições de distâncias entre objetos, um dos principais ajustes é transformação geométrica, a fim de distribuir de forma equitativa as distâncias em pixels nas marcações de uma cena. Outra transformação comum é o redimensionamento da imagem para enquadrar apenas uma região de interesse (ROI), eliminando o processamento desnecessário do restante da cena (Boyle & Hlavac, 2014).

A derivação da imagem em planos de cor também é uma técnica utilizada na etapa de pré-processamento para sistemas de visão de máquina. Este recurso é comum pois um plano de cor específico pode ser mais sensível a determinado sinal analítico que os demais planos, conforme explicado na seção 2.2.2. Estudos de otimização dos sistemas de visão de máquina avaliam diferentes espaços de cores como RGB, HSV, HSI, HSL, CIELAB, XYZ, dentre outros (Gonzalez & Woods, 2008; Majid Dowlati et al., 2012; Sergiyenko et al., 2020).

2.2.4. Segmentação de objetos

As técnicas de processamento de nível médio envolvem segmentação, na qual as entradas são geralmente imagens, enquanto as saídas (por exemplo, bordas, contornos e a identidade de objetos individuais) são atributos extraídos deles (Boyle & Hlavac, 2014). Cada aplicação de visão de máquina está associada a um reconhecimento de objetos específico, seja detecção de rachaduras de uma peça, rótulo de uma embalagem, dimensões de um componente veicular, etc. Desse modo, cada aplicação estará associada ao tipo de segmentação que melhor identifique o sinal analítico desejado.

A segmentação da imagem é uma das etapas mais importantes nas cadeias de processamento dos sistemas de visão de máquina. O principal objetivo da segmentação é dividir uma imagem em partes que tenham uma forte correlação com os objetos ou áreas do mundo real contidos na imagem. Uma segmentação completa de uma imagem R é um conjunto finito de regiões $R_1, \dots, R_S$. Para conseguir isso, a cooperação com níveis de processamento superiores que usam conhecimento específico do domínio do problema é geralmente necessária (Majid Dowlati et al. 2012; Boyle & Hlavac, 2014).

Existem uma série de aplicações em que problemas de segmentação podem ser resolvidos com êxito usando apenas o processamento de nível inferior. Neste caso, a

imagem normalmente consiste em objetos contrastantes localizados em um fundo uniforme. Esse processamento é independente do contexto; nenhum modelo relacionado ao objeto é usado e nenhum conhecimento sobre os resultados de segmentação esperados contribui para a segmentação final (Silva et al., 2018; Sergiyenko et al., 2020). A segmentação totalmente correta e completa de cenas complexas geralmente não pode ser alcançada nesta fase de processamento, embora um ganho imediato seja uma redução substancial no volume de dados. Por este motivo, o controle do ambiente de aquisição de imagens em sistemas de visão de máquina é indispensável para o sucesso da técnica (Majid Dowlati et al. 2012; Boyle & Hlavac, 2014).

O Limiar de nível de cinza (*threshold*) é o processo de segmentação mais simples e recorrente em sistemas de visão de máquina. Muitos objetos ou regiões de imagem são caracterizados por refletividade constante ou absorção de luz de sua superfície. Desse modo, uma constante ou limite de brilho pode ser determinado para segmentar objetos e o fundo da cena. A técnica de segmentação *threshold* é computacionalmente barata e rápida - é o método de segmentação mais antigo e ainda é amplamente usado em aplicativos simples, podendo ser facilmente executada em tempo real técnica (Majid Dowlati et al. 2012; Boyle & Hlavac, 2014).

O *threshold* é a transformação de uma imagem de entrada f em uma imagem binária de saída (segmentada) g , conforme descrito nas Equações 5 e 6.

$$g(i, j) = 1, \text{ para } f(i, j) > T \quad (5)$$

$$g(i, j) = 0 \text{ para } f(i, j) \leq T \quad (6)$$

Em que T é o *threshold*, $g(i, j) = 1$ é a condição para objetos e $g(i, j) = 0$ é a condição para fundo ou cena (ou vice-versa). Esta abordagem irá depender se o algoritmo de visão de máquina está programado para reconhecimento de objetos brilhantes (Eq.5) ou negros (Eq.6) (Majid Dowlati et al. 2012; Boyle & Hlavac, 2014).

A segmentação completa pode resultar de uma análise de *threshold* simples entre objeto e cena. Se os objetos não se tocam e seus níveis de cinza são claramente distintos dos níveis de cinza da cena, o limiar é um método de segmentação mais adequado (Majid Dowlati et al. 2012; Boyle & Hlavac, 2014). A Figura 4 ilustra um processo de segmentação com exemplos dos resultados obtidos a partir do valor de *threshold*. Nesse exemplo, a segmentação busca por objetos negros ($g(i, j) = 0$).

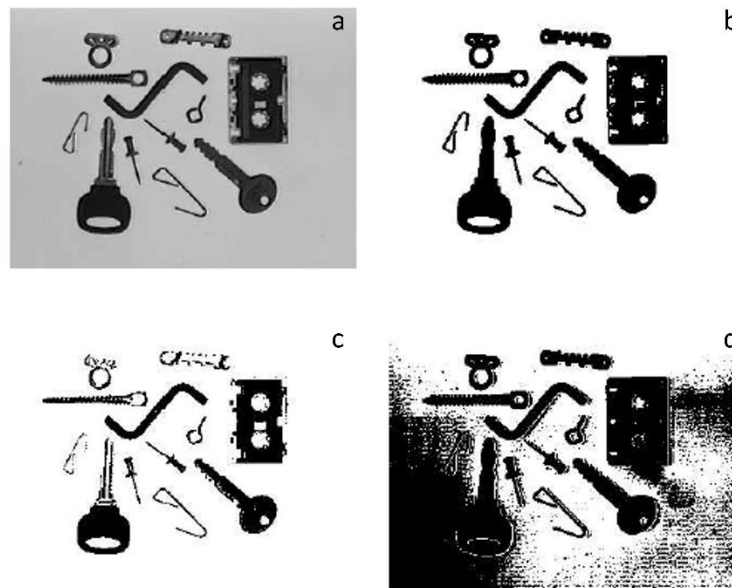


Figura 4 – Exemplificação do processo de segmentação de uma imagem. **a**-imagem original; **b**-imagem com objetos segmentados a partir de uma valor de *threshold* adequado; **c**- imagem com objetos segmentados a partir de uma valor de *threshold* baixo; **d**- imagem segmentada a partir de um valor de *threshold* alto (Sonka et al., 2012).

Nesse sentido, a escolha do valor *threshold* para segmentação de uma imagem é uma das etapas mais importantes na configuração dos parâmetros de entrada de sistemas de visão de máquina. Quando uma imagem apresenta baixa homogeneidade nas intensidades de cinza dos objetos, a seleção de um *threshold* global pode levar a perda de resolução na segmentação. Nesse caso, a imagem deve passar por uma nova etapa de pré-processamento para recorte de sub-regiões, de modo a possibilitar a aplicação de *threshold* local (Gonzalez & Woods, 2008; Silva et al., 2018).

O algoritmo de segmentação *threshold* mais comumente utilizado é o método de maior variância inter-classe, conhecido como *Otsu* (Otsu & Abdelmalek, 1992), que seleciona um limite global ideal, para então maximizar a variância entre as classes ($g(i, j) = 1$; $g(i, j) = 0$). Outros métodos de segmentação também são populares, como *threshold* baseado em entropia, método de erro mínimo, método de matriz de concorrência, método de preservação de momento, método estatístico simples, método de relaxamento de probabilidade, método de conjunto *fuzzy* e métodos combinados. A vantagem do método *Otsu* é que o cálculo é simples e, portanto, uma operação mais rápida, principalmente quando o plano de fundo têm alto contraste (Boyle & Hlavac, 2014).

A primeira etapa de processamento do *Threshold Otsu* é análise de distribuição de frequência do histograma da imagem. Essa técnica produz resultados mais satisfatórios para imagens com distribuição bimodal. O algoritmo separa o histograma da imagem em dois clusters com um limite definido, como resultado da minimização da variância ponderada dessas classes. A função que deu origem a técnica *Threshold Otsu* é descrito na [Equação 7](#) (Otsu & Abdelmalek, 1992).

$$\sigma^2_{intra} = w1\sigma_1^2 + w2\sigma_2^2 \text{ Eq. 7}$$

Em que $w1$ e $w2$ são as probabilidades que um pixel possui de pertencer a classe 1 (*background*) ou 2 (*foreground*); σ^2_w é a variância intra-classe. Esse cálculo será realizado para todos os *thresholds* possíveis (0-255). O valor de *threshold* que minimiza a variância intra-classe será o *threshold* selecionado para a binarização da imagem. Porém, este é um cálculo computacionalmente custoso. Otsu demonstrou que é possível substituir a [Equação 7](#) pelo cálculo da variância inter-classe, diminuindo o custo do algoritmo, conforme demonstrado na [Equação 8](#). A [Figura 5](#) ilustra o processo de segmentação de uma imagem empregando a técnica *Threshold Otsu* (Otsu & Abdelmalek, 1992; Boyle & Hlavac, 2014).

$$\sigma^2_{inter} = w1w2(\mu_1 - \mu_2)^2 \text{ (8)}$$

Assim, w é razão entre a soma do total de pixels de uma classe e o número total de pixels da imagem ([Equação 9](#)). μ é razão entre a intensidade média de pixel de uma classe e total de pixel da mesma ([Equação 10](#)). Neste caso, a função de custo otimiza o valor de *threshold* pela busca de um σ^2_{inter} máximo. Feito isso, cada pixel com valor igual ou superior ao *threshold* recebe as coordenadas RGB 255,255,255 (Branco), enquanto aqueles com intensidade abaixo do *threshold* recebe coordenadas RGB 0,0,0 (preto) (Boyle & Hlavac, 2014).

$$w = \frac{\sum_i^n pixel_i}{pixel_T} \text{ (9)}$$

$$\mu_i = \frac{\sum_i^n pixel_i \gamma}{\sum_i^n pixel_i} \text{ (10)}$$

Em que $\sum_i^n pixel_i$ é a soma do total de pixels de uma classe; $pixel_T$ é o total de pixels de uma imagem; $\sum_i^n pixel_i \gamma$ é a intensidade média de pixel de uma classe obtido pelo produto entre número de pixel ($pixel_i$) e sua respectiva intensidade (γ).

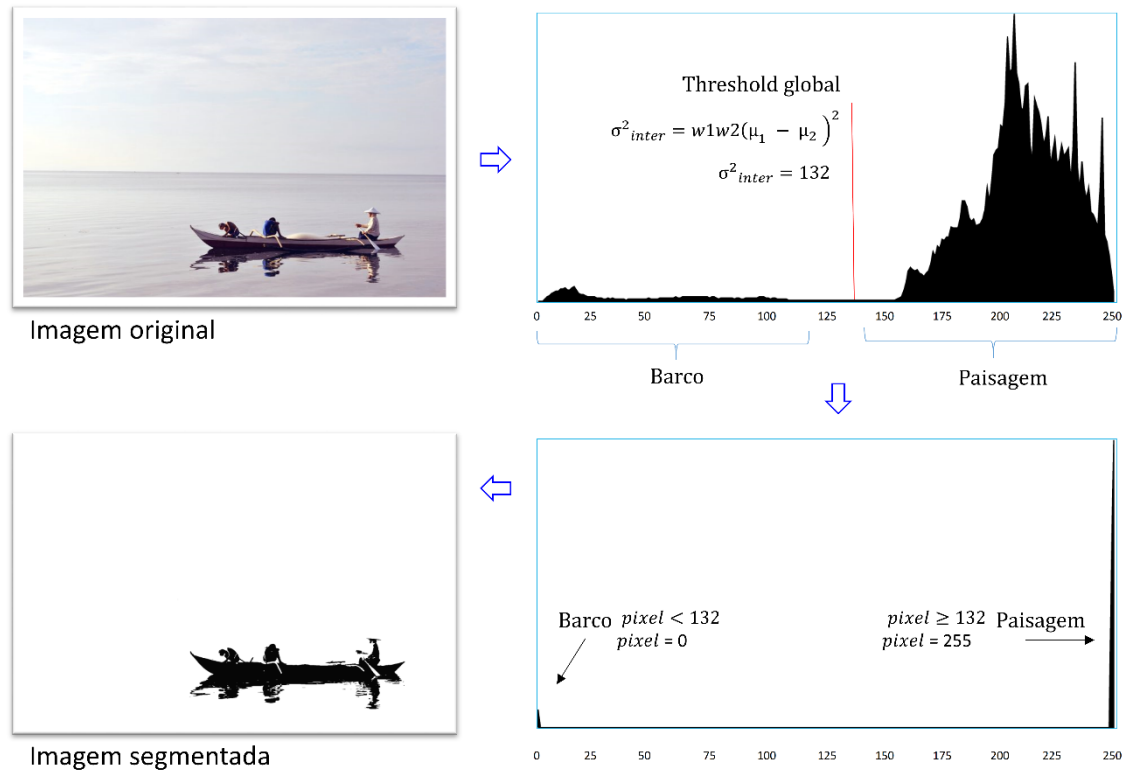


Figura 5 – Ilustração do processo de segmentação de uma imagem empregando a técnica *Threshold Otsu*.

Para cenas que possuem apenas um objeto a ser detectado, a área total do objeto é dada pelo somatório dos pixels da classe objeto. As técnicas de processamento de alto nível empregam algoritmos bioinspirados para reconhecimento de formas, contornos, morfologias, contudo, esta discussão está além do escopo do presente estudo.

Capítulo 3.

EXPERIMENTAL

3. Experimental

3.1. Instrumentação

Os filmes digitais foram obtidos utilizando-se um instrumento desenvolvido em laboratório, equipado com amostrador automático para 8 amostras (ver Fig. 6). A bandeja do amostrador automático foi rotacionada por um motor de passo (*KiaTronics*®, modelo 28BYJ-48) acionado por microcontrolador (*Atmel Corporation*®, modelo ATMEGA328P). O drive empregado para acionamento do motor de passo foi um CI ULN2003 (*STMicroelectronics*®). O algoritmo de controle deste amostrador automático foi construído e projetado para identificar o caminho de giro mais curto para alcançar a posição de amostra selecionada. A programação do micro controlador foi realizada em C++ e a biblioteca *Stepper.h* foi empregada para implementar funções de pulsado do motor de passo. O código fonte comentado está disponível no Apêndice I (Apêndice I, Figuras S1-S7).

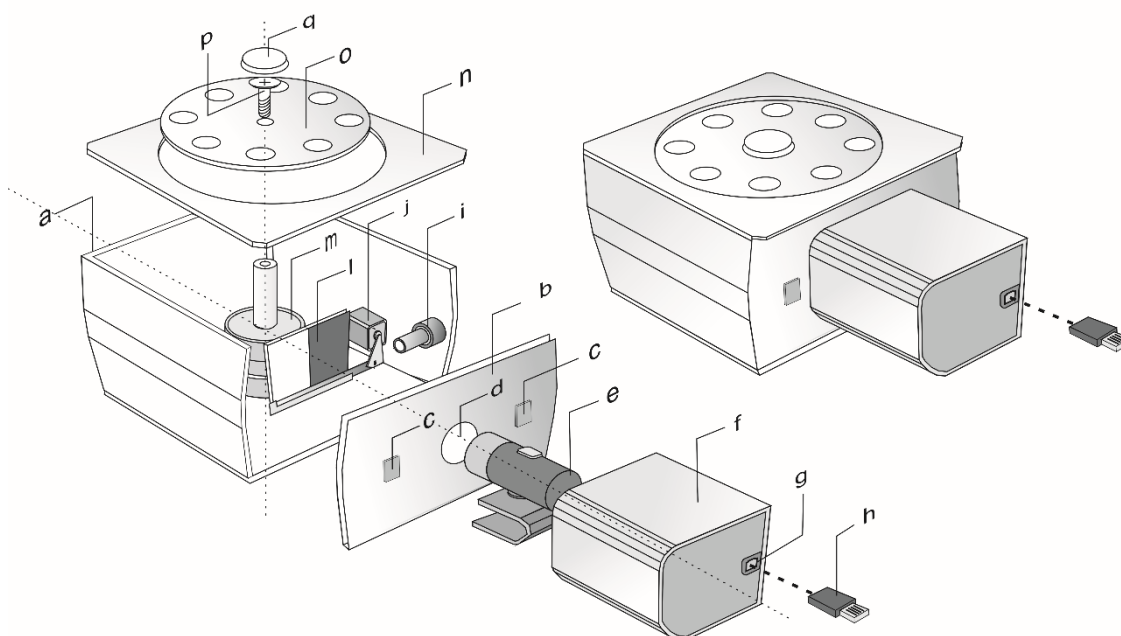


Figura 6 - Multianalisador com amostrador automático, em que: **a** – gabinete externo; **b** – tampa frontal; **c** – leds de iluminação interna; **d** – janela da cela de detecção; **e** – webcam; **f** – gabinete da webcam; **g** – porta USB; **h** – cabo usb; **i** – laser interno; **j** – servo motor; **l** – plano de fundo preto ou branco; **m** – motor de passo; **n** – tampa superior; **o** – bandeja de amostras; **p** e **q** – parafuso e tampa de fixação da bandeja de amostras.

As fontes de iluminação interna são dois *LEDs* de superfície branca ultrabrilhante (*Multicomp*®, modelo OVS-2101) e uma fonte de radiação laser (a 650 nm, 5 mW; *Mantech*®, modelo 913791). Um servo motor (*TowerPro*®, modelo SG90) foi utilizado para movimentar o fundo da célula de detecção, possibilitando a aquisição de vídeo com fundo preto ou branco. Uma webcam *Microsoft*®, modelo *LifeCam Cinema*, com 5 megapixels, foi usada para adquirir os vídeos digitais (HD 720p) das amostras. O controle e a alimentação do instrumento foram realizados via duas conexões USB com notebook, sendo um USB da webcam e o outro USB do microcontrolador *Atmel*.

3.2. Software de controle

O software para controle do hardware e para processamento de vídeo digital foi desenvolvido em ambiente de programação *LabView*®. As opções de controle incluem a ativação da fonte de iluminação interna (*LED* ou laser), escolha do fundo da cela de detecção (preto ou branco), calibração da posição da bandeja (com resolução de 0,0175 radianos) e seleção da posição da bandeja de amostragem (de 1 a 8). O executável do software pode ser instalado em qualquer sistema operacional Windows superior ao *Windows7*. A *Figura 7* apresenta a estrutura de *frontend* do *software* que foi desenvolvido.

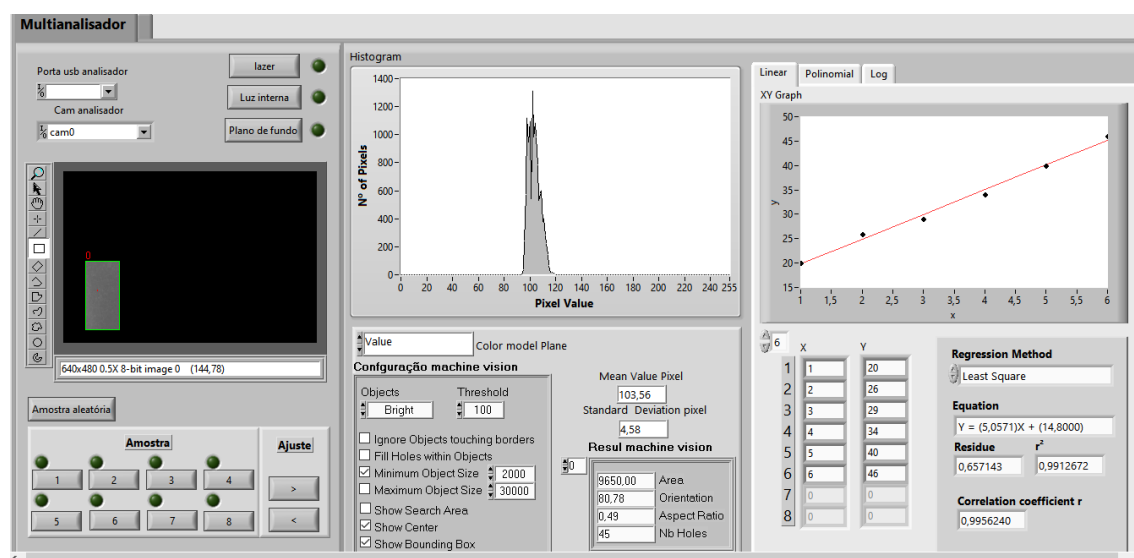


Figura 7 – Estrutura de *frontend* do *software* de processamento de vídeo e controle do multianalisador.

O *software* foi organizado em três blocos visuais, o primeiro (bloco da esquerda), apresenta na parte superior dois *textbox* para seleção da porta *Com* na qual estão conectados o multianalisador e a webcam. Ao lado estão posicionados os botões de alteração do status da iluminação interna (*ON/OFF*), da fonte de radiação laser (*ON/OFF*) e do plano de fundo da sela de detecção (Preto/Branco). Logo abaixo é possível visualizar o display de vídeo, no qual são exibidos em tempo real o filme da amostra contida pela de detecção, juntamente com o resultado de reconhecimento de objetos do sistema de visão de máquina. Ao lado do display está disponível uma caixa de ferramentas para edição da ROI, incluindo utilitários de desenho que permitem obtenção da ROI em diferentes formas geométricas. Abaixo do display de vídeo está posicionado um botão para seleção randômica da amostra. Na parte inferior deste primeiro bloco estão contidos botões de 1-8 para seleção da posição do amostrador, bem como, os botões de calibração da posição da bandeja.

No bloco central do *software* de controle estão contidos os resultados obtidos a partir das etapas de processamento de vídeo, bem como, os botões de configuração do sistema de processamento de vídeo. O gráfico da parte superior deste bloco exibe em tempo real o histograma do vídeo em processamento. Na parte inferior esquerda está posicionado o *textbox* para seleção do plano de cor desejado para a etapa de pré-processamento de vídeo (R, G, B, L, V e I), bem como, os parâmetros de configuração do algoritmo de visão de máquina (ignorar objetos que tocam a borda da ROI; preencher buracos de pixels nos objetos; definir o tamanho mínimo de objeto a ser buscado; definir o tamanho máximo de objeto a ser buscado; buscar por objetos pretos ou brilhantes; valor de *threshold*; mostrar área do objeto reconhecido; indicar o centro de massa do objeto e indicar o índice do objeto (0-n). Ainda no bloco central, na parte inferior direita, são exibidos o valor médio e o desvio da intensidade de pixel, bem como, a área do objeto reconhecido, a orientação espacial (maior distância entre dois pontos do objeto), a razão largura altura e o número de buracos do objeto.

O terceiro bloco foi projetado para salvamento de dados e construção das curvas analíticas, no qual é possível selecionar o número de pontos da curva e inserir os dados de concentração de padrão de calibração e de sinal analítico. Neste bloco é possível selecionar o método de regressão (mínimos quadrados, mínimo residual absoluto ou bisquare) e o tipo de ajuste (linear, polinomial ou logaritmo). Este bloco já fornece os

dados da curva de regressão (equação) e os dados de desempenho do modelo (Resíduo de regressão, R^2 e R^2 ajustado).

3.3. Processamento de vídeo

A [Figura 8](#) apresenta o fluxograma das rotinas de aquisição e amostragem de vídeo, pré-processamento de vídeo e algoritmo de visão de máquina. Em relação a rotina de aquisição e amostragem de vídeo, a comunicação serial entre o software e a webcam foi estabelecida através do dispositivo *IMAQdx Open Camera VI*, que inicia uma conexão para receber arquivos de vídeo em tempo real. Em seguida, os dispositivos *IMAQdx Configure Grab VI* e *IMAQdx Grab VI* foram usados para estabelecer a taxa de aquisição de quadros de vídeo (20 fps) e obter o quadro mais atual disponível, respectivamente. Vale ressaltar que a webcam utilizada pode capturar vídeos HD 720p em até 30 fps. A saída deste primeiro bloco foram quadros de vídeo a 20 fps.

No pré-processamento desses quadros de vídeo, o dispositivo *IMAQ ExtractSingleColorPlane VI* foi usado para selecionar o espaço de cores, neste caso RGB (Red-Green-Blue), HSL (*Hue-Saturation-Luminance*), HSV (*Hue-Saturation- Value*), e HSI (*Hue-Saturation-Intensity*), extraíndo um único plano de cor, entre os quais R, G, B, L, V e I foram avaliados individualmente. A conversão dos panos de cores foi baseada nas [Equações 2, 3 e 4](#). É importante notar que os componentes de cores R, G e B foram avaliados porque os vídeos foram originalmente gravados no espaço de cores RGB, enquanto os outros espaços de cores foram usados porque eles representam mais de perto as cores que o olho humano tende a perceber, conforme discutido na seção 2.2.2. Nestes últimos casos, apenas L, V e I foram avaliados porque indicam a quantidade de luz que varia do branco (muito claro, iluminação total) ao preto (muito escuro, sem luz) ([Diniz, 2020](#)). Isso se deve à necessidade de separar a cromaticidade (definida como o grau de pureza da cor, relacionada tanto ao matiz quanto à saturação) das variações na distribuição da luz contida no sinal analítico.

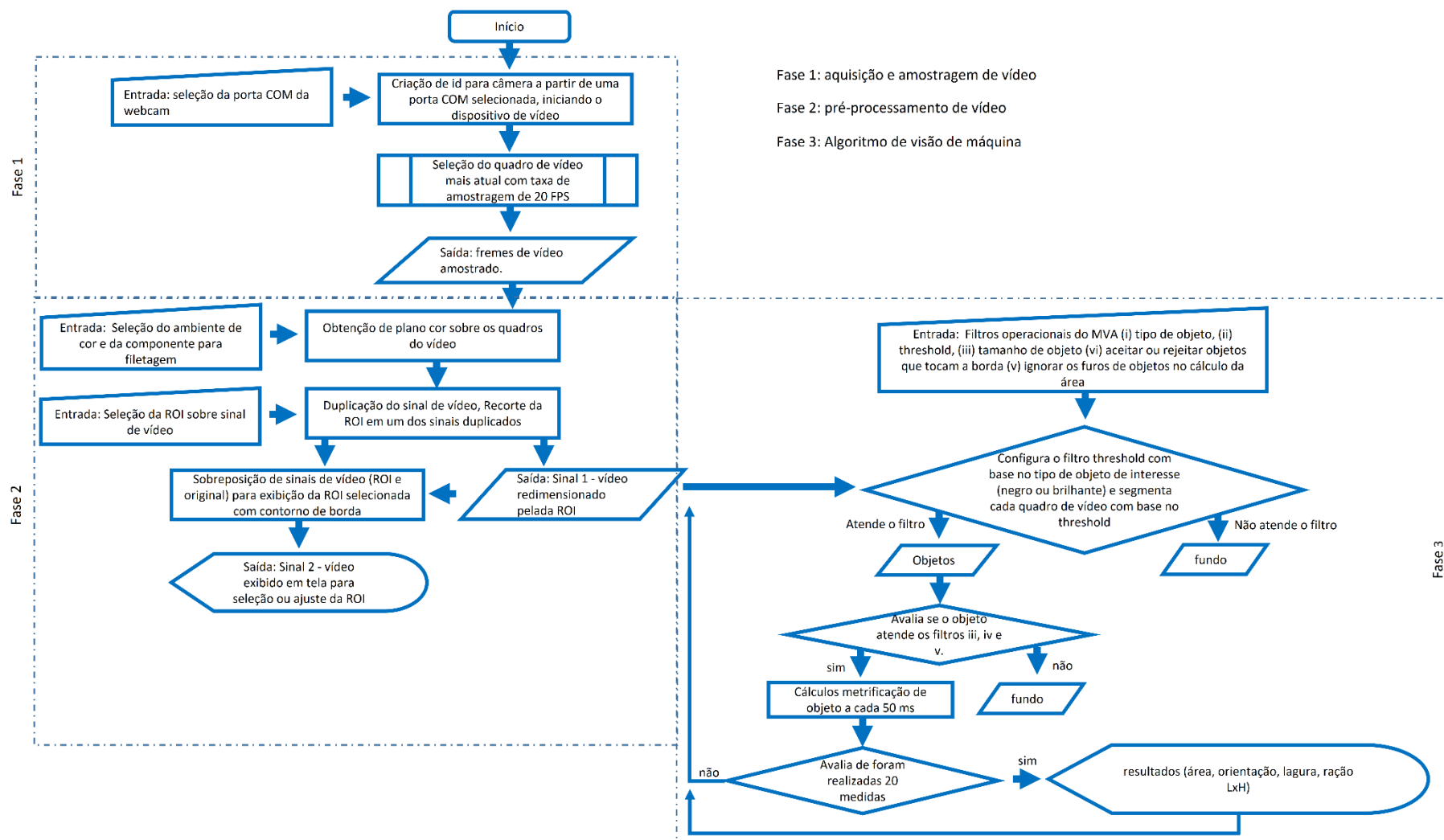


Figura 8 - Fluxograma das rotinas de aquisição e amostragem de vídeo, pré-processamento de vídeo e algoritmo de visão de máquina

Outros dispositivos para copiar, cortar e sobrepor (*IMAQ Copy VI*, *IMAQ ROIToMask 2 VI*, *IMAQ SetOffset VI* e *IMAQ Mask VI*, respectivamente) foram usados na cadeia de pré-processamento para gerar um novo quadro de vídeo da região de interesse (ROI). Esses recursos de cópia, corte e sobreposição tornaram possível definir a ROI por meio do clique/arraste do cursor do mouse diretamente na tela do software onde o vídeo capturado foi exibido. Para tanto, o sinal de vídeo foi duplicado, assim, apenas ROI foi enviada para o sistema de visão de máquina, ao passo que o vídeo em tela inteira foi exibido no display, a fim de facilitar o posicionamento da ROI. Nas determinações de SST e SS, a ROI foi definida com base no espaço visual onde os sinais analíticos estavam contidos (região de espalhamento laser na determinação de SST; e sedimentos formados no fundo dos tubos Falcon® na determinação de SS).

Após o procedimento de amostragem de vídeo, seleção do plano de cor desejado e definição da ROI, as ferramentas *IMAQ Count Objects 2 VI* e *IMAQ Histogram VI* foram utilizadas para reconhecer/metritificar objetos e analisar o valor médio de intensidade de pixel, respectivamente.

O *IMAQ Count Objects 2 VI* é um algoritmo de visão de máquina que usa o método *threshold* (Eq. 5 e 6) para segmentar objetos de uma cena em tempo real. Os filtros opcionais deste dispositivo oferecem a capacidade de: (i) ignorar objetos menores ou maiores do que os tamanhos especificados; (ii) rejeitar objetos que tocam as bordas da região de interesse (ROI); (iii) ignorar as lacunas que o processo de segmentação pode criar nos objetos; (iv) pesquisar os limites da borda de um objeto a partir de um valor limite predefinido; e (v) buscar por objetos pretos ou brilhantes. Com base no exposto, o algoritmo de visão de máquina (MVA) analisa um vídeo em tempo real para cada amostra e fornece os seguintes resultados: (i) a identificação simultânea de n objetos, que são indicados por um contorno retangular vermelho com um índice n ; (ii) as coordenadas de cada objeto; (iii) a área; (iv) o diâmetro máximo; e (v) a relação largura-altura.

O *IMAQ Histogram VI* calcula o valor médio de intensidade de pixel em tempo real com base em uma matriz de histograma. A definição do valor médio do pixel para os componentes R, G, B, L, V e I foi possível graças à seleção de cada plano de cor na etapa de pré-processamento. Tanto na análise de intensidade do componente de cor quanto nas análises de visão de máquina, o loop de processamento foi executado a cada 50 milissegundos, ou seja, os resultados médios de 20 medições são exibidos a cada segundo.

O resumo das etapas de processamento de vídeo para determinação de SST e SS empregando sistema de visão de máquina são apresentadas na [Figura 9](#).

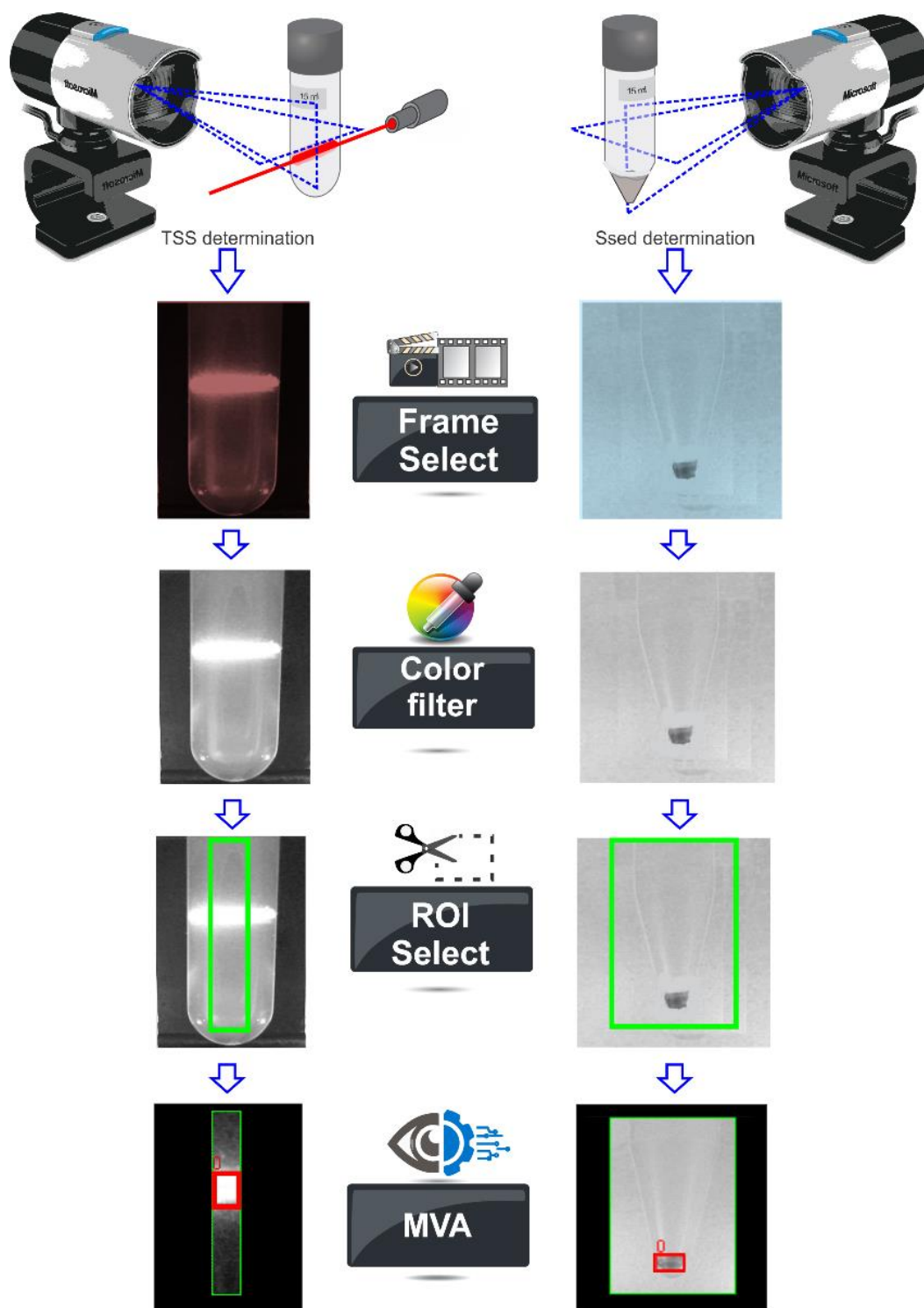


Figura 9 – Etapas de processamento de vídeo para determinação de SST e SS empregando sistema de visão de máquina.

3.4. Procedimentos analíticos

Nos ensaios para determinação da concentração de SS, o plano de fundo da cela de detecção foi ajustado para cor branca, uma vez que os sedimentos formados foram identificados pelo MVA como objetos de cor preta. Para isso, tubos Falcon® de 15 mL foram utilizados como porta amostra, os LEDs de iluminação interna permaneceram ligados e o laser desligado. A configuração utilizada no MVA foi a seguinte: (i) *threshold* na intensidade 120; (ii) detecção de objetos de cor preta; (iii) exclusão de objetos que tocam a borda da ROI e tamanho mínimo de objeto 400 (área em pixel²). A determinação do valor ótimo de *threshold* foi realizada pelo método Otsu, conforme discutido na seção 2.2.4. O software utilizado para determinação do *threshold* foi o LabView®.

Já nas determinações da concentração de SST, o plano de fundo da cela de detecção foi ajustado para cor preta, uma vez que a área do espalhamento laser foi reconhecida pelo MVA como objeto brilhante. Tubos de vidro de 15 mL e 1 cm de diâmetro foram utilizados como porta amostra. A iluminação interna permaneceu desligada e o laser em 650 nanômetros foi utilizado como a fonte de radiação para as medidas de dispersão de luz. A configuração utilizada no MVA foi a seguinte: (i) *threshold* no valor 230; (ii) detecção de objetos brilhantes (iii) seleção de objetos que tocam a borda da ROI e tamanho mínimo de objeto 1000 (área em pixel²). A ferramenta *IMAQ Histogram VI* foi empregada para gerar os histogramas de cor e calcular a distribuição e o valor médio de pixel.

3.5. Métodos de referência e amostras

Os ensaios de calibração e a predição para determinação das concentrações de SST e SS foram realizados empregando amostras de água residuária coletas no intercepto leste da rede de esgotamento sanitários da cidade de Campina Grande - PB, Brasil, nas dependências da Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários (EXTRABES-Universidade Estadual da Paraíba). As análises de referência para determinação das concentrações de SST e SS foram realizadas pelos métodos 2540D e 2540F do *Standard Methods* (APHA, 2017), conforme descrito na seção 2.1. As amostras em diferentes níveis de SST e SS foram obtidas por meio de coletas realizadas alternando o dia, horário e a diluição. Nas amostras diluídas, água destilada foi empregada como

diluyente. Todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicata para garantir resultados estatisticamente mais significativos.

3.5.1. Determinação de sólidos sedimentáveis

No método proposto para determinação da concentração de SS, os 60 minutos descritos na metodologia de referência (APHA, 2017) para que a decantação ocorra empregando cone *imhoff* foram convertidos para 1 minuto de centrifugação. Esta conversão foi realizada aplicando-se Equação 11.

$$Gc = (9,80665 \text{ ms}^{-1} \times tc) / td \quad (11)$$

Em que: Gc e tc são, respectivamente, a força G centrífuga e o tempo de centrifugação, enquanto td é o tempo de decantação. Para td de 60 minutos e tc de 1 minuto, a força Gc correspondente é 588 G.

Uma centrífuga modelo 206-BL da Fanem® foi empregada e as amostras foram dispostas em tubos Falcon® de polipropileno de 15 mL (105 mm de comprimento). A rotação correspondente a 588 G para esta centrífuga, no tempo tc de 1 minuto, corresponde à 2236 RPM.

Na determinação da concentração de SS, o MVA foi empregado para identificar e medir a área do sedimento formado após a centrifugação. Neste ensaio, foi estudado o melhor plano de cor (*Red-R*, *Green-G*, *Blue-B*, *Luminance-L*, *Value-V* and *Intensity-I*) para a etapa de pré-processamento de vídeo. As curvas analíticas foram construídas empregando amostras com sete níveis concentrações de SS (0,683 – 5,66 mL L⁻¹).

3.5.2. Determinação de sólidos suspensos totais

Na determinação da concentração de SST, a técnica alternativa foi baseada no espalhamento de luz provocado pelas partículas em suspensão. Neste ensaio, a área de luz espalhada foi identificada e determinada pelo MVA. O valor médio de pixel para os canais R, G, B, L, V e I também foi avaliada como sinal analítico. As curvas analíticas foram construídas empregando amostras com sete níveis de concentrações de SST (30,23 – 249,47 mg L⁻¹).

3.5.4. Testes de predição e determinação do tempo de análise

Nos testes de predição, cinco concentrações diferentes de SST e SS foram analisadas em triplicata, resultando em um total de 15 medições. Inicialmente, as amostras foram colocadas em tubos de vidro de 15 mL, oito tubos por vez, que foram inseridos no amostrador automático para determinação do conteúdo de SST. Em seguida, as mesmas amostras utilizadas na determinação do SST foram homogeneizadas e transferidas para tubos Falcon® de 15 mL. Na sequência, as amostras foram centrifugadas por 1 minuto e, a seguir, reinseridas no amostrador automático para posterior determinação dos SS, ativando a função aleatória de seleção de amostras.

Por fim, o amostrador automático posicionou cada amostra em frente ao sistema de detecção e o sinal analítico foi obtido por visão de máquina e registrado automaticamente em planilha digital do software de controle. O tempo de cada um desses procedimentos analíticos e o tempo de resposta do equipamento foram medidos para determinar o tempo total para determinação sequencial de SST e SS.

Capítulo 4.

**RESULTADOS E
DISCUSSÃO**

4. Resultados e Discussão

4.1. Sólidos Sedimentáveis

Na [Figura 10](#) são apresentadas imagens obtidas durante o ensaio de calibração para determinação da concentração de SS, empregando o MVA como o plano de cor *Red* (R) do espaço de cores RGB. A região retangular verde representa os limites da ROI e o retângulo vermelho com índice 0 indica a área do sedimento que foi identificada e determinada pelo MVA.

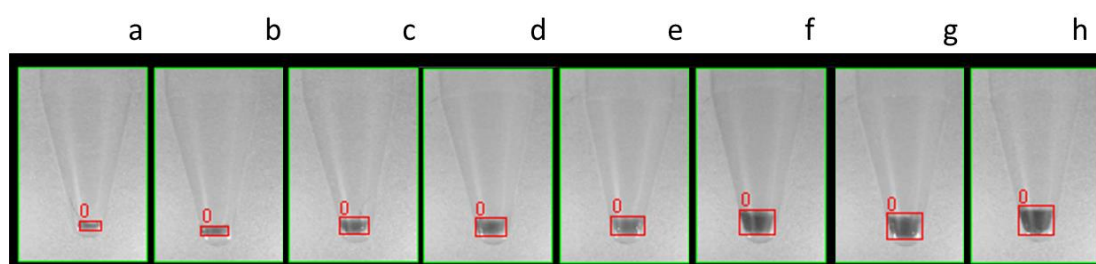


Figura 10 – Imagens das Amostras durante ensaio de calibração para determinação da concentração de SS com identificação da área de sedimento formado após centrifugação. **a)** 0,68 mL L⁻¹; **b)** 1,36 mL L⁻¹; **c)** 2,05 mL L⁻¹; **d)** 2,87 mL L⁻¹; **e)** 3,36 mL L⁻¹; **f)** 4,32 mL L⁻¹; **g)** 5,04 mL L⁻¹; **h)** 5,67 mL L⁻¹.

Conforme pode ser observado na [Figura 10](#), o MVA reconheceu de forma adequada o volume dos sedimentos formados, mesmo nas concentrações mais baixas. Durante estas medidas, a altura dos tubos Falcon® em relação ao campo visual da ROI não interferiu na capacidade de reconhecimento do MVA. Não obstante, o alinhamento da distância entre o tubo Falcon® e a webcam foram mantidos constantes.

Também foi constatado que cada tubo Falcon® possuía uma conformação diferente na região inferior, advinda do processo de fabricação dos mesmo, que modificou a geometria no espaço ocupado pelos sedimentos. Por este motivo, tubos Falcon® distintos foram utilizados para realização das medidas em triplicata. Conforme se verá nos dados de calibração, esta interferência provocada pelo porta-amostra não afetou a qualidade preditiva do MVA. Independente da conformação geométrica formada pelos sólidos sedimentáveis, a área total (em pixel²) sempre foi diretamente proporcional ao volume de sedimentos.

É válido salientar dois aspectos presentes na [Figura 10](#): (i) o sistema de iluminação de duplo *LED* projetado para o multianalisador evitou a formação de sombra no plano de fundo,

que seria um interferente para este tipo de análise. Conforme pode ser constatado na referida [Figura 10](#), a câmera obteve um vídeo livre de ruídos. (ii) o volume total de sólidos sedimentáveis que poderia ser comportado dentro do campo visual da ROI permitiria a análise de amostras com elevado volume de sólidos sedimentáveis.

A [Tabela 1](#) apresenta o resumo estatístico dos resultados de calibração e predição obtidos para a determinação de SS em águas residuais utilizando o multianalizador desenvolvido. Os modelos matemáticos para o MVA associado aos planos de cor R, G, B, L, V e I foram devidamente validados por Análise de Variância (ANOVA) (consulte as [Tabelas S8-S13](#) no [Apêndice I](#)). Esses modelos foram obtidos por regressão linear (pelo método dos mínimos quadrados) entre as concentrações de SS e suas respectivas áreas de sedimento (em pixel²) determinadas por MVA.

Tabela 1: Resultados de calibração e predição empregando algoritmo de visão de máquina para determinação de sólidos sedimentáveis.

Plano de Cor	Calibração				Predição		
	Modelos de calibração	R ²	F calculado por ANOVA		t _{cal} ^c	p _{cal} ^d	RMSEP
			Regressão ^a	Falta de ajuste ^b			
R	y = 1048,711x - 21,066	0,988	1557,711	1,192	0,436	0,685	0,300
G	y = 1039,916x + 80,124	0,989	1651,791	1,408	0,498	0,645	0,312
B	y = 1100,467x + 31,395	0,961	463,561	0,852	-0,114	0,915	0,281
L	y = 1046,189x + 54,635	0,989	1695,838	0,805	0,413	0,701	0,326
V	y = 1035,789x - 46,038	0,989	1675,084	0,714	0,310	0,772	0,300
I	y = 1020,562x + 148,250	0,953	386,645	0,713	0,193	0,856	0,278

Teste de significância de regressão: valor F^a crítico 4,381; Teste de falta de ajuste: valor F^b crítico de 2,958; Valor crítico de t^c 2,132; Valor p^d crítico 0,05.

A análise dos resultados indica que todos os modelos de calibração obtidos foram estatisticamente significativos e sem falta de ajuste, de acordo com os valores de F calculados pela ANOVA. A diferença média nas respostas entre esses modelos não foi significativa, com um nível de confiança de 95%. Pode-se observar também que o MVA acoplado aos planos de cores R, G, L e V apresentou valores de R² ligeiramente superiores aos planos de cores B e I. Uma possível explicação para este resultado do MVA baseado em B é que os sensores CMOS possuem menor eficiência quântica na região espectral de 350 a 500 nm ([Canon, 2019](#); [On Semiconductor, 2016](#)). Assim, o plano da cor Azul tem menos sensibilidade que os demais, afetando o desempenho do MVA. Em relação ao plano de cor I, valores de intensidade próximos

ao preto ou branco ocorrem apenas quando os níveis de saturação do vídeo tendem a ser 0 ou 1 (Maheswari & Korah, 2016; Distefano & Rawat, 2020). Esta característica é indesejável no reconhecimento de objetos com base na análise de limiar, uma vez que níveis naturais de saturação de cor estão associados a tons de cinza médios no canal Intensidade, o que diminui a capacidade de segmentação para distinguir entre objeto e cena.

Embora o espaço de cores HSL tenha uma representação espacial de cone duplo semelhante ao HSI, algebricamente os espaços HSL e HSV estão mais próximos quando a conversão para o espaço de cores RGB é observada (Saravanan et al., 2016). Essa aproximação ocorre porque tanto HSL quanto HSV adotam os valores máximos de pixels para o cálculo de L e V (Elaw et al., 2019). Portanto, suas alterações em tons de cinza são mais significativas do que no HSI (que utiliza a média do RGB), o que justifica a diferença entre os resultados de MVA obtidos com o plano de cor I daqueles obtidos com L e V.

Por outro lado, nos espaços de cores HSL e HSV, pontos de tons acromáticos (branco, cinza e preto) são suscetíveis a desvios RGB e sofrem instabilidade de resolução (Zhu, et al., 2020). Essa característica afeta a resolução de algoritmos de visão de máquina que empregam limiares de pixels para binarizar cenas (renderizações acromáticas) e então segmentar os objetos. A Figura 11 resume a precisão das previsões de cada um dos modelos com o teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR)

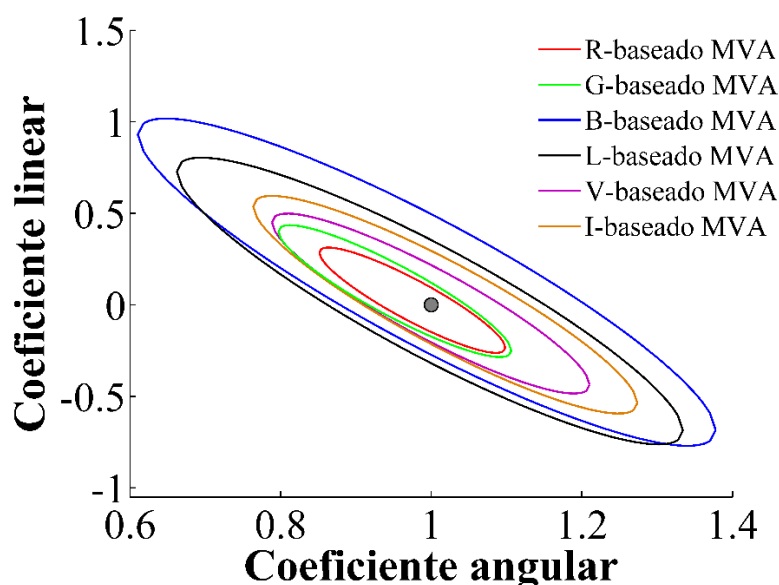


Figura 11 - Teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR) dos modelos para determinação de SS empregando MVA associado a diferentes planos de cor.

Embora todos os modelos tenham sido validados estatisticamente por ANOVA, aquele construído com o vídeo de entrada empregando o plano de cores R acoplado ao MVA foi considerado o mais satisfatório para determinar o teor de SS em amostras de águas residuárias. Isso pode ser confirmado pela observação do bom ajuste obtido nas etapas de calibração (Figura 12a) e seu respectivo *plot* de resíduos (Figura 12b), com valores distribuídos aleatoriamente em torno do zero. As curvas analíticas e os gráficos dos resíduos de todos os demais modelos são apresentados no Apêndice I (Apêndice I, Figura S8-S13).

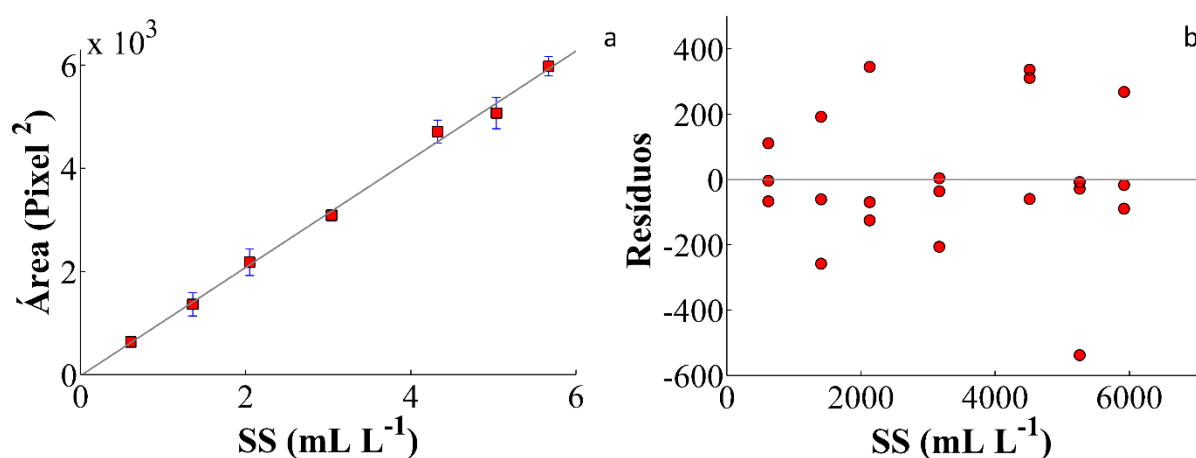


Figura 12 – Curva analítica e gráfico dos resíduos para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor R. **a**- Curva analítica; **b**- gráfico dos resíduos.

Em síntese, embora as elipses de confiança de todos os modelos contenham o ponto teórico ideal em um nível de confiança de 95%, o menor tamanho da elipse obtida pelo plano de cor R acoplado ao modelo MVA indica que este modelo é mais preciso e exato. Neste sentido, o plano de cores R acoplado ao algoritmo de visão de máquina foi escolhido para determinação de SS em águas residuárias. Também foi constatada a hipótese de diferença de médias nula entre os resultados obtidos pelo método proposto e de referência, em um nível de confiança de 95%. A faixa de trabalho obtida vai de 0,68 a 5,67 ml L⁻¹, com um RMSE de 0,300 ml L⁻¹. Considerando que o método de referência prevê diluições de uma amostra concentrada para enquadramento da faixa de medição, amostras com concentração superior a 5,67 ml L⁻¹ podem ser diluídas e então analisadas. A Tabela 2 reúne informações de desempenhos de outros métodos anteriormente propostos.

Tabela 2 – Comparativo de desempenho entre o método proposto e os métodos já relatados para determinação de SS.

Técnica	Matriz	Tempo de análise	R ²	Teste de predição	Referência
Visão de Máquina	Real (água residuária)	<24 s	0,99	RMSEP: 0,3	Método proposto
Microscopia	Real (lodo ativado)	-	0,87	-	(Jenné et al., 2005)
Análise de histograma	Real (Lodo ativado)	30 min	0,98	Erro %: 3,7	(Mullins et al., 2018)
turbidimétrico	Real (água de rio)	1 min	0,98	-	(Pavanelli & Bigi, 2005)

Alguns dos métodos anteriormente relatados não apresentaram dados de tempo de análise e não realizaram ensaios de predição. Com base nos dados da Tabela 2 pode-se concluir que o método proposto é superior em todos os aspectos em relação aos demais, apresentado o melhor desempenho do modelo de calibração, tempo de análise e precisão da predição.

4.2. Sólidos Suspensos Totais

Na Figura 13 são apresentadas imagens obtidas durante o ensaio de calibração para determinação da concentração de SST, empregando o MVA com o pano de cor *Red* (R) do espaço de cores RGB. A região retangular verde delimita os limites da ROI, enquanto o retângulo vermelho com índice 0 indica a área de luz espalhada (em pixel²) que foi identificada e determinada pelo MVA.

Conforme pode ser observado na Figura 13, o espalhamento laser provocado pelas partículas em suspensão foi proporcional a concentração de SST, em alinhamento ao que já foi fundamentado na seção 2.1.3. Os principais aspectos a serem considerados são: (i) A intensidade de pixel na região central por onde passa o feixe laser foi máxima (255) em todas as amostras analisadas. Deste modo, sistemas de detecção baseados em sensores de tamanho pontual como fotodiodos dificilmente fornecerão um bom resultado analítico (ii) Nas regiões acima e abaixo do feixe laser, é possível observar um gradiente no espelhamento laser provocado pelas partículas suspensas. (iii) Em todas as amostras analisadas é possível observar uma variação significativa no tamanho as partículas em suspensão. (iv) Em função do movimento das partículas, o sinal analítico para medidas de luminosidade é consideravelmente

instável, principalmente em função do tempo, uma vez que as partículas maiores sedimentam rapidamente.

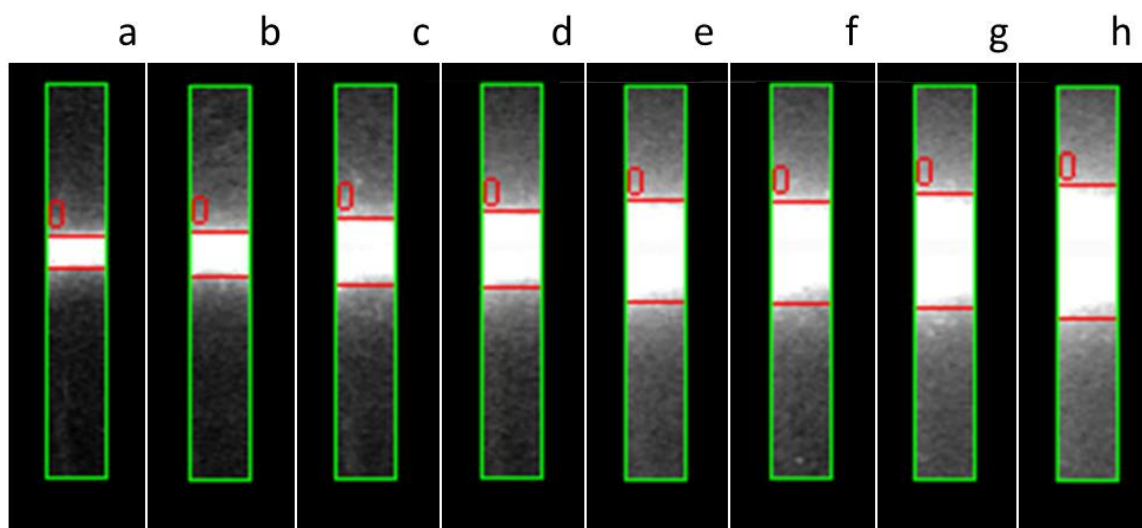


Figura 13 – Imagens das Amostras durante ensaio de calibração para determinação da concentração de SST, com identificação da área de espalhamento laser causado pelas partículas em suspensão. **a** - 30.23 mg L⁻¹; **b** - 60.09 mg L⁻¹; **c** - 89.65 mg L⁻¹; **d** - 124.59 mg L⁻¹; **e** - 150.22 mg L⁻¹; **f** - 187.07 mg L⁻¹; **g** - 219.67 mg L⁻¹; **h** - 249.47 mg L⁻¹.

Neste sentido, o MVA foi configurado para reconhecer apenas a área de espalhamento laser onde a intensidade de pixel foi máxima. Esta estratégia foi fundamental para eliminação da instabilidade de sinal provocada pelo movimento das partículas posicionadas acima e a baixo do feixe laser. Em adição, a determinação de um tamanho mínimo de objeto a ser reconhecido foi indispensável para que o MVA não contabilizasse as partículas maiores, como aquela que aparece na parte inferior da [Figura 13-f](#). Para estabelecer um estudo comparativo entre a técnica baseada em intensidade de pixel e a técnica baseada em MVA, os valores de intensidade de pixel para os planos de cor R, G, B, L, V e I foram testados. Contudo, o MVA foi aplicado apenas com o plano de cor R, em alinhamento ao melhor resultado obtido na determinação de SS.

Os modelos matemáticos de calibração foram obtidos por regressão polinomial quadrática, tanto para os modelos baseados em intensidade de pixel quanto no modelo MVA. As equações dos modelos e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) obtidos para a calibração, bem como a avaliação estatística realizada por Análise de Variância (ANOVA), são

apresentados na [Tabela 2](#). Modelos de regressão lineares, exponenciais, de potência e logaritmo foram também avaliados; o polinômio quadrático, entretanto, foi o mais adequado em todos os casos. Em relação à literatura ([Bayram et al., 2018](#); [Koydemir et al., 2019](#); [Cao et al., 2019](#); [Zhu et al., 2020](#)), a intensidade do espalhamento da luz causado pelas partículas em suspensão não tem relação linear com a concentração dessas partículas em uma ampla faixa de concentração, tanto para medições com fotossensores quanto para sistemas de análise baseados em imagens digitais. Esse comportamento está relacionado à saturação do sistema de detecção causada pela intensidade da luz espalhada ([Bayram et al., 2018](#); [Cao et al., 2019](#)) e é característico de instrumentos de medição nefelométrica e turbidimétrica usados para determinar a concentração de suspensões em meio aquoso ([Kelley et al., 2014](#)). [Orwin e Smart \(2005\)](#) empregaram medidas nefelométricas para determinar sólidos suspensos e descobriram que a relação entre o SST e a intensidade da luz espalhada foi melhor descrita por um polinômio de segunda ordem.

De acordo com os dados da [Tabela 3](#), todos os modelos matemáticos obtidos na etapa de calibração apresentaram resultados satisfatórios. A significância da regressão e os testes de falta de ajuste obtidos por ANOVA indicam que todos os modelos foram estatisticamente significativos e não houve falta de ajuste (ou seja, $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$). Os detalhes dos parâmetros ANOVA obtidos para todos os modelos são apresentados nas [Tabelas S1-S7 \(Apêndice I\)](#). A [Figura 14](#) resume a precisão das previsões de cada um dos modelos com o teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR).

Tabela 3: Resultados de calibração e predição obtidos para determinação de sólidos suspensos totais.

Calibração					Predição		
Modelos	Equações de calibração	R^2	F calculado por ANOVA		t_{cal}^c	p_{cal}^d	RMSEP
			Regressão ^a	Falta de ajuste ^b			
R_{mean}	$y = -0,0004x^2 + 0,3483x + 67,88$	0,992	1147,875	2,974	3,271	0,031	3,755
G_{mean}	$y = -0,0003x^2 + 0,2678x + 76,104$	0,987	691,215	2,692	-0,095	0,929	4,722
B_{mean}	$y = -0,0005x^2 + 0,3336x + 70,329$	0,991	1010,345	2,827	-0,401	0,709	4,436
L_{mean}	$y = -0,0003x^2 + 0,2886x + 73,072$	0,991	1016,792	2,733	0,120	0,910	4,395
V_{mean}	$y = -0,0004x^2 + 0,3257x + 77,751$	0,977	399,063	2,678	-1,438	0,224	9,586
I_{mean}	$y = -0,0004x^2 + 0,3122x + 72,206$	0,985	610,335	2,806	0,800	0,469	4,374
R-based MVA	$y = -0,054x^2 + 59,581x + 1056,9$	0,997	2961,030	2,933	-1,944	0,124	3,188

Teste de significância de regressão: F^a crítico 3,554; Teste de falta de ajuste: F^b crítico 3,112; Valor crítico de t^c 2,132; Valor p^d crítico de 0,05.

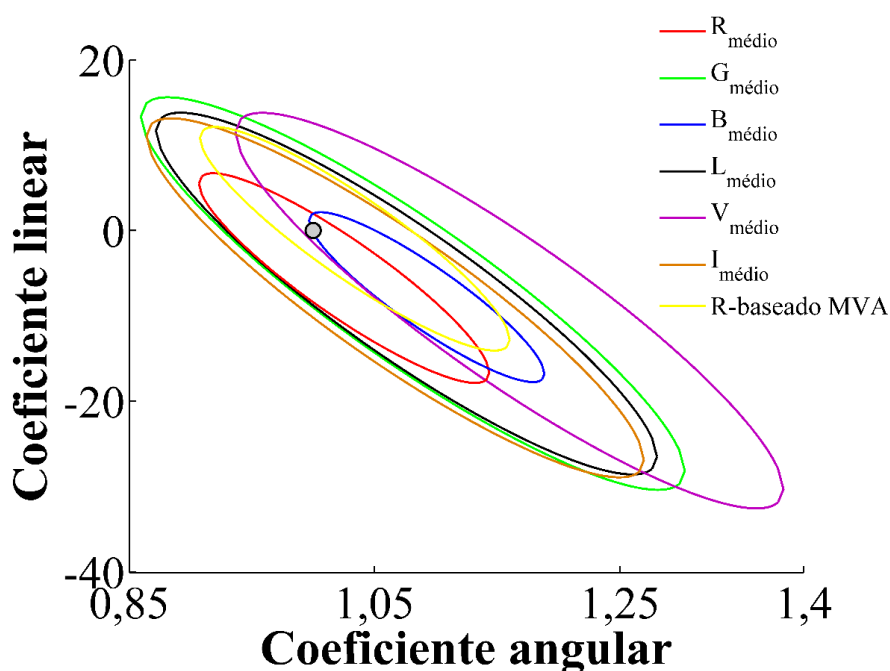


Figura 14 - Teste da região elíptica de confiança conjunta (EJCR) dos modelos para determinação de SST empregando MVA e modelos baseados em intensidade de pixel.

Na etapa de predição, apenas o modelo obtido com a intensidade média do pixel do plano de cor R apresentou resultado estatisticamente não significativo com valor de p menor que 0,05. No entanto, o modelo baseado MVA com plano de cor R apresentou o melhor resultado. Em adição, a [Figura 15-a](#) ilustra o bom ajuste da curva analítica obtida para a determinação de SST empregando o MVA associado ao plano de cor R, enquanto o gráfico na [Figura 15-b](#) confirma que os resíduos desse modelo são distribuídos aleatoriamente em torno de zero. As curvas analíticas e os gráficos dos resíduos de todos os demais modelos são apresentados no [Apêndice I](#) ([Figura S4-S19](#)).

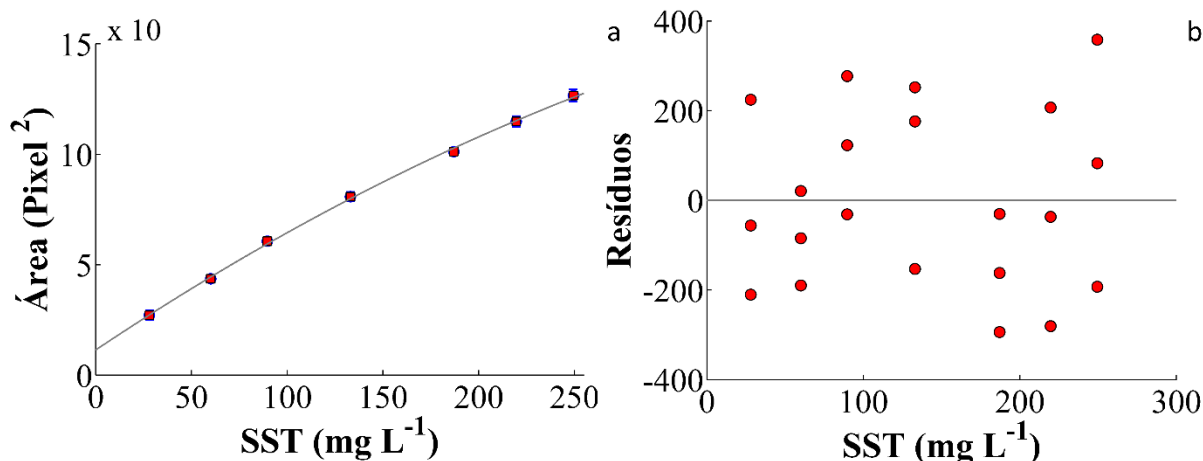


Figura 15 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST empregando MVA associado ao plano de cor R. **a**- Curva analítica; **b**- gráfico dos resíduos.

O pior desempenho dos modelos baseados na intensidade do pixel ocorre devido ao movimento das partículas suspensas, que causa oscilação no perfil de espalhamento da radiação laser. Assim, o movimento do fluido e as próprias partículas suspensas são responsáveis por variações consideráveis nas medidas de espalhamento de luz. Além disso, as partículas em movimento que estão abaixo e acima do feixe de laser contribuem para a instabilidade do sinal. Essas observações explicam a pobre correlação entre as medidas de turbidez e SST, como também encontrado em outros estudos (Villa et al., 2019; Oliveira et al., 2018; Hakim et al., 2019). Ademais, os valores de intensidade de pixel também são sensíveis às variações na cor da amostra, o que afeta a precisão do método, principalmente por se tratar de uma matriz complexa com uma cor instável.

Estes inconvenientes foram contornados com o uso do MVA, que não sofre esses tipos de interferência, pois as variações no espalhamento da luz causadas pelo movimento das partículas não implicam em uma alteração nas dimensões do objeto que é reconhecido (área central do espalhamento laser). Logo, a cor da amostra não interfere na capacidade discriminativa do MVA, que reconhece a área de luz espalhada independentemente da cor da amostra.

Embora o teste da região elíptica de confiança apresentado na Figura 14 demonstre que todas as previsões têm uma inclinação igual a 1 e uma interceptação de zero a um limite de confiança de 95%, o modelo baseado na intensidade do pixel de R não é adequado para fins de previsão, pois não passou no teste *t* de hipótese nula entre o conjunto de preditos e observados.

A principal justificativa para esse baixo desempenho é a saturação do sinal analítico causada pelo feixe de laser em 650 nm. Por outro lado, este mesmo efeito maximiza a capacidade discriminante do MVA, uma vez que a área de espalhamento da luz do laser em 650 nm possui limiares mais precisos com o plano de cor R. Em síntese, o MVA associado ao plano de cor R resultou em R^2 de 0,997 e RMSEP de apenas 3,188 mg L⁻¹. Além disso, foi validada a hipótese nula de diferença entre as médias obtidas pelo método proposto e de referência, para um nível de confiança de 95%. A [Tabela 4](#) reúne informações de desempenhos de outros métodos anteriormente propostos.

Tabela 4 – Comparativo de desempenho entre o método proposto e os métodos já relatados para determinação de SST.

Técnica	Matriz	Tempo de análise	R^2	Teste de predição	Referência
Visão de Máquina	Real (água residuária)	<24 s	0,99	RMSEP: 0,3	Método proposto
Turbidimétrico	Real (águas superficiais)	-	0,53-0,76	-	(Villa et al., 2019)
Turbidimétrico	Real (águas de rios)	-	0,54 - 0,87	-	(Oliveira et al., 2018)
Turbidimétrico	Sintético (suspensão de argila)	-	0,99	-	(Hakim et al., 2019)
Espalhamento laser	Real (águas de rios)	-	0,72 - 0,93	-	Santos et al. (2018)
Sensoriamento por satélite	Real (águas superficiais)	-	0,89	-	(Shahzad et al., 2018)
Sensoriamento por satélite	Real (águas superficiais)	-	0,65	-	(Isidro et al., 2018)
Atenuação ultrassônica	Efluente de mineração	-	-	Erro %: 10%	(Magalhães et al., 2016)

A maioria dos métodos anteriormente relatados não apresentaram dados de tempo de análise e não realizaram ensaios de predição. Neste sentido, uma avaliação adequada do desempenhos dos métodos não pôde ser realizada. Outrossim, com base nos dados da [Tabela 4](#), pode-se concluir que o método proposto é em relação aos demais, apresentado os melhor desempenho do modelo de calibração e precisão da predição.

4.3. Determinação do tempo de análise

O tempo total para a determinação sequencial de TSS e SS pelos métodos propostos foi medido durante a etapa de predição, adotando as medidas em triplicata de cada amostra. Na determinação do SST, as amostras de efluentes foram homogeneizadas, transferidas para tubos de vidro e, em seguida, colocadas na bandeja do amostrador automático. O tempo de rotação para alterar a posição da amostra foi de 2s por amostra, enquanto o tempo de leitura e processamento do sinal analítico foi de 1s. O tempo médio total nas determinações do SST foi de 74 (± 4) s, considerando as medidas em triplicata e que oito amostras foram inseridas na bandeja do amostrador automático.

Posteriormente, essas mesmas amostras foram homogeneizadas e transferidas para tubos Falcon®, centrifugadas por 60s e, posteriormente, inseridas no multianalisador para a determinação do SS. O tempo médio de centrifugação e leitura do sinal analítico totalizou 113 (± 4) s, considerando as medidas em triplicata. A determinação conjunta de SST e SS das oito amostras exigiu 187s, o que é equivalente a 24s por amostra. Além disso, o volume total de amostra consumido nessas duas determinações foi de 15 mL.

Em suma, o método proposto reduziu o volume de análise de 1,5 L para apenas 15 mL (ou seja, uma redução de 99,0%) e o tempo de análise de 12 horas para 24 segundos (ou seja, uma redução de 99,4%). Portanto, multianalisador baseado em visão de máquina pode ser considerado uma solução importante para a determinação de SST e SS em amostras de águas residuárias e outras matrizes.

A [Figura 16](#) ilustra um procedimento de operação padrão (POP) para determinação sequencial de sólidos suspensos totais e sedimentáveis utilizando o multianalisador desenvolvido associado aos métodos propostos.

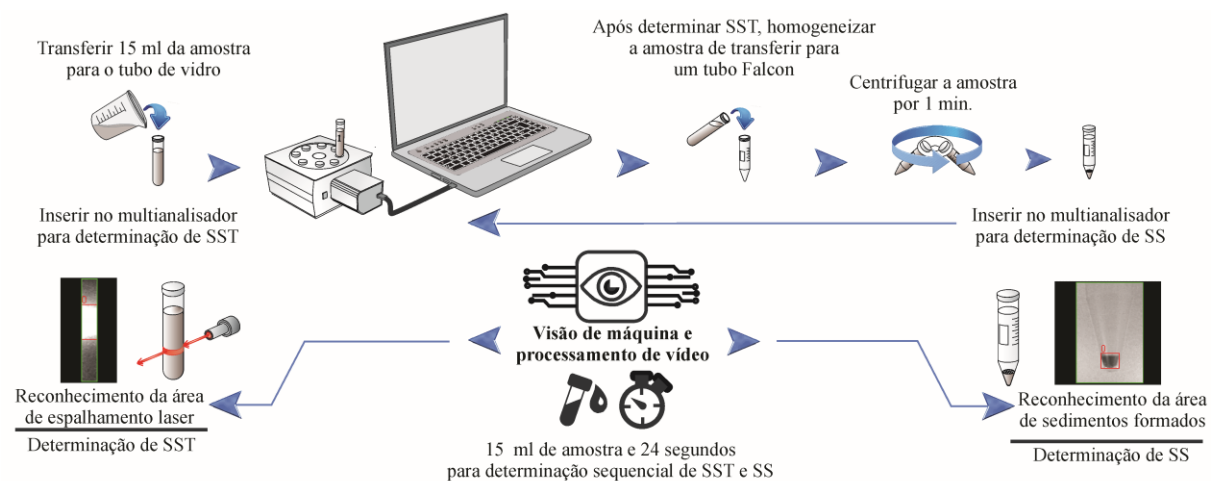


Figura 16 – Ilustração do procedimento de operação padrão (POP) para determinação sequencial de sólidos suspensos totais e sedimentáveis.

Capítulo 5.

CONCLUSÃO

5. Conclusão

Neste trabalho, desenvolveu-se um método digital para determinação das concentrações de SST e SS. Pela primeira vez, um sistema baseado em visão de máquina foi utilizado para determinar o espalhamento de luz provocado por partículas em suspensão.

No desenvolvimento da instrumentação, foram empregados recursos utilizados na indústria 4.0 como processamento inteligente, miniaturização de testes e visão de máquina. O resultado foi um equipamento/software com potencial para múltiplas aplicações, que demonstrou adequado desempenho para determinação das concentrações de TSS e SS em águas residuárias, sendo comprovado que não houve diferença estatística entre os resultados advindos dos métodos desenvolvidos neste estudo, em contraposição aos métodos aos métodos de referência.

Com este novo método digital, é possível reduzir o volume de amostra de cerca de 1.5 L para apenas 15 mL e reduzir significativamente o tempo de análise mais de 12 horas para 24 segundos, propiciando redução de custos com mão de obra, insumos de laboratório, equipamentos e energia elétrica.

Em adição, a resolução analítica no MVA na determinação de intensidade de espalhamento de luz foi superior a de turbidímetros convencionais e superior a medidas de intensidade pixel. Também foi constatado que o volume de sedimentos uma amostra pode ser mensurado com elevada resolução analítica pelo MVA. Esse achado abre um leque de alternativas frente a métodos gravimétricos e volumétricos, como aqueles empregados para medidas de biomassa em processos de fermentação, biomassa algal, análises de volume de lodo, dentre outros.

Capítulo 6.

Outros resultados obtidos ao longo do curso de doutorado

Durante o curso de doutorado, diversas frentes de pesquisas em instrumentação e automação foram desenvolvidas em parceria com o programa de pós graduação de ciência e tecnologia ambiental da UEPB. São Frutos destas parcerias um total de 5 patentes depositadas junto ao INPI. Os estudos foram voltados para desenvolvimento de analisadores portáteis para análises físico-químicas de água; sistemas automatizados para controle de reatores e monitoramento da produção de biogás; sistemas automatizados para controle em linha de pH, plataformas de monitoramento online de biorreatores; sistemas de monitoramento e controle de estações de dessalinização solar. A documentação das patentes registradas foi juntada ao [Apêndice I](#).

Patente 1: BR 10 2019 015793 3

MULTIANALISADOR PORTÁTIL, COM CONEXÃO USB E BLUETOOTH, PARA ANÁLISES FOTOMÉTRICAS, TURBIDIMÉTRICAS, NEFELOMÉTRICAS E FLUORIMÉTRICAS.

Patente 2: BR 10 2019 017890 6

INSTRUMENTO AUTOMATIZADO PARA O MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE GASES E VAPORES EM PROCESSOS QUÍMICOS, FÍSICOS OU BIOLÓGICOS.

Patente 3: BR 10 2019 017888 4

REATOR PARA MONITORAR PRODUÇÃO DE GASES E VAPORES EM PROCESSOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS

Patente 4: BR 10 2019 027031 4

SISTEMA AUTOMATIZADO COM CONECTIVIDADE PARA CONTROLE E MONITORAMENTO EM LINHA DE pH

Patente 5: BR 10 2020 009864 0

ANALISADOR AUTOMÁTICO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E SEDIMENTÁVEIS COM DETECÇÃO POR SISTEMA DIGITAL E VISÃO COMPUTACIONAL.

Capítulo 7.

REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

6. Referências bibliográficas

Alonso, V., Nietoa, A. D., Barretob, L., Amarald, A., Riveroa, E., Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview, **8th Manufacturing Engineering Society International Conference**, Procedia Manufacturing, v.41, pp.359–366, 2019. doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.020.

American Public Health Association (APHA), **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 22th ed, New York, 2017.

Andrade, R. A. N., Cunha, F. A. S., Andrade, S. I. E., Junior, P. L. A., Navarro, L. A. O., Lyra, W. S., Pessoa, A. G. G., Lima, R. A. C., Ugulino, M. C. U., A digital capture movie-based robotized Flow-batch luminometer for in-line magnetic nanoparticle solid phase extraction and chemiluminescent measurement, **Microchemical Journal**, v.153, pp. 104387, 2020. doi:10.1016/j.microc.2019.104387.

Arora, Adwitiya; Grover, Atul; Chugh, Raksha; Reka, S. Sofana. Real Time Multi Object Detection for Blind Using Single Shot Multibox Detector. **Wireless Personal Communications**, 2019. doi:10.1007/s11277-019-06294-1

Batchelor, Bruce G. **Machine Vision Handbook, Machine Vision for Industrial Applications**, 2012^{ed}, London, 2012. doi:10.1007/978-1-84996-169-1_1.

Bayram, A., Yalcin,, E., Demic, S., Gunduz, O., Solmaz, M. E., Development and application of a low-cost smartphone-based turbidimeter using scattered light, **Applied Optics**, v.57(21), pp.5935-5940, 2018. doi.org/10.1364/AO.57.005935.

Beyerer, J., Puente León, F., & Frese, C., **Machine Vision**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2016. doi:10.1007/978-3-662-47794-6.

Boyle, R. D., Hlavac, V., **Image processing, analysis, and machine vision**, 4th edition, Kentucky, EUA, 2014.

Canon, **120 MP Ultra High Resolution CMOS Sensor**, 120MXS datasheet, Huntington, New York, 2019. [dataset]

Cao, P., Zhao, W., Liu, S., Shi, L., Gao, H., Using a Digital Camera Combined With Fitting Algorithm and T-S Fuzzy Neural Network to Determine the Turbidity in Water, **IEEE Access**, v.17, pp.83589-83599, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2924462.

Cheng, C., Wu, Jinbo, Intelligent Management of Chemical Industry Parks Based on Big Data, **Cyber Security Intelligence and Analytics**, v.1147, pp.680-684, 2020. doi:10.1007/978-3-030-43309-3_101.

Chew, C. M., Aroua, M. K., Hussain, M. A., & Ismail, W. M. Z. W. Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: an industrial scale case study, **Journal of Cleaner Production**, v.112, pp.3152–3163, 2016. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.037.

D. Pavanelli & A. Bigi. Indirect Methods to Estimate Suspended Sediment Concentration: Reliability and Relationship of Turbidity and Settleable Solids. **Biosystems Engineering**, v.90(1), pp.75–83, 2005. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.09.001.

Diniz, P. H. G. D., Chemometrics-assisted colour histogram-based analytical systems, **Journal of Chemometric**, 2020, pp.1-27. doi: 10.1002/cem.3242.

Distefano, S., & Rawat, S. S., Advances in Computational Intelligence and Informatics. Lecture Notes in Networks and Systems, **Computational Intelligence and Complexity**, 1^{ed}, Singapura, 2020. doi:10.1007/978-981-15-3338-9.

Elaw, S., Abd-Elhafiez, W. M., Heshmat, M., Comparison of Video Face Detection methods Using HSV, HSL and HSI Color Spaces, **14th ICCES**, Cairo, 2019. 10.1109/ICCES48960.2019.9068182.

Ganesan P, & Rajini, V, Assessment of satellite image segmentation in RGB and HSV color space using image quality measures, **2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)**, EUA, 2014. doi:10.1109/icaee.2014.6838441.

Gaona, C. A. P., de Almeida, M. S., Viau, V., Poersch, L. H., & Wasielesky, W.. Effect of different total suspended solids levels on a *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) BFT culture system during biofloc formation, **Aquaculture Research**, v.48(3), pp.1070–1079. 2015. doi:10.1111/are.12949.

Giardino, C., Bresciani, M., Braga, F., Cazzaniga, I., De Keukelaere, L., Knaeps, E., & Brando, V. E., Bio-optical Modeling of Total Suspended Solids, In j Deepak R. M., Ogashawara, I., Gitelson, A.A. (Eds.), **Bio-Optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters**, E-Publishing Inc., Nebraska, pp.129–156, 2017. doi:10.1016/b978-0-12-804644-9.00005-7.

Hakim, W. L., Hasanah, L., Mulyanti, B., & Aminudin, A., Characterization of turbidity water sensor SEN0189 on the changes of total suspended solids in the water, **Journal of Physics: Conference Series**, v.1280(2), pp.022064, 2019. doi:10.1088/1742-6596/1280/2/022064.

Hamidi, F. N., Zainuddin, M. F., Abbas, Z., & Ahmad, A. F., Low Cost and Simple Procedure to Determine Water Turbidity with Image Processing, **ICISPC-2017**, pp.30–34, EUA, 2017. doi:10.1145/3132300.3132302.

Hossain, A., Canning, J., Ast, S., RutLEDge, P. J., Teh Li Yen, & Jamalipour, A., Lab-in-a-Phone: Smartphone-Based Portable Fluorometer for pH Measurements of Environmental Water. **IEEE Sensors Journal**, v.15(9), pp.5095–5102, 2016. doi:10.1109/jsen.2014.2361651.

Hossain, M. A., Canning, J., Ast, S., RutLEDge, P. J., & Jamalipour, A. Early warning smartphone diagnostics for water security and analysis using real-time pH mapping. **Photonic Sensors**, v.5(4), pp.289–297, 2015. doi:10.1007/s13320-015-0256-x.

Hussain, I., Ahamad, K., & Nath, P., Water turbidity sensing using a smartphone, **RSC Advances**, v.6(27), pp.22374–22382, 2016. doi:10.1039/c6ra02483a.

- Isidro, C. M., McIntyre, N., Lechner, A. M., & Callow, I., Quantifying suspended solids in small rivers using satellite data, **Science of The Total Environment**, v.634, pp.1554–1562, 2018. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.006.
- Jenné, R., Banadda, E. N., Smets, I. Y., Bamelis, A., Verdickt, L., & Impe, J. F. V., Activated sludge image analysis system: monitoring settleability and effluent clarity, **Water Science and Technology**, v.52(10-11), pp.193–199, 2005. doi:10.2166/wst.2005.0694.
- Kaur, H., Sawhney, B. K., & Jawandha, S. K., Evaluation of plum fruit maturity by image processing techniques, **Journal of Food Science and Technology**, v.55(8), pp.3008–3015, 2018. doi: 10.1007 / s13197-018-3220-0.
- Kelley, C. D., Krolick, A., Brunner, L., Burklund, A., Kahn, D., Ball, W. P., Weber-Shirk, M., An Affordable **Open-Source Turbidimeter**, v.14, pp.7142-7155, 2014. doi:10.3390/s140407142.
- Kotzé, P., & Coetzee, L., Opportunities for the Internet of Things in the Water, Sanitation and Hygiene Domain. **Springer Series in Materials Science**, pp.194–210, 2019. doi:10.1007/978-3-030-15651-0_16.
- Lins, R. G., de Araujo, P. R. M., & Corazzim, M., In-process machine vision monitoring of tool wear for Cyber-Physical Production Systems, **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.61, pp.101859, 2020. doi:10.1016/j.rcim.2019.101859.
- Magalhães, S. C., Scheid, C. M., Calçada, L. A., Lutterbach, L. M. M., Rezende, R. S., & Waldmann, A. T. A., Real time prediction of suspended solids in drilling fluids, **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v.30, pp.164–175, 2016. doi:10.1016/j.jngse.2016.02.001.
- Maheswari, S., & Korah, R., Review on image segmentation based on color space and its hybrid, **International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies**, pp.639-641, Kumaracoil, India, 2016,. doi:10.1109/iccicct.2016.7988028.

Majid Dowlati; Miguel de la Guardia; Majid Dowlati; Seyed Saeid Mohtasebi. Application of machine-vision techniques to fish-quality assessment, **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v.40, pp.168-179, 2012. doi:10.1016/j.trac.2012.07.011.

METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse**, 7^{ed}, McGraw - Hill Book Editora, New York, 316-466, 2016.

MORENO, P., **Emprego de técnica dedicada de análise de imagem na avaliação do produto GT no desempenho da floculação**. 2015 Dissertação de mestrado, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Bauru-SP, 2015.

Mullins, D., Coburn, D., Hannon, L., Jones, E., Clifford, E., & Glavin, M., Using image processing for determination of settled sludge volume, **Water Science and Technology**, v.78(2), pp.390-401, 2018. doi:10.2166/wst.2018.315.

Otsu N. & Abdelmalek N., Maximum likelihood thresholding based on population mixture models, **Pattern Recognition**, v.25(10), pp.1231–1240, 1992. doi:10.1016/0031-3203(92)90024-d

Oliveira, A. R. M. de, Borges, A. C., Matos, A. T., & Nascimento, M., Estimation On The Concentration Of Suspended Solids From Turbidity In The Water Of Two Sub-Basins In The Doce River Basin, **Engenharia Agrícola**, v.38(5), pp.751–759, 2018. doi:10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n5p751-759/2018.

On Semiconductor, **Megapixel CMOS Image Sensor**, NOII4SM6600A datasheet, Aurora, Colorado, 2014, [revised dec. 2016]. [dataset]

Organização Das Nações Unidas (ONU), Plenary: Multistakeholder dialogue on tools for implementation of the water related Sustainable Development Goals, whater and sanitation development, Zaragoza-Espanha, 2015.

Organização Das Nações Unidas (ONU), Resolução 64/A/RES/64/292, 2010.

Organização Das Nações Unidas (ONU), The 30th UN-Water Meeting, UN-Water Bulletin, v.82(34), 2019.

Orwin, J. F., Smart, C. C., An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment, **Geomorphology**, v.68, pp.3-15, 2005. doi:10.1016/j.geomorph.2004.04.007.

Plotka-Wasyłka, J., Gałuszka, A., & Namieśnik, J. Green Analytical Chemistry: Summary of existing knowledge and future trends. In J. Plotka-Wasyłka, & J. Namieśnik (Eds.). Green Analytical Chemistry. **Green Chemistry and Sustainable Technology**, pp.431-449, 2019. doi:10.1007/978-981-13-9105-7_15.

Gonzalez, R.C. & Woods, R.E., **Digital Image Processing**, 3^{ed}, Prentice Hall, New Jersey, EUA, 2008.

Richard Szeliski, **Computer Vision: Algorithms and Applications**, Whashington, 2010. Doi:10.1007/978-1-84882-935-0.

Rügner, H., Schwientek, M., Beckingham, B., Kuch, B., Grathwohl, P., Integrated Monitoring of Particle Associated Transport of PAHs in Contrasting Catchments, **Environmental Earth Sciences**, v.69, pp.373–380, 2013. doi: 10.1016/j.envpol.2012.09.004.

Santos, B. B. D., Miranda, R. B. D., Estigoni, M. V., Villela, J. M., & Mauad, F. F., Evaluation of the laser diffraction method for the measurement of suspended sediment concentration in Mogi-Guaçu reservoir (São Paulo, Brazil), **International Journal of River Basin Management**, v.1, pp.89-99, 2018. doi:10.1080/15715124.2018.1446965.

Saravanan, G., Yamuna, G., & Nandhini, S., Real time implementation of RGB to HSV/HSI/HSL and its reverse color space models, **2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)**, pp.0462-0466, Tamilnadu, India, 2016. doi:10.1109/iccsp.2016.7754179.

Schwarz, K., Gocht, T., & Grathwohl, P., Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in highly vulnerable karst systems. **Environmental Pollution**, v.159(1), pp.133–139, 2011. doi:10.1016/j.envpol.2010.09.026.

Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., & Mercorelli, P. (Eds.), **Machine Vision and Navigation**, Switzerland, 2020. doi:10.1007/978-3-030-22587-2.

Shahzad, M. I., Meraj, M., Nazeer, M., Zia, I., Inam, A., Mehmood, K., & Zafar, H., Empirical estimation of suspended solids concentration in the Indus Delta Region using Landsat-7 ETM+ imagery, **Journal of Environmental Management**, v.209, pp.254–261, 2018. doi:10.1016/j.jenvman.2017.12.070.

Shahzad, M. I., Meraj, M., Nazeer, M., Zia, I., Inam, A., Mehmood, K., & Zafar, H., Empirical estimation of suspended solids concentration in the Indus Delta Region using Landsat-7 ETM+ imagery. **Journal of Environmental Management**, v.209, pp.254–261, 2018. doi:10.1016/j.jenvman.2017.12.07.

Silva, R. L., Rudek, M., Szejka, A. L., & Junior, O. C. Machine Vision Systems for Industrial Quality Control Inspections, **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, pp.631–641, 2018. doi:10.1007/978-3-030-01614-2_58.

Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R., **Image Processing, Analysis, and Machine Vision**, First Stamford Place, 4th Floor Stamford, CT 06902 USA, 2012.

Tótolí, E. G., Salgado, H. R. N., Miniaturized turbidimetric assay: A green option for the analysis of besifloxacin in ophthalmic suspension, **Talanta**, v.209, pp.120532, 2020. doi:10.1016/j.talanta.2019.120532.

USEPA, **Municipal Nutrient Removal Technologies Reference Document**, EPA 832-F99-062, EUA, 2008.

Vadasarukkai, Y. S., & Gagnon, G. A., Characterization, fate and transport of floc aggregates in full-scale flocculation tanks, **Environmental Science: Water Research & Technology**, v.2(1), pp.223–232, 2016. doi:10.1039/c5ew00259a.

Villa, A., Fölster, J., Kyllmar, K., Determining suspended solids and total phosphorus from turbidity: comparison of high-frequency sampling with conventional monitoring methods, **Environmental Monitoring and Assessment**, v.191(605), pp.1-16, 2019. doi: 10.1007/s10661-019-7775-7.

Williams, H. A. M., Jones, M. H., Nejati, M., Seabright, M. J., Bell, J., Penhall, N. D., MacDonald, B. A., Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms, **Biosystems Engineering**, v.181, pp.140–156, 2019. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.03.007.

Zhang, B., Liu, M., Tian, Y., Wu, G., Yang, X., Shi, S., & Li, J., Defect inspection system of nuclear fuel pellet end faces based on machine vision, **Journal of Nuclear Science and Technology**, v.57(6), pp.1–7, 2020. doi:10.1080/00223131.2019.1708827.

Zhang, D., Tian, B., Wei, Y., Hou, W., Guo, G., Structural dynamic response analysis using deviations from idealized edge profiles in high-speed video, **Optical Engineering**, v.58(1), pp.014106, 2019. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.1.014106>.

Zhu, Y., Cao, P., Liu, S., Zheng, Y., Huang, C., Development of a New Method for Turbidity Measurement Using Two NIR Digital Cameras, **ACS Omega**, v.5, pp.5421-5428, 2020. doi/pdf/10.1021/acsomega.9b04488.

Apêndice I

DESCRIÇÃO DOS DADOS COMPLEMENTARES:

Figura S1 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (inclusão de bibliotecas e declaração de variáveis).

Figura S2 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (configuração da frequência de comunicação com software de controle e declaração dos pinos de controle dos leds, do laser e do motor de ajuste do plano de fundo).

Figura S3 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (loop de recebimento dos dados seriais do software de controle).

Figura S4 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (switch para seleção das funções de controle).

Figura S5 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (algoritmo que busca o melhor sentido de rotação da bandeja do amostrador automático).

Figura S6 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (Funções de acionamento do motor de passo,

Figura S7 – O código fonte da rotina de controle do multianalisador (Funções de acionamento dos leds, do laser e do servo motor).

Figura S8 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor R. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S9 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor G. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S10 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor B. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S11 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor L. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S12 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor V. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S13 – Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SS empregando MVA associado ao plano de cor I. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S14 - Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST valor médio de intensidade de pixel associado ao plano de cor R. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S15 - Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST valor médio de intensidade de pixel associado ao plano de cor G. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S16 - Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST valor médio de intensidade de pixel associado ao plano de cor B. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S17 - Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST valor médio de intensidade de pixel associado ao plano de cor L. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S18 - Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST valor médio de intensidade de pixel associado ao plano de cor V. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Figura S19 - Curva analítica e gráfico dos resíduos de para determinação de SST valor médio de intensidade de pixel associado ao plano de cor I. **a-** Curva analítica; **b-** gráfico dos resíduos.

Tabela S1-6. Resumo da ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando os valores médios de vermelho, verde, azul, luminância, valor e intensidade, respectivamente.

Tabela S7. Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos suspensos totais usando o algoritmo de visão de máquina baseado em vermelho.

Tabela S8-S13. Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado em vermelho, verde, azul, luminância, valor e intensidade, respectivamente.

Figura S1

```

1 //declaração da biblioteca do motor de passo
2 #include <Stepper.h> // inclusão da biblioteca do motor de passo
3 #define STEPS 2038 //definição do motor de passo como um objeto controlável
4 Stepper stepper(STEPS, 8, 10, 9, 11); //definição dos pinos de acionamento do drive do motor de passo
5
6 //declaração de variáveis
7 String x; //string para recebimento dos dados da interface de controle (posição da bandeja)
8 String y; //string para recebimento dos dados da interface de controle (funções internas)
9 int xl=0; //variável de recebe a distância entre a posição atual e a posição deseja da bandeja
10 int yl=0; //variável para controle do switch case de funções internas
11 int p=1; //variável que recebe a posição desejada da bandeja
12 int po=1; //variável que contém a posição atual da bandeja
13 int sentido=0; //variável que indica o sentido e o numero de passos para rotação da bendeja
14 int cont=0; //variável de verificação interna
15 int l=0; //variável de verificação interna

```

Figura S2

```

16
17 //configurações e setup.
18 void setup() {
19   Serial.begin(9600); //estabelece a frequência de comunicação serial com o software de controle
20   pinMode(2, OUTPUT); //define opino de controle dos led
21   pinMode(3, OUTPUT); //define opino de controle do laser
22   pinMode(4, OUTPUT); //define opino de controle do servo motor que ajusta o plano de fundo
23 }
24

```

Figura S3

```

25 //algoritmo executado em loop
26 void loop()
27 {
28   if(Serial.available()>0){ //verifica se o software de controle enviou informações
29     cont=0; //indica um novo passo de movimento da bandeja será executado
30     x= Serial.readStringUntil('/'); //Leitura do comando de posição da bandeja
31     y= Serial.readStringUntil('/'); //Leitura do comando de controle de funções
32
33     yl = y.toInt(); //Conversão da String de dados para interito
34     p = x.toInt(); //Conversão da String de dados para interito
35
36   }
37

```

Figura S4

```

38 switch (y1){//Estrutura de case para acionamento das funções
39   case 1:    //ajuste fino da bandeja no sentido horário
40     rot3();
41     y1=0;
42     break;
43   case 2:    //ajuste fino da bandeja no sentido anti-horário
44     rot4();
45     y1=0;
46     break;
47   case 3:    //muda o status do led de iluminação interna
48     luz();
49     y1=0;
50     break;
51   case 4:
52     laser(); //muda o status do da fonte de radiação lazer
53     y1=0;
54     break;
55   case 5:
56     fundo(); //muda o status do plano de fundo
57     y1=0;
58     break;
59 }
60 }

```

Figura S5

```

61 //cauculo do melhor sentido de rotação
62 if(cont==0){ //se uma nova posição foi envia, cont recebe 0.
63   if(p !=0){ //se a nova posição da bandeja "p" for diferente de zero
64     sentido = p-po; //calcula a diferença entre a posição atual "p0" e posição desejada "p"
65     xl=abs(sentido); //determina o valor absoluto da distância
66     if(sentido>=5){ //caso a distância seja maior ou igual a 5
67       sentido=sentido-8;//o sentido antiorário será menor
68       xl=abs(sentido); //atribui um novo valor a distância, considerando o sentido antiorario
69     }
70   }
71   cont=cont+1; //altera o status do contador
72 }
73
74 if(sentido<0){ //chama a rotação antiorária
75   if(xl>0){
76     rot1();
77     xl=xl-1;
78   }
79 }
80 if(sentido>0){ //chama a rotação orária
81   if(xl>0){
82     rot2();
83     xl=xl-1;
84   }
85 }
86 Serial.print(po); //informa ao software de controle a posição da bandeja
87 delay(500);
88 }

```

Figura S6

```

90 void rot1(){ //aciona o motor no sentido horário
91 stepper.setSpeed(4); // frente
92 stepper.step(257.1); //
93 po=po-1;
94 }
95 void rot2(){ //aciona o motor no sentido horário
96 stepper.setSpeed(4); // trás
97 stepper.step(-257.1); //
98 po=po+1;
99 }
100 //-----ajuste fino da posição da bandeja
101 void rot3(){ //aciona o motor no sentido horário
102 stepper.setSpeed(4); //
103 stepper.step(20); //
104 }
105 void rot4(){ //aciona o motor no sentido horário
106 stepper.setSpeed(4); //
107 stepper.step(-20); //
108 }

```

Figura S7

```

109 //-----demais funções de controle
110 void luz(){ // aciona a iluminação interna
111 digitalWrite(2,HIGH);
112 l=l+1;
113 if(l==2){
114 digitalWrite(2,LOW);
115 l=0;
116 }
117 }
118 void laser(){ // aciona a fonte laser
119 digitalWrite(3,HIGH);
120 l=l+1;
121 if(l==2){
122 digitalWrite(3,LOW);
123 l=0;
124 }
125 }
126 void fundo(){ // altera o plano de fundo
127 digitalWrite(4,HIGH);
128 l=l+1;
129 if(l==2){
130 digitalWrite(4,LOW);
131 l=0;
132 }
133 }
134

```

Figura S8

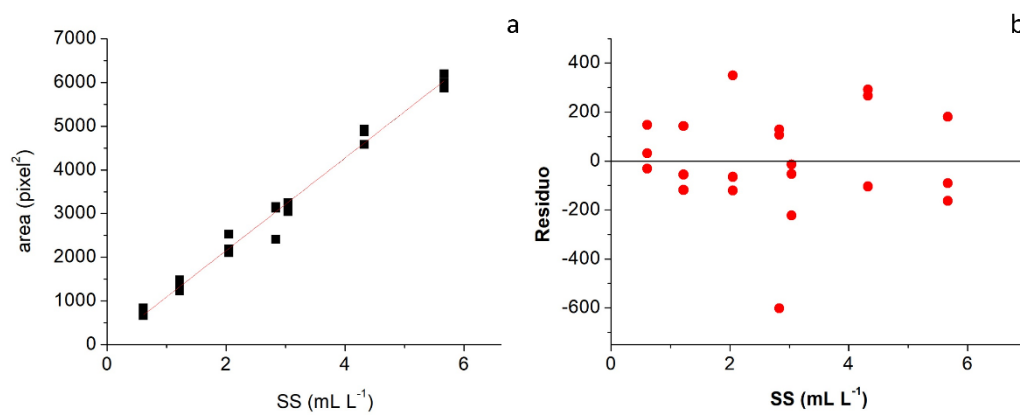


Figura S9

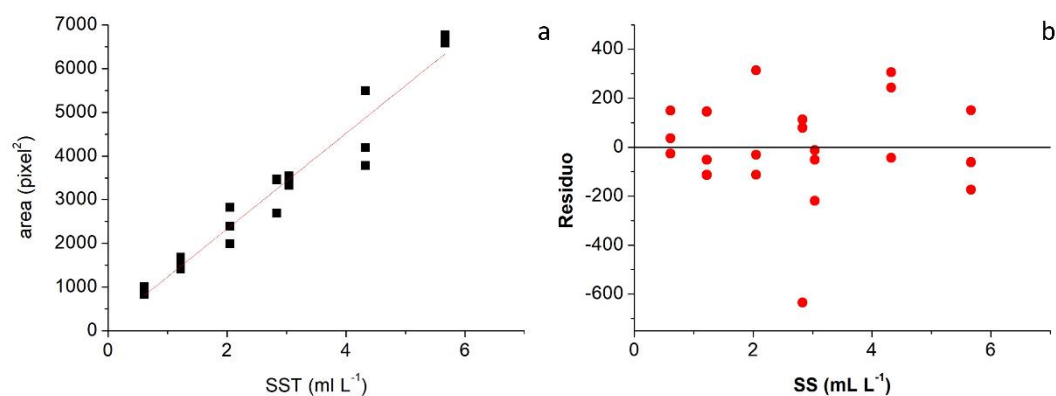


Figura S10

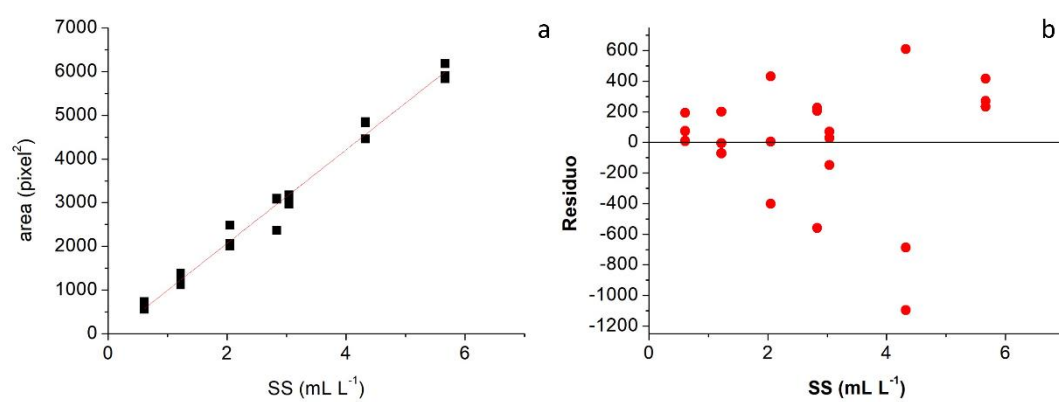


Figura S11

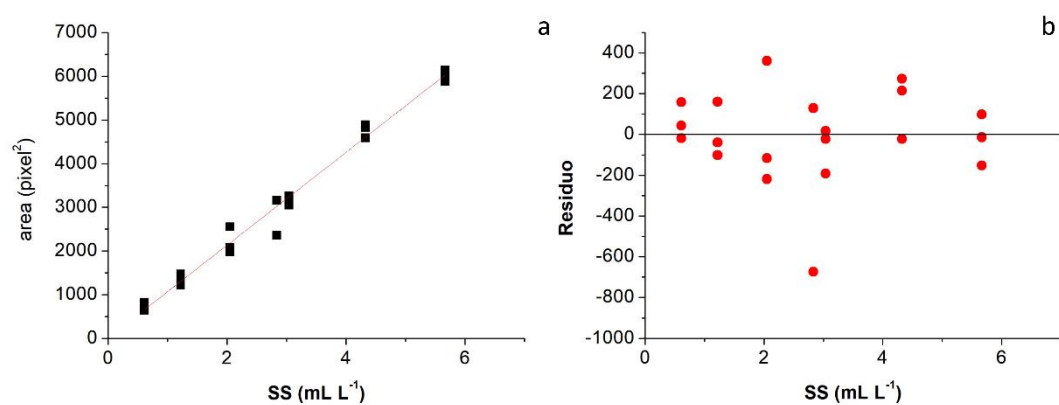


Figura S12

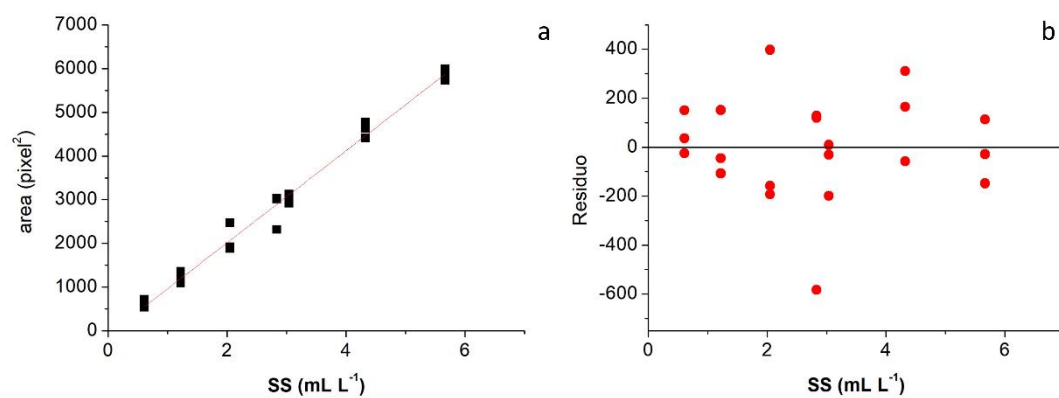


Figura S13

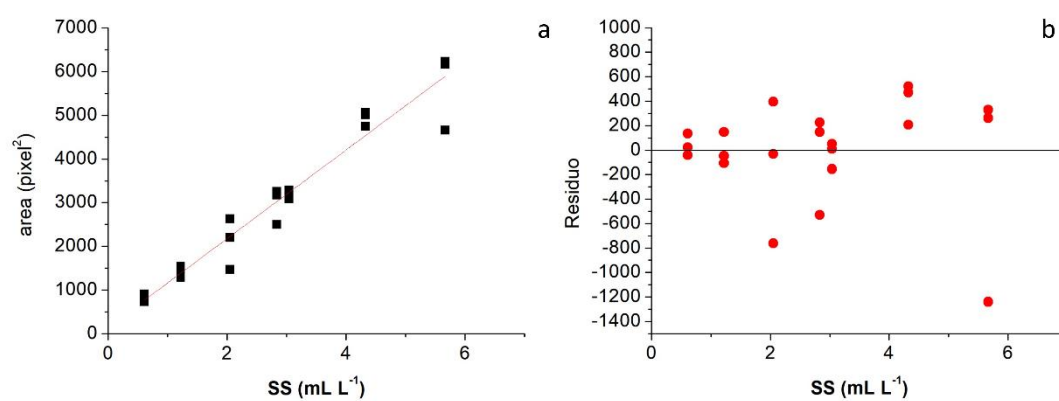


Figura S14

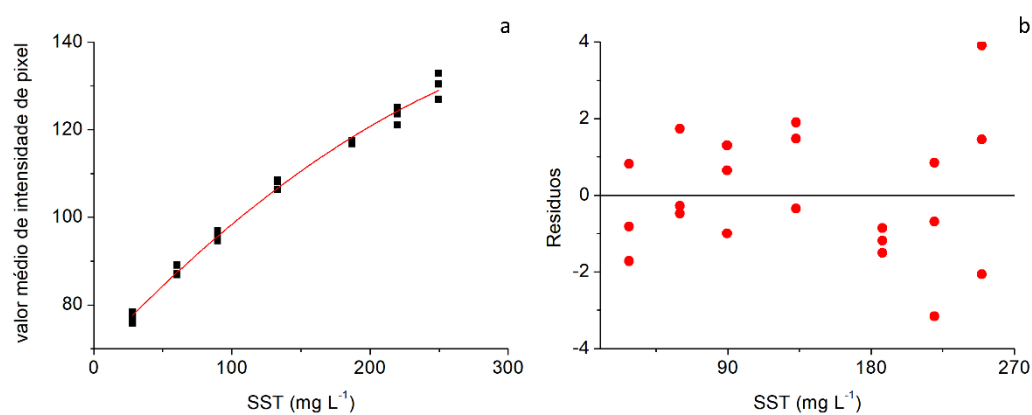


Figura S15

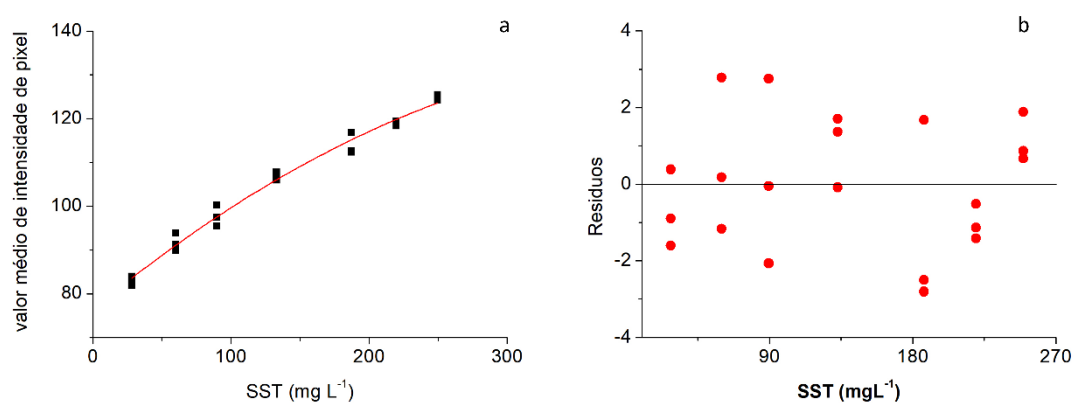


Figura S16

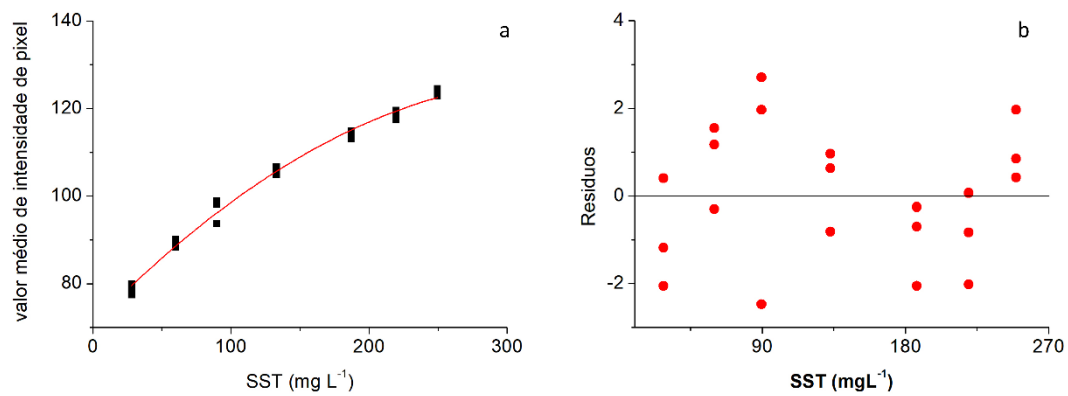


Figura S17

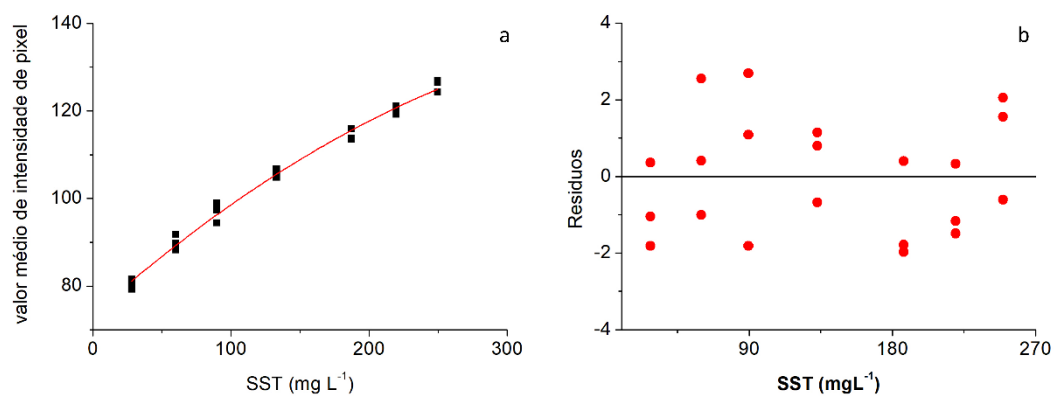


Figura S18

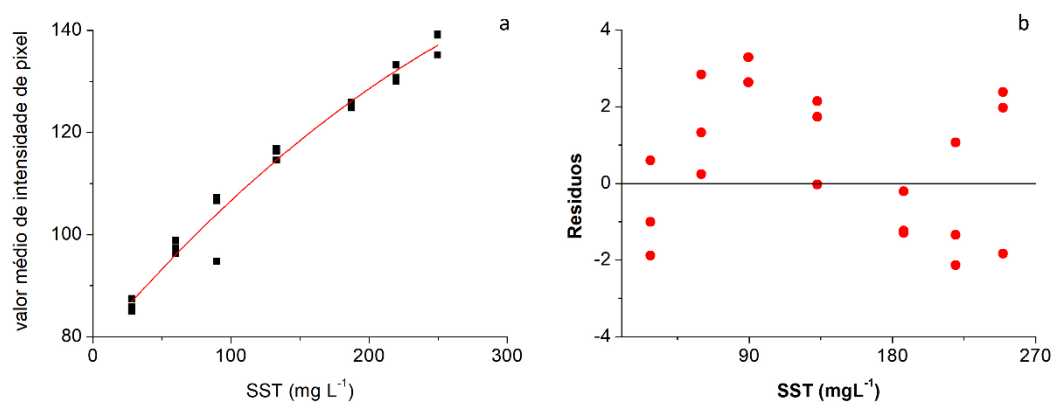


Figura S19

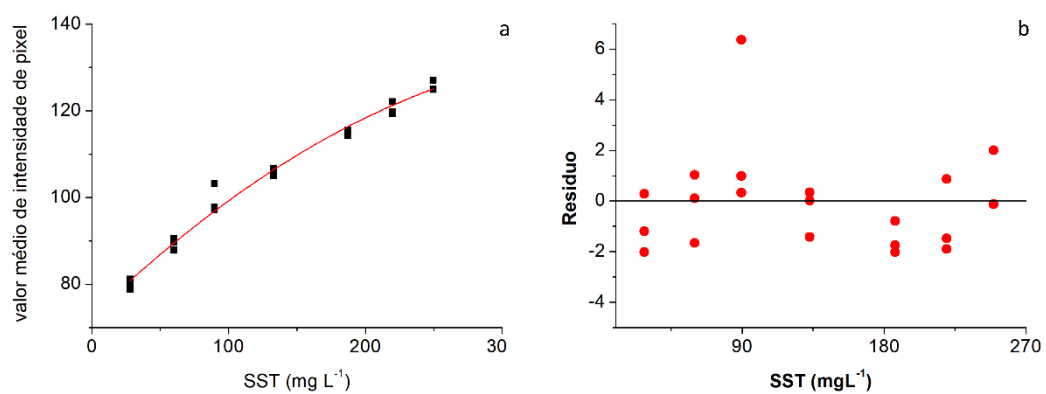


Table S1, Resumo ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando o valor médio pixel do plano R.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	6884,287	2	3442,143
Residual error	53,977	18	2,999
Lack of fit	1176,941	4	294,235
Pure error	1385,123	14	98,937
Total	6938,263	20	3445,142
MS_{Reg}/MS_{res}	1147,875	$F_{critico (2/18)} = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,974	$F_{critico (4/14)} = 3,11$	
R^2	0,992		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S2, Resumo ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando o valor médio pixel do plano G.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	4190,632	2	2095,316
Residual error	54,564	18	3,031
Lack of fit	732,478	4	183,120
Pure error	952,416	14	68,030
Total	4245,196	20	2098,347
MS_{Reg}/MS_{res}	691,215	$F_{critico (2/18)} = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,692	$F_{critico (4/14)} = 3,11$	
R^2	0,987		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S3, Resumo ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando o valor médio pixel do plano B.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	4859,210	2	2429,605
Residual error	43,285	18	2,405
Lack of fit	833,749	4	208,437
Pure error	1032,149	14	73,725
Total	4902,495	20	2432,010
MS_{Reg}/MS_{res}	1010,345	$F_{critico (2/18)} = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,827	$F_{critico (4/14)} = 3,11$	
R^2	0,991		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S4, Resumo ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando o valor médio pixel do plano L.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	5003,308	2	2501,654
Residual error	44,286	18	2,460
Lack of fit	848,316	4	212,079
Pure error	1086,296	14	77,593
Total	5047,594	20	2504,114
MS_{Reg}/MS_{res}	1016,792	$F_{critico (2/18)} = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,733	$F_{critico (4/14)} = 3,11$	
R^2	0,991		

MS_{Reg} : mean square of regression; MS_{res} : mean square of residual error; MS_{LF} : mean square of lack of fit; MS_{PE} : mean square of pure error; R^2 : coefficient of determination.

Table S5, Resumo ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando o valor médio pixel do plano V.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	6649,465	2	3324,733
Residual error	149,964	18	8,331
Lack of fit	1119,899	4	279,975
Pure error	1463,557	14	104,540
Total	6799,429	20	3333,064
MS_{Reg}/MS_{res}	399,063	$F_{critico} (2/18) = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,678	$F_{critico} (4/14) = 3,11$	
R^2	0,977		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S6, Resumo ANOVA obtido para a curva de calibração do total de sólidos suspensos usando o valor médio pixel do plano I.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	5128,981	2	2564,490
Residual error	75,632	18	4,202
Lack of fit	888,348	4	222,087
Pure error	1108,116	14	79,151
Total	5204,613	20	2568,692
MS_{Reg}/MS_{res}	610,335	$F_{critico} (2/18) = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,806	$F_{critico} (4/14) = 3,11$	
R^2	0,985		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S7, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos suspensos totais usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor R.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$2,503 \times 10^8$	2	$1,252 \times 10^8$
Residual error	$7,609 \times 10^5$	18	$4,227 \times 10^4$
Lack of fit	$4,114 \times 10^7$	4	$1,028 \times 10^7$
Pure error	$4,910 \times 10^7$	14	$3,507 \times 10^6$
Total	$2,511 \times 10^8$	20	$1,252 \times 10^7$
MS_{Reg}/MS_{res}	2961,030	$F_{critico} (2/18) = 3,55$	
MS_{LF}/MS_{PE}	2,933	$F_{critico} (4/14) = 3,11$	
R^2	0,997		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S8, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor R.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$7,307 \times 10^7$	1	$7,310 \times 10^7$
Residual error	$8,913 \times 10^5$	19	$4,690 \times 10^4$
Lack of fit	$2,662 \times 10^5$	5	$5,324 \times 10^4$
Pure error	$6,251 \times 10^5$	14	$4,465 \times 10^4$
Total	$7,397 \times 10^7$	20	$3,698 \times 10^6$
MS_{Reg}/MS_{res}	1557,711	$F_{critico} = 4,381$	
MS_{LF}/MS_{PE}	1,192	$F_{critico} = 2,958$	
R^2	0,988		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S9, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor G.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$7,185 \times 10^7$	1	$7,190 \times 10^7$
Residual error	$8,265 \times 10^5$	19	$4,350 \times 10^4$
Lack of fit	$2,766 \times 10^5$	5	$5,531 \times 10^4$
Pure error	$5,499 \times 10^5$	14	$3,928 \times 10^4$
Total	$7,268 \times 10^7$	20	$3,634 \times 10^6$
MS_{Reg}/MS_{res}	1651,791	$F_{critico} = 4,381$	
MS_{LF}/MS_{PE}	1,408	$F_{critico} = 2,958$	
R^2	0,989		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S10, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor B.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$8,046 \times 10^7$	1	$8,050 \times 10^7$
Residual error	$3,298 \times 10^6$	19	$1,740 \times 10^5$
Lack of fit	$7,693 \times 10^5$	5	$1,539 \times 10^5$
Pure error	$2,529 \times 10^6$	14	$1,806 \times 10^5$
Total	$8,376 \times 10^7$	20	$4,188 \times 10^6$
MS_{Reg}/MS_{res}	463,561	$F_{critico} = 4,381$	
MS_{LF}/MS_{PE}	0,852	$F_{critico} = 2,958$	
R^2	0,961		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S11, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor L.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$7,272 \times 10^7$	1	$7,270 \times 10^7$
Residual error	$8,148 \times 10^5$	19	$4,290 \times 10^4$
Lack of fit	$1,820 \times 10^5$	5	$3,641 \times 10^4$
Pure error	$6,327 \times 10^5$	14	$4,520 \times 10^4$
Total	$7,354 \times 10^7$	20	$3,677 \times 10^6$
MS_{Reg}/MS_{res}	1695,838	$F_{critico} = 4,381$	
MS_{LF}/MS_{PE}	0,805	$F_{critico} = 2,958$	
R^2	0,989		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S12, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor V.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$7,128 \times 10^7$	1	$7,130 \times 10^7$
Residual error	$8,086 \times 10^5$	19	$4,260 \times 10^4$
Lack of fit	$1,642 \times 10^5$	5	$3,284 \times 10^4$
Pure error	$6,443 \times 10^5$	14	$4,602 \times 10^4$
Total	$7,209 \times 10^7$	20	$3,605 \times 10^6$
MS_{Reg}/MS_{res}	1675,084	$F_{critico} = 4,381$	
MS_{LF}/MS_{PE}	0,714	$F_{critico} = 2,958$	
R^2	0,989		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.

Table S13, Resumo de ANOVA obtido para a curva de calibração de sólidos sedimentáveis usando o algoritmo de visão de máquina baseado no plano de cor I.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Estimativa de variância (quadrado médio)
Regression	$6,920 \times 10^7$	1	$6,920 \times 10^7$
Residual error	$3,401 \times 10^6$	19	$1,790 \times 10^5$
Lack of fit	$6,901 \times 10^5$	5	$1,380 \times 10^5$
Pure error	$2,711 \times 10^6$	14	$1,936 \times 10^5$
Total	$7,260 \times 10^7$	20	$3,630 \times 10^6$
MS_{Reg}/MS_{res}	386,645	$F_{critico} = 4,381$	
MS_{LF}/MS_{PE}	0,713	$F_{critico} = 2,958$	
R^2	0,953		

MS_{Reg} : quadrado médio de regressão; MS_{res} : quadrado médio do erro residual; MS_{LF} : quadrado médio de falta de ajuste; MS_{PE} : quadrado médio de erro puro; R^2 : coeficiente de determinação.



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2019 015793 3

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 24098477000110

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58059-900

País: Brasil

Telefone: (83) 32167558

Fax:

Email: inova@reitoria.ufpb.br

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): MULTIANALISADOR PORTÁTIL, COM CONEXÃO USB E BLUETOOTH, PARA ANÁLISES FOTOMÉTRICAS, TURBIDIMÉTRICAS, NEFELOMÉTRICAS E FLUORIMÉTRICAS

Resumo: A presente invenção trata-se de um multianalisador portátil controlado por dispositivos móveis, via comunicação bluetooth, ou por microcomputador, via conexão USB, para determinações fotométricas, turbidimétricas, nefelométricas e fluorimétricas. Compreende um gabinete, que possui na face frontal uma janela móvel (s) que fechada permite determinações com fotodetectores (m) e, aberta permite análises por imagens digitais. Tem ainda na face frontal, um encaixe (t) para o acoplamento vertical ou horizontal do suporte para dispositivos móveis (v) composto de uma garra deslizável com molas (z) e uma lente focalizadora (x). Na face direita há uma porta USB (n) empregada para comunicação e/ou alimentação. A face superior contém a tampa móvel (u) que permite acoplar cubetas retangulares ao suporte de cubetas cilíndricas (r). O circuito eletrônico composto de um microprocessador (d), uma ponte USB (e), um módulo bluetooth (f) e um módulo de acionamento (g), é responsável pelo controle do instrumento de acordo com comandos provenientes do software, via conexão USB, ou do App, via comunicação bluetooth, por meio dos quais é possível selecionar a faixa espectral das fontes de radiação, a intensidade de luz e a posição angular do detector (45, 90, 135 e 180°). A cela de detecção é constituída de um difusor de luz (i), de placas de fendas (o e p); um suporte de cubetas (r) contendo fotodetectores (m) e Leds RGB (j) e Laser (l).

Figura a publicar: 2

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 7

Nome: RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

CPF: 09295256476

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Doutorando

Endereço: Rua Domestica Tereza Alexandre Barbosa, 7 - Cidade dos Colibris

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58073-209

País: BRASIL

Telefone: (83) 996 279150

Fax:

Email: railson_uepb@outlook.com

Inventor 2 de 7

Nome: MARIO CESAR UGULINO DE ARAÚJO

CPF: 16075056491

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Maria das Dores Souza, Nº 60, Apartamento 601, Edifício Residencial Grandmare - Altiplano Cabo Branco

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58046-095

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: mariougulino@gmail.com

Inventor 3 de 7

Nome: VALBER ELIAS DE ALMEIDA

CPF: 09657319447

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Doutorando

Endereço: Rua Otávio Soares, nº 130, Castelo Branco

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58050-320

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: vallber_ellias@hotmail.com

Inventor 4 de 7

Nome: DAVID DOUGLAS DE SOUSA FERNANDES

CPF: 05594020403

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Pesquisador

Endereço: Rua Empresário Olavo dos Guimarães Vanderlei, - Valentina Figueiredo

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58063-012

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: davidddf013@gmail.com

Inventor 5 de 7

Nome: KÁTIA MESSIAS BICHINHO

CPF: 50154095087

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua José Clementino de Oliveira, 1790

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58042-300

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: katia.bichinho@gmail.com

Inventor 6 de 7

Nome: ARTHUR OLIVEIRA LIMA

CPF: 09472161464

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Analista de sistemas, desenvolvedor de software, administrador de redes e bancos de dados e outros especialistas em informática (exceto técnico)

Endereço: Rua Maurílio Silva Santos, nº 120, Malvinas

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58432-659

País: BRASIL

Telefone: (83) 981 041612

Fax:

Email: oliveiraarthur93@outlook.com

Inventor 7 de 7

Nome: WILTON SILVA LOPES

CPF: 02064721452

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Avenida das Barúnas Nº 131

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58109-753

País: BRASIL

Telefone: (83) 331 53311

Fax:

Email: wilton@uepb.edu.br

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Comprovante de pagamento de GRU 200	00_Comprovante de pagamento.pdf
Relatório Descritivo	01_Relatório Descritivo.pdf
Reivindicação	02_Reivindicações.pdf
Desenho	03_Desenhos.pdf
Resumo	04_Resumo.pdf

Acesso ao Patrimônio Genético

- ☒ Declaração Negativa de Acesso - Declaro que o objeto do presente pedido de patente de invenção não foi obtido em decorrência de acesso à amostra de componente do Patrimônio Genético Brasileiro, o acesso foi realizado antes de 30 de junho de 2000, ou não se aplica.

Declaração de veracidade

- ☒ Declaro, sob as penas da lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras.



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2019 017890 6

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAIBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 12671814000137

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Rua Baraúnas, 351

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58429-500

País: Brasil

Telefone: (83) 3315 3383

Fax:

Email: inovateupeb@uepb.edu.br

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 24098477000110

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58051-900

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67558

Fax:

Email: inova@reitoria.ufpb.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): INSTRUMENTO AUTOMATIZADO PARA O MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO DE GASES E VAPORES EM PROCESSOS QUÍMICOS, FÍSICOS OU BIOLÓGICOS

Resumo: A presente invenção é um instrumento automatizado para o monitoramento da produção de gases e vapores que possui dispositivos para controle da pressão interna, da temperatura, da rotação de mistura, da produção de vácuo e descarga. Uma das vantagens deste equipamento é capacidade de monitorar mais de um processo de produção de gases e vapores ao mesmo tempo, e realizar controle e coleta de dados em tempo real.

Figura a publicar: 00

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 3

Nome: WILTON SILVA LOPES

CPF: 02064721452

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Avenida das Barúnas N° 131, Cidade Universitária

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58109-753

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: wiltonuepb@gmail.com

Inventor 2 de 3

Nome: RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

CPF: 09295256476

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação

Endereço: Rua comerciante Alfredo Ferreira da Rocha N° 740 B, Mangabeira

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58055-540

País: BRASIL

Telefone: (83) 996 279150

Fax:

Email: railson_uepb@outlook.com

Inventor 3 de 3

Nome: MÁRIO CÉSAR UGULINO DE ARAÚJO

CPF: 16075056491

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Maria das Dores Souza N° 60, Ed. Grandmare, apt. 601,
Altiplano

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58046-095

País: BRASIL

Telefone: (83) 988 860625

Fax:

Email: mariougulino@gmail.com

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Comprovante de pagamento de GRU 200	Comprovante GRU_Patente_Instrumento.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo WILTON.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo RAILSON.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo MARIO.PDF
Procuração	Procuração UEPB_UFPB_ assinada - Instrumento.pdf
Desenho	FIGURAS_Instrumento.pdf
Relatório Descritivo	RELATÓRIO DESCRITIVO_Instrumento.pdf
Reivindicação	REIVINDICAÇÕES_Instrumento.pdf
Resumo	RESUMO_Instrumento.pdf

Acesso ao Patrimônio Genético

- ☒ Declaração Negativa de Acesso - Declaro que o objeto do presente pedido de patente de invenção não foi obtido em decorrência de acesso à amostra de componente do Patrimônio Genético Brasileiro, o acesso foi realizado antes de 30 de junho de 2000, ou não se aplica.

Declaração de veracidade

- ☒ Declaro, sob as penas da lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras.



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2019 017888 4

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAIBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 12671814000137

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Rua Baraúnas, 351

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58429-500

País: Brasil

Telefone: (83) 3315 3383

Fax:

Email: inovateupeb@uepb.edu.br

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 24098477000110

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58051-900

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67558

Fax:

Email: inova@reitoria.ufpb.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): REATOR PARA MONITORAR PRODUÇÃO DE GASES E VAPORES EM PROCESSOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS

Resumo: O presente invento para monitoramento da produção de gases e vapores em processos físicos, químicos e biológicos trata-se de um reator que possui uma tampa (b) hermeticamente acoplável a frascos de diferentes tamanhos (a), que possui uma abertura para o acoplamento de uma sonda (c) fixada à tampa (b) através dos parafusos (d). Esta sonda (c) possui um furo lateral no qual está posicionado: i) um conector pneumático (f) para o acoplamento de um medidor de pressão, coletor ou descarte; ii) um furo central onde estão alocados os selos pneumáticos (e); iii) parafusos (d) para fixação a tampa do reator. Fixado na sonda (c) através dos parafusos (j) e dos selos pneumáticos (e), está acoplado um motor de mistura (g) com um eixo (h) e uma hélice de mistura (i). Na parte externa dos frascos (a) estão fixados um sensor de temperatura (l) e um módulo de aquecimento (m).

Figura a publicar: 00

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 3

Nome: WILTON SILVA LOPES

CPF: 02064721452

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Avenida das Barúnas Nº 131, Cidade Universitária

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58109-753

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: wiltonuepb@gmail.com

Inventor 2 de 3

Nome: RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

CPF: 09295256476

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação

Endereço: Rua comerciante Alfredo Ferreira da Rocha, Mangabeira

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58055-540

País: BRASIL

Telefone: (83) 996 279150

Fax:

Email: railson_uepb@outlook.com

Inventor 3 de 3

Nome: MÁRIO CÉSAR UGULINO DE ARAÚJO

CPF: 16075056491

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Maria das Dores Souza N° 60, Ed. Grandmare, apt. 601,
Altiplano

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58046-095

País: BRASIL

Telefone: (83) 988 860625

Fax:

Email: mariougulino@gmail.com

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Comprovante de pagamento de GRU 200	Comprovante GRU_Patente_Reator.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo WILTON.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo RAILSON.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo MARIO.PDF
Procuração	Procuração UEPB_UFPB_ assinada - Reator.pdf
Desenho	Figuras_reator.pdf
Relatório Descritivo	Relatório descritivo_reator.pdf
Reivindicação	Reivindicações_reator.pdf
Resumo	Resumo_reator.pdf

Acesso ao Patrimônio Genético

- ☒ Declaração Negativa de Acesso - Declaro que o objeto do presente pedido de patente de invenção não foi obtido em decorrência de acesso à amostra de componente do Patrimônio Genético Brasileiro, o acesso foi realizado antes de 30 de junho de 2000, ou não se aplica.

Declaração de veracidade

- ☒ Declaro, sob as penas da lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras.



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2019 027031 4

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAIBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 12671814000137

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Rua Baraúnas, 351

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58429-500

País: Brasil

Telefone: (83) 3315 3383

Fax:

Email: inovatecuepb@uepb.edu.br

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA - UFPB

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 24098477000110

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58051-900

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67558

Fax:

Email: inova@reitoria.ufpb.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de SISTEMA AUTOMATIZADO COM CONECTIVIDADE PARA

Utilidade (54): CONTROLE E MONITORAMENTO EM LINHA DE pH

Resumo: O presente invento trata-se de um sistema automatizado para controle e monitoramento em linha de pH, aplicável à sistemas em escala de bancada, piloto ou industrial, para processos físicos, químicos e biológicos.

Figura a publicar: 00

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 5

Nome: RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

CPF: 09295256476

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação

Endereço: Rua comerciante Alfredo Ferreira da Rocha N° 740 B, Mangabeira

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58055-540

País: BRASIL

Telefone: (83) 996 279150

Fax:

Email: railson_uepb@outlook.com

Inventor 2 de 5

Nome: WILTON SILVA LOPES

CPF: 02064721452

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Avenida das Barúnas N° 131, Cidade Universitária

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58109-753

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: wiltonuepb@gmail.com

Inventor 3 de 5

Nome: MÁRIO CÉSAR UGULINO DE ARAÚJO

CPF: 16075056491

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Maria das Dores Souza N° 60, Ed. Grandmare, apt. 601,
Altiplano

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58046-095

País: BRASIL

Telefone: (83) 988 860625

Fax:

Email: mariougulino@gmail.com

Inventor 4 de 5

Nome: EDIANO DUARTE DE LIMA

CPF: 08254436444

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação

Endereço: Rua Vereador Arrojado Lisboa, 121, Monte Santo

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58400-640

País: BRASIL

Telefone: (83) 999 716534

Fax:

Email: edianoduartelima@gmail.com

Inventor 5 de 5

Nome: VALBER ELIAS DE ALMEIDA

CPF: 09657319447

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Estudante de Pós Graduação

Endereço: Rua Otávio Soares, nº 130, Castelo Branco

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58050-320

País: BRASIL

Telefone: (83) 988 938001

Fax:

Email: vallber_ellias@hotmail.com

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Comprovante de pagamento de GRU 200	Comprovante GRU - pedido de Patente - Wilton.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo - RAILSON.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo - WILTON.pdf
Contrato de trabalho	comprovante de vínculo - MARIO.PDF
Contrato de trabalho	Comprovante de vínculo - EDIANO.pdf
Contrato de trabalho	Comprovante de vínculo - VALBER.pdf
Reivindicação	Reivindicações_ATUALIZADAS_111219.pdf
Relatório Descritivo	Relatório descritivo_ATUALIZADO_111219.pdf
Resumo	Resumo_111219.pdf
Desenho	Figuras_ATUALIZADAS_111219.pdf
Procuração	Procuração cotitularidade_ASSINADA.pdf



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2020 009864 0

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 2

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 24098477000110

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Cidade Universitária

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58059-900

País: Brasil

Telefone: (83) 32167558

Fax:

Email: inova@reitoria.ufpb.br

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 12671814000137

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa

Endereço: Rua das Baraúnas, Nº 351, Universitário, Reitoria, 2º Andar, Sala 212.

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58429-500

País: BRASIL

Telefone: (83) 331 53383

Fax:

Email: inovatecuepb@uepb.edu.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): ANALISADOR AUTOMÁTICO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E SEDIMENTÁVEIS COM DETECÇÃO POR SISTEMA DIGITAL E VISÃO COMPUTACIONAL

Resumo: A presente invenção trata de um instrumento para determinação de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos sedimentáveis (SSed) que usa um amostrador automático e sistema de detecção inteligente baseado imagens digitais e visão computacional. Este invento possui aplicação nas áreas de Indústria Química, Alimentos, Farmacêutica, Recursos hídricos, Agricultura, Ambiental, Petroquímica, Mineração, Nuclear e áreas afins.

Figura a publicar: 2

Dados do Inventor (72)

Inventor 1 de 5

Nome: RAILSON DE OLIVEIRA RAMOS

CPF: 09295256476

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Doutorando

Endereço: Rua Domestica Tereza Alexandre Barbosa, Nº 7, Cidade dos Colibris.

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58073-209

País: BRASIL

Telefone: (83) 996 279150

Fax:

Email: railson_uepb@outlook.com

Inventor 2 de 5

Nome: MARIO CESAR UGULINO DE ARAÚJO

CPF: 16075056491

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Rua Maria das Dores Souza, Nº 60, Apartamento 601, Edifício Residencial Grandmare, Altiplano, Cabo Branco.

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58046-095

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: mariougulino@gmail.com

Inventor 3 de 5

Nome: VALBER ELIAS DE ALMEIDA

CPF: 09657319447

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Doutorando

Endereço: Rua Otávio Soares, Nº 130, Castelo Branco.

Cidade: João Pessoa

Estado: PB

CEP: 58050-320

País: BRASIL

Telefone: (83) 321 67438

Fax:

Email: vallber_ellias@hotmail.com

Inventor 4 de 5

Nome: VALDERI DUARTE LEITE

CPF: 10879390468

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Pesquisador

Endereço: Rua Francisco Guedes de Moura, Nº 72, Catolé.

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58421-490

País: BRASIL

Telefone: (83) 333 15026

Fax:

Email: mangabeiraleite@gmail.com

Inventor 5 de 5

Nome: WILTON SILVA LOPES

CPF: 02064721452

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Física: Professor do ensino superior

Endereço: Avenida das Barúnas, Nº 131.

Cidade: Campina Grande

Estado: PB

CEP: 58109-753

País: BRASIL

Telefone: (83) 331 53311

Fax:

Email: wilton@uepb.edu.br

Documentos anexados

Tipo Anexo	Nome
Comprovante de pagamento de GRU 200	00_Comprovante.pdf
Relatório Descritivo	01_Relatorio_descritivo.pdf
Reivindicação	02_Reivindicacao.pdf
Desenho	03_Desenhos.pdf
Resumo	04_Resumo.pdf

Acesso ao Patrimônio Genético

- ☒ Declaração Negativa de Acesso - Declaro que o objeto do presente pedido de patente de invenção não foi obtido em decorrência de acesso à amostra de componente do Patrimônio Genético Brasileiro, o acesso foi realizado antes de 30 de junho de 2000, ou não se aplica.

Declaração de veracidade

- ☒ Declaro, sob as penas da lei, que todas as informações acima prestadas são completas e verdadeiras.

06/05/2020 - BANCO DO BRASIL - 16:15:49
161901619 0036

COMPROVANTE DE PAGAMENTO DE TITULOS

CLIENTE: MARIO CESAR U DE ARAUJO

AGENCIA: 1619-5 CONTA: 1.239-4

=====

BANCO DO BRASIL

00190000090294091619618706173178382760000007000

BENEFICIARIO:

INSTITUTO N P I - INPI

NOME FANTASIA:

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE I

CNPJ: 42.521.088/0001-37

PAGADOR:

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

CNPJ: 24.098.477/0001-10

NR. DOCUMENTO	50.601
---------------	--------

NOSSO NUMERO	29409161918706173
--------------	-------------------

CONVENIO	02940916
----------	----------

DATA DE VENCIMENTO	04/06/2020
--------------------	------------

DATA DO PAGAMENTO	06/05/2020
-------------------	------------

VALOR DO DOCUMENTO	70,00
--------------------	-------

VALOR COBRADO	70,00
---------------	-------

=====

NR.AUTENTICACAO	9.213.8F0.D5A.33A.224
-----------------	-----------------------

Central de Atendimento BB

4004 0001 Capitais e regioes metropolitanas

0800 729 0001 Demais localidades

Consultas, informacoes e servicos transacionais.

SAC

0800 729 0722

Informacoes, reclamacoes e cancelamento de
produtos e servicos.

Ouvidoria

0800 729 5678

Reclamacoes nao solucionadas nos canais
habituais: agencia, SAC e demais canais de
atendimento.

Atendimento a Deficientes Auditivos ou de Fala

0800 729 0088

Informacoes, reclamacoes, cancelamento de
cartao, outros produtos e servicos de Ouvidoria.

“ANALISADOR AUTOMÁTICO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E SEDIMENTÁVEIS COM DETECÇÃO POR SISTEMA DIGITAL E VISÃO COMPUTACIONAL”

[001] A presente invenção trata de um instrumento para determinação de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos sedimentáveis (SSed) que usa um amostrador automático e sistema inteligente de detecção por imagens/filmes digitais e visão computacional. Este instrumento está inserido no campo da instrumentação analítica para as áreas de química, alimentos, farmacêutica, recursos hídricos, agricultura, biodiagnóstico, ambiental, petroquímica etc.

[002] Um grande diferencial deste instrumento é que, até o presente momento, não existem relatos de um analisador que usa um amostrador automático e que utilize imagens/filmes digitais e visão computacional para realizar determinações analíticas de SST e SSed.

[003] Um sistema de visão computacional aplicado a indústria é chamado de visão de máquina, conceituado como a tecnologia e os métodos usados para fornecer inspeção e análise automáticas baseadas em imagens ou filmes digitais, chamada, normalmente, de “tecnologia das máquinas que enxergam”. Esta tecnologia refere-se a softwares e hardwares, sistemas, ações, métodos e conhecimentos integrados. O presente invento envolve o uso de software (algoritmo de inteligência artificial), hardware e métodos analíticos para determinação de SST e SSed.

[004] No banco de pesquisa do INPI não existe nenhum instrumento com tais características e, inclusive, não existe nenhuma abordagem para sistemas visão de máquina inteligente. Patentes e inventos envolvendo visão computacional somam juntos 15 registros, dos quais, apenas 2 estão relacionadas a instrumentação: A BR 10 2017 028656 8 trata-se de um “MÉTODO PARA LEITURA DE MEDIDORES DE

CONSUMO DE ÁGUA (HIDRÔMETROS), DE ENERGIA (RELÓGIO DE LUZ), DE GÁS (RELÓGIO DE GÁS)” baseado em visão computacional, não tendo relação com as aplicações do presente invento. A BR 10 2016 022717 8 descreve um “SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO PONTO DE EQUIVALÊNCIA DE TITULAÇÕES VOLUMÉTRICAS BASEADO EM VISÃO COMPUTACIONAL”, mas não se destina as aplicações deste invento nem possui características similares.

[005] Das muitas patentes relacionadas a espectrometria, fotometria, fluorimetria, nefelometria e análise de partículas (57 inventos no total), nenhuma utiliza sistema de detecção inteligente por visão de máquina. Nos bancos internacionais de propriedade intelectual existem algumas aplicações de visão computacional e visão de máquina, contudo, são poucos os relatos para instrumentação: A US20090080735A1 descreve um sistema com “MACHINE VISION PARA VERIFICAÇÃO FARMACÊUTICA ESPECTROSCÓPICA”, destinada a análise dedicada de reflectância em sólidos farmacêuticos, não sendo destinada a determinação de sólidos suspensos ou sedimentáveis.

[006] A US20040197020A1 reivindica um “SISTEMA DE VISÃO A CORES PARA COLORIMETRIA”, caracterizado por um método de inspeção para objetos, não sendo destinado a determinação de sólidos suspensos ou sedimentáveis. A US5227985A descreve um “SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MONITORAMENTO DE POSIÇÃO EM 3D USANDO FONTES DE LUZ NÃO COPLANARES CONECTADAS A UM OBJETO MONITORADO”, destinado a detecção e monitoramento da posição e orientação de um objeto rígido, mas não se aplica para determinações sólidos suspensos ou sedimentáveis.

[007] Este invento consiste em um sistema integrado hardware/software em que análise por imagem/filme digital é utilizada em determinações de SST e SSed. O sistema de visão de máquina inteligente é aplicada para reconhecimento, contagem e análise de

partículas, sedimentos e/ou fases de uma amostra, bem como, para reconhecer e medir o espalhamento de luz provocados por sólidos e partículas em suspensão.

[008] A FIGURA 1 é uma representação visual do equipamento fechado.

[009] A FIGURA 2 mostra os detalhes da parte física do instrumento que é compreendido por um gabinete (1), que possui uma tampa frontal (2) com janela (3) para aquisição de imagens/vídeo da cela de detecção. Acoplados a tampa frontal (2) estão os LEDs de iluminação interna (4) e o compartimento de câmera (5). Na parte interna do compartimento de câmera (5) está alocada uma câmera digital (6) para aquisição de imagens/vídeo, que fica posicionada em frente à janela (3). O compartimento de câmera (5) também possui: uma porta USB (7), através da qual o instrumento pode se conectar a tablets, notebooks, computadores e outros dispositivos para alimentação, controle e transferência de dados; uma tampa lateral (8), à qual está acoplado o circuito eletrônico (9) responsável pelo controle do instrumento. O gabinete (1) também possui uma tampa superior (10), com uma abertura circular (11), que acomoda a bandeja de amostragem (12) do amostrador automático. O amostrador automático é constituído por: uma bandeja de amostragem (12), que possui n encaixes para acoplamento de n amostras; um motor de passo (13), responsável pela rotação da bandeja de amostragem (12); um parafuso (14) e uma tampa (15) que fixam a bandeja de amostragem (12) ao eixo do motor de passo (13). Quando as amostras são alocadas no amostrador automático, a rotação da bandeja de amostragem (12) possibilita posicionar a amostra selecionada em frente a cela de detecção. A cela de detecção, por sua vez, compreende o espaço entre a janela (3) e o plano de fundo móvel (17). O plano de fundo móvel (17) é deslocado pelo servo motor (18), possibilitando a aquisição de imagens/filmes em fundo preto ou branco. Na parte lateral interna do

gabinete (1), está posicionado uma unidade laser (16), que pode ser utilizada para ensaios de espalhamento de luz, análise de suspensões e tamanho de partículas, análises de fluorescência etc.

[010] O circuito eletrônico (9) é composto por um microprocessador e uma unidade de acionamento do motor de passo (13). O microprocessador emprega um algoritmo inteligente capaz de localizar uma amostra presente no amostrador automático e, em seguida, buscar o menor percurso de rotação para posicionar esta amostra na cela de detecção. As opções de controle do instrumento, acessadas via computador ou outros dispositivos, são: o acionamento dos LEDs de iluminação (4) e do módulo laser (16), seleção do plano de fundo (branco/preto) (17), além da seleção da posição da bandeja de amostragem (12) e calibração da posição da bandeja de amostragem (com resolução de 0,0174533 radiano). As opções de pré-processamento de imagem são: seleção da região de interesse na imagem (ROI) e a escolha componente de cor utilizada como filtro para a imagem/filme digital (Vermelho-Red, Verde-Green, Azul-Blue, Luminância-Luminance, Valor-Value e Intensidade-Intensity). As opções de processamento de imagem para análise pelo sistema de visão de máquina inteligente são: buscar por objetos negros ou brilhantes, o valor do threshold (valor de pixel de borda), selecionar ou rejeitar objetos que tocam a borda da ROI. O sistema reconhece os objetos, determinando propriedades geométricas e espaciais. Quando as amostras são dispostas na bandeja de amostragem, uma mostra por vez é alocada na cela de detecção onde o sistema de captura de imagem/vídeo registra o sinal analítico.

[011] Teste de validação do invento na determinação de SSed foram realizados usando amostras com diferentes teores de SSed na calibração e validação. Com o invento foi possível determinar com boa precisão e exatidão o teor de SSed nas amostras analisadas.

[012] A FIGURA 3 apresenta os resultados dos testes. As imagens

do reconhecimento dos diferentes níveis de sólidos são destacados, tais como: - 0,68 mg L⁻¹; - 1,36 mg L⁻¹; - 2,05 mg L⁻¹; - 2,87 mg L⁻¹; - 3,36 mg L⁻¹; - 4,32 mg L⁻¹; - 5,04 mg L⁻¹; - 5,67 mg L⁻¹. As curvas analíticas de calibração são apresentadas para dois diferentes filtros de cor: filtro Red e filtro Value. Os testes de predição empregando o filtro Red e filtro Value são destacados. Um teste de significância (0,05) foi aplicado nos dados de predição para 24 amostras empregando os modelos com filtros R e V. A diferença da média de respostas entre estes modelos (1,84468E⁻⁴) não foi significativa, apresentando hipótese de diferença de médias nula (t Statistic: 0,01169; Prob>|t| 0,99077). Também foi constatada a hipótese de diferença de médias nula entre os modelos propostos e o método de referência (filtro V: t Statistic: 0,00145; Prob>|t| 0,9988) (filtro R: t Statistic: -0,00246; Prob>|t| 0,9980). Isto indica que, nas condições deste estudo, o equipamento é adequado para determinação de SSed.

[013] A FIGURA 4 apresenta os resultados dos testes realizados para validação do invento em medidas de dispersão de luz e na determinação SST. Os resultados apresentados na FIGURA 3 foram para a calibração e predição. O equipamento foi eficiente, capaz de reconhecer e mensurar a área de luz espalhada em diferentes níveis de sólidos em suspensão: - 30.23 mg L⁻¹; - 60.09 mg L⁻¹; - 89.65 mg L⁻¹; - 124.59 mg L⁻¹; - 150.22 mg L⁻¹; - 187.07 mg L⁻¹; - 219.67 mg L⁻¹; - 249.47 mg L⁻¹.

[014] Os resultados comprovam que o sinal analítico registrado guarda correlação adequada com o nível de sólidos suspensos de uma amostra. Um teste de significância (0,05) foi aplicado nos dados de predição para 24 amostras empregando sistema de visão de máquina inteligente. A diferença da média entre os preditos e observados (-1.72) não foi significativa, validando a hipótese de diferença nula (t Statistic: -1.0458; Prob>|t| 0,3065). Isto indica que, nas condições deste estudo, o equipamento é adequado para determinação de TSS.

REIVINDICAÇÃO

1. “Analisador automático de sólidos suspensos e sedimentáveis com detecção por sistema digital e visão computacional” caracterizado por compreender um gabinete (1), que possui uma tampa frontal (2) com janela (3) para aquisição de imagens/vídeo da sela de detecção, acoplados a tampa frontal (2) estão os LEDs de iluminação interna (4) e o compartimento de câmera (5); na parte interna deste compartimento de câmera (5) está alocada uma câmera (6), posicionada em frente à janela (3), uma porta USB (7) e uma tampa lateral (8), na qual está acoplado o circuito eletrônico (9); além disso, o gabinete (1) possui uma tampa superior (10), com uma abertura (11), onde é acomodado o amostrador automático constituído de: uma bandeja de amostragem (12) fixada a um motor de passo (13) usando um parafuso (14) e uma tampa (15); o gabinete (1) possui ainda uma unidade laser (16) um plano de fundo móvel preto/braço (17) que pode ser movimentado sobre controle do servo motor (18).

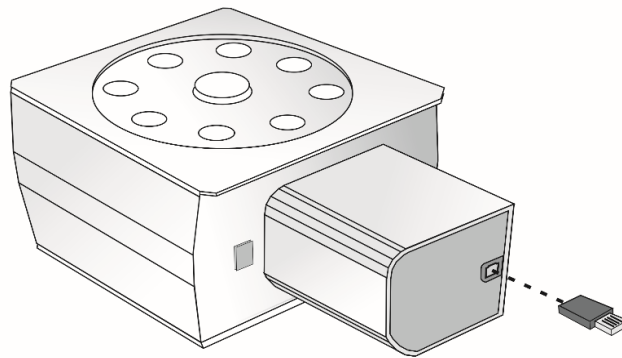


Figura 1

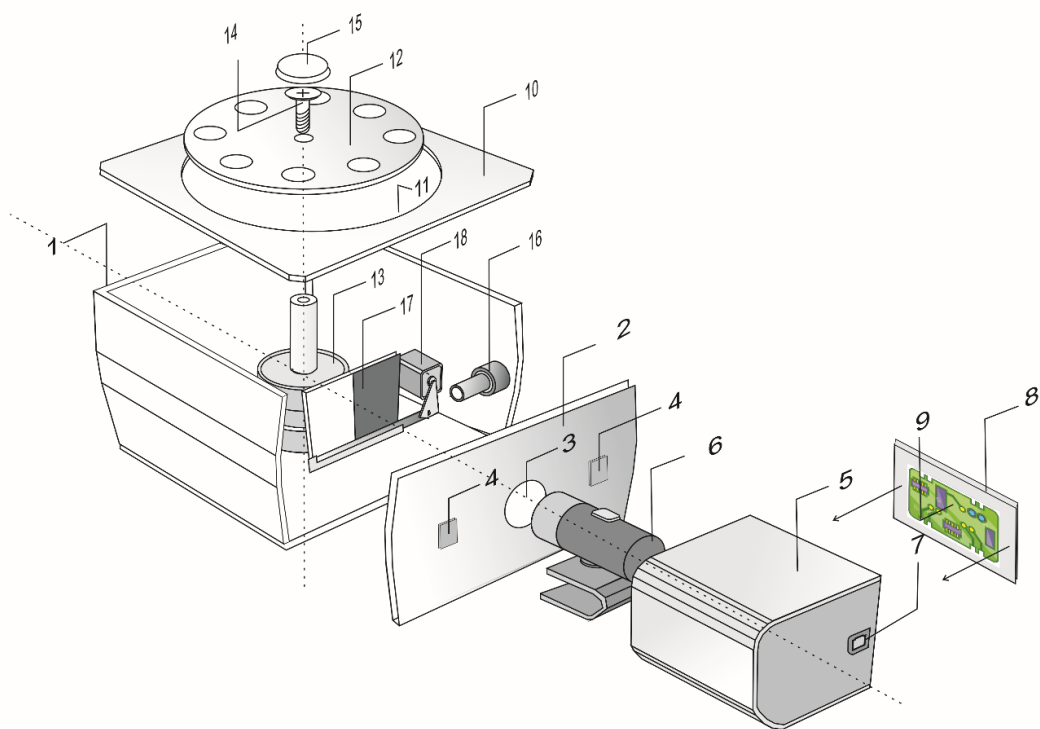


Figura 2

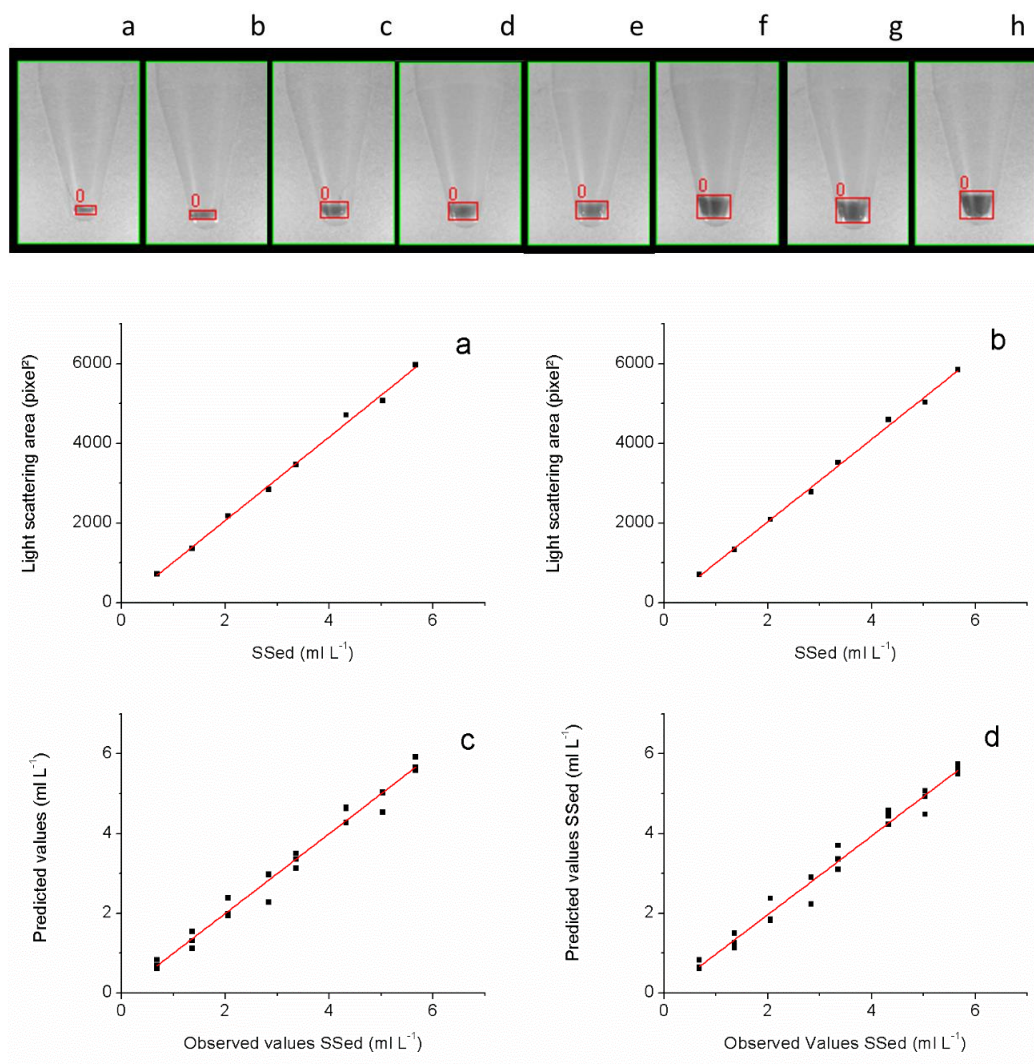


Figura 3

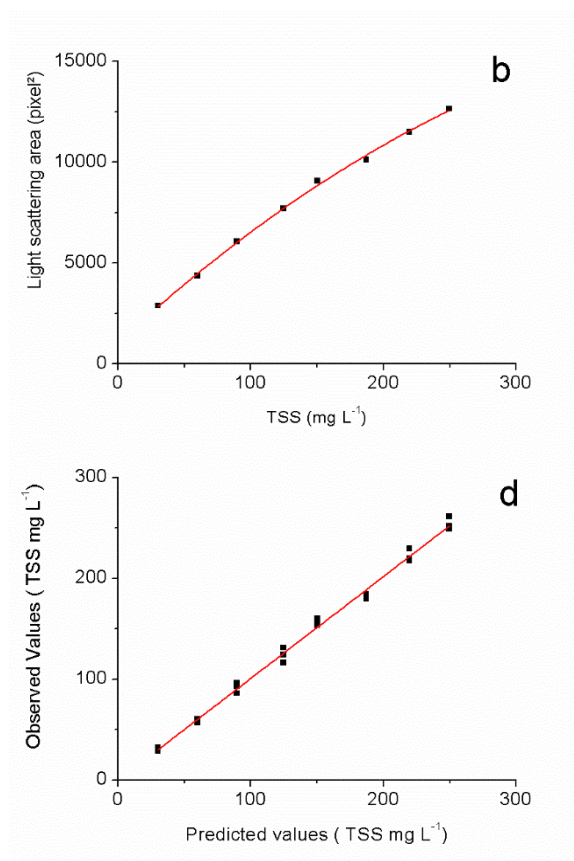
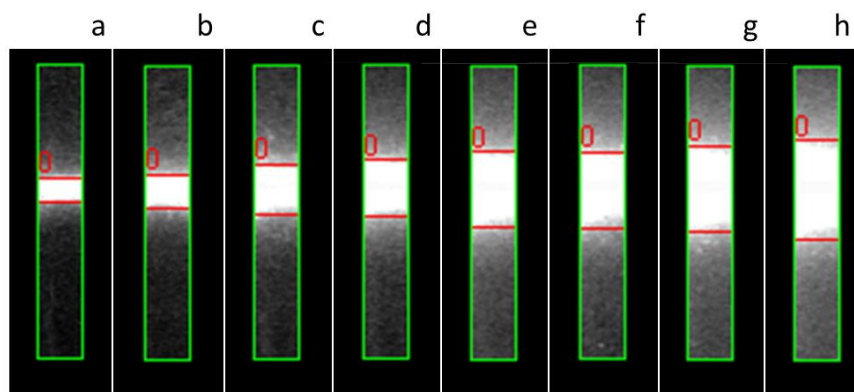


Figura 4

RESUMO

“ANALISADOR AUTOMÁTICO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E SEDIMENTÁVEIS COM DETECÇÃO POR SISTEMA DIGITAL E VISÃO COMPUTACIONAL”

A presente invenção trata de um instrumento para determinação de sólidos suspensos totais (SST) e sólidos sedimentáveis (SSed) que usa um amostrador automático e sistema de detecção inteligente baseado imagens digitais e visão computacional. Este invento possui aplicação nas áreas de Indústria Química, Alimentos, Farmacêutica, Recursos hídricos, Agricultura, Ambiental, Petroquímica, Mineração, Nuclear e áreas afins.