



*Federação das Indústrias do Estado da Bahia*

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

ALLAN FONSECA SEIXAS  
LIZ MORAES SIMÕES FERNANDES  
LUCAS SARNO CASTRO BORGES  
ROBSON COSTA MONTEIRO FILHO

**DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E  
REMOÇÃO DE IMPUREZAS EM AREIAS DE QUARTZO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SALVADOR, BAHIA  
2019

ALLAN FONSECA SEIXAS  
LIZ MORAES SIMÕES FERNANDES  
LUCAS SARNO CASTRO BORGES  
ROBSON COSTA MONTEIRO FILHO

**DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL DE SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO E  
REMOÇÃO DE IMPUREZAS EM AREIAS DE QUARTZO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,  
apresentado à disciplina de TheoPrax, do curso  
de Engenharia Elétrica do Centro Universitário  
SENAI CIMATEC, como requisito parcial  
para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador Técnico: Prof. Me. Jovelino Torres  
dos Santos  
Orientador TheoPrax: Prof. Me. João Lucas da  
Hora de Jesus

SALVADOR, BAHIA  
2019

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Me. Jovelino pela orientação técnica neste projeto, pelas discussões, por todo o auxílio no desenvolvimento do trabalho e na construção do protótipo e pelo tempo dedicado à equipe e ao projeto.

À Profª. Dr. Valéria pela orientação dada nas pesquisas e desenvolvimentos com relação ao dimensionamento de sensores de imagens e lentes, além do fornecimento de componentes para a realização dos testes e validações.

Ao colega da Automação, Wallace, pelas inúmeras discussões técnicas, pela disponibilidade em nos auxiliar e por todo o material cedido para a execução do projeto.

Ao Prof. Me. João pela orientação dos processos e metodologia TheoPrax.

Ao nosso querido amigo, Néelson Timbó, pela ajuda nos momentos difíceis e testes do protótipo.

Aos colegas Silas, Felipe Plech e Bianca, pelo apoio com discussões e disponibilidade de estruturas e materiais dos laboratórios.

Aos nossos pais, amigos e aqueles professores que efetivamente contribuíram para nossa formação, por toda paciência e apoio durante o curso.

*"Nenhum trabalho é tão grande, nenhum filhote é tão pequeno"*

***Patrulha Canina***

## RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento do conceito e construção do protótipo de um sistema para beneficiamento de quartzo, capaz de identificar e remover impurezas na areia do mineral. A identificação é feita através de um sistema de sensor de imagem, associado a uma lente, que com auxílio de um algoritmo desenvolvido em *Python*, utilizando a biblioteca *OpenCV*, é implementado em *Raspberry PI*, sendo possível a sua utilização em demais computadores de baixo custo. Já a remoção é realizada através de técnicas de automação, que utilizando um conjunto de atuadores acionados via computador, possibilitam a sucção de grãos identificados como impurezas, separando-os dos demais. O sistema será capaz de remover impurezas com granulometrias entre 0,1mm e 1,2mm, facilitando o processo de purificação do material e agregando valor ao quartzo na indústria nacional.

**Palavras-chave:** Beneficiamento de quartzo. Identificação de impurezas. Remoção de impurezas. Óptica. Automação. *Raspberry Pi*. *OpenCV*.

## ABSTRACT

This work describes the development of the concept and construction of a prototype for the Quartz beneficiation system, capable of identifying and removing impurities in the Quartz sand. The identification is done through an image sensor associated with a lens, which with the help of an algorithm developed in Python, using the OpenCV library, is implemented on a Raspberry Pi, being applicable in other low-cost computers. The removal is done through Automation techniques, which use a set of computer-controlled actuators, enabling the suction of grains identified as impurities, separating them from the others. The system will be able to remove impurities with granulometry between 0.1mm and 1.2mm, facilitating the purification process of the material and increasing the value of the quartz in the national industry.

**Keywords:** Quartz beneficiation. Identification of impurities. Removal of impurities. Optics. Automation. Raspberry Pi. OpenCV.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Comparação entre tamanho de pixels e suas resoluções. ....	19
Tabela 2: Resultado dos testes do método de interrupção do vácuo. ....	58
Tabela 3: Resultado dos testes do tempo de execução. ....	74
Tabela 4: Custos do projeto. ....	78



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de diferentes níveis de contraste.....	16
Figura 2: Esquema demonstrando efeitos relação entre tamanho do pixel e resolução. ....	17
Figura 3: Exemplo de limitação de pares de linhas em um sensor de imagem. ....	17
Figura 4: Target de resolução para testes. ....	18
Figura 5: MTF para sensor de imagem SonyIXC625. ....	20
Figura 6: Perdas de contraste em lentes. ....	21
Figura 7: Modelo de sistema de câmera em condições de operação. ....	22
Figura 8: Gráfico do modelo de cores RGB.....	25
Figura 9: Exemplo de separação de canais RGB, vermelho, verde e azul respectivamente. ....	26
Figura 10: Filtros Bayer sob matriz de pixels em um sensor de imagem.....	26
Figura 11: Sistema de atuação com três eixos de movimentação. ....	30
Figura 12: Exemplo do funcionamento do sistema de três eixos. ....	31
Figura 13: Sistema de atuação com dois eixos de movimentação e remoção fixa.....	35
Figura 14: Sistema de atuação com dois eixos de movimentação, incluindo a remoção. ....	36
Figura 15: Sistema de atuação com um eixo de movimentação.....	37
Figura 16: Sistema de atuação com estrutura fixa para elementos de sucção. ....	38
Figura 17: Princípio de funcionamento de válvula tipo diafragma. ....	39
Figura 18: Princípio de funcionamento de válvula tipo esfera.....	40
Figura 19: Princípio de funcionamento de válvula tipo mangote.....	41
Figura 20: Exemplo de atuador elétrico solenoide. ....	42
Figura 21: Exemplo de atuador elétrico com servo motor. ....	43
Figura 22: Exemplo de atuador com pistão pneumático. ....	44
Figura 23: Sistema de iluminação direta. ....	46
Figura 24: Sistema de iluminação difusa frontal.....	46
Figura 25: Sistema de iluminação difusa axial.....	47

	9
Figura 26: Sistema de iluminação ring light. ....	48
Figura 27: Sistema de iluminação polarizada.....	48
Figura 28: Sistema de Backlight. ....	49
Figura 29: Sensores de imagem disponíveis no mercado.....	50
Figura 30: MTF para lentes objetivas M12.....	52
Figura 31: Sensores de imagem IMX219 para diferentes tipos de lentes. ....	53
Figura 32: Raspberry PI com Câmera module V2 acoplado.....	54
Figura 33: Esquema com efeito da máscara sob o cubo RGB. ....	55
Figura 34: Fluxograma da solução computacional empregada. ....	56
Figura 35: Inicialização da câmera.....	56
Figura 36: Esquema de FOV e áreas de atuação do sistema de remoção de impurezas. ....	57
Figura 37: Esquema de ligação do controlador com os relés. ....	58
Figura 38: Montagem da peça 3D com o pistão pneumático, utilizados para testes.....	60
Figura 39: Nova peça 3D para acoplamento do atuador. ....	61
Figura 40: Circuitos elétrico e pneumático utilizados para os testes de atuação.....	62
Figura 41: Fonte 24VCC e relé de contato seco.....	63
Figura 42: Montagem do conjunto de atuação para os testes.....	64
Figura 43: Esquema preparado para testes de aquisição de imagem e iluminação. ....	65
Figura 44: Adaptador produzido para acoplar lente ao sensor. ....	65
Figura 45: Encapsulamento produzido para proteção da câmera. ....	66
Figura 46: Imagem registrada do target de resolução, para resolução de 3280x2464 e 1640x1232 respectivamente. ....	67
Figura 47: Imagens obtidas dos três tipos de grãos para os testes iniciais. ....	68
Figura 48: Testes preliminares demonstrando regiões escuras nas imagens.....	68
Figura 49: Imagens com boa qualidade após ajustes e configurações corretas.....	69
Figura 50: Aplicação de máscara sobre imagem de grãos de 1mm a 0,7mm.....	69
Figura 51: Aplicação de máscara sobre imagem de grãos de 0,7mm a 0,3mm.....	70
Figura 52: Aplicação de máscara sobre imagem de grãos de 0,3mm a 0,1mm.....	70

	10
Figura 53: Tempo de inicialização da câmera.....	71
Figura 54: Tempo de configuração do balanço do branco da câmera.....	71
Figura 55: Tempo de configuração da resolução da câmera para 1664 X 1232. ....	72
Figura 56: Tempo de execução do código de processamento com blur.....	72
Figura 57: Tempo de execução do código de processamento sem blur. ....	73
Figura 58: Tempo de identificação de setor de impureza para atuação. ....	73
Figura 59: Tempo de execução de cv.inrange.....	74
Figura 60: Estrutura montada com nova peça 3D para acoplamento dos atuadores. ....	75
Figura 61: Estrutura montada com nova peça 3D para união das mangueiras de sucção. ....	76
Figura 62: Estrutura final de atuação montada.....	77
Figura 63: Estrutura final de atuação montada.....	78

**LISTA DE SIGLAS**

AFOV	Campo de Visão Angular
FOV	Campo de Visão
MTF	Função de Transferência de Modulação
PMAG	Magnificação Primária
VCA	Tensão Alternada
VCC	Tensão contínua
WD	Distância de Trabalho

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>13</b>
1.1. Contextualização do Projeto .....	13
1.2. Motivação.....	13
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo Geral .....	14
1.3.2. Objetivos Específicos .....	14
<b>2. Fundamentação teórica.....</b>	<b>15</b>
2.1. Aquisição de Imagens .....	15
2.1.1. Sensores de Imagens.....	15
2.1.2. Câmeras e Lentes Objetivas.....	20
2.2. Processamento Digital de Imagens .....	23
2.2.1. Modelos de cores .....	24
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>28</b>
3.1. Planejamento do Projeto .....	28
3.2. Análise da Tecnologia Proposta.....	28
3.3. Dimensionamento do Sistema de Atuação.....	28
3.3.1. Forma de Remoção da Impureza .....	29
3.3.2. Tipo de Atuação.....	29
3.3.3. Sistema de interrupção de vácuo.....	38
3.4. Dimensionamento do Sistema de Aquisição de Imagem.....	44
3.4.1. Iluminação .....	44
3.4.2. Sensor de Imagem e Objetiva .....	49
3.5. Desenvolvimento da Solução Computacional.....	53
3.6. Definições Finais .....	58
<b>4. Resultados.....</b>	<b>61</b>
4.1. Testes do Sistema de Acionamento do Atuador.....	61
4.2. Testes do Sistema de Aquisição de Imagens e Lentes .....	64
4.3. Testes de Tempo de Execução.....	70
4.4. Testes Finais .....	74
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>80</b>
<b>6. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>81</b>

# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização do Projeto

O vasto território brasileiro e sua diversidade geológica propiciam a existência e variedade de jazidas minerais por todo o país. Os frutos desse território abundante e diverso são recursos minerais de alta qualidade, que impulsionam a indústria da mineração e tornam o país internacionalmente reconhecido pelos mesmos [1].

Um grande destaque dessa situação no país é o quartzo, mineral com diversas aplicações, que o Brasil possui as maiores jazidas do mundo, as reservas de grandes cristais naturais ocorrem quase que exclusivamente no país, que detém 95% das reservas mundiais e o estado da Bahia é destaque na produção nacional [2].

A quantidade de Quartzo no país é grande, mas essa não é a única razão para a atenção mundial nessas reservas, além disso, o minério brasileiro é de alta qualidade. Grande parte das jazidas brasileiras do minério são de origem geológica hidrotermal, caracterizada pelos níveis baixos de impurezas químicas, podendo até ser utilizadas na produção de sílica vítrea de alta qualidade [3].

Em contrapartida à abundância e qualidade natural está a inabilidade do país na conversão do potencial em riqueza, a forma de extração rudimentar e a falta de base tecnológica para agregar valor, torna inviável a exploração de toda a potencialidade de uso do mineral [4], fazendo com que o material bruto seja exportado e assim, o valor seja agregado fora do país.

Ainda assim, diversas empresas beneficiam o Quartzo no Brasil, mudando seus processos a depender, principalmente, do produto final. No caso da produção de areias para indústria cerâmica, um processamento mais elaborado pode ser necessário para remoção de impurezas ou da própria superfície dos grãos de quartzo [5], visto que é preciso uma alta pureza dos grãos para esta finalidade.

## 1.2. Motivação

Atualmente, visando exportar o Quartzo, diversas empresas brasileiras do ramo da mineração buscam se adequar às exigências dos clientes, que vão desde a separação em diversas granulometrias até a remoção eficiente de impurezas.

A variedade de produtos que podem ser manufaturados a partir do Quartzo é imensa, desde osciladores de frequência [4] até a produção de granito artificial através da areia do

quartzo [6]. Com o objetivo de agregar cada vez mais valor ao mineral, os grãos são devidamente separados e selecionados, de acordo com suas respectivas granulometrias e seus níveis mínimos de impurezas para cada aplicação, para assim serem exportados e transformados em diversos produtos.

Grande parte dos grãos obtidos são selecionados por processos automatizados de remoção de impurezas, porém os grãos de areia mais finos, por exemplo, com granulometrias de 0,1mm, ainda não possuem processos específicos de separação, sendo utilizadas máquinas de alto custo adaptadas para o processo ou operadores em situações não ergométricas executando a separação manualmente, o que não permite que tal atividade seja feita por um longo período. Esse escasso leque de opções de métodos para separação dos grãos, muitas vezes levam a areia a ser estocada enquanto não há uma solução viável.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver o conceito de um sistema capaz de identificar impurezas, com granulometrias entre 0,1mm e 1,2mm, de diversos materiais e tamanhos em areia de quartzo, através da cor e removê-las de forma confiável, independente das posições das mesmas, facilitando o processo de beneficiamento do mineral para aplicações na indústria cerâmica.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudar possíveis métodos de identificação de impurezas em areia de quartzo através da cor;
- Estudar possíveis métodos de remoção de impurezas em areia de quartzo em ambiente com sólidos em suspensão;
- Construir um protótipo funcional capaz de identificar e remover impurezas de areia de quartzo entre 0,1mm e 1,2mm.

## 2. Fundamentação teórica

### 2.1. Aquisição de Imagens

Fatores recorrentes em aplicações de visão computacional são as metodologias e teorias que envolvem o processo de aquisição de uma imagem digital, levando em consideração sua resolução e níveis de contraste.

A natureza da óptica pode oferecer diversos fatores limitantes para o desempenho de sistemas de aquisição de imagens, uma vez que as tecnologias atuais não são capazes de estabelecer todas as condições perfeitas para esse tipo de processo. Dessa forma, é essencial compreender as limitações físicas dos equipamentos e sensores utilizados, assim como as características e funcionamento de alguns fenômenos ópticos.

#### 2.1.1. Sensores de Imagens

Sensores de imagem são componentes eletrônicos que exercem a função de captar luz e convertê-la em sinais elétricos analógicos e digitais. São constituídos basicamente por matrizes de pixels, estes compostos por elementos sensíveis a luz, micro lentes e outros elementos eletrônicos.

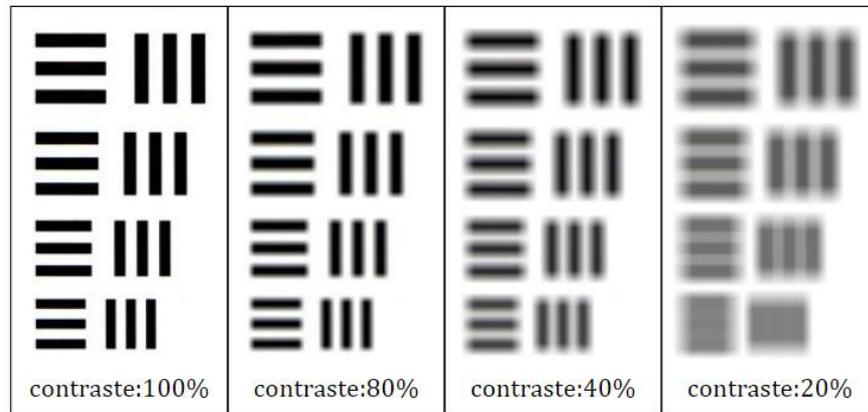
A classificação dos sensores de imagens se faz pelas suas características construtivas, tais como tamanho de cada pixel, formato da matriz de pixels e resolução. Podem ainda ser classificados quanto a sensibilidade a luz, como por exemplo monocromáticos, os que geram imagens em escala de cinza, coloridos, sensíveis ao espectro de luz visível, além dos que são capazes de registrar imagens em infravermelho.

##### 2.1.1.1. Resolução e Contraste

Contraste, em aplicações de sensoriamento de imagens, pode ser definido com a capacidade de distinguir determinadas intensidades de cores. Comumente, para analisar níveis de contraste, são empregados figuras e formas que diferem em preto e branco em padrões normalizados, denominados de *targets*. A Figura 1 demonstra uma imagem qualquer sob diferentes contrastes gerados via software, com um simples código desenvolvida na linguagem Python no *visual studio*. É possível observar que com a redução da porcentagem do contraste na imagem, torna-se cada vez mais difícil a distinção das linhas escuras. A imagem foi gerada

com auxílio da biblioteca Open CV, amplamente utilizada em processamento de imagens, no caso, foi utilizado de efeitos de manipulação de contraste para gerar as variações observadas

Figura 1: Exemplo de diferentes níveis de contraste.

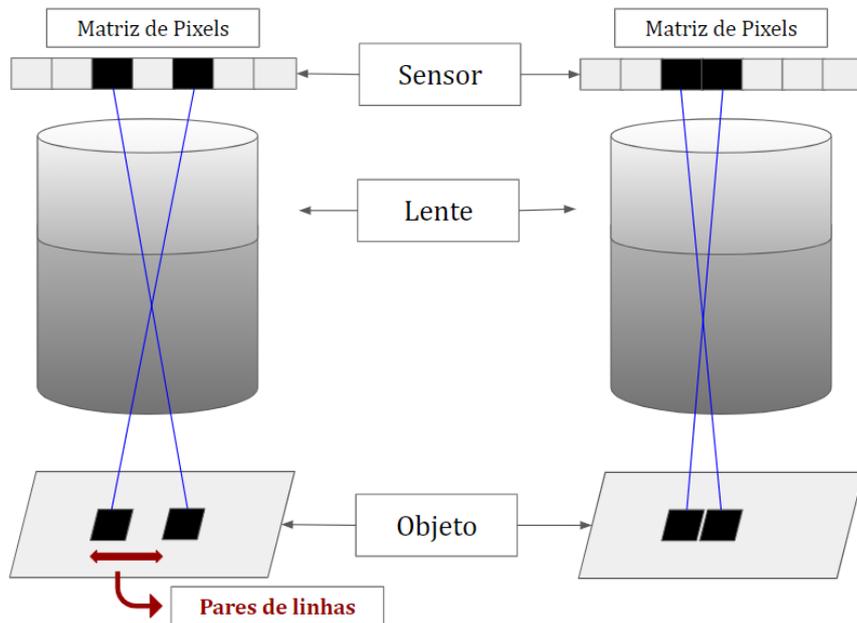


Fonte: Autoria própria.

A resolução de um sistema de aquisição de imagens pode ser interpretada como a capacidade de reproduzir fielmente as características da imagem original [7]. Este parâmetro traz importantes informações das limitações de um sensor de imagem, podendo ser influenciado por diversos fatores, tais como tamanho do pixel ou iluminação e até mesmo o tipo de lente utilizada em conjunto.

Nos esquemas apresentados na Figura 2, dois objetos podem ser diferenciados pelo sensor até estarem separados a uma distância mínima de pares de linha. Quando este limite é ultrapassado o sensor perde a capacidade de diferenciar os dois objetos, como pode ser observado na imagem resultante na matriz de pixels do sensor. Desta forma, o sistema perde a capacidade de reproduzir a imagem de interesse.

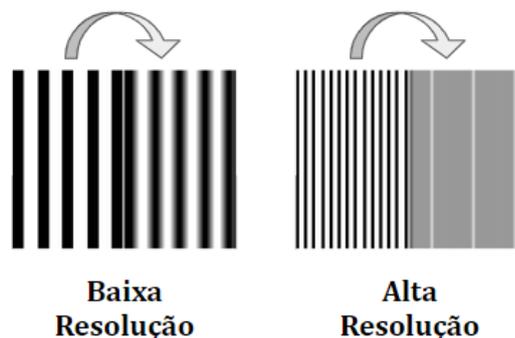
Figura 2: Esquema demonstrando efeitos relação entre tamanho do pixel e resolução.



Fonte: Edmund Adaptado [7]

Pares de linhas por milímetros, ou lp/mm é a unidade usada para caracterização de resoluções em imagens e objetos. Esta unidade pode ser entendida como a quantidade de linhas de uma determinada dimensão que estão contidas em 1 mm. A Figura 3 exemplifica os efeitos gerados pelo aumento da resolução, onde, para valores maiores que a capacidade de resolução do sistema, ou sensor, o contraste é reduzido consideravelmente.

Figura 3: Exemplo de limitação de pares de linhas em um sensor de imagem.



Fonte: Autoria própria.

Para analisar a capacidade de um sensor reproduzir com determinada fidelidade uma imagem qualquer é preciso calcular a sua resolução. Este cálculo pode ser realizado através da equação (1), que converte as dimensões de interesse, em pares de linhas por milímetro. O valor

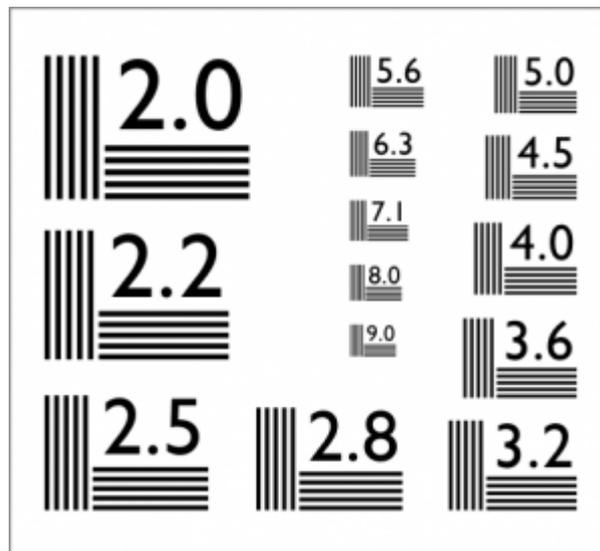
resultante do cálculo equivale a uma frequência espacial, ou seja, um valor de número de ciclos em um determinado campo visual [9].

$$\text{Resolução do sensor} \left( \frac{lp}{mm} \right) = \frac{1000 \left( \frac{\mu m}{mm} \right)}{2 * \text{Dimensão do pixel} (\mu m)} \quad (1)$$

A resolução obtida da equação (1), também denominada de limite de *Nyquist* para os sensores de imagens, delimita a frequência espacial máxima do sensor. Este limite define as dimensões mínimas que podem ser reproduzidas de forma fiel.

A maneira de testar e validar a capacidade de um sistema dimensionado registrar uma determinada frequência espacial de interesse se faz por meio de uso dos *targets*. Estes objetos de teste obedecem a padrões que garantem formas e linhas em uma faixa de frequência espacial. Nos *targets*, são observados conjuntos de linhas verticais e horizontais, uma vez que a resolução se comporta diferentemente para ambas orientações. A Figura 4 apresenta um *target* de resolução utilizado para os testes de validação, próximas às linhas horizontais e verticais está o valor da frequência equivalente.

Figura 4: *Target* de resolução para testes.



Fonte: [DS&ME](#). [10].

De maneira análoga ao cálculo da resolução de imagem da equação (1), é possível calcular a frequência espacial de objetos através da equação (2).

$$\text{Resolução de Objeto } \left( \frac{\text{lp}}{\text{mm}} \right) = \frac{1000 \left( \frac{\mu\text{m}}{\text{mm}} \right)}{2 * \text{Dimensão do Objeto } (\mu\text{m})} \quad (2)$$

Com base nos sensores de imagens comerciais é possível traçar um perfil de limites de frequências que poderiam auxiliar no dimensionamento de sistemas de aquisição de imagens. A Tabela 1 demonstra as resoluções que podem ser encontradas, com base nas dimensões de pixels mais comuns.

Tabela 1: Comparação entre tamanho de pixels e suas resoluções.

Dimensão do Pixel ( $\mu\text{m}$ )	Limite de <i>Nyquist</i> (lp/mm)
14	35,71
10	50
7	71,43
6,5	76,92
4,6	108,69
3,5	142,86
2,2	227,27
1,7	294,12
1,25	400
1,12	446,43

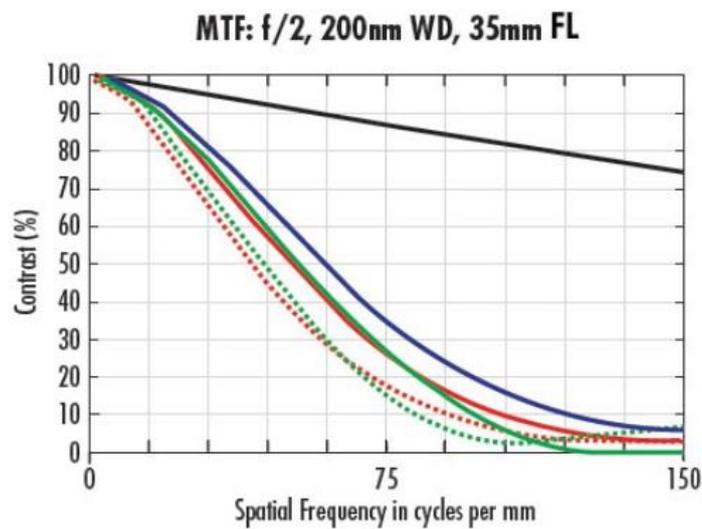
Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a análise da Tabela 1 fica evidente que ao passo que as dimensões dos pixels em um sensor de imagem reduzem, a resolução cresce consideravelmente. Desta forma, se for desejável obter imagens de alta frequência é importante se atentar ao tamanho dos pixels, além de outros fatores da lente empregada, do próprio sensor de imagem, dentre outros.

A resposta de um sensor para diferentes frequências espaciais não necessariamente tem um comportamento linear. Os níveis de contraste para cada frequência são obtidos experimentalmente, de forma a gerar um gráfico conhecido como função de transferência de modulação ou MTF. Para isso é necessário combinar o sensor com uma lente para que seja possível registrar os experimentos. A curva de MTF relaciona os níveis de resolução com o contraste resultante. Um exemplo de curva que descreve o comportamento não linear do

contraste pode ser observada na Figura 5, onde a linha preta é o limite de difração, representando o máximo contraste teórico possível, a linha azul, vermelha e verde correspondem, respectivamente, ao quão bem a objetiva se comporta ao centro do sensor, a 70% de distância do campo total do sensor e nas extremidades do sensor, além disso as linhas tracejadas representam o comportamento em outro eixo de orientação, visto que sensores de imagem não possuem as mesmas características verticalmente e horizontalmente, analisando essas curvas, pode-se concluir que o sensor em questão apresentou redução linear de contraste para altas frequências, que difere para baixas frequências, onde a variação é menor.

Figura 5: MTF para sensor de imagem SonyIXC625.



Fonte: Edmund [11].

Em sua grande maioria, as curvas de MTF apresentam as frequências de corte próximas ao contraste de 20%, uma vez que este valor é considerado o mínimo requerido para a reconstrução com certa fidelidade de uma imagem [8].

### 2.1.2. Câmeras e Lentes Objetivas

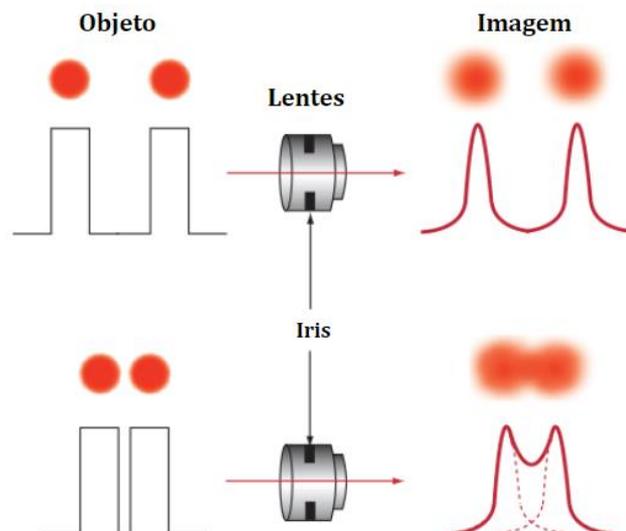
Câmeras são sistemas compostos por sensores de imagens e lentes. Ambos os componentes possuem significativa importância, contudo, muitas vezes as lentes podem apresentar maior criticidade no dimensionamento de sistemas de imageamento. Este fato se deve às distorções e aberrações óticas que podem ser geradas nas imagens, além dos milites de resolução que as mesmas geram na aquisição da imagem.

Lentes em sistemas de câmeras são fundamentais para gerar as ampliações requeridas em diversas aplicações, tais como para ampliar a imagem de objetos pequenos ou aumentar o campo de observação de um sensor qualquer. A magnificação pode ser entendida como a razão entre as dimensões do sensor de imagem e o campo de observação, de forma que as suas respectivas resoluções se relacionem.

### 2.1.2.1. Objetivas

As objetivas, assim como os sensores de imagens, possuem limites de frequências espaciais, apresentando inclusive curvas de MTF próprias. A combinação da função de transferência de modulação da lente com o sensor de imagem resulta na curva de resolução final do sistema. Os fenômenos de interferência em contraste, que são caracterizados nas curvas das lentes, são exemplificados na Figura 6. Nesta, a parte superior demonstra a imagem gerada para uma determinada frequência espacial, enquanto a inferior para uma frequência menor. Pode-se observar que com a redução da frequência a distinção dos dois objetos redondos se torna inviável, similar ao processo de aquisição de imagens por sensores.

Figura 6: Perdas de contraste em lentes.



Fonte: Edmund [12].

Objetivas, aplicadas em *machine vision*, geralmente apresentam limite de frequências espaciais com valores próximos entre 150 lp/mm a 200 lp/mm, valores este muitas vezes menor

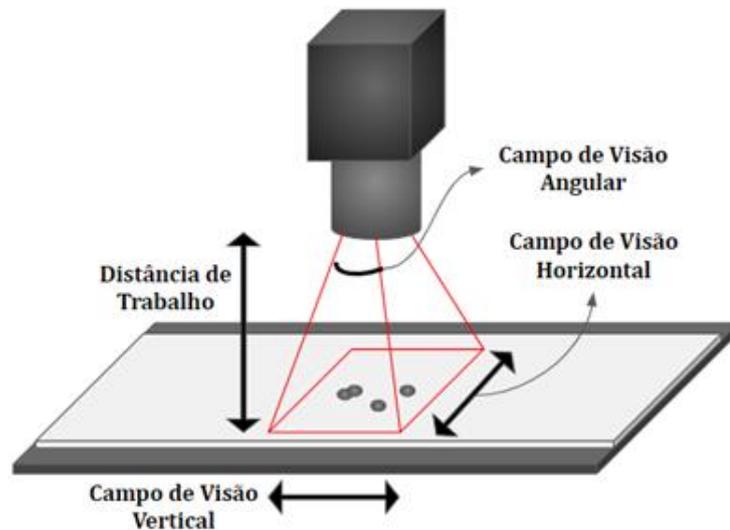
que a resolução máxima para sensores de imagens. Desta forma, as lentes acabam se apresentando como elementos críticos em certas aplicações, requerendo cuidado para com a magnificação desejada e o contraste resultante.

Alguns fatores presentes nas lentes irão gerar limitações de projeto. Este fato se deve justamente a resolução máxima observável pela lente, pela sua capacidade de ajuste de foco e dentre outros aspectos construtivos. Tais elementos restringem a distância máxima de observação e a compatibilidade de tamanho para alguns sensores.

### 2.1.2.2. Parâmetros de Operação

O cenário básico de aplicação de uma câmera em um sistema de aquisição de imagens pode ser observado na Figura 7, com a qual podem ser analisados alguns parâmetros relevantes para o dimensionamento dos componentes, tais como a distância de trabalho ou WD, que influenciam no campo de visão (FOV) e com o campo de visão angular.

Figura 7: Modelo de sistema de câmera em condições de operação.



Fonte: Autoria própria.

Para desejada a magnificação a aplicação requerida pode ser obtida com o tamanho do sensor que se deseja utilizar e o campo de visão obtido na equação (3).

$$PMAG = \frac{\text{Tamanho do sensor}}{\text{Campo de visão}} \quad (3)$$

De forma similar para com o campo de visão e as dimensões do sensor, a magnificação primária pode ser obtida com a relação entre a resolução do pixel e a resolução de objeto observável, assim como demonstrado pela equação (4).

$$PMAG = \frac{\text{Resolução do Objeto } (\frac{lp}{mm})}{\text{Resolução da Imagem } (\frac{lp}{mm})} \quad (4)$$

A lente da câmera será o elemento responsável por garantir a magnificação requerida. Para isso, se faz necessário obter os dados técnicos de ângulo de observação da lente, também referido como campo de visão angular ou AFOV.

Quanto a distância entre a câmera e o objeto que se deseja observar, a distância de trabalho, pode ser encontrada por meio da distância focal da lente objetiva utilizada, como demonstrado na equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ou através do campo de visão desejado e a abertura da câmera, como demonstrado na equação(6), facilmente obtida por meio de relações de ângulos em triângulos retângulos.

$$\text{Distância de Trabalho} = \frac{FOV/2}{\tan(AFOV/2)} \quad (5)$$

$$PMAG = \frac{\text{Distância focal}}{\text{Distância de trabalho}} \quad (6)$$

## 2.2.Processamento Digital de Imagens

Processamento digital de imagens consiste em aplicação de operações matemáticas em matrizes. Muitos algoritmos empregados na atualidade para a identificação de formas e objetos, tais como detecção de *blobs*, busca de contornos e dentre outros, fazem do uso de cálculos matriciais para obtenção dos resultados desejados.

No contexto de imagens, cada pixel representa os componentes das matrizes. Cada posição registra informações sobre a cor presente nos pixels. Muitos sistemas de representação de cores são utilizados e estes fazem do uso de recursos tais como a simples combinação de cores primárias ou informação de saturação e brilho.

Um importante recurso para o uso de algoritmos de processamento de imagens é a biblioteca de uso público e acadêmico *OpenCV*, capaz de oferecer funções e códigos que são capazes de auxiliar em quase todas as categorias de processamento digital de imagens. Para o projeto levantado em questão a versão que mais se adequaria seria a biblioteca para Python, uma linguagem de programação de alto nível empregada em diversos projetos dentro da engenharia [13].

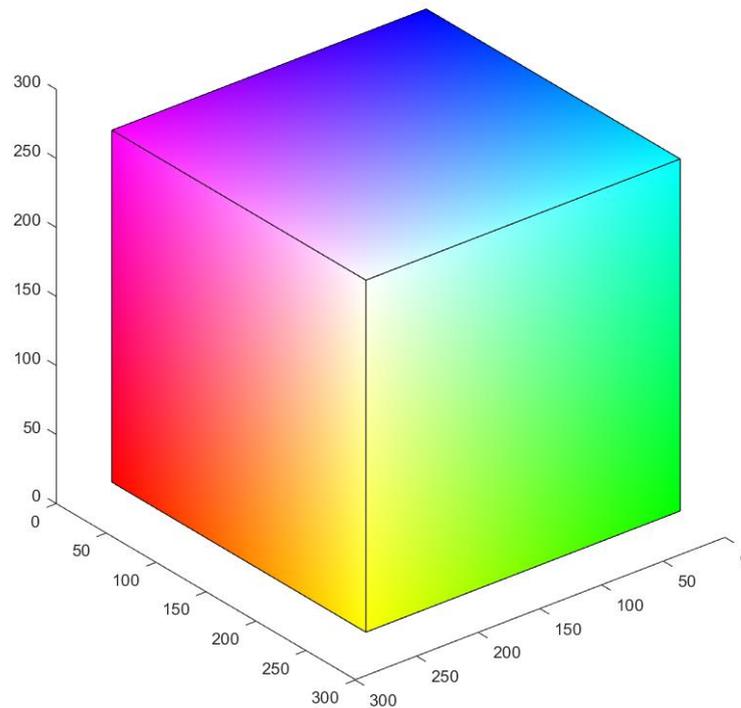
### 2.2.1. Modelos de cores

Modelos matemáticos utilizados para representação de cores sob a forma de números são denominados de modelos de cores. Tais aproximações numéricas geram o que é conhecido com um espaço de cores, contidos em representações tridimensionais.

Mídias digitais e quaisquer outros sistemas que transmitem ou exibem imagens utilizam de sistemas aditivos ou subtrativos simples para gerar as cores desejadas. Estes modelos se baseiam na mistura de cores primárias para a obtenção de uma outra cor. O modelo de cor mais conhecido e empregado nesta categoria seria o RGB.

No sistema RGB cada pixel está associado a adição de intensidades de três cores básicas, sendo estas, vermelho, verde e azul respectivamente. A cor branca surge da combinação das cores fundamentais em suas intensidades máximas, e a preta da ausência das mesmas. Todas as demais cores do espectro visível humano podem ser obtidas pela combinação dessas cores primárias. Tal fato pode ser observado na Figura 8, onde está presente o espaço de cores referente. Nos eixos presentes na figura estão destacadas as intensidades de cada cor para cada coordenada do espaço RGB. As intensidades de cada cor estão associadas a saturação das mesmas, e variam dentro de uma faixa de 0 a 255, para ausência completa da cor e saturação máxima respectivamente.

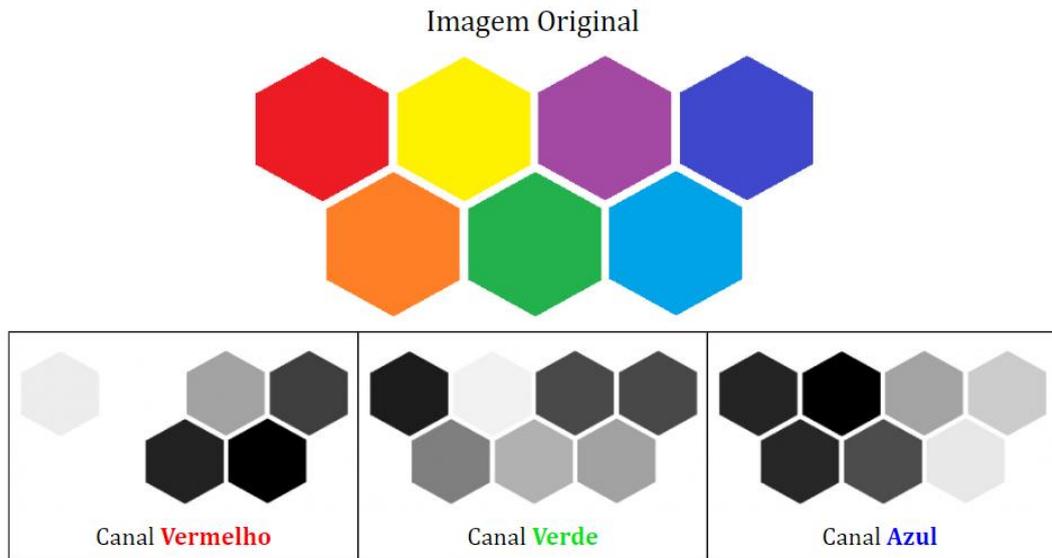
Figura 8: Gráfico do modelo de cores RGB.



Fonte: Autoria própria.

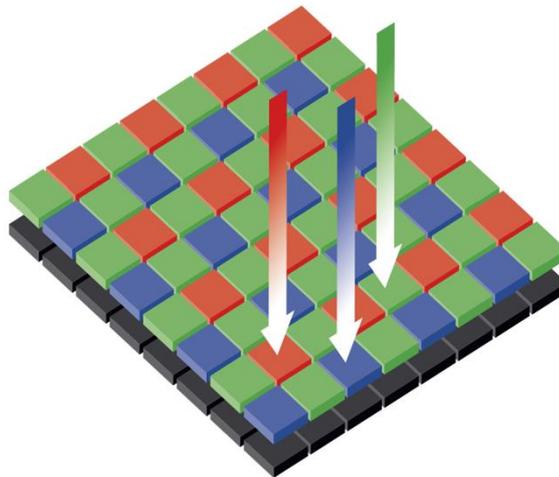
Matematicamente, o modelo RGB gera três matrizes de mesmo tamanho para cada imagem. Cada matriz, denominada de canal, pode ser separada e analisada digitalmente de forma independente. Este fato é demonstrado na Figura 9, onde são extraídos os canais vermelho, verde e azul de uma imagem exemplo. Nas figuras resultantes de cada canal, a escala de cinza descreve a quantidade de cor presente, ou seja, para o branco e cinza claro equivale a presença completa ou parcial da cor do canal e para preto e cinza escuro a ausência completa ou parcial da cor do canal.

Figura 9: Exemplo de separação de canais RGB, vermelho, verde e azul respectivamente.



As matrizes presentes no modelo RGB são obtidas com base na conversão do formato *Bayer* provido da captação da luz na matriz de pixels nos sensores de imagens. Os filtros *Bayer* estão presentes em muitos os sensores de imagens sensíveis ao espectro visível da luz, nada mais são do que um conjunto de filtros vermelho, verde e azul dispostos sob toda a matriz de elementos sensíveis a luz [14]. A Figura 10, demonstra distribuição dos filtros sobre a matriz de pixels de um sensor de imagem qualquer, de forma que é possível observar que cada pixel só será capaz de registrar níveis de uma determinada cor e que as cores são distribuídas em determinados padrões.

Figura 10: Filtros *Bayer* sob matriz de pixels em um sensor de imagem.



Fonte: What Digital Camera [14]

Desta forma, os circuitos eletrônicos presentes no *hardware* dos sensores de imagens, tem como fundamental função realizar as devidas conversões do padrão dos pixels em *Bayer* para as três matrizes presentes na representação RGB.

A natureza dos sistemas de modelos de cores pode ser útil em algoritmos de detecção em imagens, uma vez que muitas aplicações apresentam necessidades de observar e identificar formas ou objetos com cores atípicas do meio. As ferramentas para análise e processamento de imagens com relação aos modelos estão disponíveis na biblioteca *OpenCV*, facilitando a integração de métodos que utilizam deste.

### 3. Metodologia

#### 3.1. Planejamento do Projeto

No período de pesquisa do projeto, os membros da equipe executaram uma visita a uma empresa do ramo e foi possível verificar as condições de operação dos equipamentos neste local. No processo de beneficiamento do quartzo existem diversas etapas de separação, que consistem basicamente da moagem e passagem do material por peneiras de granulometrias diferentes. No decorrer desse processo, muito sólidos são mantidos em suspensão, gerando um ambiente altamente particulado. Além disso, a contaminação dos grãos de quartzo é potencializada durante o transporte; apesar de grande parte das impurezas metálicas serem removidas através de ímãs nas extremidades das esteiras, durante o transporte, pedaços de borracha são expelidos da mesma, contaminando ainda mais os grãos. O processo de remoção das impurezas é executado de forma manual; a areia de quartzo é transportada por uma esteira, enquanto um operador utiliza uma mangueira com vácuo para sugar as impurezas visíveis.

#### 3.2. Análise da Tecnologia Proposta

Nas definições do projeto, foram levadas em consideração as restrições dos locais que comumente executam esse tipo de separação de grãos, que se referem, principalmente, à estrutura física. Ambientes desse tipo possuem diversos sólidos em suspensão, o que dificulta a atuação de boa parte dos equipamentos que não são preparados para essa hostilidade. Nesses locais, geralmente, o transporte dos grãos para separação é feito através de esteiras, e o ambiente possui utilidades equivalentes às industriais: fontes de tensão, ar comprimido e vácuo.

O sistema deve ser acoplável a uma esteira, com largura de 50 cm, um comprimento útil de 1,5 m e uma velocidade constante estimada de 15 m/min. Além disso, a alimentação da aplicação deverá ser compatível com os pontos de tensão usualmente disponíveis, de 220V e 380 V e o vácuo utilizado deverá ser proveniente de bomba de vácuo ou semelhante.

#### 3.3. Dimensionamento do Sistema de Atuação

O sistema de atuação foi dimensionado de acordo com as necessidades do projeto, de operar com granulometrias entre 0,1 mm e 1,2mm e possuir estrutura física capaz de ser

acoplável ao local de instalação do protótipo. Foram pesquisadas soluções capazes de atender à funcionalidade da aplicação, de forma simples e com baixo custo.

### 3.3.1. Forma de Remoção da Impureza

O primeiro passo do dimensionamento do sistema foi a escolha da forma como a remoção da impureza deveria ser feita, sendo as opções:

- Impureza expelida com jato de ar comprimido
- Impureza sugada com bomba de vácuo

As dependências de empresas do ramo da separação de grão, comumente já possuem tanto ponto de ar comprimido como uma bomba de vácuo, não sendo esse um fator relevante no descarte de uma das opções.

A remoção da impureza com jato de ar comprimido mostrou-se a opção mais complicada a ser aplicada, visto que, apesar de máquinas com aplicações semelhantes a utilizarem, seria necessária uma adaptação do sistema existente em ambientes de separação, como o visitado. Para essa aplicação é necessário que no momento da remoção o material não esteja apoiado em nenhuma superfície, ou seja, em queda livre, ainda que por um curto período de tempo, para que a areia expelida seja recolhida em um outro local.

O sistema de remoção por vácuo, por outro lado, trouxe consigo algumas vantagens. Atualmente é dessa forma que é feita a remoção das impurezas em estabelecimentos como o visitado, manualmente, para a granulometria desejada, uma bomba de vácuo acoplada a um reservatório que possui uma mangueira na saída, utilizada diretamente na sucção, que ocorre quando a mangueira é aproximada dos grãos. Dessa forma, não é necessário o acoplamento de uma estrutura próxima a esteira para o armazenamento dos grãos removidos. Sendo assim, foi definido que o sistema de remoção de impurezas utilizaria sucção por vácuo.

### 3.3.2. Tipo de Atuação

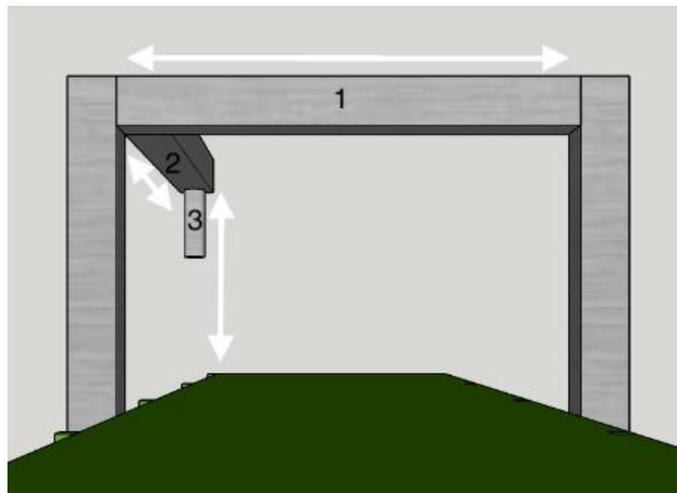
Com a forma de remoção por vácuo definida, o segundo passo no dimensionamento do sistema foi a escolha do tipo de atuação, sendo levadas em consideração as seguintes opções:

- Sistema com três eixos
- Sistema com dois eixos
- Sistema com um eixo
- Sistema ON/OFF

### 3.3.2.1. Sistema com três eixos

O sistema com três eixos consiste na movimentação de um eixo ao longo da largura da esteira, um eixo ao longo do comprimento da mesma e um eixo de elevação do sistema de sucção. Como mostrado na Figura 11 abaixo, a estrutura 1 representa o primeiro eixo, executando a movimentação ao longo da largura da esteira, e funciona como base para o acoplamento do atuador do segundo eixo, representado pela estrutura 2, que por sua vez executa a movimentação em parte do comprimento da esteira e funciona como base para o acoplamento do atuador da estrutura 3, no terceiro eixo, que movimenta-se da altura da estrutura 2 até a esteira, permitindo a sucção da impureza.

Figura 11: Sistema de atuação com três eixos de movimentação.



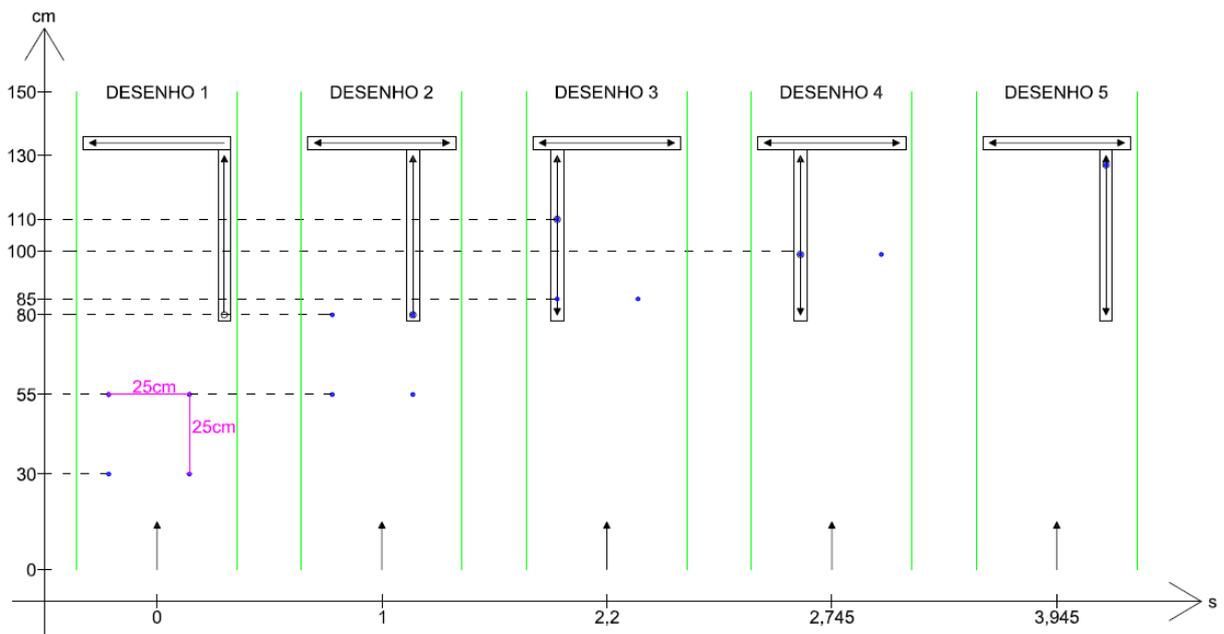
Fonte: Autoria própria.

Para o funcionamento adequado desse sistema a movimentação dos três eixos deve estar bem sincronizada e possuir um tempo de resposta razoavelmente baixo, já que, a esteira possui uma velocidade constante e impurezas podem vir em sequência.

Levando em conta essas considerações, foi feita uma simulação do comportamento do sistema com impurezas próximas ao longo do comprimento e da largura da esteira, com o

objetivo de calcular uma velocidade mínima dos atuadores para esta situação. Na Figura 12, temos um exemplo da vista superior da esteira em cinco momentos distintos, o eixo x da figura representa o tempo em s de cada situação e o eixo y representa a posição em cm, em relação à esteira. Inicialmente, os três eixos do sistema encontram-se na posição inicial e quatro impurezas são identificadas próximas; no segundo desenho, ocorre a movimentação da esteira e dos atuadores, de forma a remover a primeira impureza do lado direito; no terceiro desenho, tem-se a posição que os atuadores devem estar, com a movimentação da esteira, suficiente para a segunda impureza ainda estar na área de sucção do atuador, no quarto desenho, a posição do conjunto para a sucção da terceira impureza, após a movimentação da esteira e do atuador no sentido oposto, por último, a posição de sucção da última impureza.

Figura 12: Exemplo do funcionamento do sistema de três eixos.



Fonte: Autoria própria

Para o desenvolvimento da representação foi suposto um sistema onde a identificação é feita até os primeiros 55 cm da esteira e a atuação ocorre 25 cm depois, entre 80 cm e 130 cm da esteira, levando em consideração a velocidade da esteira de 15 m/min (25 cm/s), o tempo de 1 s para o processamento da identificação e desprezando o tempo de atuação (sucção). De acordo com a equação (7), sendo 25 cm o valor calculado de  $\Delta d_{comp}$ :

$$v_{est} = \frac{\Delta d_{comp}}{\Delta t} \quad (7)$$

Para descobrir a velocidade mínima do atuador foi levada em consideração a melhor solução para a situação simulada, na qual, a sucção da última impureza identificada acontece no final do curso do atuador, ou seja, a distância total a ser percorrida pela última impureza é 50 cm. Considerando os três movimentos, ao longo do comprimento da esteira, que ocorrem entre os desenhos 3 e 5, obtemos 3 distâncias percorridas, sendo  $\Delta d_1$  a distância percorrida do desenho 2 para o 3,  $\Delta d_2$  a distância percorrida do desenho 3 para o 4 e  $\Delta d_3$  a distância percorrida do desenho 4 para o 5. A soma dessas distâncias deve ser igual à distância total percorrida, de 50 cm, de acordo com a equação (8):

$$\Delta d_{perc} = \Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 \quad (8)$$

Para calcular a distância percorrida  $\Delta d_1$  é utilizada a equação (9) abaixo, sendo  $n$  igual a 1:

$$\Delta d_n = v_{est} * \Delta t_n \quad (9)$$

Sendo  $\Delta t_1$  o mesmo tempo necessário para que o atuador 2, percorra a distância entre as impurezas ( $\Delta d_{larg}=25$  cm) ao longo da largura da esteira. Desta forma, obtemos  $\Delta t_1$  através da equação (10):

$$v_{atua} = \frac{\Delta d_{larg}}{\Delta t_1} \quad (10)$$

Com as equações definidas podemos obter a equação (11), relacionando as variáveis das equações (9) e (10):

$$\Delta d_1 = v_{est} * \frac{\Delta d_{larg}}{v_{atua}} \quad (11)$$

Para o movimento entre os desenhos 3 e 4 utiliza-se, inicialmente, a mesma equação (9) da distância 1, porém agora  $n$  é igual a 2 e objetiva-se obter  $\Delta d_2$ . Para calcular o  $\Delta t_2$ , deve-se levar em consideração que não há distância percorrida ao longo da largura da esteira, apenas ao longo do comprimento. Diferente da situação anterior, agora o atuador e a esteira movimentam-

se na mesma direção, mas em sentidos diferentes, sendo assim, calcula-se uma velocidade relativa, equivalente à soma das velocidades da esteira e do atuador, de acordo com a equação (12):

$$v_{rel} = v_{atua} + v_{est} \quad (12)$$

Para calcular  $\Delta t_2$ , utiliza-se a velocidade relativa, considerando a distância igual a distância entre o atuador e a impureza, que equivale a distância total entre as impurezas (25 cm), já que o atuador encontra-se no posição de sucção da segunda impureza, como mostra a equação (13):

$$v_{rel} = \frac{\Delta d_{atua/imp}}{\Delta t_2} \quad (13)$$

Assim, com as equações (9), (12) e (13) podemos obter a distância  $\Delta d_2$  através da equação (14):

$$\Delta d_2 = v_{est} * \frac{\Delta d_{atua/imp}}{v_{atua} + v_{est}} \quad (14)$$

A distância  $\Delta d_3$  é equivalente a  $\Delta d_1$ , já que, a velocidade da esteira e do atuador são as mesmas, e a largura equivalente a distância entre as impurezas também, sendo assim, obtemos a equação (15):

$$\Delta d_3 = v_{est} * \frac{\Delta d_{larg}}{v_{atua}} \quad (15)$$

Desta forma, relacionando as equações (8), (11), (14) e (15), obtemos a velocidade mínima do atuador, de 195,2 mm/s pela equação de segundo grau (16):

$$v_{atua}^2 * \Delta d_{perc} + v_{atua} * \left( \Delta d_{perc} * v_{est} - 2 * v_{est} * \Delta d_{larg} - v_{est} * \frac{\Delta d_{atua}}{imp} \right) - 2 * v_{est}^2 * \Delta d_{larg} = 0 \quad (16)$$

Além disso, um plano com manutenções preventivas mais frequentes seria necessário, já que o ambiente possui muitos sólidos em suspensão, tornando-se hostil para esse tipo de equipamento. Foram levantadas as possibilidades de compra do sistema completo, montagem do sistema com motores elétricos, montagem do sistema com atuadores pneumáticos e montagem do sistema misto com motor elétrico e atuador pneumático.

A compra de sistemas completos foi a ideia inicial para esta solução, visto que, já existem sistemas semelhantes para aplicações desta escala, sendo necessária apenas uma adaptação da atuação do eixo onde estaria localizado o elemento de sucção. O controle e sincronização desses sistemas poderia ser um problema, porém, com sistemas como o motion control, esse impasse seria descartado. Porém, as opções de mercado desta solução mostraram-se custosas.

Motores elétricos usualmente utilizados para essa aplicação são motores de passo, que necessitam de sistemas auxiliares para transformação do movimento angular em linear, o que aumenta os custos. Além disso, para alcançar as velocidades desejadas, os valores comerciais são muito altos, em torno de R\$8.000,00 por atuador, tornando-o uma solução inviável; a possibilidade de utilizar outros tipos de motores traz um risco para implementação, por não costumarem ser utilizados para aplicações semelhantes, aliada ao custo mais alto em busca de mais velocidade.

Atuadores pneumáticos são caracterizados pela possibilidade de alcançar maiores velocidades que os motores de passo, sua utilização seria uma adaptação de sistemas semelhantes, para movimentação do atuador do terceiro eixo, que removerá as impurezas, no curso do atuador pneumático. Porém, atuadores pneumáticos comumente não são precisos, podendo elevar ainda mais o custo do projeto na busca pela precisão.

Um sistema misto, envolvendo a atuação de um motor elétrico em um dos eixos e um atuador pneumático em outro também foi levantado, porém verificou-se que a velocidade e a precisão são necessárias em ambos os eixos, inviabilizando também esta opção.

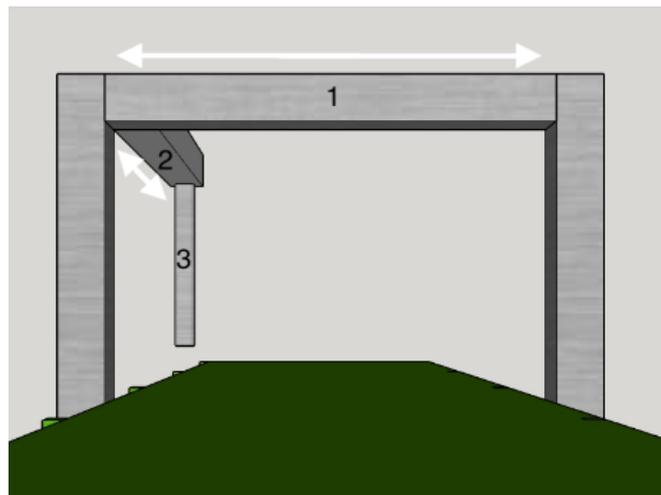
Levando em conta esses fatores, essa solução foi descartada, visto que, para que funcione de forma adequada, o custo dos componentes e da manutenção será alto, além de necessitar de adaptações em todas as soluções para o acoplamento da mangueira e do sistema de sucção.

### 3.3.2.2. Sistema com dois eixos

O sistema com dois eixos pode ser aplicado de diversas formas, com o elemento de remoção fixo, ou com um dos demais eixos fixos.

No caso da remoção fixa, o sistema consiste na movimentação de um eixo ao longo da largura da esteira e um eixo no comprimento da mesma, sendo a estrutura de sucção fixada à uma altura que não afete o posicionamento dos grãos e continue sendo capaz de sugar a impureza. Como mostrado na Figura 13 abaixo, a estrutura 1 representa o primeiro eixo, executando a movimentação ao longo da largura da esteira, e funciona como base para o acoplamento do atuador do segundo eixo, representado pela estrutura 2, que por sua vez executa a movimentação em parte do comprimento da esteira e funciona como base para o acoplamento da estrutura 3, que é fixada a uma altura que não encoste nas impurezas de forma a movimentá-las e seja capaz de removê-las através da sucção.

Figura 13: Sistema de atuação com dois eixos de movimentação e remoção fixa.



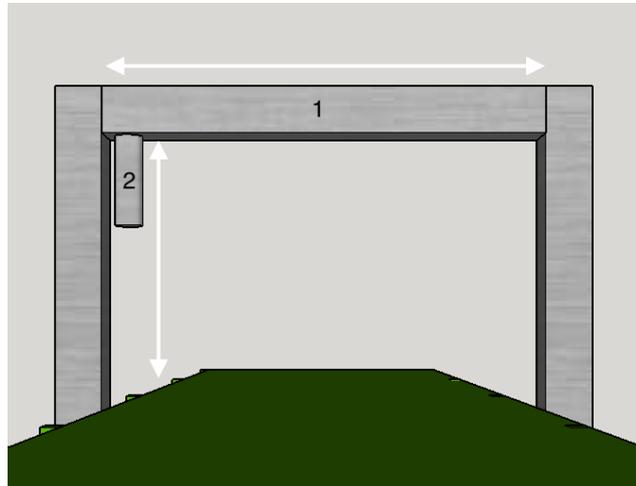
Fonte: Autoria própria

Essa solução tem como vantagem o fato de não necessitar de adaptações para o acoplamento do elemento de sucção, porém traz consigo os demais problemas do sistema com três eixos já que, os outros dois eixos precisam se movimentar de forma ágil e precisa, sendo custosa tal aplicação para ambos.

Já no caso da remoção móvel e um eixo fixo, o sistema se dá com a movimentação de um eixo ao longo da largura da esteira e um eixo com o sistema de remoção. Como mostrado na Figura 14 abaixo, a estrutura 1 representa o primeiro eixo, executando a movimentação ao longo da largura da esteira, e funciona como base para o acoplamento do atuador do segundo

eixo, representado pela estrutura 2, que por sua vez executa a movimentação da altura da estrutura 1 até a esteira, permitindo a sucção da impureza.

Figura 14: Sistema de atuação com dois eixos de movimentação, incluindo a remoção.



Fonte: Autoria própria

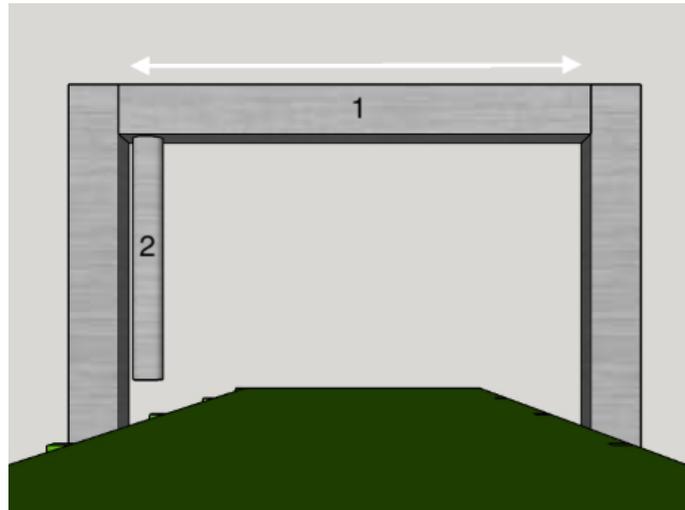
Essa solução tem a vantagem de possuir um eixo com o curso menor, reduzindo os problemas relacionados à manutenção do atuador, porém ainda necessita de adaptações para o acoplamento do elemento de sucção.

Por fim, o sistema de dois eixos mostrou-se uma solução mais viável que o sistema com três eixos, porém ainda não satisfatória, visto que, os problemas relacionados ao sistema anterior foram reduzidos mas não eliminados.

### 3.3.2.3. Sistema com um eixo

O sistema com um eixo e elemento de remoção fixo consiste na movimentação de um eixo ao longo da largura da esteira, sendo a estrutura de sucção fixada à uma altura que não afete o posicionamento dos grãos e seja capaz de sugar a impureza. Como mostrado na Figura 15 abaixo, a estrutura 1 representa o primeiro eixo, executando a movimentação ao longo da largura da esteira, e funciona como base para o acoplamento da estrutura 2, que é fixada a uma altura que não encoste nas impurezas de forma a movimentá-las e seja capaz de removê-las através da sucção.

Figura 15: Sistema de atuação com um eixo de movimentação.



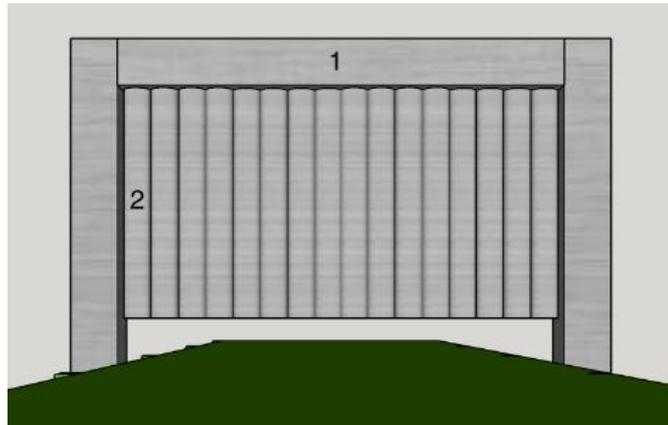
Fonte: Autorial própria

Essa solução tem como vantagem o fato de não necessitar de adaptações para o acoplamento do elemento de sucção, e de não ser tão caro, visto que, apenas um eixo irá se movimentar, reduzindo drasticamente os problemas relacionados ao mesmo, porém a área de inviabilidade de sucção dessa opção é muito grande, como mostrado anteriormente na Figura 12, para um sistema de três eixos, no caso de um único eixo a sucção seria ineficaz em ainda mais situações, visto que apenas são consideradas a velocidade do atuador, ao longo da largura da esteira, e a velocidade da mesma.

#### 3.3.2.4. Sistema ON/OFF

O sistema ON/OFF consiste em uma estrutura com sugadores posicionados lado a lado, de forma a percorrer toda a largura da esteira, fixados à uma altura que não afete o posicionamento dos grãos e seja capaz de sugar a impureza quando o vácuo for acionado em algum dos sugadores. A ideia seria utilizar mangueiras com sistemas acoplados em pontos estratégicos, de forma que o fluxo de vácuo seja ligado quando necessário, durante o tempo necessário. Como mostrado na Figura 16 abaixo, a estrutura 1 funciona como base para o acoplamento da estrutura 2, composta por diversos elementos de remoção, que é fixada a uma altura que não encoste nas impurezas de forma a movimentá-las e seja capaz de removê-las através da ativação/desativação da sucção.

Figura 16: Sistema de atuação com estrutura fixa para elementos de sucção.



Fonte: Autoria própria

Essa solução traz consigo diversas vantagens, não há movimentação de nenhum eixo, eliminando os problemas de manutenções exacerbadas, os custos seriam reduzidos em função da quantidade de intervenções na estrutura e das próprias manutenções e não existiria mais nenhuma área onde a sucção seja inviável, já que, o vácuo pode ser acionado ou não a qualquer momento, o quanto for necessário e em quantos pontos forem necessários, sendo o único problema a ser analisado a capacidade da bomba de vácuo de suportar várias mangueiras abertas ao mesmo tempo.

### 3.3.3. Sistema de interrupção de vácuo

Com a decisão de utilizar o sistema ON/OFF, o terceiro passo veio do método de interrupção do vácuo, para isso foram levadas em consideração três informações básicas, a utilização de sólidos, a granulometria dos mesmos e a bitola da mangueira utilizada. A bitola da mangueira foi definida como um range do diâmetro interno, entre 1 cm e 2 cm, tamanhos próximos do utilizado atualmente, sendo ele  $\frac{3}{4}$ " de diâmetro externo e diâmetro interno de  $\frac{1}{2}$ " (aproximadamente 1,27 cm). Esse range não pôde ser diminuído exacerbadamente para não aumentar demais a quantidade de mangueiras e sistemas de interrupção de vácuo a serem utilizados e não pôde ser aumentado demasiadamente para não crescer o desperdício de areia limpa sugada como impureza. Por fim, a necessidade de testes para a escolha da topologia foi evidenciada, sendo levado em consideração também a disponibilidade dos componentes na orientação dos testes. Os testes foram realizados em ambiente laboratorial, utilizando uma extrusora para simular a bomba de vácuo, em uma bancada estática, ainda sem interação com esteiras.

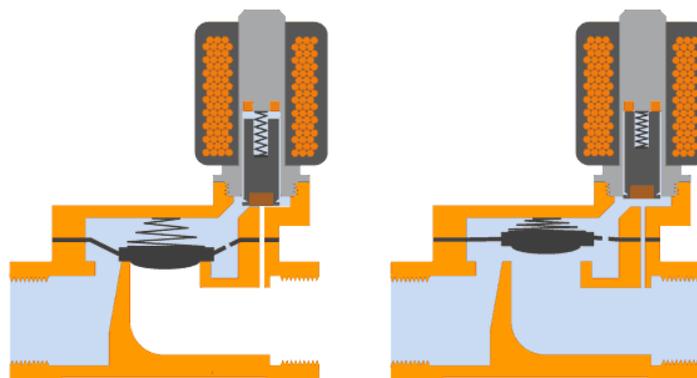
### 3.3.3.1. Válvulas

Uma das opções levantadas foi a utilização de válvulas para a aplicação, porém o tipo de válvula a ser utilizado ainda precisava ser dimensionado. A utilização de sólidos nas válvulas mostrou-se um problema, visto que, as válvulas comumente utilizadas são para fluidos (gases e líquidos), além de se tratar de um sólido abrasivo, porém a baixa granulometria dos mesmos permitiria o funcionamento em algumas topologias de válvulas, nessas condições.

#### 3.3.3.1.1. Válvula Diafragma Solenoide

A Válvula Diafragma Solenoide foi a primeira opção para teste, visto que é uma válvula comum, com rosca de 3/4" compatível com a mangueira utilizada atualmente e possui bobinas com 12 VCC, 24 VCC, 110 VCA e 220 VCA compatíveis com diversos microcontroladores. Seu princípio de funcionamento é explicitado na imagem abaixo, Figura 17, na qual, é possível analisar a abertura e fechamento do diafragma, liberando e fechando o fluxo.

Figura 17: Princípio de funcionamento de válvula tipo diafragma.



Fonte: Citisystem [15]

O primeiro teste foi realizado com a válvula acoplada na mangueira e a mesma acoplada na saída da extrusora com a redução feita através de vedações utilizando plásticos maleáveis e fitas adesivas. Neste teste não houve sucção, sendo suposta a causa provável como a vedação insuficiente.

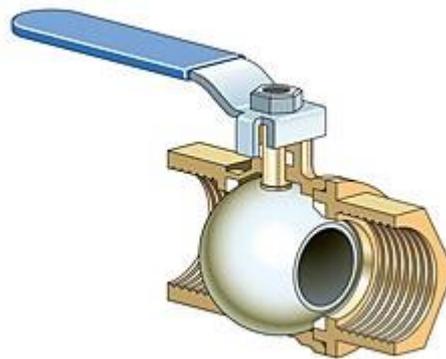
Para o segundo teste foi fabricada uma peça de impressão 3D com a função de fazer a redução da saída da extrusora. A peça foi acoplada na saída extrusora com silicone e a

mangueira foi acoplada na peça com fita teflon. Inicialmente, alguns grãos foram sugados, porém logo em seguida o fluxo de ar foi cortado, com este resultado, o entupimento do orifício onde está localizado o diafragma da válvula seria a causa mais provável do problema. A teoria foi verificada ao executar o mesmo teste sem a válvula e o sistema ser capaz de sugar os grãos. Assim, a utilização de válvulas do tipo diafragma foi descartada.

### 3.3.3.1.2. Válvula Esfera

A Válvula Esfera foi uma opção levantada após os testes, visto que o tamanho do orifício não seria um problema, já que é semelhante ao orifício de encaixe da mangueira. Esse tipo de válvula pode ser manual, acionada via servo ou solenoide, a opção manual é inviável para a aplicação, visto que é um sistema automatizado, o acionamento via servo é muito lento para a aplicação, em torno de 2,5s para ser totalmente aberta ou fechada, e por fim, o acionamento via solenoide é o ideal. A Figura 18 demonstra o funcionamento da válvula tipo esfera, que ao rotacionar o eixo, a esfera inferior é rotacionada, permitindo ou não o fluxo na tubulação em que é acoplada.

Figura 18: Princípio de funcionamento de válvula tipo esfera.



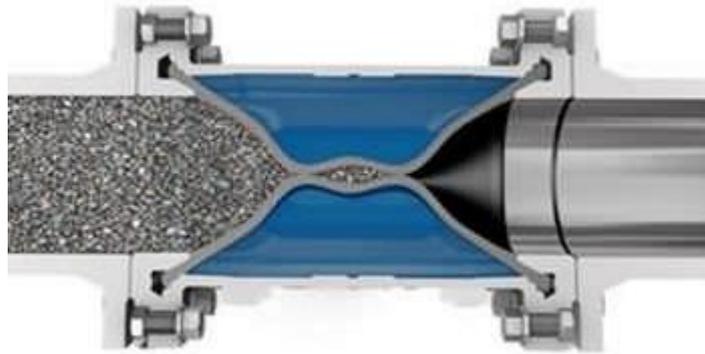
Fonte: MTIBrasil [16]

Válvulas esfera do tipo solenoide são geralmente encontradas em tamanhos grandes, maiores que 1", sendo o tamanho e material para resistir a abrasividade desejados muito específicos.

### 3.3.3.1.3. Válvula Mangote

A Válvula Mangote foi a melhor opção levantada para a aplicação. Sendo uma válvula projetada para sólidos, que resiste à abrasividade, possui a bitola de 1/2", próxima da desejada, e suporta vácuo. Como mostra na Figura 19, a válvula possui um mangote de borracha que ao ser comprimido interrompe o fluxo dos sólidos na tubulação.

Figura 19: Princípio de funcionamento de válvula tipo mangote.



Fonte: Direct Industry [17]

Válvulas do tipo mangote geralmente são acionadas pneumaticamente, necessitando assim de uma outra válvula solenoide para ser acionada, o que implica na elevação dos custos e piora ainda mais sua situação, visto que possui um preço muito elevado em comparação com as demais.

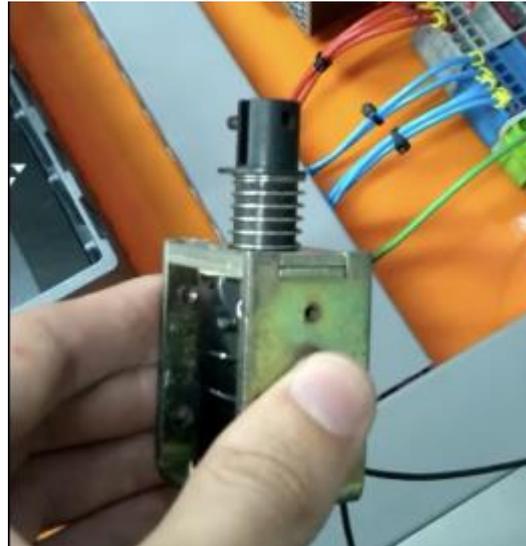
### 3.3.3.2. Atuadores

A aplicação de atuadores veio da inviabilidade das topologias de válvulas, seja fisicamente ou economicamente. Com a utilização de atuadores a interrupção do fluxo se daria com o estrangulamento da mangueira, semelhante ao funcionamento de uma válvula mangote, porém com o estrangulamento da mangueira contra uma estrutura determinada. Essa aplicação possui um risco inerente: a possibilidade da vedação entre as laterais da mangueira, com grãos de areia acumulados, não seja suficiente.

### 3.3.3.2.1. Atuador Elétrico Solenoide

O Atuador Elétrico solenoide foi a primeira opção para teste. Um atuador com bobina 12 VCC, do tipo "puxa", com força de 5N, facilmente encontrado no mercado e de baixo custo. A Figura 20 mostra a estrutura física do atuador.

Figura 20: Exemplo de atuador elétrico solenoide.



Fonte: Autoria própria

Esta opção foi rapidamente descartada, já que o atuador não suporta continuar acionado após o comando, pois possui uma bobina que tem sua temperatura elevada rapidamente ao permanecer acionada.

### 3.3.3.2.2. Atuador Elétrico com Servo Motor

Uma segunda opção de atuador foi uma solução pesquisada que utiliza um servo motor para mover uma peça que estrangula a mangueira. É uma opção de custo relativamente baixo, porém que envolve usinagem de estruturas, não sendo tão viável em baixa escala. A Figura 21 mostra um exemplo de atuador elétrico com servo motor.

Figura 21: Exemplo de atuador elétrico com servo motor.



Fonte: Inventive Madness [18]

Apesar de mostrar-se uma opção boa, essa solução apresenta um alto risco de execução, dependendo de diversos fatores que deveriam ser testados previamente, como a potência necessária pelo servo para estrangular a mangueira.

### 3.3.3.2.3. Atuador Pneumático

Por fim, a última opção testada foi um pistão pneumático, acoplado a uma estrutura 3D impressa, de baixo custo, com maior potência que os demais elétricos, capaz de reter e retomar o fluxo da areia sugada pelo vácuo. Esse atuador é acionado pneumáticamente, o que gera a necessidade de uma válvula solenoide para cada pistão a ser acionado, aumentando o custo do projeto, mas não de forma significativa, já que, ambos possuem baixo custo, somando em torno de R\$300,00 o conjunto. A Figura 22 mostra um exemplo de atuador com pistão pneumático.

Figura 22: Exemplo de atuador com pistão pneumático.



Fonte: MTIBrasil [19]

Os testes com esse atuador consistiram em impressão de estrutura de acoplamento no pistão pneumático e na mangueira, que permitem que o acionamento do pistão empurre a estrutura acoplada no pistão, contra a estrutura da mangueira de forma que retenha e retome o fluxo.

### 3.4. Dimensionamento do Sistema de Aquisição de Imagem

Para o dimensionamento de um sistema de aquisição deve-se levar em conta a eficiência de processamento necessária para identificação da impureza por meio de um algoritmo de reconhecimento, para tal é importante salientar o tamanho da impureza a ser detectada, a velocidade da esteira, contraste e resolução do sistema formado por câmeras e lentes, iluminação do local de inspeção e coordenação entre as unidades de processamentos e sensores de imagem.

#### 3.4.1. Iluminação

O sistema de iluminação impacta diretamente na qualidade e capacidade de identificação de impurezas, portanto para otimizar o sistema de aquisição são propostas algumas montagens de sistema de iluminação possíveis:

- Iluminação direta
- Iluminação difusa frontal
- Iluminação difusa axial
- *Ring light*
- Iluminação polarizada
- *Backlighting*

#### 3.4.1.1. Iluminação Direta

A iluminação direta possui uma montagem mais simples e mais facilmente aplicável, caracterizada por um ponto de iluminação, tendo uma ou mais fontes. Os maiores limitadores desse tipo de montagem são o brilho excessivo e sombreamento causados pela fonte, visto que locais de inspeção distintos são iluminados de formas diferentes, provocando pontos extremamente brilhantes e pontos com sombras acentuadas [20]. Na Figura 23 são demonstrados à esquerda objetos sob iluminação direta e os efeitos desta na imagem capturada e à direita o esquema de montagem com a luz proveniente de um único ponto, refletindo no objeto e alcançando o sensor de imagem, enquanto é criada uma sombra equivalente a posição da fonte de luz . Esses pontos podem provocar erros de identificação de impurezas, por isso não é indicado sua adoção.

Figura 23: Sistema de iluminação direta.

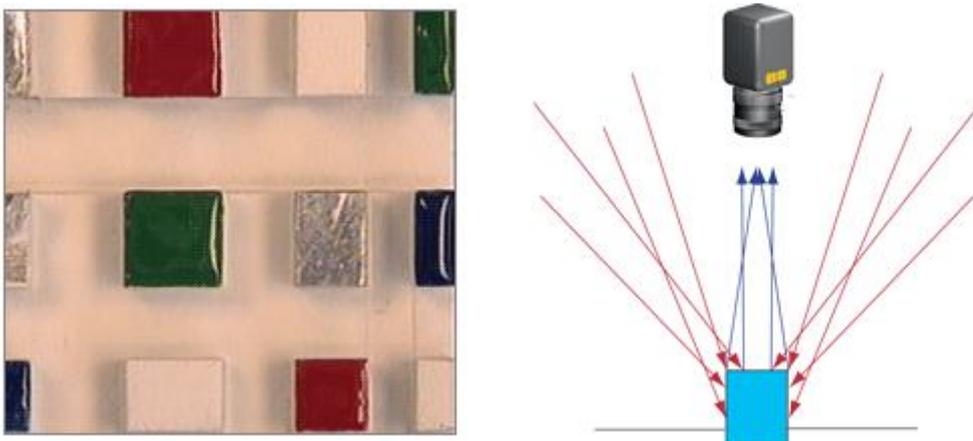


Fonte: Edmund [20]

### 3.4.1.2. Iluminação Difusa Frontal

Um sistema com iluminação difusa frontal tem como objetivo promover iluminação simétrica a todos os pontos de inspeção, reduzindo pontos de brilho excessivo e sombra, no entanto para tal iluminação é necessária uma fonte suficientemente extensa, dificultando a aplicação em espaços pequenos [20]. Na Figura 24 são evidenciados o esquema de iluminação e os efeitos deste sobre a imagem de teste.

Figura 24: Sistema de iluminação difusa frontal.

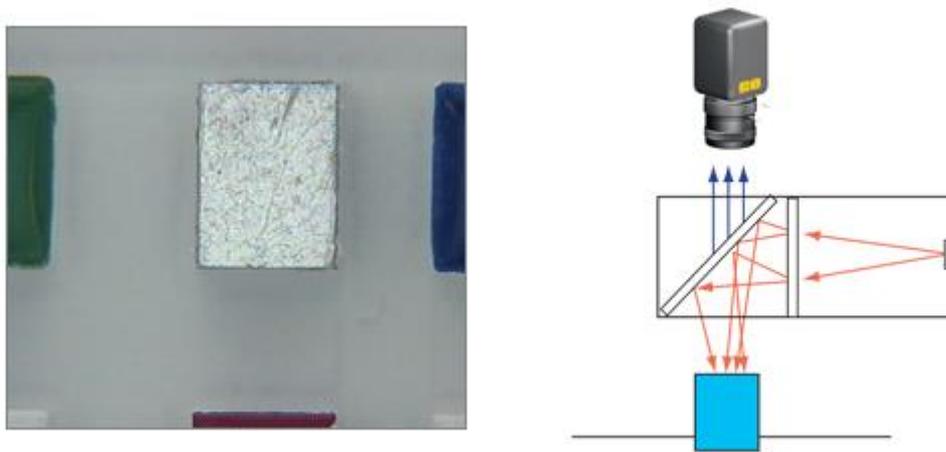


Fonte: Edmund [20]

### 3.4.1.3. Iluminação Difusa Axial

A iluminação difusa axial trata-se de uma montagem alternativa à difusa frontal que visa a iluminação bem distribuída, só que montada coaxial ao sensor de imagem, consistindo de uma fonte que incide num *beamsplitter*, que ilumina o objeto sob inspeção, enquanto o sensor observa o ponto através deste, como observado na Figura 25. Os grandes limitantes dessa alternativa são a dificuldade de montagem, distância de trabalho limitada e necessidade de muitas fontes de luz devido à perda de luminosidade no sistema [20].

Figura 25: Sistema de iluminação difusa axial.



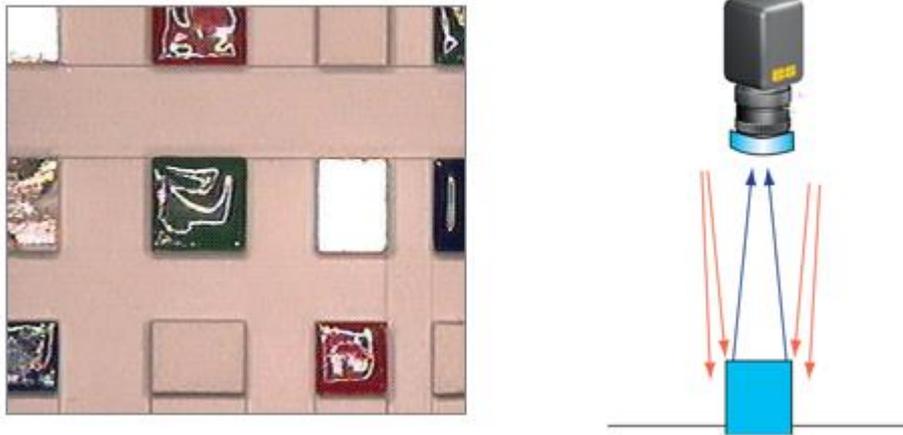
Fonte: Edmund [20]

### 3.4.1.4. Ring Light

*Ring Light* é um sistema montado diretamente na lente da câmera possibilitando luminosidade uniforme em distâncias de trabalho relativamente pequenas, evidenciado na Figura 26 à direita, no entanto devido ao tipo de montagem na lente provoca padrões brilhantes circulares em superfícies reflexivas provocando erros quando identificadas impurezas brilhosas, à esquerda na imagem de teste da figura.

Ao contrário de uma iluminação difusa frontal ela não promove iluminação simétrica utilizando uma fonte extensa, ou seja, inúmeras fontes de luz, a montagem sob a lente promove luz simétrica utilizando uma só fonte, iluminando objetos numa pequena região.

Figura 26: Sistema de iluminação *ring light*.

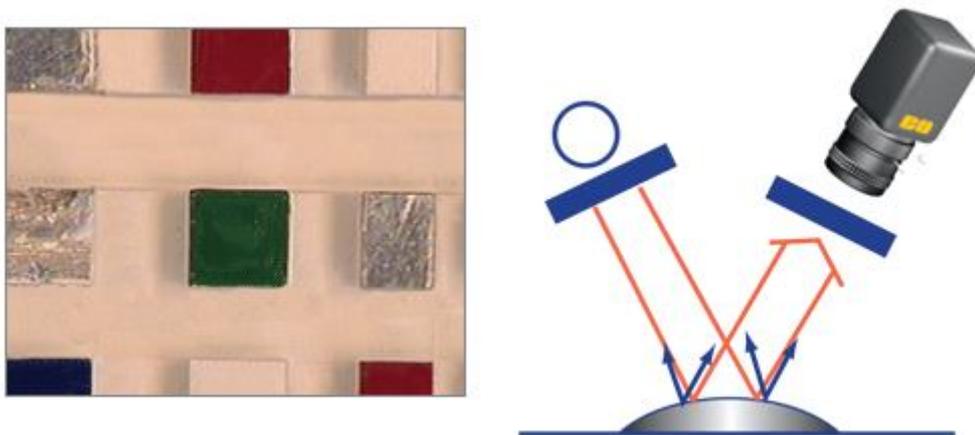


Fonte: Edmund [20]

### 3.4.1.5. Iluminação Polarizada

A iluminação polarizada é caracterizada pela utilização de filtros polarizados, fator que melhora consideravelmente a qualidade da imagem, distribuindo uniformemente a luminosidade e reduzindo o brilho, no entanto a intensidade média da luz ao passar pelos filtros é reduzida [21]. Na Figura 27 é representado um sistema polarizado que pode ser associado a outros para melhorar a performance da aquisição da imagem ou selecionar um comprimento de onda de um material específico para identificação.

Figura 27: Sistema de iluminação polarizada.

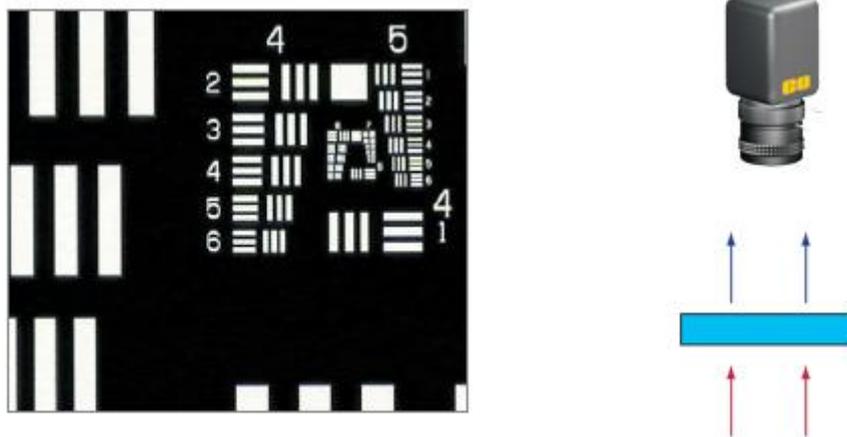


Fonte: Edmund [20]

### 3.4.1.6. *Backlighting*

O *backlighting* mostra-se ideal para identificação de objetos opacos visando o máximo de contraste possível, como as impurezas tendem a se sobrepor e a utilização de uma esteira que permita a visualização através da mesma não é viável para a aplicação, sua implementação é impossibilitada. Na Figura 28 é demonstrado o esquema de montagem *backlighting*, evidenciando o contraste que se obtém.

Figura 28: Sistema de *Backlight*.



Fonte: Edmund [20]

### 3.4.1.7. Dimensionamento da Iluminação

Para dimensionamento do sistema de iluminação foi utilizado o tipo de montagem difusa frontal, utilizando dois pontos de iluminação LED com difusor, totalizando 850 lúmens por ponto, para tornar a iluminação bem distribuída nos 50 cm da esteira, minimizando os efeitos de sombras nas imagens capturadas que podem ser erroneamente interpretadas como impurezas pelo algoritmo de identificação, além de poderem ser mais facilmente montadas que as demais opções.

### 3.4.2. Sensor de Imagem e Objetiva

Para o dimensionamento do sistema de imageamento, primeiramente é necessário definir e analisar os requerimentos básicos de operação, tais como campo de visão e defeito

mínimo a ser reproduzido por pixels. Estes, irão determinar as necessidades quanto ao sensor de imagem e a objetiva.

Analisando os requisitos do sistema é estabelecido o tamanho mínimo de defeito, ou menor objeto que deve ser reconhecido, como 0,1 mm, resultando em uma frequência espacial de 5 lp/mm, valor este obtido com a equação (1), e o campo de visão horizontal desejado, a largura da esteira, de 500 mm. Quanto ao campo de visão vertical, este não influencia na aplicação, portanto não será considerado nos cálculos. Relacionando essas informações na equação (17) são necessários 5000 pixels, na orientação horizontal, para reprodução da imagem.

$$\frac{\text{Largura da esteira}}{\text{Defeito}} = \frac{500\text{mm}}{0.1\text{mm}} = 5000 \quad (17)$$

Com base na quantidade estimada de pixels, podem ser selecionados modelos comerciais de sensores de imagens que atendam a este valor, ou seja, dentro da categoria de 18 MP. Os modelos encontrados podem ser observados na Figura 29.

Figura 29: Sensores de imagem disponíveis no mercado.



Fonte: Edmund [22].

Através dos modelos levantados, observa-se que ambos possuem elevado custo, o que está em desacordo com umas das principais premissas do projeto de desenvolver um conceito de baixo custo em relação a outras opções de mercado. Além disso, para associação com uma objetiva, o FOV dimensionado iria requerer um ângulo de abertura ou uma distância de trabalho muito grandes, o que poderia gerar distorções na imagem e seriam inviáveis ao projeto devido a distância de trabalho de objetivas comerciais.

Para resolver este problema divide-se o campo de observação em setores menores, implicando em reduzir a quantidade de pixels requerida, o que possibilita a seleção de sensores

de imagens com menor resolução e, portanto, mais baratos. A quantidade de setores pode ser determinada com base nas especificações da objetiva a ser empregada. A lente disponível para validação dos conceitos foi a NVM-12M23 da Navitar, com distância focal de 12 mm e distância de trabalho entre 15 cm ao infinito. O ângulo de abertura para sensores de imagens com formato de 1", de aproximadamente de 15,63°, foi obtido por meio de estimativas com base nos dados especificados na documentação técnica da objetiva. Para um WD de 15 cm, tem-se um FOV calculado de aproximadamente 4,11 cm, como descrito pela equação (18).

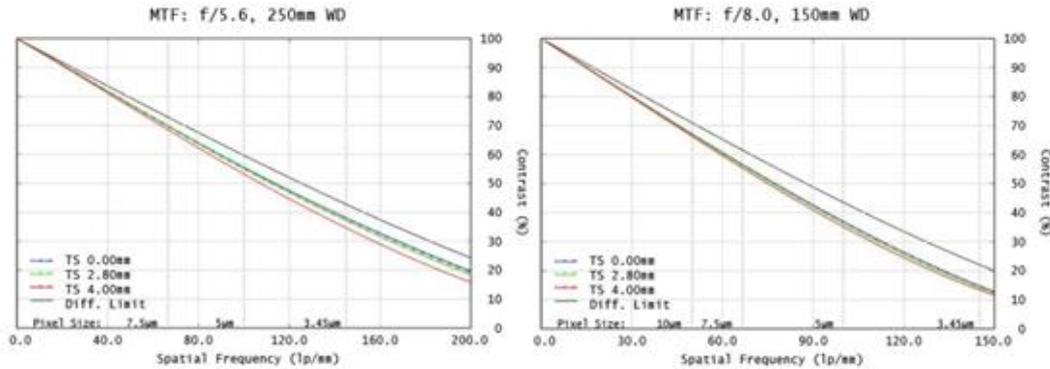
$$15 \text{ cm} = \frac{FOV/2}{\tan(15,63^\circ/2)} \rightarrow FOV = 4,11 \text{ cm} \quad (18)$$

Este é o campo de visão mínimo para a objetiva. O valor do FOV é aproximado para 5 cm, de forma que a largura da esteira possa ser dividida em um número de setores que seja inteiro e proporcional aos 50 cm, totalizando 10 setores para a esteira. Desta forma a distância de trabalho para o sistema a ser desenvolvido pode ser calculada como observado na equação (19).

$$WD = \frac{5 \text{ cm}/2}{\tan(15,63^\circ/2)} \rightarrow WD = 18,21 \text{ cm} \quad (19)$$

Para obter a magnificação do sistema proposto, deve-se levar em consideração a frequência espacial do defeito mínimo e a resolução no sensor de imagem. Com base nas curvas de MTF para alguns modelos comerciais de objetivas destinadas a *machine vision*, como exemplificado na Figura 29, é possível observar que geralmente possuem níveis de contraste muito baixos para resoluções intermediárias a 150 lp/mm e 200 lp/mm. Para valores acima desta faixa, o contraste é reduzido para menos de 20%, o que não é desejável.

Figura 30: MTF para lentes objetivas M12.



Fonte: Edmund [23].

Desta forma, a magnificação é calculada de forma que atenda os limites das objetivas para contrastes abaixo de 20%. Para isso utiliza-se a frequência espacial do pixel da imagem -de 5 lp/mm, relacionada à dimensão do menor defeito, e a frequência espacial máxima limite para a objetiva. O cálculo é realizado com o uso da equação (4), como demonstrado na equação (20).

$$PMAG = \frac{\text{Resolução do Objeto}}{\text{Resolução da Imagem limite}} = \frac{5 \text{ lp/mm}}{150 \text{ lp/mm}} = 0,033 \quad (20)$$

Visto que não é mais necessário empregar sensores de alta resolução, pode-se então selecionar um sensor mais acessível e com menor quantidade de pixels. Desta forma, é recalculado a quantidade de pixels necessária no novo cenário, como pode ser observado na equação (21).

$$\frac{\text{Setor da esteira}}{\text{Defeito}} = \frac{50 \text{ mm}}{0,1 \text{ mm}} = 500 \quad (21)$$

Dentre os modelos disponíveis para a realização dos testes e validação do conceito, o sensor de imagem IMX219 da SONY de 8MP, com matriz de 3280 X 2464 pixels com tamanho de 1,12µm poderia ser utilizado. Este sensor, além de poder ser encontrado sob diferentes modelos no mercado, comportando os tipos de lentes mais usados, tais como os demonstrados na Figura 31, apresenta custo relativamente menor quando comparado aos sensores analisados anteriormente.

Figura 31: Sensores de imagem IMX219 para diferentes tipos de lentes.



Fonte: Protocentral [24].

Associando o sensor de imagem IMX219 com a objetiva NVM-12M23 e utilizando a WD calculada na equação (19) para o FOV de 5 cm, encontra-se 0,074 de PMAG do sistema, como pode ser observado na equação (22).

$$PMAG = \frac{\text{Tamanho do sensor}}{\text{Campo de visão}} = \frac{1640 \cdot 1,12 \mu m}{50000 \mu m} = 0,037 \quad (22)$$

O valor de PMAG do sistema dimensionado supera a magnificação primária mínima necessária de 0,033 para reprodução da imagem com a resolução desejada de 5 lp/mm. Desta forma, o sistema proposto atende os requisitos do projeto e se mostra aplicável.

### 3.5. Desenvolvimento da Solução Computacional

Tendo em vista o modelo de sensor de imagem dimensionado e os softwares mais adequados para a aplicação proposta, o computador de baixo custo *Raspberry PI* mostrou-se como uma escolha rentável e compatível para os demais componentes. Possuindo a linguagem *python* como uma de suas mais comuns, viabiliza o uso de bibliotecas de processamento de imagens. Além do mais, como demonstrado na

Figura 32, o computador possui tamanho desejável por não ocupar muito espaço e entradas compatíveis para as câmeras escolhidas para o projeto.

Figura 32: *Raspberry PI* com Câmera module V2 acoplado.



Fonte: Protocentral [24].

Inicialmente foi realizado um estudo sobre as opções de algoritmos acerca às necessidades do projeto. Com o foco de identificação de impurezas em areia de quartzo algumas alternativas se mostraram promissoras, como o algoritmo de detecção de *blobs* ou a busca de contornos que poderiam facilmente serem utilizados no *OpenCV*. Ambos têm como foco a classificação e detecção de formas e objetos em uma determinada imagem. Contudo, requerem de alto processamento o que pode resultar em baixa velocidade de operação. Além disso, oferecem recursos desnecessários que podem prejudicar os tempos ainda mais.

Tendo tais pontos em vista, uma alternativa mais simples e rápida pode substituir os algoritmos mais robustos. Tal abordagem se baseia nas características do quartzo, das impurezas e da esteira em que ambos se localizam. Os quartzos presentes na linha de produção estudada se encontram predominantemente na cor branca, similar a cor da esteira, e oscilam sob e opaco a translucido. Contudo, as impurezas que aparecem sob maior frequência apresentam cores mais vibrantes e escuras que se distanciam do branco da areia de sílica.

Baseado neste cenário, um simples algoritmo de identificação por cores se apresenta como suficiente e com probabilidade de agir sob tempos mais eficazes. Para isso, é necessário da aplicação de uma máscara sobre os canais de cores nas imagens registradas, operações básicas em matrizes, além de desvios condicionais propriamente calibrados para seleção e acionamento dos elementos de limpeza.

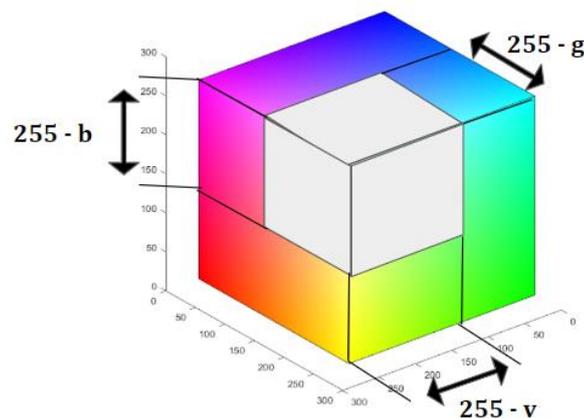
A máscara de cores é um recurso utilizado para delimitação de uma faixa contida em um determinado espaço de cores. A sua aplicação se adapta para quaisquer modelos de cores que foram necessários. Como as imagens das câmeras serão geradas sob o modelo RGB, faz-

se uso desse sistema de representação para delimitação da máscara. Esta é ajustada de acordo com os níveis de vermelho, verde e azul de interesse.

Como o sistema RGB consiste de 3 coordenadas referentes a cada canal de cor, a máscara necessita de limites inferiores e superiores para a delimitação de um espaço de cores que pode ser considerado como impureza. A Figura 33, representa a delimitação de um subespaço para uma máscara para detectar objetos com cores mais saturadas e escuras. A área delimitada, em branco, está contida pelas cores que compõem a areia de quartzo, enquanto o espaço restante os contaminantes.

Figura 33: Esquema com efeito da máscara sob o cubo RGB.

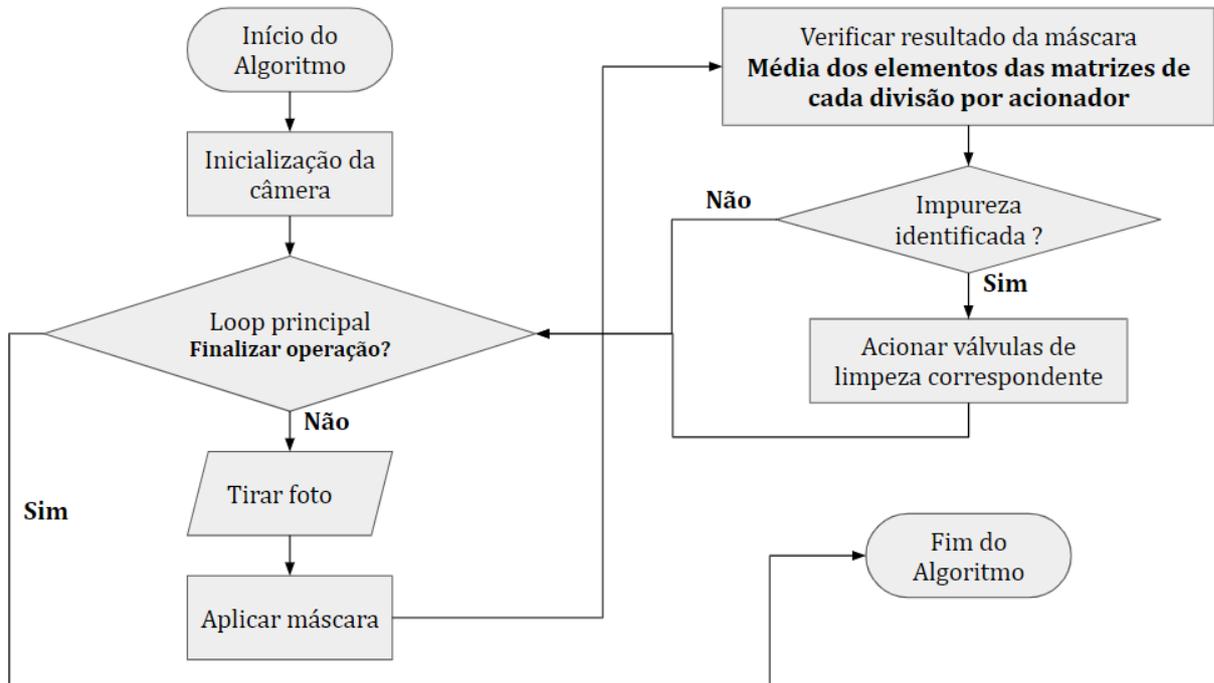
**Limite inferior da máscara: [ v, g, b ]**  
**Limite superior da máscara: [ 255, 255, 255 ]**



Fonte: Autoria própria.

Os valores referentes ao limiar inferior da máscara devem ser obtidos por meio de testes, de forma que as impurezas mais comuns sejam separadas do quartzo. Uma vez com os valores de seleção calibrados pode ser desenvolvido o algoritmo como descrito pelo fluxograma da Figura 34.

Figura 34: Fluxograma da solução computacional empregada.



Fonte: Autoria própria

Primeiramente o algoritmo inicializa a câmera, utilizando a linha 01 da Figura 35 e configura seus parâmetros básicos como resolução, *framerate*, ganho de balanço branco e nível de exposição do sensor nas linhas subsequentes, além disso é criada um *numpy array* vazio para armazenar a futura imagem a ser capturada na linha 07.

Figura 35: Inicialização da câmera.

```

01. camera = Picamera()
02. camera.awb_mode = 'fluorescent'
03. camera.exposure_mode = 'night'
04. camera.resolution = (1664, 1232)
05. camera.framerate = 40
06.
07. image = np.empty((1232* 1664* 3), dtype = np.uint8)
  
```

Fonte: Autoria própria

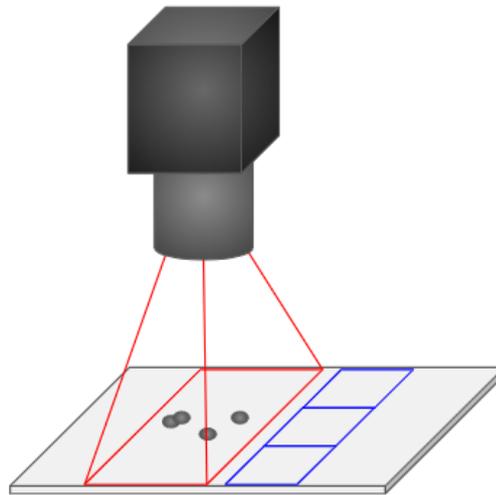
Depois de inicializada a câmera, o algoritmo entra no *loop* principal, onde este executa a ação de capturar uma imagem, podendo realizar esta ação por meio da porta *still*, responsável por imagens com melhor qualidade e resolução completa, devido ao tratamento extra atrelado, no entanto com o *framerate* menor, ou seja, com menor velocidade, ou por meio da porta de vídeo, utilizada principalmente para gravações de vídeos, portanto caracterizada por um

*framerate* maior e com resolução e qualidades limitados para prover a velocidade configurada [25].

A imagem é capturada e salva na forma de um *numpy array*, uma forma de arquivo básico para RGB. Arquivada nesta forma, a imagem pode ser processada e carregada de forma mais eficiente, ao contrário do que se tem para formatos genéricos de imagens como png, jpg ou bmp.

A máscara então é aplicada por meio da função *inRange*, que retorna uma nova matriz de uma única dimensão. Esta é composta por pontos que alternam 0 ou 255. Caso um determinado pixel seja encontrado contido na faixa descrita nos limites da máscara, recebe o valor de 255, caso contrário 0. Desta forma, as impurezas recebem o valor de 0. Com a necessidade da aplicação de mais de uma câmera, dividindo assim os setores dentro da esteira, apenas uma pequena quantia de atuadores será associada a cada sensor de imagem. Com base na área de atuação dos tubos selecionados para o sistema de limpeza, estimou-se um total de três atuadores por câmera. Sendo assim, cada sensor passa a possuir três regiões de decisão, divididas no FOV, como demonstrado na Figura 36. Com base na característica exemplificada na figura, pode-se observar que, na matriz gerada pela aplicação da máscara, a identificação da presença das impurezas pode ser feita de maneira independente.

Figura 36: Esquema de FOV e áreas de atuação do sistema de remoção de impurezas.

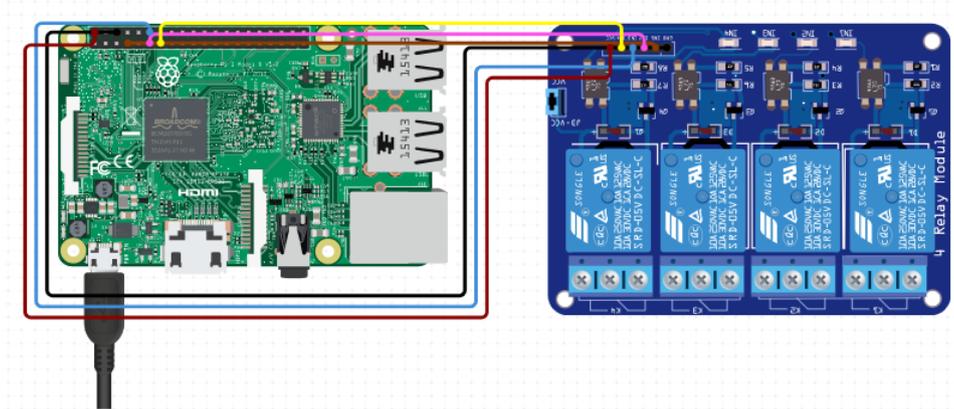


Fonte: Autoria própria

A identificação de impurezas se faz pelo cálculo da média dos componentes da matriz de cada área de atuação. Como na ausência de impurezas a média deve corresponder a 255, enquanto que na presença de pelo menos uma impureza, a média possuirá valor inferior a 255. Desvios condicionais verificam o resultado do cálculo das médias e acionam os devidos

atuadores por meio de pinos GPIO, presentes na *Raspberry PI*, conectado como pode ser observado na Figura 37.

Figura 37: Esquema de ligação do controlador com os relés.



Fonte: Autoria própria

### 3.6. Definições Finais

Com a realização dos testes nos componentes isolados do sistema, as soluções ideais foram definidas. No caso da forma de remoção de impurezas, definiu-se que seria utilizada a sucção por vácuo, já para o tipo de atuação, o sistema ON/OFF mostrou-se o ideal e por fim, após a realização dos testes para o método de interrupção do vácuo, os seguintes resultados foram encontrados, de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2: Resultado dos testes do método de interrupção do vácuo.

Testes	Válvulas			Atuadores		
	Diafragma Solenóide	Esfera	Mangote	Elétrico Solenóide	Elétrico Servo Motor	Pistão Pneumático
Acoplamento	✓	✓	✓	×	×	×
Passagem de sólidos	×	✓	✓	×	×	✓
Abrasividade	×	×	✓	✓	✓	✓
Custo	✓	×	×	✓	×	✓

Baixo risco de execução    ×            ×            ✓            ×            ×            ×

Fonte: Autoria própria

Com respeito ao acoplamento, todas as topologias de válvulas estudadas possuem rosca padrão no tamanho do redutor para o range de possíveis conexões, em contrapartida, nenhum dos atuadores pesquisados possui encaixe padrão para mangueiras, sendo necessárias adaptações específicas de estruturas para cada um deles.

Já quanto à passagem de sólidos, o formato das válvulas do tipo esfera e mangote seria compatível, diferentemente da válvula tipo diafragma que entupiu com a passagem dos grãos durante os testes. Os atuadores elétricos também mostraram-se inviáveis nesse quesito, no caso do solenoide pela incapacidade de permanecer acionado e no caso do servo motor pela alta força necessária para manter a mangueira estrangulada. Já o pistão pneumático, mostrou-se suficiente nos testes executados.

Em relação à abrasividade, apenas as válvulas tipo diafragma e esfera não seriam suficientes para aplicação, visto que, nesses tipos de válvulas os materiais comumente utilizados não resistem à abrasão. Já a válvula do tipo mangote projetada para este tipo de aplicação, mostrando-se ideal para a solução. Nenhum dos atuadores sofreria com a abrasividade do material, visto que não teriam contato direto com o sólido e sim com a mangueira, sendo assim a especificação do material adequado para a mangueira seria suficiente para solucionar o problema da abrasividade.

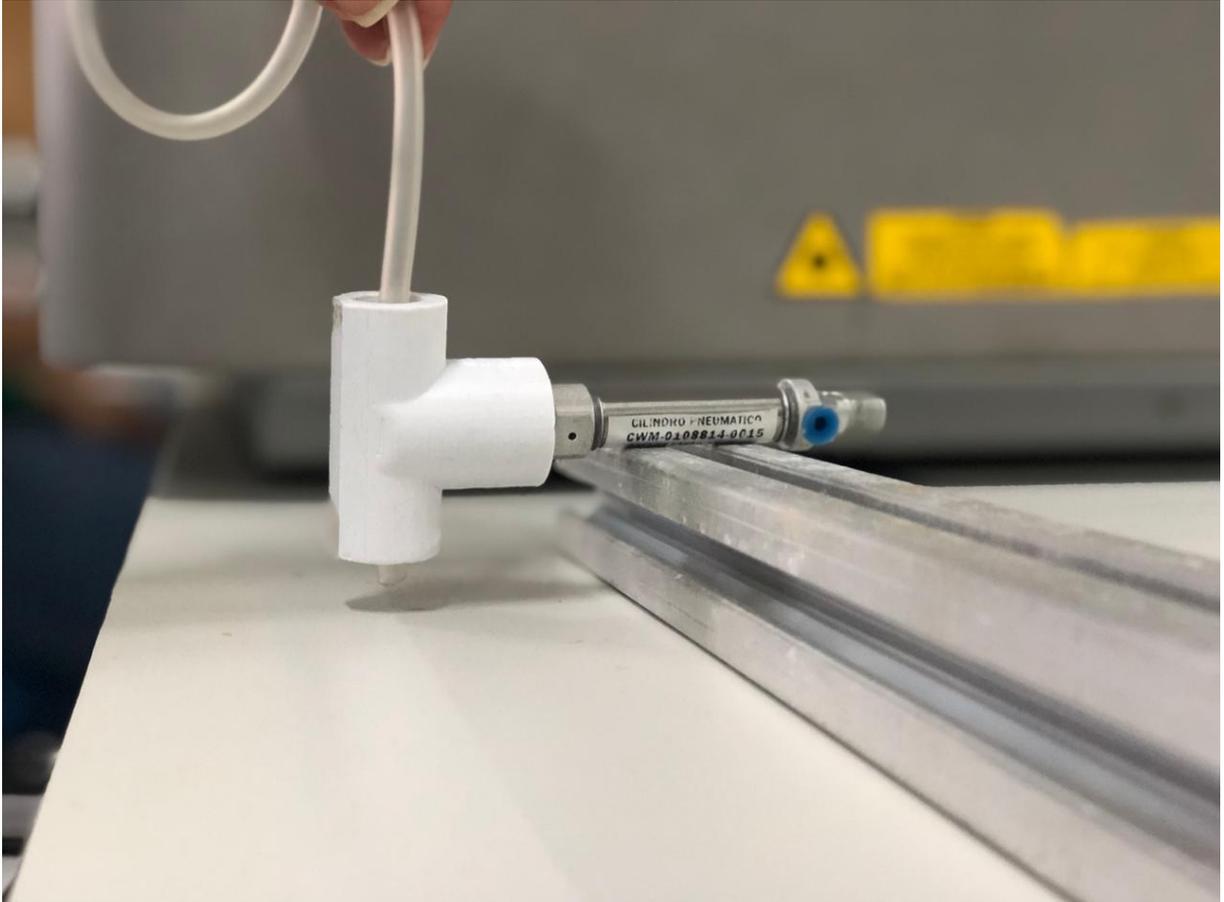
Quanto aos custos, as soluções consideradas viáveis foram apenas os atuadores elétrico solenoide e o pistão pneumático, que além de serem de baixo custo, não iriam necessitar da construção de estruturas auxiliares ou adaptações caras para o acoplamento no sistema.

Por último, foi levado em consideração o risco de execução, sendo elevado em todas as soluções exceto na válvula mangote, que é projetada para aplicações semelhantes. Nas demais opções de válvulas, a tentativa de gerenciar um melhor custo-benefício para a aplicação poderá gerar um alto risco, visto que, para manter o baixo custo, adaptações seriam necessárias para o funcionamento com sólidos abrasivos. No caso dos atuadores, estruturas usinadas ou impressões 3D seriam necessárias, para adaptações tanto do acoplamento, quanto para o estrangulamento.

Desta forma, a opção do pistão pneumático foi testada e validada, sendo a escolhida para a aplicação por sua eficiência nos testes iniciais e baixo custo. A Figura 38 mostra a

montagem do pistão pneumático com a peça 3D, utilizados para os testes e validação do método de interrupção do vácuo.

Figura 38: Montagem da peça 3D com o pistão pneumático, utilizados para testes.



Fonte: Autoria própria.

## 4. Resultados

Com a realização dos testes com os componentes isolados e as definições para a solução concluídas, a montagem dos sistemas foi possibilitada. Inicialmente, foram montados apenas os itens essenciais para o funcionamento adequado de cada sistema, por fim, os sistemas foram integrados e ajustados.

### 4.1. Testes do Sistema de Acionamento do Atuador

A partir da validação do método de interrupção do vácuo, os testes do sistema de atuação foram iniciados. Para montagem do sistema de forma funcional foram necessários novos materiais. De início, uma nova peça 3D foi impressa, com mudanças nas dimensões, proporcionando melhorias no acoplamento com o atuador e com a própria mangueira. De acordo com a Figura 39:

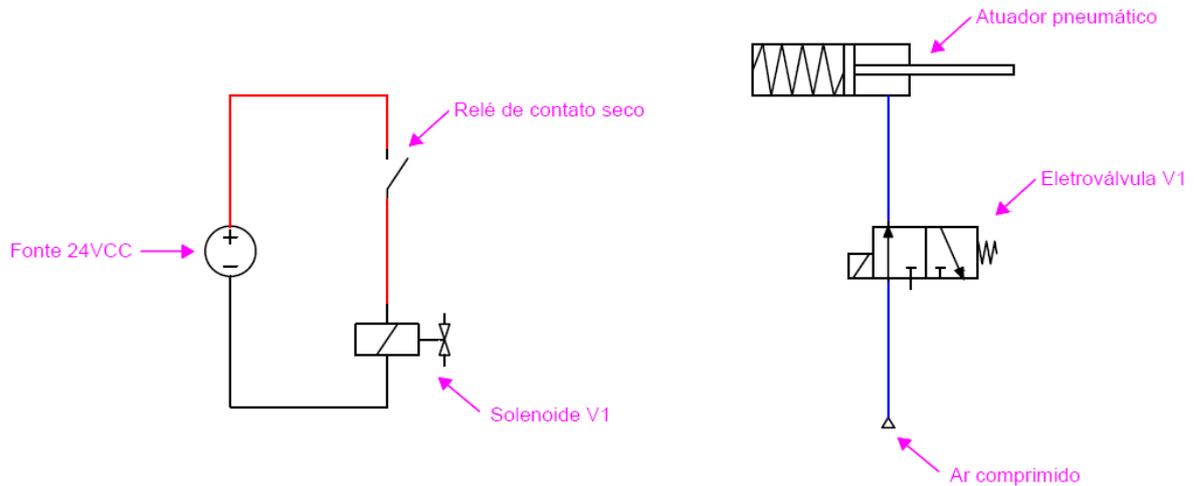
Figura 39: Nova peça 3D para acoplamento do atuador.



Fonte: Autoria própria

Para o controle do acionamento do atuador pneumático foi utilizada uma válvula solenoide pneumática, acionada com 24 VCC, via relé, de acordo com a Figura 40:

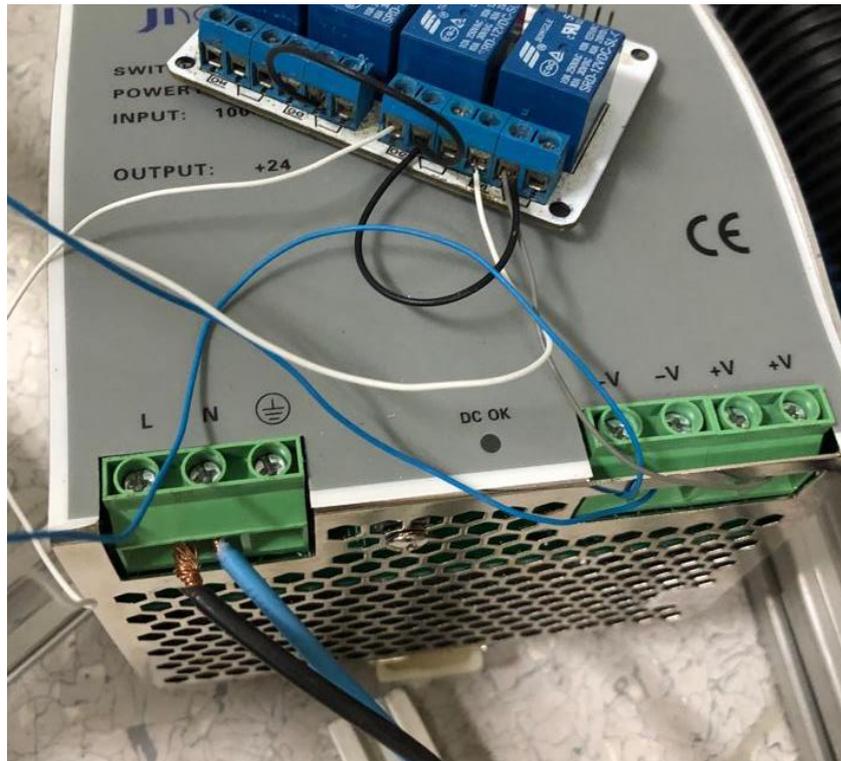
Figura 40: Circuitos elétrico e pneumático utilizados para os testes de atuação.



Fonte: Autoria própria

Assim, fazem-se necessários uma fonte de alimentação 24 VCC e um relé de contato seco, para a alimentação da válvula solenoide foi selecionada uma fonte, já disponível para testes, de 10 A (24VCC), sendo mais que suficiente para a aplicação; no caso do relé, foi escolhido um conjunto com 4 canais de relés com alimentação 5 V, devido a facilidade de ser encontrado e a utilização em aplicações semelhantes. É importante frisar que as válvulas solenoides devem ser normalmente fechadas, para que no caso de uma falta de energia ou problema na alimentação o sistema não se mantenha sugando. A montagem do relé e da fonte é mostrada na Figura 41:

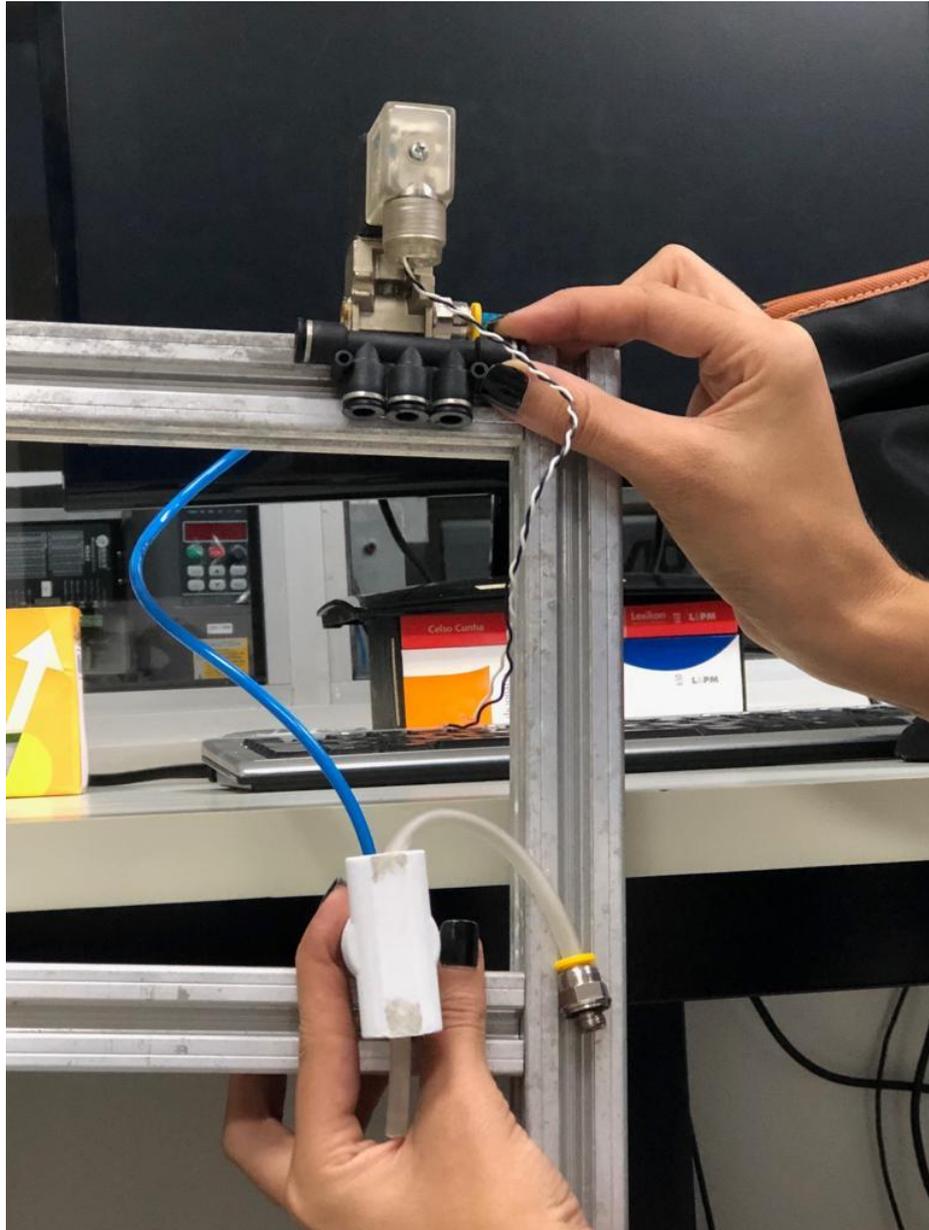
Figura 41: Fonte 24VCC e relé de contato seco.



Fonte: Autoria própria

A estrutura montada é demonstrada na Figura 42 abaixo:

Figura 42: Montagem do conjunto de atuação para os testes.



Fonte: Autoria própria

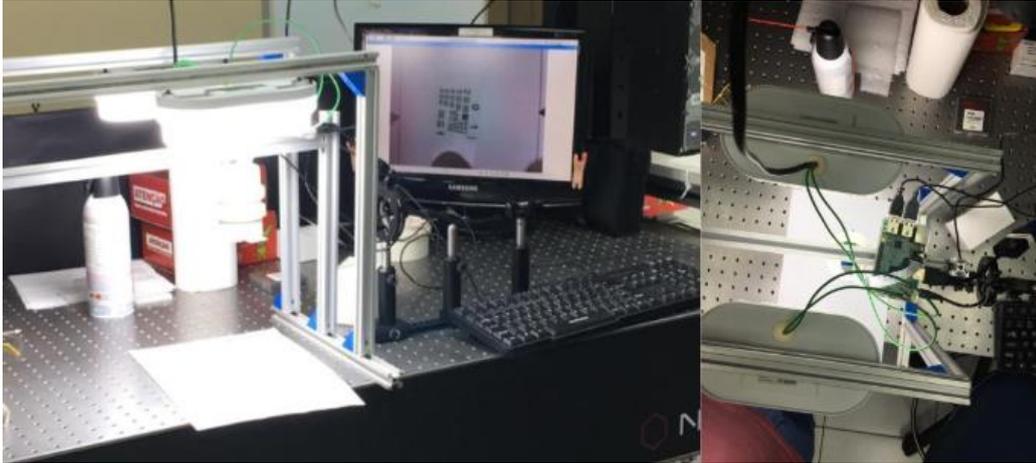
Para verificar o funcionamento adequado da atuação, a extrusora foi utilizada como sistema de vácuo na entrada das mangueiras e a presença ou ausência do mesmo foi identificada, validando o teste.

#### 4.2. Testes do Sistema de Aquisição de Imagens e Lentes

Os testes para validação da solução computacional e câmera proposta tem como fundamento avaliar as etapas do processo de aquisição de imagem, o processamento das imagens e o acionamento do sistema de atuadores. Os testes foram realizados em laboratório,

como demonstrado na Figura 43. O sistema utilizado compõe a iluminação projetada e o suporte para encaixe da câmera.

Figura 43: Esquema preparado para testes de aquisição de imagem e iluminação.



Fonte: Autoria própria.

Como o modelo de sensor de imagem disponível, modulo câmera V2 para *Raspberry*, não possuía compatibilidade para o tipo de lente escolhida para os testes, foi necessário a produção de um adaptador. O mesmo foi realizado por meio de impressora 3D com modelos encontrados na internet. A Figura 44 demonstra o resultado da peça impressa a esquerda, juntamente com adaptadores para ajuste de distância focal da lente, e a direita a peça posicionada sob o sensor de imagem com a lente acoplada.

Figura 44: Adaptador produzido para acoplar lente ao sensor.



Fonte: Autoria própria.

Para proteção da lente contra poeira e quaisquer outros elementos que pudessem prejudicá-la foi necessário também produzir um encapsulamento. A peça, feita com tampas de canos PVC e uma fina peça de vidro, serviria também para prender a câmera na estrutura

produzida para os testes. O encapsulamento de proteção e a peça posicionada na estrutura podem ser observados na Figura 45.

Figura 45: Encapsulamento produzido para proteção da câmera.

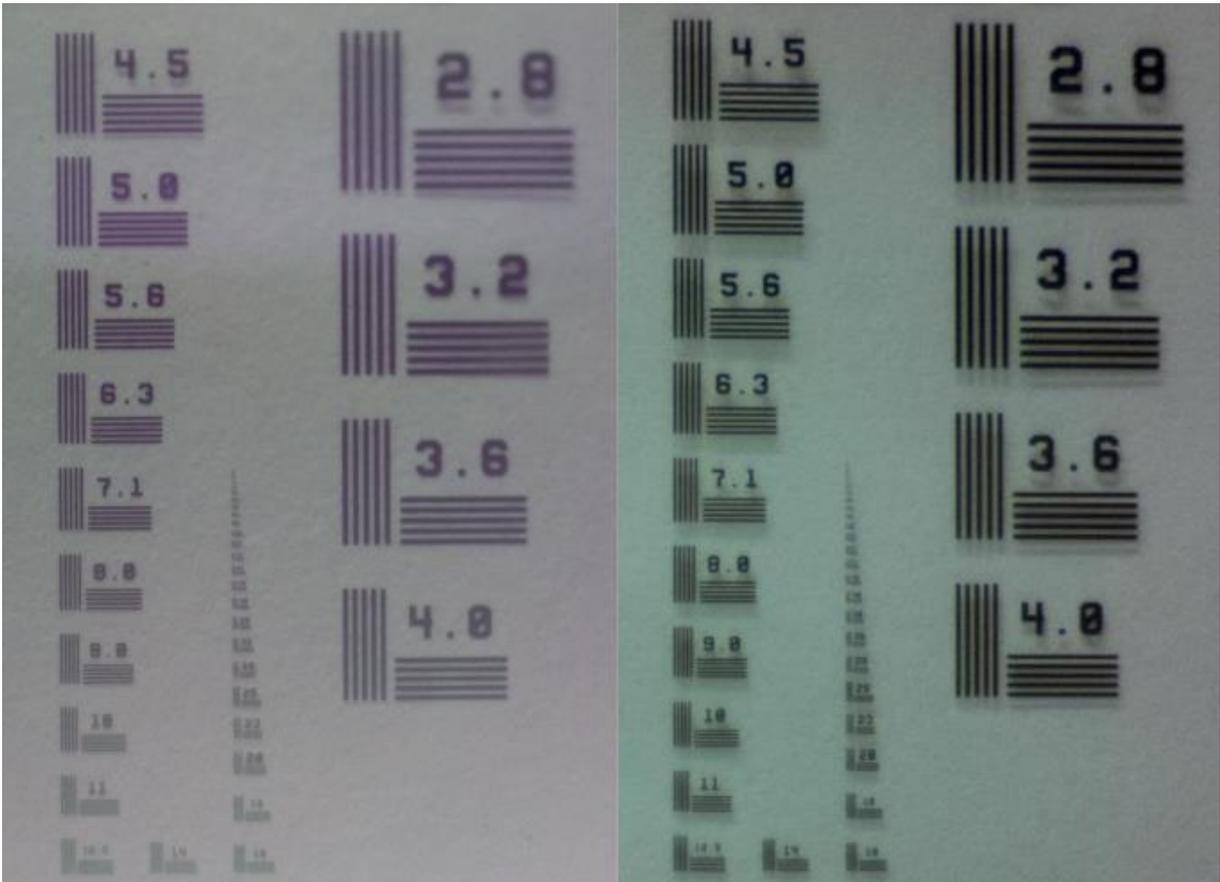


Fonte: Autoria própria.

Para os testes funcionais, inicialmente foi verificado a capacidade da câmera dimensionada em captar as frequências espaciais desejadas e se a iluminação correspondia às expectativas de projeto. Para isso foi utilizando um *target* disponível. A câmera foi configurada para a resolução máxima de 3280 x 2464. O resultado da captura pode ser observado na imagem no lado esquerdo da Figura 46. Pode-se observar que a frequência estipulada para a menor dimensão de impurezas, 5 lp/mm, aparece com ótimo contraste. Além verifica-se também que a iluminação se mostrou satisfatória.

Através dos dados levantados da Figura 46 pode-se concluir que a câmera aplicada não só cumpriu os requerimentos como atingiu resolução melhor. Devido a este fato, poderia ser feito o uso da redução da resolução aplicada câmera de 3280x2464 para 1640x1232, o que reduziria o tempo de processamento do algoritmo sem perder contraste de forma significativa na frequência de 5 lp/mm. A imagem no lado direito da Figura 46 demonstra a foto registrada para a menor configuração de resolução, comprovando bom contraste para a frequência espacial de 5 lp/mm.

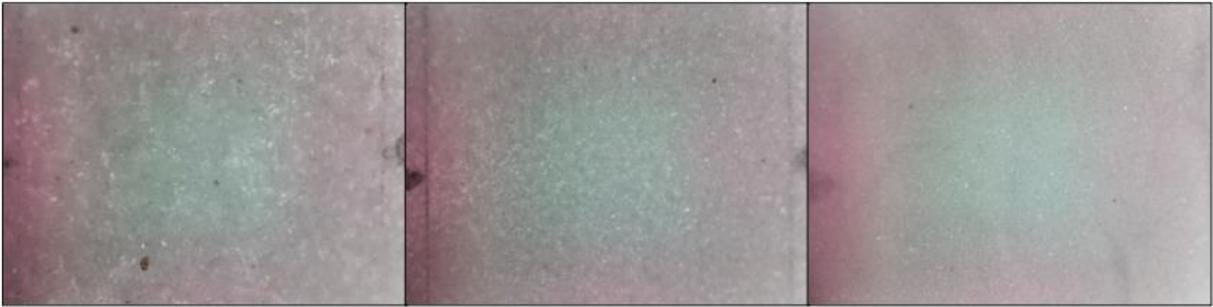
Figura 46: Imagem registrada do *target* de resolução, para resolução de 3280x2464 e 1640x1232 respectivamente.



Fonte: Autoria própria.

Com a validação do contraste requerido na aquisição das imagens, segue-se para a validação do registro de fotos com as impurezas sob as condições de inicialização da câmera. Os resultados dos testes estão demonstrados na Figura 47, onde a primeira imagem corresponde aos grãos de 1 mm a 0,7 mm, a segunda imagem aos grãos de 0,7 mm a 0,3 mm e a última aos grãos de 0,3 mm a 0,1 mm. os resultados se mostraram inicialmente insatisfatórios devida a baixo contraste gerado pela falta de ajustes na orientação da lente. Contudo ainda foi observado que as imagens apresentavam fortes regiões em tom de rosa, devido à natureza do sensor empregado.

Figura 47: Imagens obtidas dos três tipos de grãos para os testes iniciais.



Fonte: Autoria própria.

Com os devidos ajustes de posicionamento e orientação da lente, de modo que o contraste fosse relativamente bom e equivalente em grande parte da imagem, seguiram-se mais testes de aquisição. Nas novas imagens foi observado novamente a presença de áreas em rosa que poderiam dificultar o processo de identificação. Tal defeito pode ser observado na Figura 48, onde novamente estão representados os três tipos de grãos.

Figura 48: Testes preliminares demonstrando regiões escuras nas imagens.



Fonte: Autoria própria.

Foi constatado que o problema seria originário do processo de inicialização do sensor, uma vez que este, na configuração de fábrica, realiza ajustes de sensibilidade a brilho e exposição de luz. Removendo o ajuste de fábrica e selecionando configurações pré estabelecidas o problema pode ser solucionado, gerando imagens com boa qualidade e boa resolução, como demonstrados nas imagens dos diferentes tipos de da Figura 49, onde conclui-se que não há interferências te borrões e o contraste se mostra aceitável.

Figura 49: Imagens com boa qualidade após ajustes e configurações corretas.



Fonte: Autoria própria.

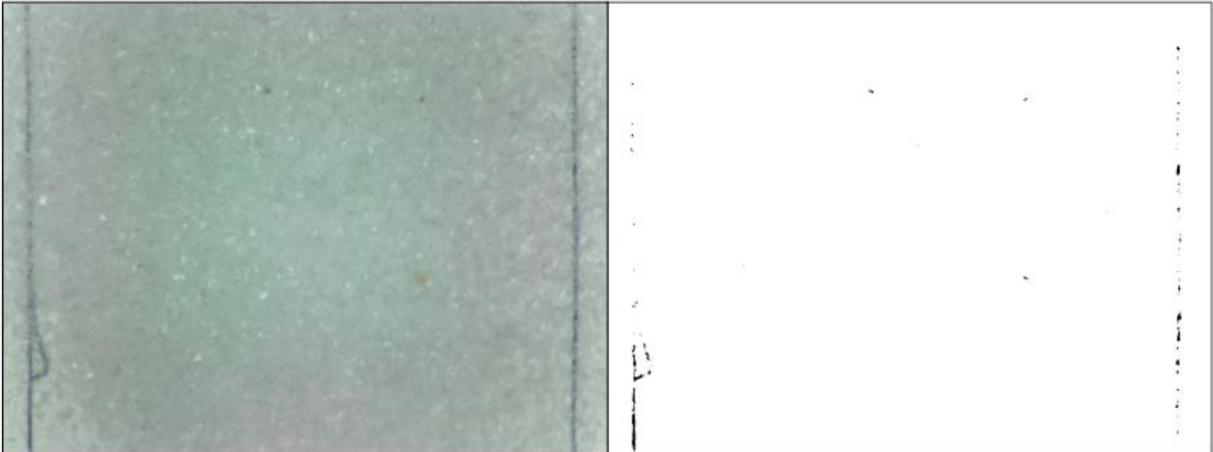
Com as fotos registradas com as condições esperadas e dimensionadas segue-se para os testes com foco no processamento de imagem. Inicialmente é verificado o funcionamento da aplicação da máscara de cores presente no algoritmo, processo esse feito de forma empírica. Para estes testes, não foram considerados falsos positivos, uma vez que se espera que a iluminação e o algoritmo sejam suficientes para evitar estes tipos de defeito. Os resultados da aplicação da máscara propriamente calibrada podem ser observados nas Figuras Figura 50, Figura 51 e Figura 52, para os grãos de 1 mm a 0,7 mm; 0,7 mm a 0,3 mm e 0,3 mm a 0,1 mm respectivamente. Nas figuras podem ser observadas linhas verticais em destaque, esta foram utilizadas para ajudar a alinhar o posicionamento dos objetos de prova durante os testes.

Figura 50: Aplicação de máscara sobre imagem de grãos de 1mm a 0,7mm.



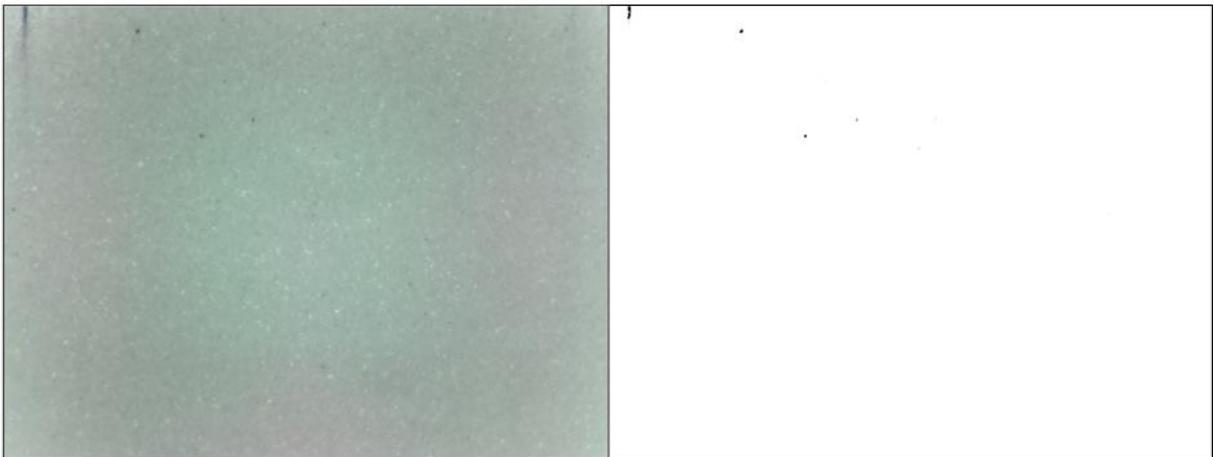
Fonte: Autoria própria.

Figura 51: Aplicação de máscara sobre imagem de grãos de 0,7mm a 0,3mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 52: Aplicação de máscara sobre imagem de grãos de 0,3mm a 0,1mm.



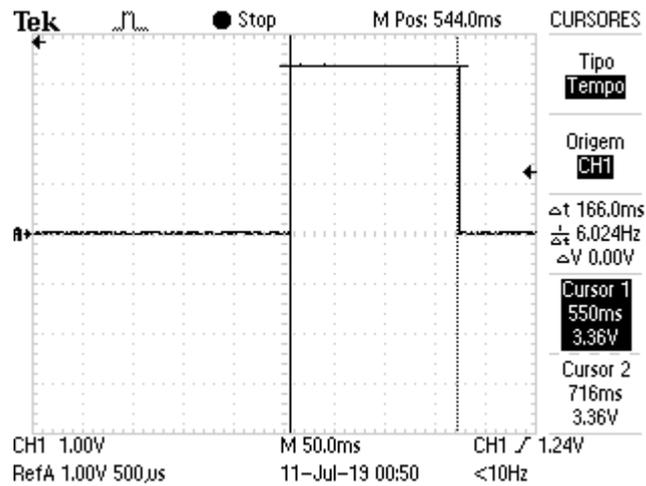
Fonte: Autoria própria.

Através dos resultados observados nas figuras Figura 50 a Figura 52, conclui-se que a máscara consegue separar, de forma satisfatória, as impurezas presentes na areia de quartzo. Uma vez, que as imagens resultantes da aplicação da máscara demonstram com clareza as impurezas observadas nas imagens originais.

### 4.3. Testes de Tempo de Execução

Ao ser validado a solução computacional, foram realizados testes para avaliar o tempo de execução das partes componentes do código, utilizando um osciloscópio e um pino GPIO que alterna para o nível lógico 1 ao se começar o teste, mantendo-se até o final, quando este retorna ao nível lógico 0. Primeiramente se avaliou o tempo de inicialização da câmera, constatando-se um tempo de 166 ms, como pode ser observado na Figura 53.

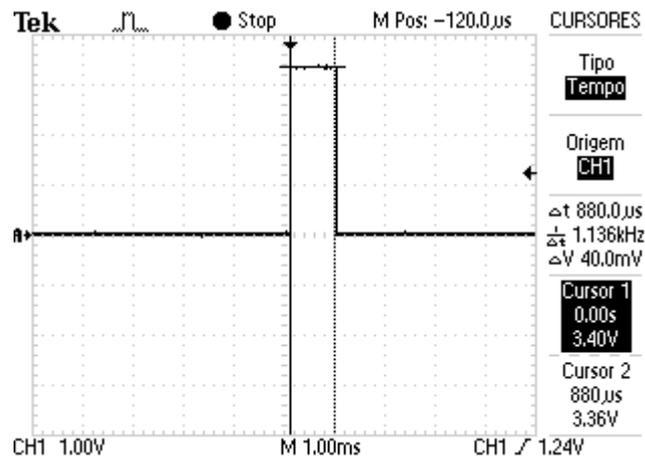
Figura 53: Tempo de inicialização da câmera.



Fonte: Autoria própria

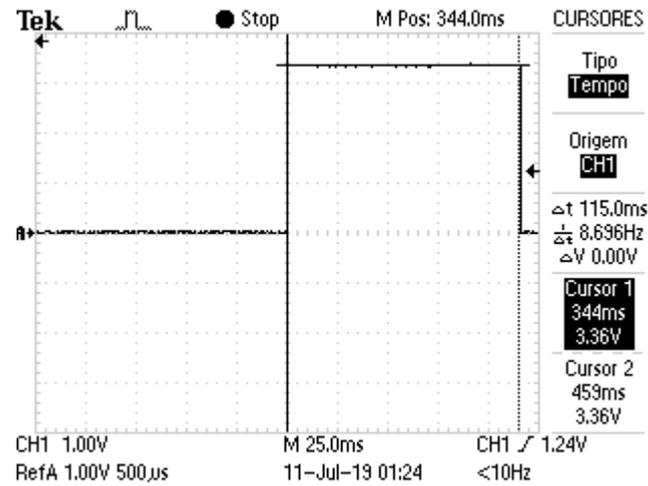
Em seguida, foram observados os tempos de configuração do balanço de branco da câmera, na Figura 54 e definição da resolução, na Figura 55, obtendo 880  $\mu$ s e 115 ms, respectivamente.

Figura 54: Tempo de configuração do balanço do branco da câmera.



Fonte: Autoria própria

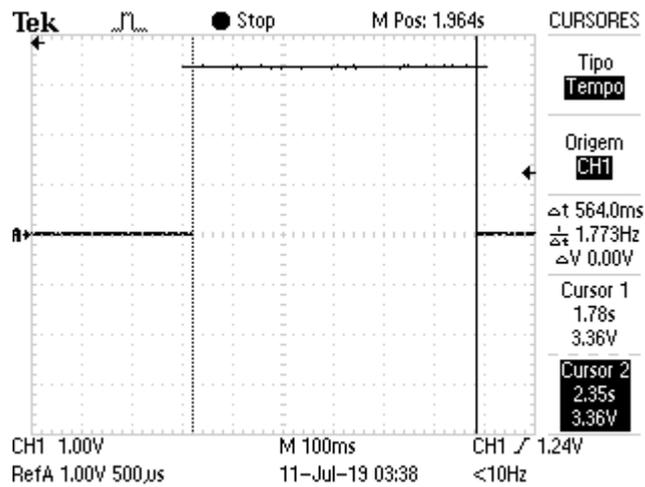
Figura 55: Tempo de configuração da resolução da câmera para 1664 X 1232.



Fonte: Autoria própria

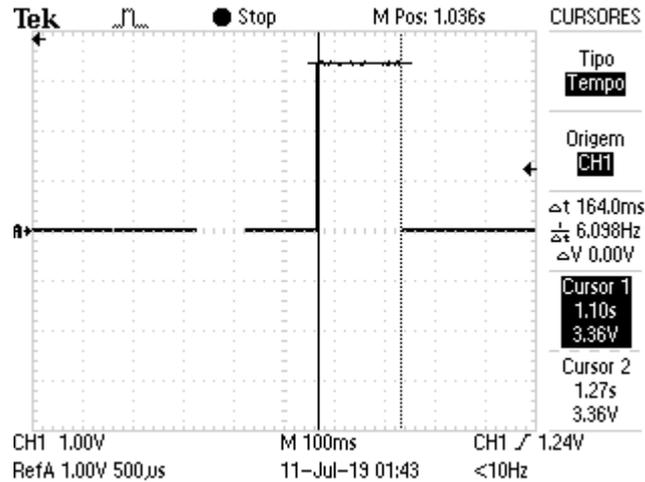
Depois de inicializada e configurada a câmera, o código passa a processar a imagem capturada, levando 564 ms para identificar e atuar ao utilizar a versão com *blur*, como visto na Figura 56, e 164 ms na versão sem, como observado na Figura 57.

Figura 56: Tempo de execução do código de processamento com *blur*.



Fonte: Autoria própria

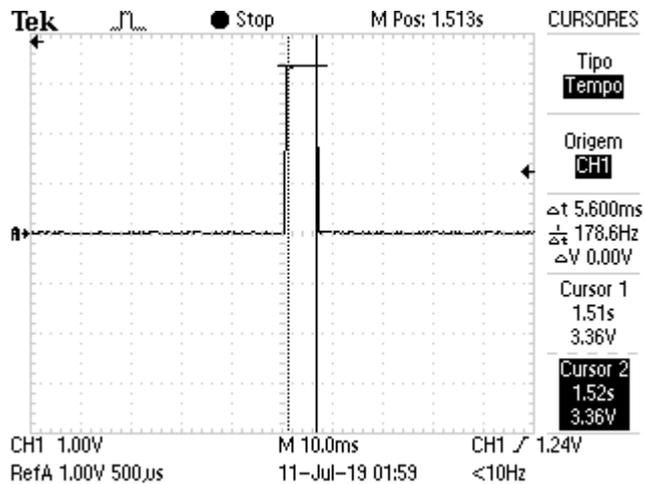
Figura 57: Tempo de execução do código de processamento sem *blur*.



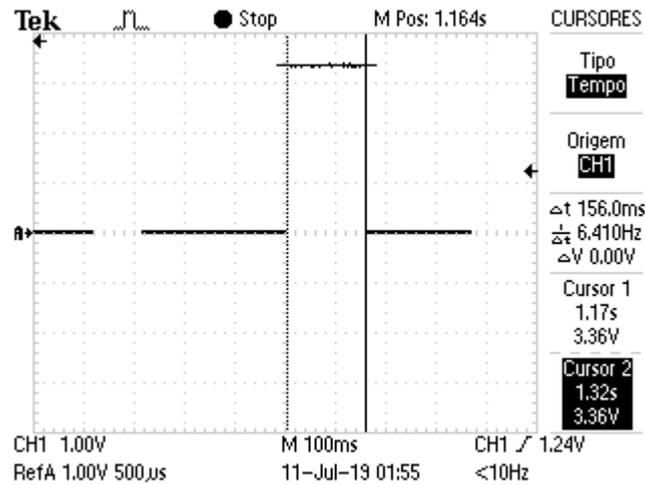
Fonte: Autoria própria

Por fim, foi-se avaliado detalhadamente os tempos de identificação, atrelados a função *cv.inrange* da Figura 58, concluído em 156 ms , e tempo de 5,6 ms necessário para ativação do setor correspondente e atuação, apresentado na Figura 59, estes contidos no tempo de processamento total mostrado anteriormente .

Figura 58: Tempo de identificação de setor de impureza para atuação.



Fonte: Autoria própria

Figura 59: Tempo de execução de *cv.inrange*.

Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos são condensados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Resultado dos testes do tempo de execução.

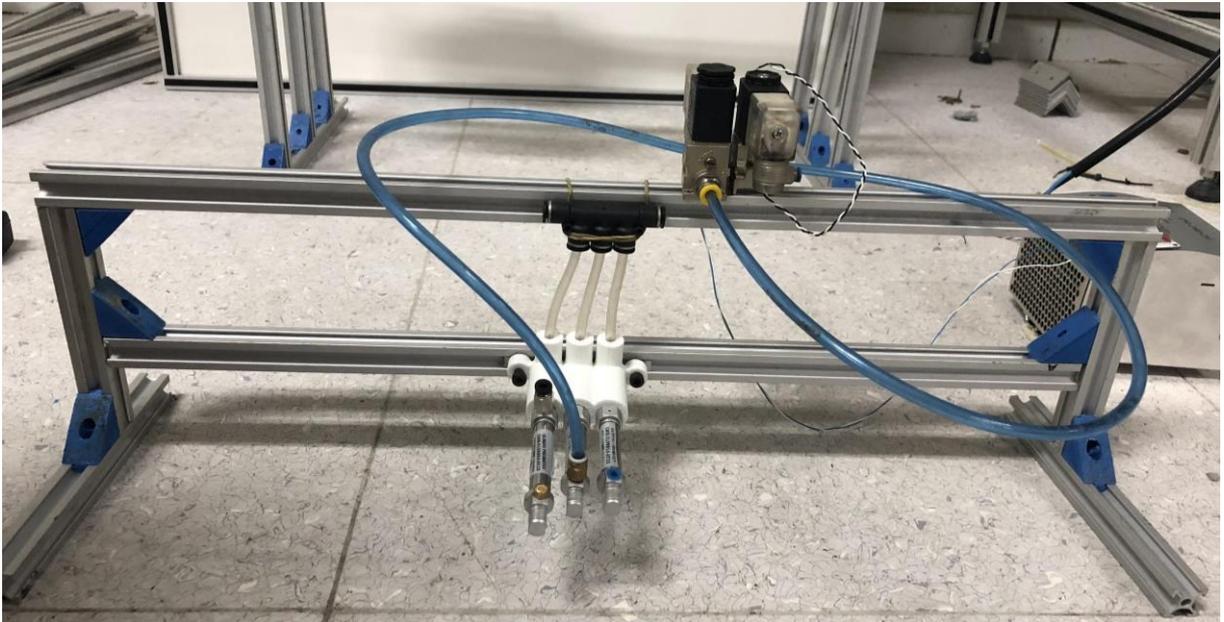
Procedimento	Tempo(ms)
Inicialização da Câmera	166
Configuração AWB	0,88
Configuração do modo de exposição	0,88
Configuração da resolução(1664X1232)	115
Captura Câmera ( <i>still port</i> )	516
Execução de <i>cv.inrange</i>	156
Ativação do setor correspondente	5,6
Execução da identificação e atuação	564

Fonte: Autoria própria

#### 4.4. Testes Finais

Com todos os sistemas validados foi possível montar a estrutura final para os testes. Uma nova peça 3D foi impressa para possibilitar o acoplamento de 3 pistões pneumáticos, equivalentes a um setor, como mostrado na Figura 60:

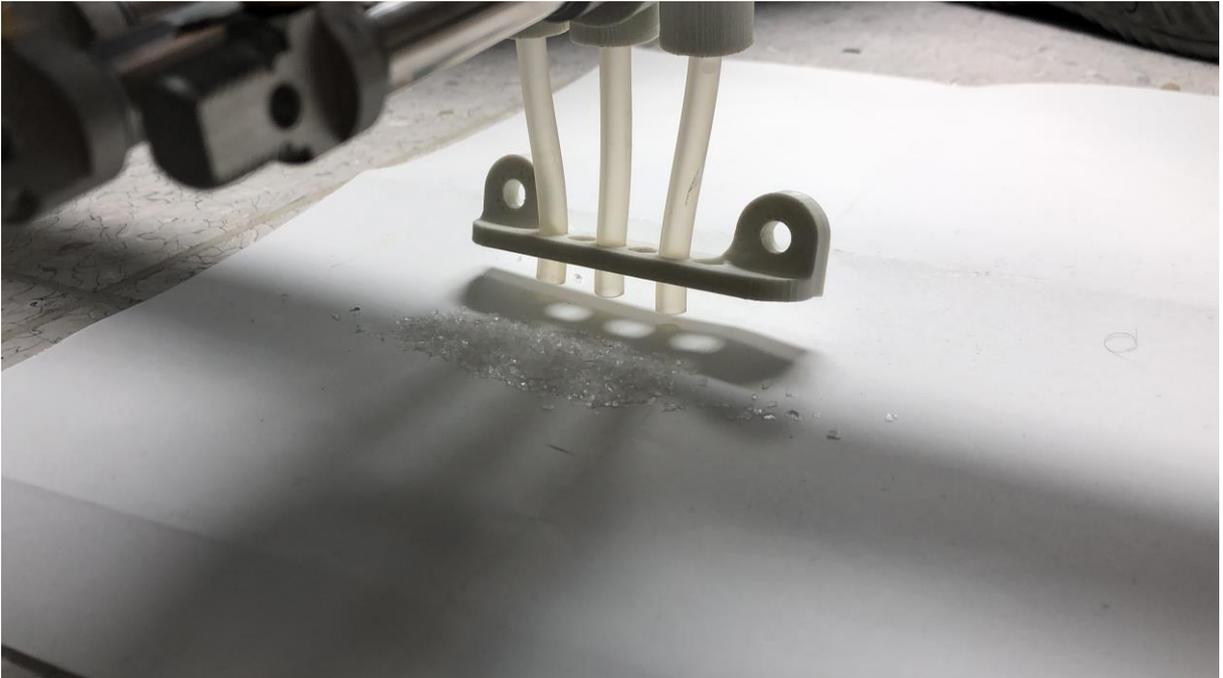
Figura 60: Estrutura montada com nova peça 3D para acoplamento dos atuadores.



Fonte: Autoria própria

Todo o sistema de acionamento foi replicado para os demais pistões, levando-se em consideração que: o mesmo conjunto de relés foi utilizado, visto que apenas 3 dos 4 canais seriam ocupados; para o comando dos canais do relé foi utilizado o microcontrolador responsável por processar a identificação da impureza; o terceiro pistão montado possui uma topologia diferente, é normalmente acionado, sendo necessária uma adaptação da rosca para que quando desativado permita o fluxo de vácuo pela mangueira; a terceira válvula solenoide utilizada é diferente das demais, sendo alterada apenas a topologia física da mesa. Ao final de todos os ajustes foi adicionada uma nova peça 3D para união das mangueiras de sucção na distância correta, de acordo com a Figura 61.

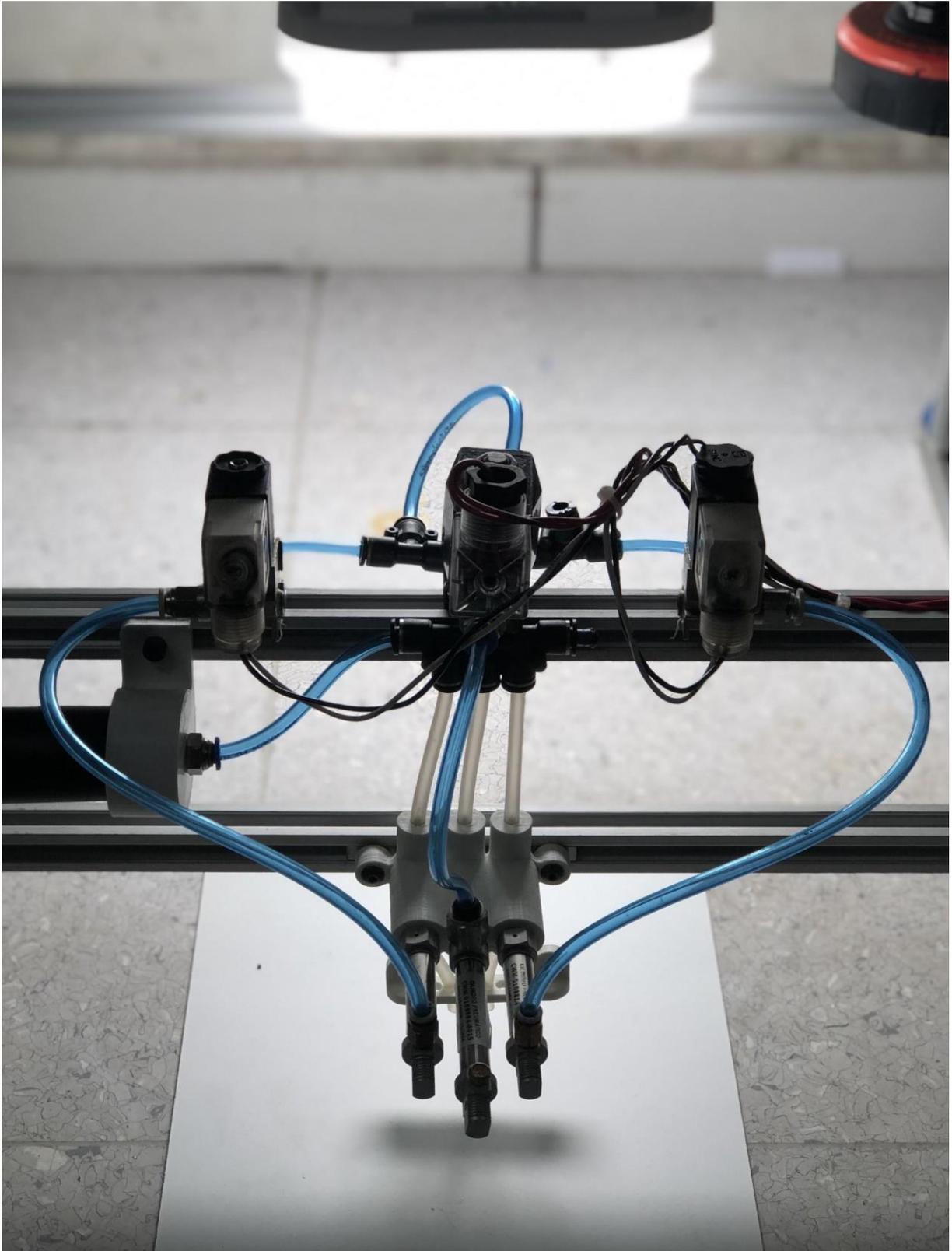
Figura 61: Estrutura montada com nova peça 3D para união das mangueiras de sucção.



Fonte: Autoria própria

Com o término de todos os testes foram obtidos resultados positivos quanto à atuação, as mangueiras foram capazes de sugar os grãos de areia de Quartzo sem entupimentos ou danos maiores e os pistões suportaram interromper o fluxo de grãos pela mangueira num tempo suficiente para a remoção completa da impureza, porém o pistão que possui uma topologia diferente foi posteriormente removido do protótipo, pois seu acionamento não libera espaço suficiente para a desobstrução das mangueiras, tornando-se um elemento imprevisível no protótipo. A estrutura final de atuação montada e testada é mostrada na Figura 62.

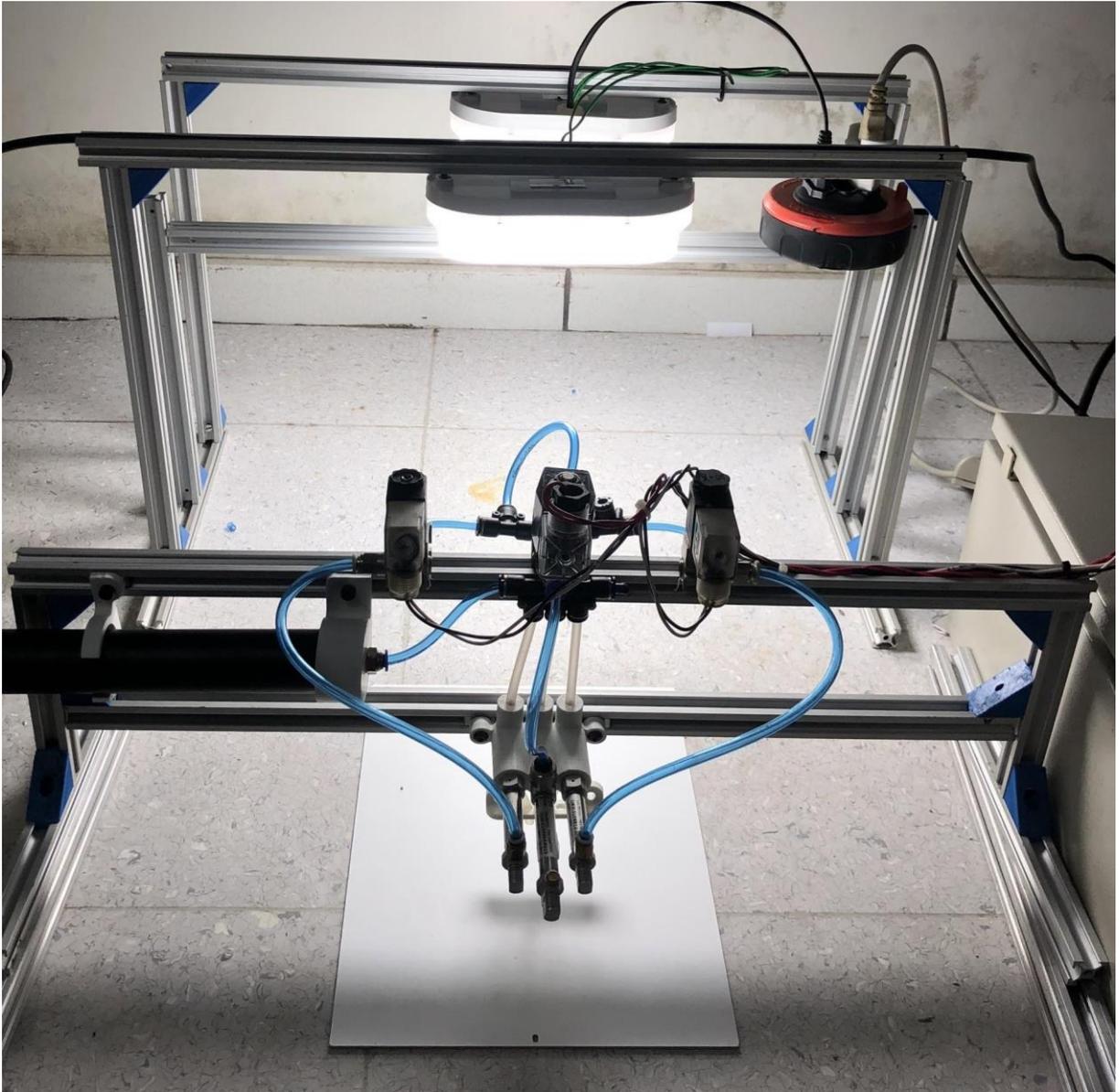
Figura 62: Estrutura final de atuação montada.



Fonte: Autoria própria

A estrutura completa do protótipo é mostrada a seguir na Figura 63:

Figura 63: Estrutura final de atuação montada.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados positivos obtidos com os testes, foram totalizados os custos do projeto, de acordo com a Tabela 4, a seguir:

Tabela 4: Custos do projeto.

Item	Qt.	Custo Individual	Custo	Frete
Arducam módulo C IMX219	10	237,28	2.372,80	118.84
25.0mm Blue Series M12 Imaging Lens	10	376,32	3.763,20	380.25

Single Board Raspberry Pi 3 B	10	138,64	1.386,40	347.28
Cabo Flex 1 m para câmera Raspberry Pi	10	15,65	156,50	
Barra de LEDs 50 cm 9 W	2	11,98	23,96	17.9
Atuador Pneumático	30	150,00	4.500,00	20
Usinagem de peça para o esmagamento da mangueira	1kg	100,00	100,00	
Mangueira de silicone	2(metros)	20,00	40,00	
Mangueiras pneumáticas	5(metros)	8,00	40,00	
Conexão pneumática tipo T	50	3,7	185,00	
Válvula Solenoide	30	60,00	1.800,00	
Módulo relé 12V 5 canais	10	30,00	300,00	
Fonte Chaveada 12 V 20 A	2	59,90	119,80	80.99
Conversor <i>Step Down</i> 5 V 3 A	10	22,90	229,00	53.3
Perfil Sobrepor Slim Fita Led C/ Difusor Acrílico Lum22 50cm	2	35	70,00	61.9
Perfil Estrutural em Alumínio 30x30 (60cm)	5	40	200,00	
Total	-	-	15.286,66	1.080,46

Fonte: Autoria própria

Por fim, o custo total do projeto para implementação ao longo de toda a largura da esteira, levando em consideração os fretes, é R\$16.367,12. Sendo esse um valor considerado baixo em comparação com produtos existentes que custam em torno de R\$150.000,00, próximo de dez vezes mais que o valor final do projeto.

## 5. Conclusão

O sistema de remoção de impurezas foi dimensionado utilizando a sucção como forma de remoção, um sistema ON/OFF como sistema de localização da posição de atuação e um pistão pneumático como sistema de interrupção do vácuo. Para o acionamento do pistão via ar comprimido foi utilizada uma válvula solenoide 24VCC, que por sua vez, utilizou um relé de contato seco para o seu acionamento. Além disso, foram utilizadas uma fonte de alimentação 24 VCC para a alimentação das válvulas. O comando das válvulas foi feito através dos relés, com um microcontrolador.

O dimensionamento do sistema de aquisição de imagem se fez por classificação das necessidades principais da aplicação com foco em garantir a reprodução fiel das imagens requeridas para a identificação das impurezas. A câmera projetada, constituída de um sensor de imagem de baixo custo em conjunto com uma lente objetiva, operando em conjunto com a iluminação correta selecionada, foi capaz de obter imagens com níveis aceitáveis de contraste.

O algoritmo, desenvolvido em Python com o auxílio da biblioteca *OpenCV*, baseado na caracterização por seleção de pixels por saturação de cores, foi capaz de identificar a presença das impurezas de diferentes dimensões. O acionamento é dado por seleção de setores com base nas áreas de atuação dos atuadores dimensionados.

O protótipo construído foi capaz de executar as duas funções para que foi projetado, inicialmente identificar as impurezas na areia de quartzo e, através da localização, definir qual o melhor atuador a ser acionado para a remoção de cada impureza, e posteriormente remover a impureza através do acionamento do atuador na posição ideal, proporcionando a sucção da mesma.

Diversas possibilidades ainda não foram exploradas para a solução, como a troca do tipo das mangueiras por opções com materiais mais resistentes à abrasão, visto que o quartzo é um mineral altamente abrasivo, ou até a utilização da válvula mangote, potencialmente ideal para a aplicação. Também seria interessante realizar testes em ambiente relevante, onde seria possível avaliar o impacto dos sólidos em suspensão no desempenho do protótipo, e avaliar a sua eficiência.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, “INFORMAÇÕES SOBRE A ECONOMIA MINERAL BRASILEIRA 2015,” Outubro 2015. [Online]. Available: <http://portaldamineracao.com.br/>. [Acesso em 18 Maio 2019].
- [2] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, “SUMÁRIO MINERAL,” 2015. [Online]. Available: <http://www.dnpm.gov.br/>. [Acesso em 18 Maio 2019].
- [3] M. F. M. d. Santos, “Avaliação de jazidas brasileiras de quartzo mais adequadas para uso em sílica vítrea,” Campinas, 2014.
- [4] E. Lobato, “A MINERAÇÃO BRASILEIRA PRODUTO 27 QUARTZO Relatório Técnico 37 Perfil do Quartzo,” 2009.
- [5] J. M. Coelho, “PRODUTO 44 Areia Industrial Relatório Técnico 44,” 2010.
- [6] PKO, “Quartzo Artificial Stone,” [Online]. Available: <https://site.pkodobrasil.com.br/>. [Acesso em Julho 2019].
- [7] Edmund optics, “Guia de Recursos para Processamento de Imagens - Resolução,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [8] N. A. d. SANTOS, V. d. C. R. d. M. FRANCA e P. A. d. A. ALVES, Diferenças na detecção de frequências espaciais e radiais em crianças. Psicologia: Teoria e Pesquisa, vol. 4, Brasília, 2009, pp. 581-587.
- [9] Digital Scanning & Microfilm Equipment, “DS & ME - Resolution Test Targets for Scanners & Micrographic Cameras,” [Online]. Available: <https://www.microfilm.net.au/>. [Acesso em Julho 2019].
- [10] Edmund optics, “Guia de Recursos para Processamento de Imagens - Função de Transferência de Modulação(MTF) e Curvas de MTF,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [11] Edmund optics, “Pixel Sizes and Optics,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [12] Edmund optics, “Guia de Recursos para Processamento de Imagens - Contraste,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [13] OpenCV, “Tutorial de Introdução ao OpenCV-Python,” [Online]. Available: <https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/>. [Acesso em Julho 2019].

- [14] What Digital Camera, “Filtro Bayer: o que é e como funciona?,” Julho 2019. [Online]. Available: <https://www.whatdigitalcamera.com/>.
- [15] Citisistems, “Válvula Solenoide,” [Online]. Available: <https://www.citisystems.com.br/>. [Acesso em Abril 2019].
- [16] MTI Brasil, “Guia sobre Válvula Esfera,” [Online]. Available: <https://www.mtibrasil.com.br/>. [Acesso em Abril 2019].
- [17] Direct Industry, “Válvula Mangote,” [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/>. [Acesso em Abril 2019].
- [18] Inventive Madness , “DIY How to make a sanitary food valve (pinch valve),” Youtube, 2018.
- [19] MTI Brasil, “Cilindro Pneumático,” [Online]. Available: <https://www.mtibrasil.com.br/>. [Acesso em Maio 2019].
- [20] Edmund optics, “Guia de Recursos para Processamento de Imagens - Iluminação,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [21] Edmund optics, “Técnicas de Iluminação Polarizada Bem Sucedidas,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [22] Edmund optics, “M12 lenses,” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [23] Edmund optics, “Blue series M12 imaging lenses,” [Online]. Available: : <https://www.edmundoptics.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [24] Protocentral, “Raspberry Pi & Pi Camera Module V2,” [Online]. Available: <https://www.protocentral.com/>. [Acesso em Julho 2019].
- [25] Pi Camera, “Pi Camera 1.13 Documentation - Camera Hardware,” [Online]. Available: <https://picamera.readthedocs.io/>. [Acesso em Julho 2019].