

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

THALIS ROCHA PESTANA

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO MOBILE PARA
USO DE CELULAR COMO DISPOSITIVO RECEPTOR EM
SISTEMA DE COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL**

VITÓRIA
2022

THALIS ROCHA PESTANA

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO MOBILE PARA USO DE
CELULAR COMO DISPOSITIVO RECEPTOR EM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Thalis Rocha Pestana**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva

Coorientador: Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha

VITÓRIA
2022

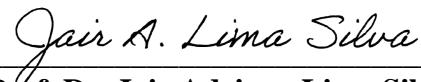
THALIS ROCHA PESTANA

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO MOBILE PARA USO DE
CELULAR COMO DISPOSITIVO RECEPTOR EM SISTEMA DE
COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL**

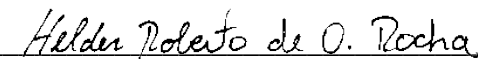
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Thalis Rocha Pestana**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 15 de agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



Me. Higor Araújo Fim Camporez
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. Dr. Patrick Marques Ciarelli
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

A minha mãe e aos meus amigos pelo apoio irrestrito.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha mãe, Arlete, por ser meu exemplo de fibra, força e persistência e pelo apoio incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica. Obrigado pelas interrupções e sorrisos desprezenciosos que inúmeras vezes me trouxeram esperança e lucidez para seguir em frente.

Agradeço também aos meus amigos pelos diversos momentos de descontração e desabafos, momentos esses de fundamental importância para que minha trajetória fosse mais agradável.

Agradeço aos professores Jair e Helder por terem aceitado o desafio de me orientar e por todo o suporte concedido para que este trabalho pudesse se concretizar. Ao professor Patrick que contribuiu indiretamente na realização deste trabalho, através dos conteúdos ministrados na disciplina de Processamento Digital de Imagens.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Espírito Santo pelo ensino público, gratuito e de qualidade. Guardarei eternamente, com muito carinho, em meu coração todos os ensinamentos e experiências vividas nesta instituição. Agradeço também a todo o corpo de funcionários do departamento de Engenharia Elétrica que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

Atualmente, diversos infortúnios como a: lotação do espectro de radiofrequência e limitações dos sistemas de comunicação *wireless* amplamente adotados, tornam necessária a implementação de sistemas de comunicação mais sustentáveis dos pontos de vista ambiental e econômico. A Comunicação via Luz Visível (do inglês, *Visible Light Communication - VLC*) se apresenta como uma promissora alternativa, a fim de mitigar os problemas supracitados. Nesse sentido, os *smartphones* mostram-se de fundamental importância para a transição dos sistemas de comunicação, tendo em vista sua ampla difusão e popularidade crescente. O presente projeto de graduação descreve o desenvolvimento de uma aplicação *mobile* para a recepção de dados em um enlace *VLC*, mais especificamente um enlace *OCC* (do inglês, *Optical Camera Communication*). Para tal, foram utilizados os sensores de imagem *CMOS* (do inglês, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), presentes na câmera de um *smartphone*. As informações foram recebidas e decodificadas por intermédio do mecanismo de *Rolling Shutter* aplicado para a formação de imagens. Por fim, obteve-se um aplicativo *mobile* capaz de decodificar os dados recebidos e disponibilizá-los ao usuário final.

Palavras-chave: Comunicação via Luz Visível. *VLC*. Aplicativo. Câmera. *Rolling Shutter*. *Optical Camera Communication*. *CMOS*.

ABSTRACT

Currently, several misfortunes such as the: climate crisis, the overcrowding of the radio frequency spectrum and the limitations of widely adopted wireless communication systems, make it necessary to implement more sustainable communication systems from an environmental and economic point of view. Visible Light Communication presents itself as a promising alternative, in order to fade, sometimes mitigate the aforementioned problems and smartphones are shown to be of fundamental importance for the transition of communication systems, in view of its wide diffusion and growing popularity. This undergraduation project describes the development of a mobile application for receiving data on a VLC link, more specifically an OCC (Optical Camera Communication) link. For this, CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) image sensors were used, present in the camera of a smartphone. The information was received and decoded through the Rolling Shutter mechanism applied for the formation of images. Finally, we obtained a mobile application capable of decoding the received data and making them available to the end user.

Keywords: Visible Light Communication. VLC. Application. Camera. *Rolling Shutter*. Optical Camera Communication. *OCC*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração NLOS.....	16
Figura 2 – Processo de limiarização e subtração de <i>background</i>	17
Figura 3 – <i>Frames</i> contendo os três estados <i>OFF</i> , <i>Half-ON</i> , <i>ON</i>	17
Figura 4 – Modulação UPSOOK.....	18
Figura 5: Esquema geral do projeto.....	19
Figura 6 – <i>Setup</i> de transmissão.	20
Figura 7 – <i>Smartphone</i> utilizado para recepção.	20
Figura 8 – <i>Setup</i> Experimental.	21
Figura 9 – Lente colimadora.....	21
Figura 10 – Configuração para testes.	22
Figura 11 – Espectro Eletromagnético	23
Figura 12 – Sistema heliógrafo simples e duplo.....	25
Figura 13 – Representação esquemática do fotofone.	26
Figura 14 – Aplicação do sistema VLC em ambiente interno.....	28
Figura 15 – Sistema de Transporte Inteligente.	29
Figura 16 – Diodo emissor de luz.....	30
Figura 17 – Espalhamento sofrido pela luz.	30
Figura 18 – Aplicação de lente colimadora no feixe ilustrado na Figura 17.....	31
Figura 19 – Sensores de Imagem CMOS, à esquerda, e CCD, à direita.	32
Figura 20 – Esquemático do funcionamento de um sensor de imagem CMOS.....	33
Figura 21 – Mecanismo de <i>Rolling Shutter</i>	34
Figura 22 – Processo de varredura: ideal e real.....	35
Figura 23 – Vizinhança 3 x 3 ao redor de um ponto (x,y) em uma imagem no domínio espacial.	36
Figura 24 – Convolução de impulso unitário 2D com filtro 3x3 2D.....	38
Figura 25 – (a) imagem de raio-x de placa de circuito corrompida por ruído sal e pimenta; (b) resultado da aplicação de filtro de média 3 x 3 na imagem em (a); (c) resultado da aplicação de um filtro de mediana 3 x 3 em (a).....	40
Figura 26 – Função de limiarização.....	41
Figura 27 – Histograma que pode ser dividido por limiar global.....	41

Figura 28 – (a) Imagem livre de ruído; (b) Imagem com ruído gaussiano de desvio padrão de 10 níveis de intensidade; (c) Imagem com ruído gaussiano de desvio padrão de 50 níveis de intensidade; (d), (e) e (f) seus respectivos histogramas.	42
Figura 29 – (a) Imagem com ruído gaussiano; (b) Rampa de intensidade; (c) Produto de (a) e (b); (d), (e) e (f) seus respectivos histogramas.	43
Figura 30 – Representação binária utilizando mecanismo de <i>Rolling Shutter</i>	45
Figura 31 – Representação binária intercalando três bits em nível alto.	46
Figura 32 – Histograma da imagem.	47
Figura 33 – Região de interesse para limiarização.	47
Figura 34 – Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 45x45.	48
Figura 35 – Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança 45x45 e SNR superior.	49
Figura 36 - Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 90x90.	49
Figura 37 – Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 90x90 e SNR superior.	50
Figura 38 - Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 120x120.	50
Figura 39 - Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 120x120 e SNR superior.	51
Figura 40 – Resultados das limiarizações global e local.	51
Figura 41 – Algoritmo de definição de início e fim das franjas obtidas por meio do mecanismo de varredura da câmera.	54
Figura 42 – (Pacotes recuperados/ Frame) x distância.	60
Figura 43 – Mecanismo de <i>Rolling Shutter</i> registrado para diferentes frequências de transmissão.	62
Figura 44 – (Pacotes Recuperados/Frame) x Frequência.	64
Figura 45 – (Pacotes Recuperados/Frame) x Frequência para número fixo de pacotes.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos de processamento para o mesmo conjunto de pacotes transmitido.....	57
Tabela 2 – Resultados obtidos para diferentes distâncias entre transmissor e receptor.	59
Tabela 3 – Resultados obtidos para diferentes frequências de transmissão.	63
Tabela 4 – Porcentagem de pacotes recuperados em relação aos enviados.	63
Tabela 5 – Resultados obtidos para diferentes frequências de transmissão e 7500 pacotes transmitidos.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VLC	Visible Light Communication
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
LED	<i>Light Emitter Diode</i>
EMI	<i>Eletromagnetic Interference</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
FPS	<i>Frames per Second</i>
OCC	<i>Optical Camera Communication</i>
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
FSO	<i>Free-Space</i>
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
RF	Radiofrequência
OOK	<i>On-Off Keying</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CCD	<i>Charged Couple Device</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
LabTel	Laboratório de Telecomunicações da Universidade Federal do Espírito Santo
NLOS	<i>Non-line-of-Sight</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação e Contextualização	13
1.2	Objetivos Geral e Específicos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	Trabalhos Relacionados	16
1.4	Metodologia	18
1.4.1	Métodos	18
1.4.2	Materiais	19
1.5	Contribuições	22
1.6	Organização do Trabalho	22
2	COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL	23
2.1	Visão Geral	23
2.2	Histórico	24
2.3	Aplicações	27
2.4	Diodo Emissor de Luz Branca	29
2.5	Lentes Colimadoras	30
3	TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS	32
3.1	Sensores de Imagem	32
3.2	Rolling Shutter	33
3.3	Fundamentos da Transformação de Intensidades e Filtragem Espacial	35
3.4	Preenchimento com Zeros	37
3.5	Técnicas de Filtragem Espacial	38
3.5.1	Filtro de média	38
3.5.2	Filtro de Mediana	39
3.6	Limiarização	40
3.6.1	Fundamentos da Limiarização	41
3.6.2	Ruído na limiarização de imagens	42
3.6.3	Iluminância e Refletância na Limiarização de Imagens	43
3.6.4	Limiarização Local	44

4	SISTEMA DESENVOLVIDO	45
4.1	Caracterização do Sinal	45
4.2	Definição da Vizinhança de Limiarização e Região de interesse	47
4.3	Filtros de Média e Mediana para Redução de Ruído.....	52
4.4	Técnicas de Decodificação Implementadas	52
4.5	Subamostragem	56
5	RESULTADOS.....	58
5.1	Desempenho em Função da Distância	58
5.2	Desempenho em Função da Frequência de Transmissão	61
5.2.1	Análise em Função da Frequência para um mesmo Intervalo de Tempo.....	62
5.2.2	Análise em função da Frequência para um mesmo Número de Pacotes Transmitidos	64
6	CONCLUSÃO E PROJETOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Contextualização

No momento presente, o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis pautadas na ética ambiental, social e econômica tem se tornado um tópico de imprescindível importância. É notório o fato dos LEDs (do inglês, *Light Emitter Diodes*) serem eletricamente mais eficientes que lâmpadas incandescentes e fluorescentes convencionais, além de apresentarem maior eficiência luminosa, durabilidade, segurança e preço acessível (VIEIRA, A. B. et al., 2017). Conseqüentemente, configuram fontes luminosas mais sustentáveis, do ponto de vista ecológico e financeiro.

Uma característica fundamental desses dispositivos é a possibilidade de controle da intensidade luminosa, permitindo a modulação em altas frequências, característica essa que possibilita a utilização dos LEDs tanto para iluminação de ambientes quanto para a transmissão de informações, potencializando a economia de energia decorrente de sua aplicação. Estima-se que a indústria de Telecomunicações é responsável por aproximadamente 4% das emissões globais de CO₂ (ISMAIL, M., 2011). Nesse preâmbulo, a Comunicação via Luz Visível tem demonstrado grande potencial, exibindo uma redução de até 75% no consumo de energia elétrica em sistemas híbridos (Wi-Fi e VLC), quando comparados a sistemas puramente Wi-Fi, nas redes domésticas (ABDALLAH, K.; SIHUA, S., 2018).

Dentre as diversas aplicações dos enlaces VLC, pode-se destacar sua aplicação na medicina. Em um ambiente hospitalar encontram-se diversos equipamentos eletrônicos utilizados direta ou indiretamente no tratamento de pacientes acometidos de alguma enfermidade que os obrigue a permanecer em observação. Os sistemas de comunicação *wireless* convencionais, comumente empregados na atualidade como o Wi-Fi, apresentam alguns problemas, particularmente em hospitais, como por exemplo a interferência eletromagnética (EMI, do inglês *Eletromagnetic Interference*) (KLEIN, A. A.; DJAIANI, G.N., 2003). Equipamentos de radiologia, lâmpadas fluorescentes, alarmes de incêndio e até mesmo computadores são exemplos de fontes de radiofrequência. Em situações nas quais é necessária a monitorização constante de um paciente, as conseqüências de possíveis interferências podem ser catastróficas, resultando, no pior dos casos, no mau funcionamento de um equipamento mantenedor de vida e, por conseqüência, na

morte evitável de um paciente. Nesse contexto, enlaces VLC mostram-se de grande valia, visto a utilização do espectro da luz visível e consequente ausência de EMI.

Outro ponto importante que corrobora com a implementação dos sistemas VLC se refere ao congestionamento do espectro de radiofrequência (MOHAMED, K.; MOHAMED, A.; KHALID, Q., 2016). A crescente demanda por vídeos, serviços de *streaming*, redes sociais e aplicativos de mensagens, somada ao aumento da quantidade de dispositivos móveis ao redor do mundo ocasiona a superlotação da faixa do espectro eletromagnético destinada ao Wi-Fi (VIEIRA, A. B. et al., 2017). Esse fenômeno pode ser agravado com a chegada da Indústria 4.0 e a gradativa implementação da Internet das Coisas (do inglês, *IoT – Internet of Things*), aumentando radicalmente o número de dispositivos conectados. Os sistemas VLC apresentam amplo espectro devido a utilização da luz, podendo reduzir a lotação da faixa (do inglês, *Wi-Fi Spectrum Crunch*).

Os *smartphones* são pontos chave no planejamento e expansão dos sistemas VLC. Alguns estudos revelam o potencial dos sensores de imagem CMOS (do inglês, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor - CMOS*) presentes nas câmeras da grande maioria dos *smartphones* da nova geração (CHOW, C. W.; CHEN, C. Y.; CHEN, S. H., 2015). O uso desse tipo de sensor implica em um processo de varredura da imagem em linhas sequenciais, processo esse conhecido como *Rolling Shutter* (em tradução livre: obturador de rolamento), permitindo a transmissão de dados a uma taxa de transmissão superior a taxa de quadros (do inglês, *FPS - Frames per second*) da câmera (DANAKIS, C. et al, 2012).

Vale ressaltar a presença massiva dos dispositivos móveis na sociedade atualmente. Segundo dados do portal de informações estatísticas *STATISTA*, estima-se que atualmente existam 6,567 bilhões de usuários de *smartphones* em todo o mundo, para uma população global de, aproximadamente, 7,9 bilhões de pessoas (WORLDMETER, 2022), ou seja, 83,13% da população mundial faz uso de um aparelho celular. Além disso, ainda há potencial para expansão de usuários visto que países populosos como a China e a Índia apresentam uma taxa potencial de penetração de 70%, possibilitando uma boa margem para crescimento (STATISTA, 2022). Esses dados reforçam a relevância, já amplamente reconhecida, dos *smartphones* nos sistemas modernos de comunicação.

Considerando toda a conjuntura, o presente trabalho objetiva o desenvolvimento de uma aplicação *Android* para a recepção e posterior decodificação de sinais oriundos de um transmissor VLC, utilizando-se do mecanismo de *Rolling Shutter* da câmera *CMOS* de um *smartphone*, a fim de endossar as potencialidades dos dispositivos móveis no desenvolvimento e popularização da Comunicação via Luz Visível.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste projeto é desenvolver uma aplicação *Android*, por intermédio da linguagem de programação Java, para recepção de dados em um sistema VLC (do inglês, *Visible Light Communication*), mais especificamente, um sistema OCC (do inglês, *Optical Camera Communication*).

Ambiciona-se decodificar as informações transmitidas utilizando-se do mecanismo de *Rolling Shutter* (em tradução literal, Obturador de Rolamento) dos sensores de imagem *CMOS* presentes na câmera do *smartphone*. Dessa forma, o aplicativo a ser desenvolvido será focado na decodificação e sincronização entre os dispositivos receptor e transmissor.

1.2.2 Objetivos Específicos

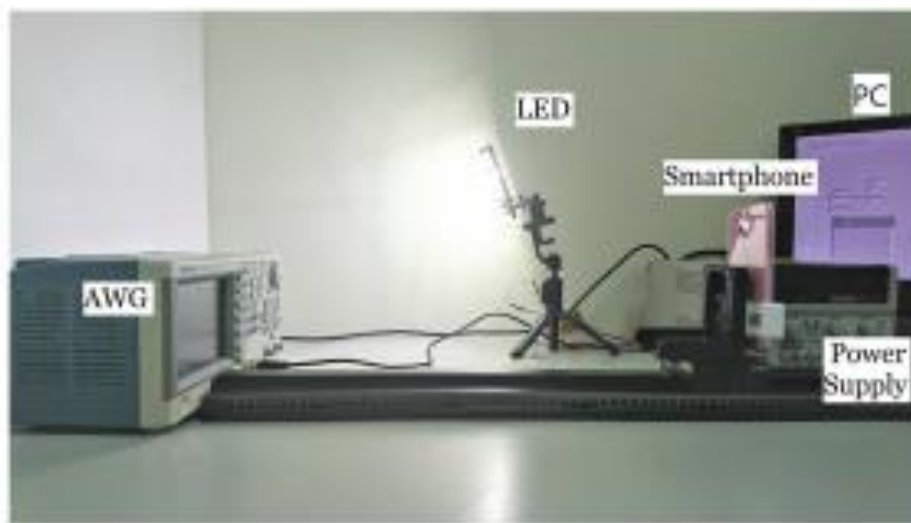
Os objetivos específicos que pautaram o desenvolvimento deste projeto estão listados como segue:

- Desenvolver um aplicativo *Android* capaz de decodificar as informações transmitidas por um transmissor VLC presente no LabTel - UFES (Laboratório de Telecomunicações da Universidade Federal do Espírito Santo);
- Realizar a correta sincronização entre os dispositivos transmissor e receptor (celular);
- Investigar a capacidade de transmissão de informações de um enlace OCC;
- Investigar a capacidade das câmeras de *smartphones* na implementação de sistemas VLC em suas diversas aplicações.

1.3 Trabalhos Relacionados

Alguns trabalhos presentes na literatura implementaram sistemas de comunicação VLC utilizando *smartphones*. Buscando possibilitar a recepção dos sinais refletidos em qualquer superfície, Jenn-Kaie, Fu-Cheng e Zheng-Dao (2018) desenvolveram um sistema NLOS (do inglês, *Non-Line-of-Sight* – NLOS) OCC (do inglês, *Optical Camera Communication* – OCC) utilizando uma superfície heterogênea de reflexão, conforme pode ser observado na Figura 1.

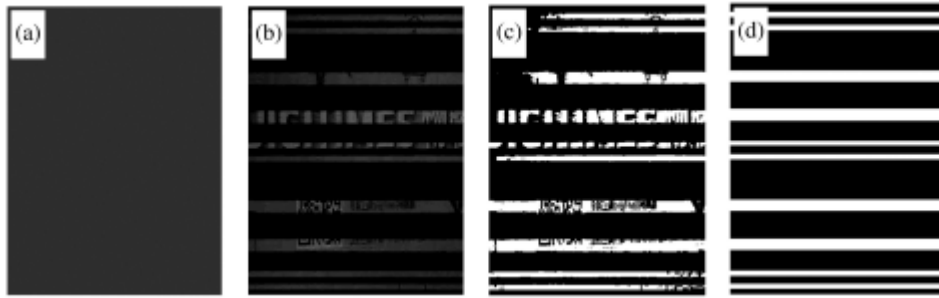
Figura 1 – Configuração NLOS.



Fonte: LAIN, J.K., JHAN, F.C. (2019).

Os autores utilizaram o mecanismo de *Rolling Shutter* da câmera do *smartphone* para a decodificação das informações. A fim de contornar a desuniformidade das imagens refletidas pela superfície de reflexão, os autores aplicaram uma técnica de Processamento Digital de Imagens baseada na subtração da cena de fundo (ou *background*). Na Figura 2 é possível observar a imagem inicialmente sem tratamento (a), o resultado da subtração de *background* (b), a imagem limiarizada (c) e a imagem após a recuperação dos pixels danificados.

Figura 2 – Processo de limiarização e subtração de *background*.



Fonte: LAIN, J.K., JHAN, F.C. (2019).

Em outro trabalho, Tsun-Ting, Chi-Wai, Yun-Han e outros (2022) utilizaram 4 LEDs presentes em faróis de um veículo, estabelecendo três estados distintos: *ON*, *Half-ON* e *OFF*. Dessa forma, foram estabelecidos três intensidades luminosas facilmente distinguíveis, possibilitando a transmissão de dados de 6 bits e reduzindo a complexidade na decodificação das informações. Na Figura 3 é possível observar as imagens capturadas pela câmera, apresentando os três estados citados.

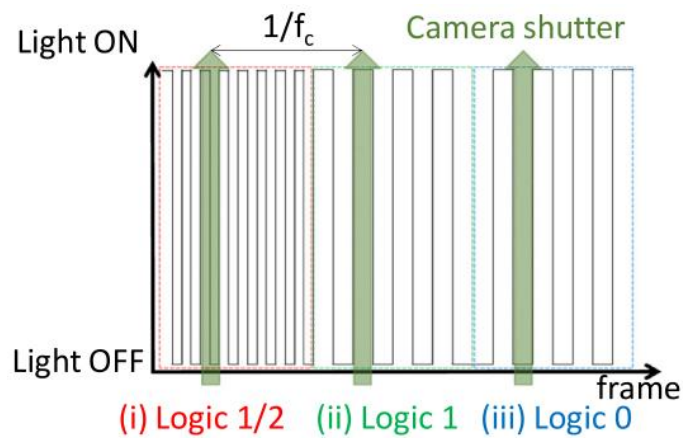
Figura 3 – *Frames* contendo os três estados *OFF*, *Half-ON*, *ON*.



Fonte: TSAI, T. T., CHOW, C. W. et al., (2022).

A técnica de modulação por subamostragem UPSOOK (do inglês, *Under-Sampled Phase Shift On-Off Keying - UPSOOK*) foi implementada a fim de definir os três estados, conforme a Figura 4, onde f_c é a taxa de *frames* da câmera.

Figura 4 – Modulação UPSOOK.



Fonte : TSAI, T. T., CHOW, C. W. et al., (2022).

1.4 Metodologia

1.4.1 Métodos

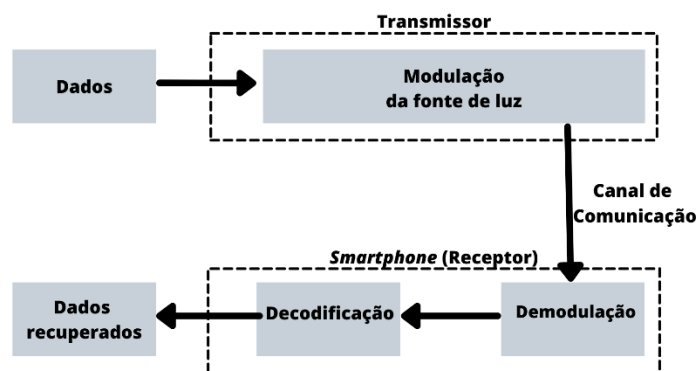
Esse projeto constitui uma pesquisa de natureza experimental, com uma abordagem quantitativa e tipologia exploratória (LAKATOS, E. M., 2001) em relação aos objetivos de pesquisa. Para o desenvolvimento do presente projeto, inicialmente, foi necessária uma familiarização com o *IDE* (do inglês, *Integrated Development Environment*) do sistema operacional *Android*. Também revelou-se importante um maior aprofundamento na literatura com relação ao estado da arte em sistemas *OCC*, a fim de verificar a viabilidade da utilização do *software Android Studio* para o desenvolvimento do aplicativo responsável pela decodificação das informações, bem como a aplicação do *smartphone* como dispositivo receptor.

A hipótese pôde ser confirmada por intermédio do *Google Colab*, aplicando uma abordagem centrada no Processamento de Imagens, utilizando a linguagem *Python*. O *IDE* de desenvolvimento *Android*, bem como a linguagem *Java*, apresentam algumas complexidades para a visualização de imagens e operações matriciais. Em contrapartida, a linguagem *Python* aliada ao espaço colaborativo da *Google* possibilitam o processamento de imagens de forma facilitada. Por conseguinte, inicialmente, o aplicativo se restringiu a coleta das imagens registrando o mecanismo de *Rolling Shutter* e a disponibilização dessas imagens no armazenamento local, para posterior análise no espaço colaborativo da *Google*. Confirmada a

hipótese, realizaram-se testes iniciais, objetivando verificar a precisão do sistema e, por fim, a aplicabilidade da proposta.

Após verificada a aplicabilidade da proposta, o sistema foi migrado para o aplicativo de celular e novos testes foram realizados a fim de observar o seu desempenho adotando-se diferentes parâmetros. Primeiramente no transmissor, definiu-se um pacote de 16 bits sendo enviado de forma ininterrupta com uma frequência fixa, aplicando modulação *OOK* (do inglês, *On-Off Keying*). Em seguida, no receptor verificou-se a quantidade de *frames* processados, o número de pacotes efetivamente decodificados e o tempo médio de processamento de cada *frame*. Essas variáveis foram verificadas para diferentes distâncias entre transmissor e receptor, alcançando uma distância máxima de 1,40 m. As mesmas variáveis também foram verificadas para diferentes frequências do transmissor. Em relação ao receptor, faz-se necessária uma superfície de filtragem de forma que a luz se distribua de forma mais uniforme, permitindo a captura do mecanismo de *Rolling Shutter*. O esquema geral da proposta pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Esquema geral do projeto.



Fonte: Produção do próprio autor.

1.4.2 Materiais

O dispositivo transmissor pode ser observado na parte à esquerda da Figura 6 e foi desenvolvido no Laboratório de Telecomunicação da UFES, mais especificamente pelo grupo de pesquisa PPSUS (Programa de Pesquisa Para o SUS) em parceria com a empresa de desenvolvimento

de soluções integradas *2Solve*. Para a codificação dos dados, utilizou-se o mini computador *Raspberry Pi 3* (mais à direita na Figura 6).

Figura 6 – *Setup* de transmissão.



Fonte: Produção do próprio autor.

O dispositivo receptor pode ser observado na Figura 7. Trata-se de um *smartphone* de modelo *Samsung Galaxy S7*, sistema operacional *Android*, Processador *Octa Core 64-bits*, Memória RAM de 4 GB e Memória Interna de 32 GB, câmera de 12 Mp, resolução de 4290 x 2800 pixels, abertura de f/1.7 e sensor de 1/2.6”.

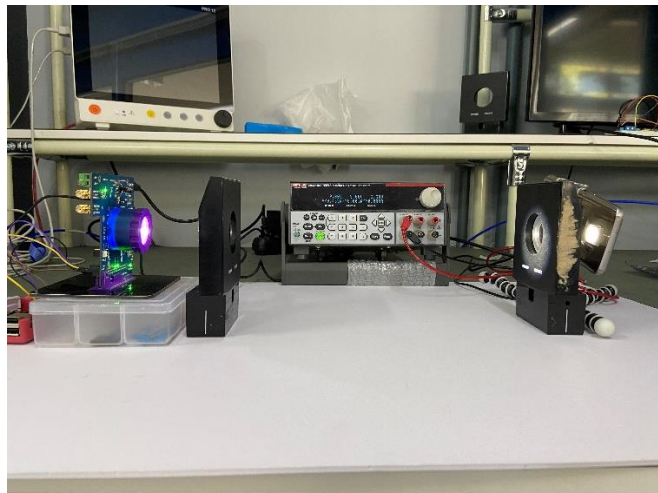
Figura 7 – *Smartphone* utilizado para recepção.



Fonte: MAIScelular.

A Figura 8 mostra o *setup* experimental implementado.

Figura 8 – Setup Experimental.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 9, apresenta uma lente colimadora utilizada no Laboratório de Telecomunicações da UFES – LabTel.

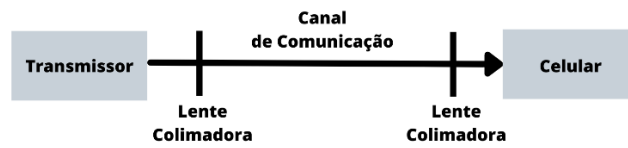
Figura 9 – Lente colimadora.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 10 demonstra a configuração aplicada para a realização dos testes.

Figura 10 – Configuração para testes.



Fonte: Próprio autor.

1.5 Contribuições

Espera-se com o presente trabalho evidenciar as potencialidades da comunicação via luz visível para transmissão de informações, somando-se as diversas produções já presentes na literatura e concentrando-se mais particularmente nos enlaces *OCC*.

1.6 Organização do Trabalho

O presente trabalho está subdividido em 5 seções. O primeiro capítulo descreve as motivações, objetivos, metodologia e contribuições do projeto para o tema de pesquisa. No segundo capítulo, a comunicação via luz visível é descrita desde sua aplicação até seus princípios básicos de funcionamento. O terceiro capítulo possui maior enfoque no dispositivo receptor e nas estratégias implementadas para a decodificação do sinal, descrevendo o mecanismo de varredura utilizado e as técnicas de Processamento de Imagem implementadas, bem como possíveis técnicas para otimização do sistema. Por fim, o capítulo 4 descreve o sistema desenvolvido, promovendo a discussão /justificativa das técnicas utilizadas, bem como a análise do desempenho. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e projetos futuros.

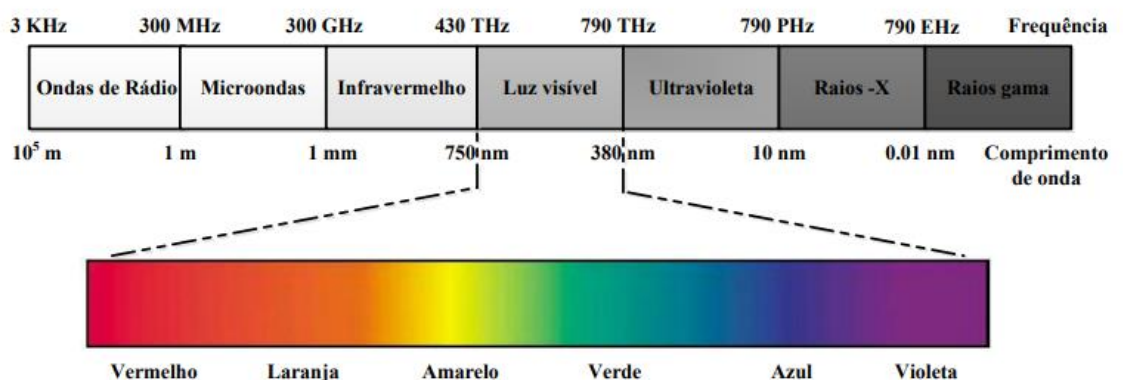
2 COMUNICAÇÃO VIA LUZ VISÍVEL

2.1 Visão Geral

Comunicação via Luz Visível ou VLC é a denominação dada aos sistemas de comunicação óptica sem fios capazes de transmitir informação através da modulação da luz no espectro visível (380-750 nm), comumente utilizado para a iluminação de ambientes (ARNON, S., 2015). O princípio básico de funcionamento de um enlace VLC se dá através de um dispositivo transmissor, geralmente composto de um ou mais LEDs de luz branca, um reator, invólucro e outros acessórios utilizados para controle de brilho e modulação, e um dispositivo receptor que pode ser um fotodetector (fotodiodo) ou um sensor de imagem, como os utilizados em câmeras de *smartphones*.

Atualmente, os fotodetectores disponíveis comercialmente possuem a capacidade de amostrar a luz visível a taxas de dezenas de MHz (Neves, 2018). A capacidade de amostragem do dispositivo receptor bem como a adaptabilidade do dispositivo transmissor são pontos essenciais da Comunicação via Luz Visível. Geralmente, um sistema VLC necessita transmitir informações cumprindo com a função de iluminação do ambiente. Dessa forma, a intensidade luminosa, bem como a frequência de transmissão e taxa de amostragem precisam atender determinados padrões a fim de estabelecer um enlace de comunicação funcional. A Figura 11 apresenta o Espectro Eletromagnético.

Figura 11 – Espectro Eletromagnético



Fonte: Neves (2018).

Conforme pode-se observar na Figura 11, o espectro da luz visível é cerca de 10000 (dez mil) vezes maior que o espectro das ondas de rádio (SINGH, S.; KAKAMANSHADI, G.; GUPTA, S., 2015), possibilitando um aumento na capacidade de conexão de múltiplos dispositivos. Outras vantagens dos sistemas *VLC* são:

- 1- Segurança: a luz visível pode ter sua propagação interrompida por materiais opacos como paredes, por exemplo. Essa característica proporciona o confinamento da luz em ambientes fechados, evitando a possibilidade de *eavesdropping* ou *sniffing* e eliminando a interferência entre sistemas de comunicação espacialmente isolados, um grande problema observado na comunicação em RF (radiofrequência) (BURCHARDT, H. et al, 2014);
- 2- Custo: o baixo custo de dispositivos como os LEDs e fotodiodos torna a aplicação dos sistemas *VLC*, geralmente, mais barata;
- 3- Ausência de Interferência Eletromagnética: os sistemas *VLC* podem ser utilizados em hospitais, no espaço aéreo ou em plantas nucleares sem causar problemas decorrentes da interferência eletromagnética.

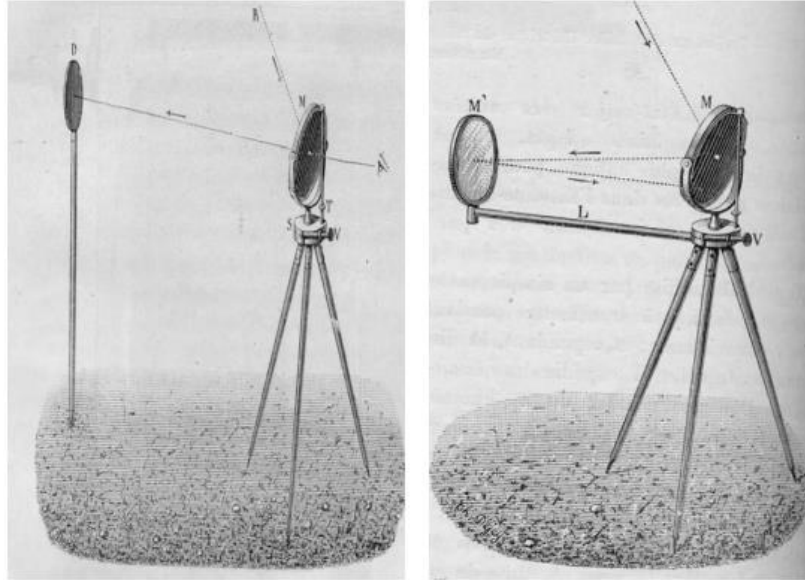
2.2 Histórico

O desenvolvimento dos LEDs (do inglês, *Light Emitting Diode*) de cor azul e o posterior desenvolvimento dos LEDs brancos de alto brilho viabilizou um ambiente propício para a popularização desses dispositivos e, conseqüente, ascensão dos sistemas de Comunicação via Luz Visível (YEH, N.; CHUNG, J. P., 2009). No entanto, as primeiras observações dos sistemas *VLC* datam de milhares de anos atrás, por intermédio de faróis, fogo, fumaça, tochas e luz solar.

Gregos e romanos utilizavam a luz solar para transmitir mensagens básicas através de seus escudos durante as batalhas. Mais recentemente, no final do século XIX, observa-se o surgimento do heliógrafo, um dos primeiros instrumentos dedicados a comunicação via luz visível, utilizando espelhos direcionais a fim de refletir os raios solares incidentes até uma estação receptora, com capacidade de transmitir informações até cerca de 40 km de distância por intermédio do código morse.

Na Figura 12, observa-se dois sistemas heliógrafos distintos: o heliógrafo simples e o heliógrafo duplo. O heliógrafo simples não funcionava quando o sol estivesse alto no horizonte. Através de um espelho adicional o heliógrafo duplo contornava essa limitação.

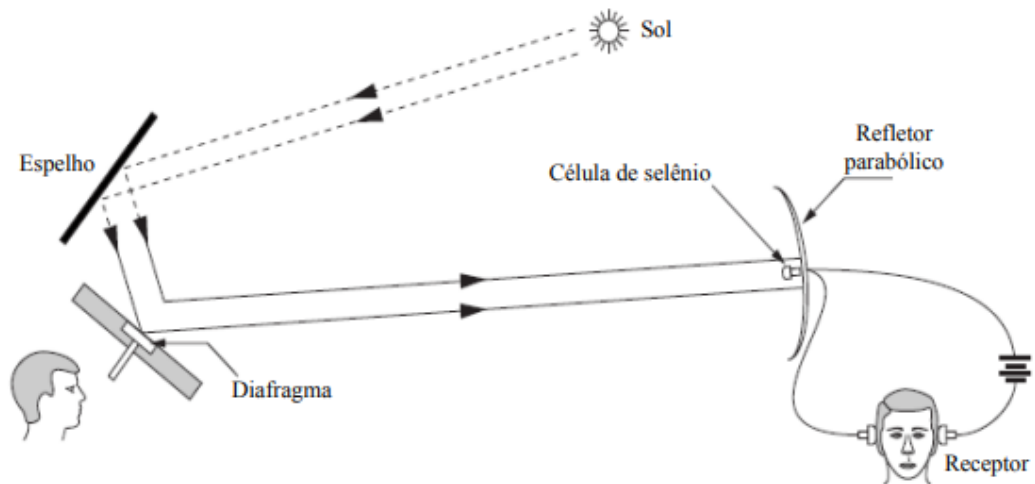
Figura 12 – Sistema heliógrafo simples e duplo.



Fonte: Bouchet et al. (2006).

Em 1880, Alexander Graham Bell demonstrou experimentalmente pela primeira vez o princípio básico dos sistemas de comunicação ópticos modernos. Bell modulou a radiação solar através de um sinal vocal, utilizando um diafragma montado em um espelho e transmitiu a uma distância de aproximadamente 200 m até um espelho parabólico com uma célula de selênio em seu ponto focal, conectado a fones de ouvido. A Figura 13 exibe o dispositivo popularmente conhecido como fotofone.

Figura 13 – Representação esquemática do fotofone.



Fonte: Neves (2018) adaptado de Bouchet et al. (2006).

Devido a intermitência da radiação solar e a forma rudimentar com a qual os dispositivos eram construídos, o fotofone não obteve sucesso comercial. Paralelamente, desenvolviam-se sistemas de comunicação utilizando radiofrequência.

Alguns anos após o experimento do fotofone, em 1886, as primeiras observações do fenômeno da propagação de ondas eletromagnéticas foram documentadas por Heinrich Rudolf Hertz, corroborando com as previsões matemáticas realizadas por Maxwell (ISKANDER, M.F., YUN, Z., 2002). O grande marco inicial da comunicação wireless foi dado por Guglielmo Marconi demonstrando a primeira transmissão de rádio da Ilha de Wight, no canal da Mancha, para um navio localizado a pouco mais de 28 km de distância, em 1895 (SEYMOUR, T.; SHAHEEN, A., 2011).

As transmissões em radiofrequência tornaram-se predominantes desde então, porém a partir da segunda metade do século XX intensificou-se o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias voltadas para a comunicação óptica, impulsionadas pelo desenvolvimento de fontes ópticas com propriedades específicas, como o laser. Os sistemas OWC (do inglês, *Optical Wireless Communication*) receberam atenção especial na década de 60, porém os experimentos foram considerados frustrantes devido a incapacidade de lidar com efeitos atmosféricos. Conseqüentemente, durante esse período, OWC se restringiu a aplicações militares, principalmente devido a sua segurança intrínseca (Neves, 2018).

Na década de 70, iniciou-se um crescente interesse na tecnologia de fibra óptica devido a sua capacidade de transmissão em longas distâncias. Atualmente, as fibras ópticas têm desempenhado importante papel nas telecomunicações, proporcionando um meio de comunicação estável que possibilita altas taxas de transmissão e proteção contra interferência eletromagnética (TRONCO, T. R.; DE AVILA, L. F., 2007).

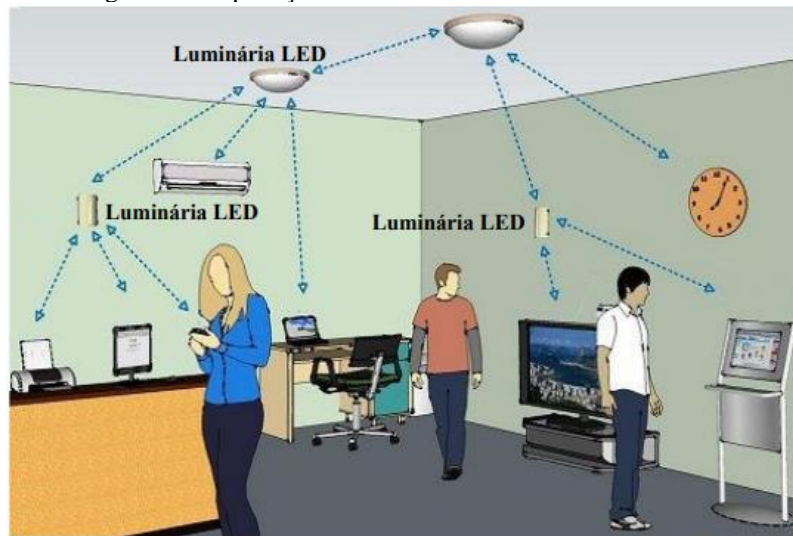
Mais recentemente, a partir do fim da década de 90, a comunidade acadêmica e a indústria têm concentrado esforços no desenvolvimento da comunicação óptica sem fio. Sabe-se que o espectro de radiofrequência não será mais suficiente futuramente e o espectro óptico se apresenta como uma solução, objetivando acomodar a demanda crescente. Nesse sentido, dentre as principais tecnologias OWC desenvolvidas atualmente, pode-se citar: a comunicação FSO (do inglês, *Free Space Optical*) ou comunicação óptica no espaço livre; VLC (do inglês, *Visible Light Communication*) ou comunicação via luz visível; OCC (do inglês, *Optical Camera Communication*) e redes wireless via luz, popularmente conhecidas como redes Li-Fi (HAAS, H.; ELMIRGHANI, J.; WHITE, I., 2020).

2.3 Aplicações

Os sistemas VLC possuem diversas aplicações como em hospitais e espaço aéreo, porém também podem ter aplicações mais específicas como em Sistemas de Transporte Inteligente e Comunicação Subaquática. Outra aplicação mais comum se dá em redes domésticas comumente conhecidas como Li-Fi (do inglês, *Light Fidelity*) em analogia as redes *Wi-Fi*.

A tecnologia Li-Fi é baseada no uso de luminárias, comumente utilizadas para iluminação, com o objetivo de estabelecer comunicação bidirecional multiusuário em ambientes internos. A Figura 14 apresenta um exemplo ilustrativo da tecnologia Li-Fi.

Figura 14 – Aplicação do sistema VLC em ambiente interno.

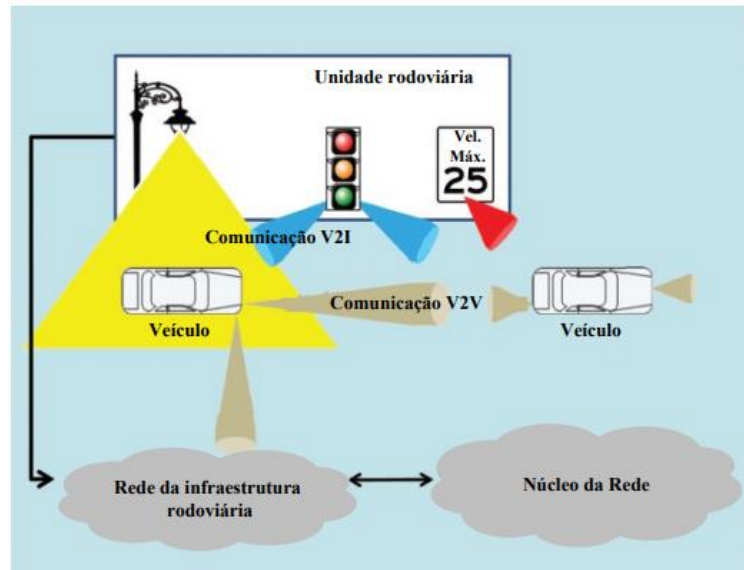


Fonte: Neves (2018).

A rede inclui diferentes pontos de acesso compostos por células ópticas (Li-Fi attocells), compondo uma rede. Alguns estudos vêm demonstrando que a adoção de um sistema híbrido (Wi-Fi e Li-Fi) pode gerar economias drásticas de energia elétrica (ABDALLAH, K.; SIHUA, S., 2018).

Os Sistemas de Transporte Inteligente envolvem a comunicação entre veículos e infraestrutura de transporte (semáforos, placas, etc.) utilizando a luz emitida pelos faróis e sinais de trânsito. Esse tipo de rede de comunicação veicular pode ser utilizado na prevenção de colisões entre veículos, avisos de limite de velocidade, ultrapassagem ou curvas. A Figura 15 exemplifica um sistema de transporte inteligente, denotando a comunicação entre veículos (do inglês, V2V – *Vehicle to Vehicle*) e entre veículos e infraestrutura (do inglês, V2I – *Vehicle to Infrastructure*).

Figura 15 – Sistema de Transporte Inteligente.



Fonte: Neves (2018).

Os sistemas VLC para Comunicação Subaquática podem ser aplicados no monitoramento da vida marinha (biologia oceânica como um todo) e comunicação militar. Ondas de rádio sofrem grande atenuação na água e ondas acústicas enfrentam dificuldades para penetrar na interface água-ar (Neves, 2018). Nesse contexto, as comunicações ópticas apresentam um grande potencial para aplicação em ambientes subaquáticos (CHEN, L. K., SHAO, Y., Di, Y., 2022).

2.4 Diodo Emissor de Luz Branca

O diodo emissor de luz (do inglês, *Light Emitter Diode* - LED) se trata de um dispositivo eletrônico do tipo bipolar que converte energia elétrica em luz. O LED é constituído de uma junção P-N, ou seja, dois semicondutores dopados do tipo P e do tipo N. Semicondutores do tipo P apresentam déficit de elétrons (lacunas) enquanto semicondutores do tipo N apresentam elétrons excedentes. No momento em que a junção é polarizada diretamente ocorrem recombinações entre lacunas e elétrons liberando energia na forma de fótons. Na Figura 16, observa-se um diodo emissor de luz.

Figura 16 – Diodo emissor de luz.

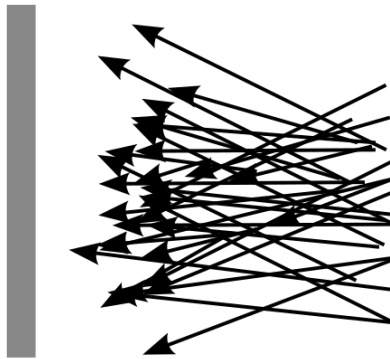


Fonte: Electrónica Embajadores (2022).

2.5 Lentes Colimadoras

Sendo a luz visível uma onda eletromagnética, consequentemente ela está sujeita ao fenômeno da difração. A difração é descrita como fenômeno físico decorrente do princípio de superposição, fazendo com que ao longo de sua propagação a luz sofra espalhamento transversal (BOUWKAMP, C. J., 1954). A Figura 17 evidencia o espalhamento sofrido pela luz.

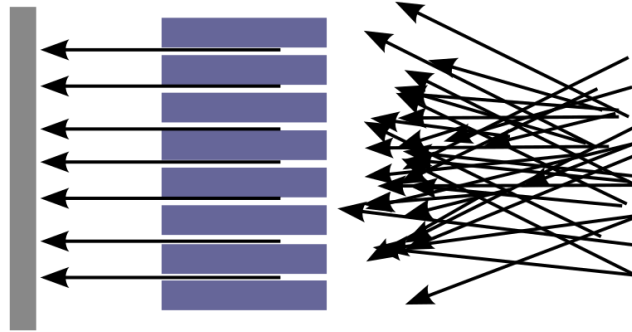
Figura 17 – Espalhamento sofrido pela luz.



Fonte: WIKIVERSITY, 2021.

Uma lente colimadora é capaz de conferir certo grau de paralelismo as trajetórias dos diversos feixes de luz, restringindo-os a uma certa região e consequentemente aumentando a intensidade do sinal. A Figura 18 ilustra o resultado da aplicação de uma lente colimadora.

Figura 18 – Aplicação de lente colimadora no feixe ilustrado na Figura 17.



Fonte: WIKIVERSITY, 2021.

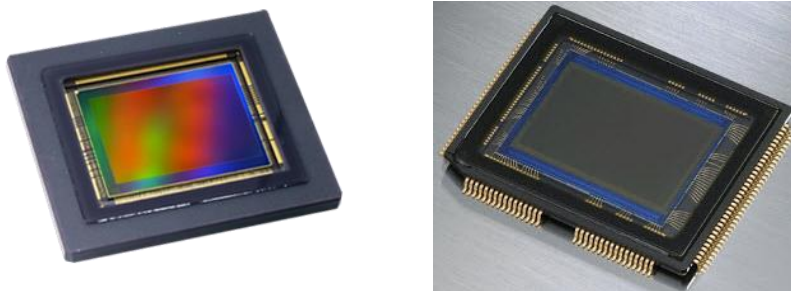
As lentes colimadoras podem ser utilizadas para melhorar a iluminação de ambientes internos ou, como nesse trabalho, potencializar a intensidade de um feixe luminoso.

3 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

3.1 Sensores de Imagem

Os sensores de imagem funcionam como “olhos eletrônicos” de uma câmera e consistem, geralmente, em diversos fotodiodos e amplificadores que juntos compõem minúsculas células fotoelétricas dispostas em diversas fileiras formando linhas e colunas, onde cada célula gera um pixel na imagem. O pixel é resultado da conversão dos fótons incidentes em elétrons que são então convertidos em uma voltagem com amplitude correspondente a intensidade da luz incidente. Na Figura 19, a esquerda é possível observar um sensor CMOS (do inglês, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor - CMOS*) e na imagem da direita um sensor CCD (do inglês, *Charge Coupled Device – CCD*).

Figura 19 – Sensores de Imagem CMOS, à esquerda, e CCD, à direita.



Fonte: BLOG E-MANIA (2016).

Esses sensores se diferenciam principalmente pela disposição física dos componentes e pelo processo de varredura para formação de uma imagem. No sensores CCD a carga acumulada para cada pixel é medida fora do local físico do pixel. Já nos sensores CMOS, a carga acumulada é convertida em corrente elétrica e amplificada, ainda dentro do espaço físico de cada pixel, através de transistores ali existentes. Desta forma, cada pixel possui seu conjunto individual de transistores.

Essa implementação dos sensores CMOS dificulta o controle global do tempo de exposição, (período de tempo em que as células fotoelétricas estão aptas a captar a luz incidente), por exigir o uso de um transistor adicional dentro da área de cada pixel, somente para efetuar este controle. A solução utilizada na maioria dos casos é colocar esses transistores na "borda" de

cada linha horizontal inteira do sensor, utilizando um processo de leitura linha a linha (ou coluna a coluna), ao invés de simultâneo para todo o quadro de imagem, denominado *Rolling Shutter*.

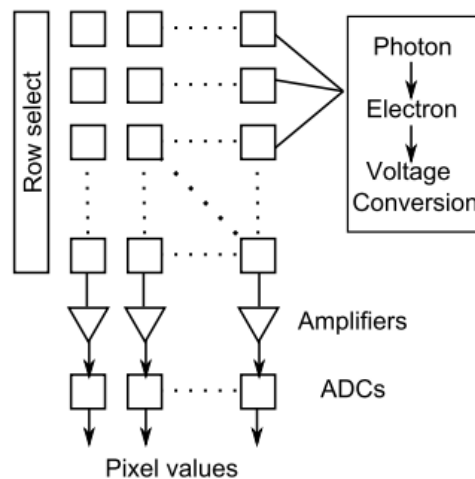
3.2 Rolling Shutter

O CMOS (do inglês, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) designa uma gama de dispositivos que podem ser utilizados em CPUs (do inglês, *Central Processing Unit*), memórias computacionais, celulares, câmeras digitais, mouses, circuitos integrados, processadores e circuitos digitais (QIU, X. et al, 2013).

A maior parte das câmeras dos celulares, atualmente, são concebidas através de sensores de imagem *CMOS*. Esses sensores funcionam como “olhos eletrônicos” e consistem, geralmente, em um fotodiodo e um amplificador *CMOS* destinado a cada pixel de uma imagem, individualmente. Um pixel *CMOS* é resultado da conversão dos fótons incidentes em elétrons que são então convertidos em uma diferença de potencial elétrico com amplitude correspondente ao valor do pixel obtido (DANAKIS, C. et al, 2012).

A Figura 20 demonstra o funcionamento de um típico sensor de imagem *CMOS*. Cada vetor de pixels é acionado sequencialmente através de um mecanismo de aquisição de imagens chamado *Rolling Shutter*, permitindo a recepção e decodificação de dados (CHOW, C. W.; CHEN, C. Y.; CHEN, S. H., 2015).

Figura 20 – Esquemático do funcionamento de um sensor de imagem CMOS.

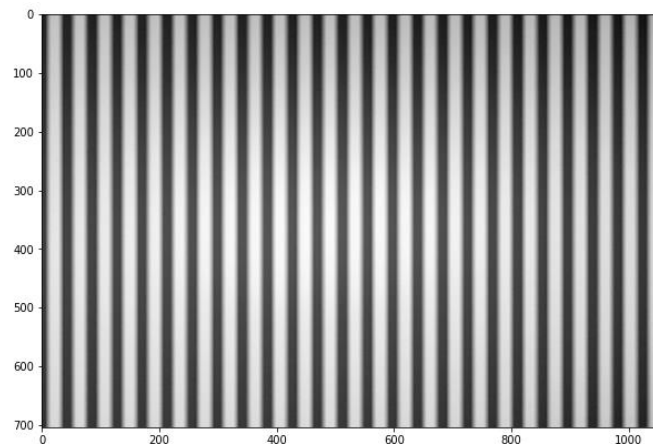


Fonte: DANAKIS, C. (2012).

Câmeras que se utilizam do mecanismo de *Rolling Shutter* são, geralmente, câmeras *CMOS* de baixo custo e baixo consumo e não capturam uma imagem de uma só vez como é feito em câmeras *Global Shutter* (em tradução literal, Obturador Global). Os pixels são gerados e, posteriormente, unidos para formar uma imagem (NICKLIN, S. P.; FISHER, R. D.; MIDDLETON, R., 2006).

Caso a frequência de transmissão seja menor que a taxa de *frames* do sensor de imagem *CMOS* (aproximadamente 30 *frames* por segundo), uma ou mais imagens podem representar um nível lógico, fazendo com que o mecanismo de *Rolling Shutter* não seja visível. Caso a frequência de transmissão seja maior que a taxa de *frames* do sensor de imagem, podem ser observadas franjas na imagem devido ao *Rolling Shutter* (DANAKIS, C. et al, 2012), conforme a Figura 21.

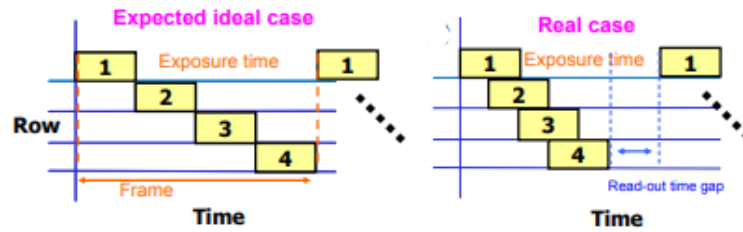
Figura 21 – Mecanismo de *Rolling Shutter*.



Fonte: NICKLIN, S.P, (2006).

Em um processo de captura ideal, cada vetor de pixels seria registrado sequencialmente um a um, considerando um sensor de imagem *CMOS* com uma relação sinal-ruído suficientemente alta, conforme pode ser observado na ilustração mais à esquerda na Figura 22. No entanto, o que se observa na prática é algo semelhante à ilustração mais à direita, havendo um *gap* entre *frames* (CHOW, C. W.; CHEN, C. Y.; CHEN, S. H., 2015).

Figura 22 – Processo de varredura: ideal e real.



Fonte: CHOW C. W. (2015).

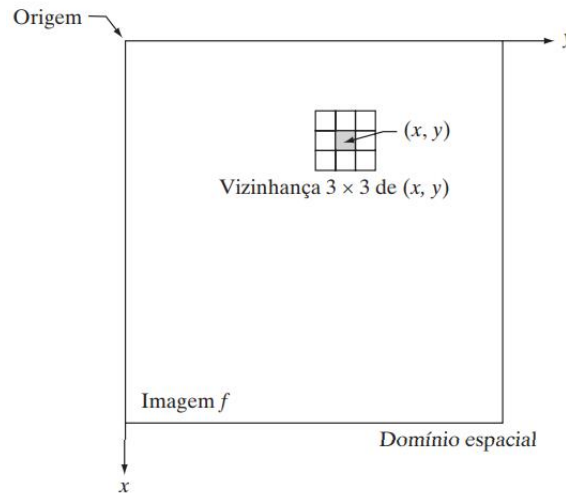
3.3 Fundamentos da Transformação de Intensidades e Filtragem Espacial

Técnicas de processamento de imagem no domínio espacial englobam um conjunto de métodos aplicados diretamente sobre o plano contendo os pixels de uma imagem. Os processos no domínio espacial podem ser expressos pela Equação 1:

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (1)$$

onde $f(x, y)$ define a imagem de entrada, $g(x, y)$ define a imagem de saída e T define um operador em f definido em uma vizinhança do ponto (x, y) . A Figura 23 exhibe o processo definido pela Equação 1. É possível observar um ponto arbitrário (x, y) e uma região em torno desse ponto denominada vizinhança. Por simplicidade, geralmente as vizinhanças são retangulares, porém outros formatos como aproximações circulares (comumente utilizados em análises morfológicas) podem ser aplicados (WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C., 2008).

Figura 23 – Vizinhança 3 x 3 ao redor de um ponto (x,y) em uma imagem no domínio espacial.



Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

O processo consiste em mover a origem da vizinhança pixel a pixel aplicando o operador T nos pixels presentes na região delimitada pela vizinhança, gerando uma saída nessa posição. Observando a Figura 23, supondo que o operador T seja definido como a intensidade média da vizinhança, para uma vizinhança 3 x 3, supondo a origem da vizinhança na posição $(x, y) = (100, 150)$, a saída gerada nessa posição $(g(x, y))$ é dada pela soma de $f(100, 150)$ e seus vizinhos-8 ($\{f(100, 149), f(99, 149), f(101, 149), f(101, 150), f(99, 150), f(99, 151), f(100, 151), f(101, 151)\}$), dividida por 9, ou seja, a média dos pixels contidos na vizinhança. A Equação 2 mostra o processo realizado bit a bit, onde $f(x, y)$ é a imagem de entrada e $g(x, y)$ a imagem de saída, ambos no plano definido pelas coordenadas (x, y) , para uma vizinhança de tamanho 3 x 3.

$$g(x, y) = \frac{f(x - 1, y) + f(x - 1, y + 1) + f(x - 1, y - 1) + f(x, y) + f(x, y + 1) + f(x, y - 1) + f(x + 1, y) + f(x + 1, y + 1) + f(x + 1, y - 1)}{9} \quad (2)$$

A origem da vizinhança é movida e o próximo valor da imagem de saída g é gerada. Comumente, o processo se inicia no canto superior esquerdo da imagem de entrada $f(x, y) = f(0, 0)$, avançando pixel a pixel da esquerda para direita, de cima para baixo. Em certos momentos a origem da vizinhança encontra as extremidades (ou bordas) da imagem de forma que parte da vizinhança se localize fora dela. Nesse contexto, técnicas de preenchimento são

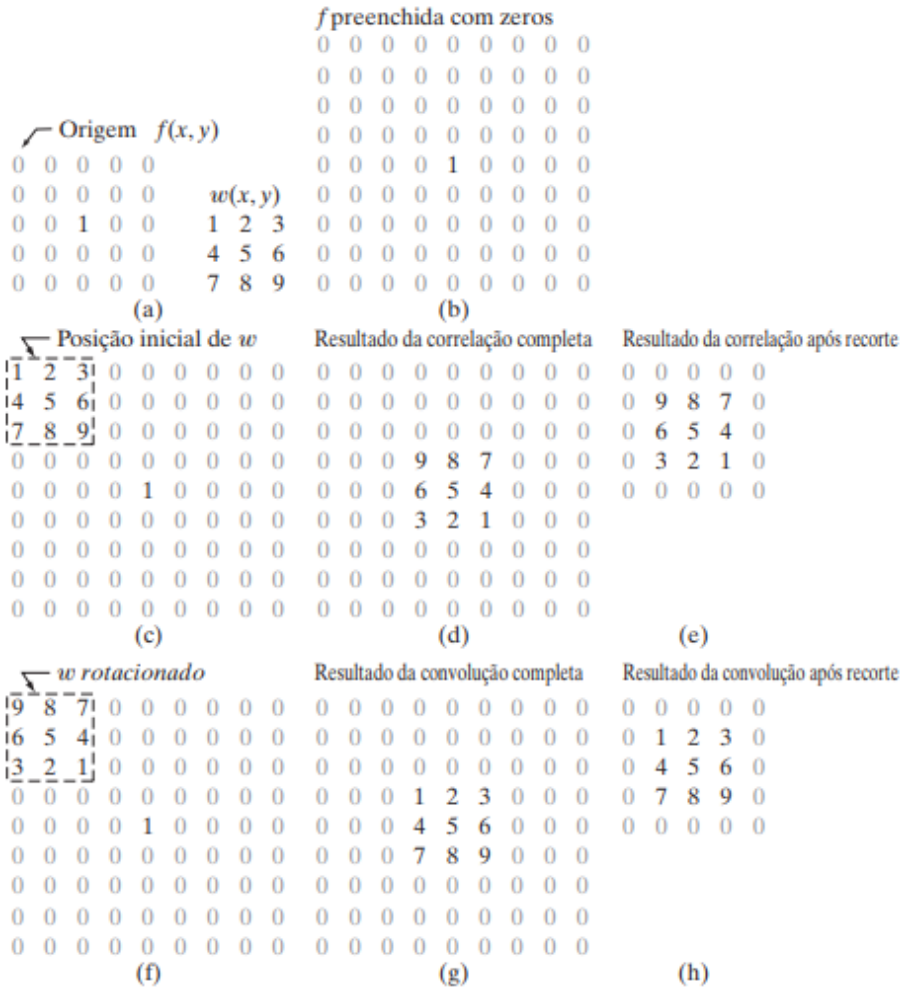
aplicadas a fim de evitar interferências na imagem de saída, sendo o preenchimento com zeros a técnica mais utilizada.

3.4 Preenchimento com Zeros

De acordo com o teorema da convolução, a multiplicação no domínio da frequência corresponde a convolução circular no domínio do espaço. A convolução de duas funções periódicas é também periódica e a proximidade entre períodos é tal que os períodos geram interferências entre si provocando o chamado erro de *wraparound* ou erro de borda (WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C., 2008). Em síntese, o processo de convolução espacial em uma imagem de entrada, sem nenhum pré-tratamento, ocasiona o erro de bordas na imagem de saída.

Objetivando evitar esse tipo de erro, o preenchimento com zeros é adotado e consiste na adição de um número $N-1$ de zeros em cada borda da imagem, onde N é o tamanho da máscara ($w(x, y)$), conforme a Figura 24). Esse procedimento permite a convolução apropriada dos sinais, reduzindo a contaminação nos pixels de saída. A Figura 24, ilustra o processo de preenchimento com zeros e convolução em um sinal 2D.

Figura 24 – Convolução de impulso unitário 2D com filtro 3x3 2D.



Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

3.5 Técnicas de Filtragem Espacial

O procedimento descrito na Seção 3.2 é comumente descrito como filtragem espacial. Mais especificamente no exemplo dado, um filtro de média. Quando a vizinhança é acompanhada de uma operação predefinida pode ser chamada de filtro espacial (outras denominações aceitas são: máscara espacial, kernel, template ou janela).

3.5.1 Filtro de média

Os filtros de média também são conhecidos como filtros espaciais lineares de suavização ou, simplesmente, filtros passa-baixa. Sua resposta é dada pela média aritmética dos pixels contidos na vizinhança da máscara de filtragem. A aplicação do filtro de média em uma imagem implica em uma perda de nitidez que reduz transições abruptas de intensidade. Nesse sentido, o filtro

de média pode ser utilizado para a suavização de falsos contornos decorrentes de um número insuficiente de níveis de intensidade na imagem.

Todavia, a aplicação de maior importância para o presente trabalho se refere ao borramento da imagem para obtenção de uma representação mais geral dos objetos de interesse. Nesse caso, objetiva-se observar apenas as franjas verticais resultantes do mecanismo de varredura. No processo de borramento, os detalhes “irrelevantes”, ou seja, objetos menores que o tamanho da máscara, são mesclados ao fundo, conseqüentemente definindo uma máscara de tamanho adequado é possível reduzir ruído e facilitar o processo de limiarização posterior.

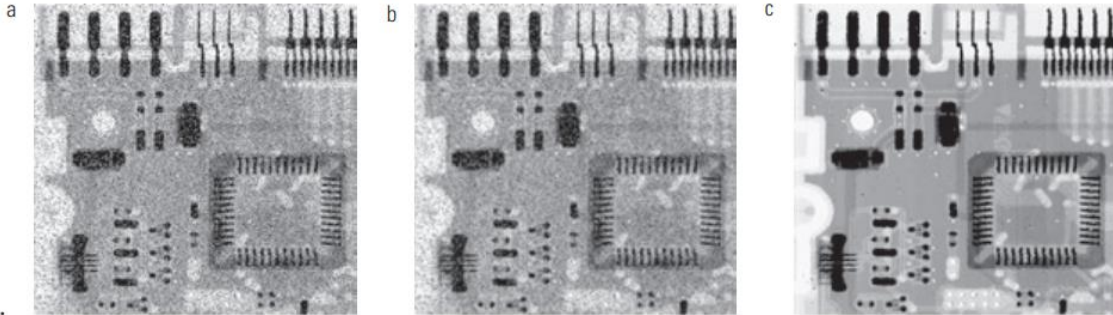
3.5.2 Filtro de Mediana

O filtro de mediana se enquadra na categoria dos filtros de estatística de ordem (ou não lineares). Nessa categoria, a resposta obtida é baseada na classificação dos pixels com base em suas intensidades (do menor para o maior) contidos na área da imagem coberta pela máscara de filtragem e substituição do valor do pixel central pelo valor do percentil de interesse dos pixels ordenados. Evidentemente, para o filtro de mediana o valor do pixel central adotado é a mediana (percentil 50) dos valores na vizinhança da máscara.

Os filtros de mediana apresentam bons resultados na redução de ruído, com borramento menor quando comparados aos filtros lineares de suavização de tamanho similar, sendo amplamente adotados. Além disso, são muito eficazes na presença de ruído impulsivo, ou ruído “sal e pimenta”, assim conhecido por ser constituído de pontos pretos e brancos sobrepostos (WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C., 2008).

Na Figura 25 é possível observar os resultados da filtragem aplicando-se um filtro de média (b) e um filtro de mediana (c) sobre uma imagem de raio-x (a). Conforme explicitado, a nitidez da imagem resultante da aplicação do filtro de mediana é muito maior quando comparada a imagem resultante da aplicação do filtro de média.

Figura 25 – (a) imagem de raio-x de placa de circuito corrompida por ruído sal e pimenta; (b) resultado da aplicação de filtro de média 3 x 3 na imagem em (a); (c) resultado da aplicação de um filtro de mediana 3 x 3 em (a)



Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

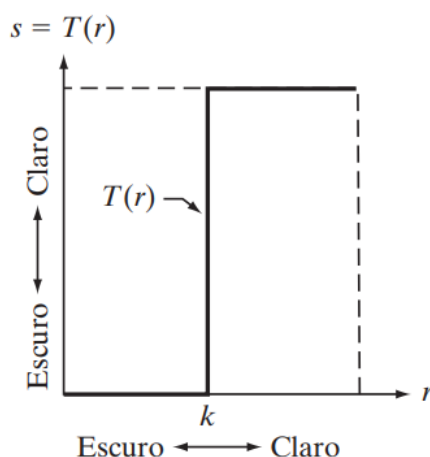
3.6 Limiarização

No procedimento de filtragem ilustrado na Seção 3.2, a menor vizinhança possível possui tamanho 1 x 1. Nesse caso, a imagem de saída (g) é definida com base em um único ponto da imagem de entrada (f), resumindo-se a uma função de transformação de intensidade (ou função de transformação de níveis de cinza/ mapeamento). A Equação 3 define uma notação simplificada para a função de transformação, na qual r é um ponto na imagem de entrada e s o ponto resultante da transformação T em r .

$$s = T(r) \quad (3)$$

No caso em que $T(r)$ possuir a forma da Figura 26, quando r apresenta valores maiores que k , o ponto resultante na imagem de saída recebe um valor alto (geralmente 255) e do contrário, s recebe um valor baixo (geralmente 0). Dessa forma, é gerada uma imagem de dois níveis (binarizada). Esse tipo de transformação é conhecido como limiarização (ou *thresholding*), onde k é o limiar (ou *threshold*) global.

Figura 26 – Função de limiarização.



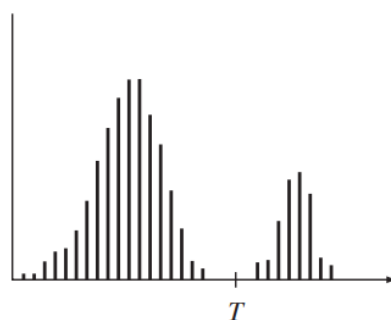
Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

A limiarização é uma técnica amplamente utilizada na análise de imagens digitais com o objetivo de separar (segmentar) objetos ou regiões de interesse, tendo em vista a simples implementação e propriedades intuitivas (MARQUES FILHO, 1999).

3.6.1 Fundamentos da Limiarização

O histograma presente na Figura 27 é resultante de uma imagem composta de objetos claros em um fundo escuro. Torna-se evidente o agrupamento dos pixels dessa imagem em dois modos distintos.

Figura 27 – Histograma que pode ser dividido por limiar global.



Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

Para a imagem em questão, a segmentação se torna uma tarefa de baixa complexidade, bastando selecionar um limiar T que separe os dois grupos (ou modos) observados no histograma. O processo de definição de uma constante T aplicável a uma imagem inteira é chamado de

limiarização global. Quando o valor de T varia ao longo da imagem, utiliza-se o termo limiarização variável. Também são comuns os termos limiarização local ou regional nos casos em que o valor de T em um ponto qualquer da imagem é definido com base em uma vizinhança.

3.6.2 Ruído na limiarização de imagens

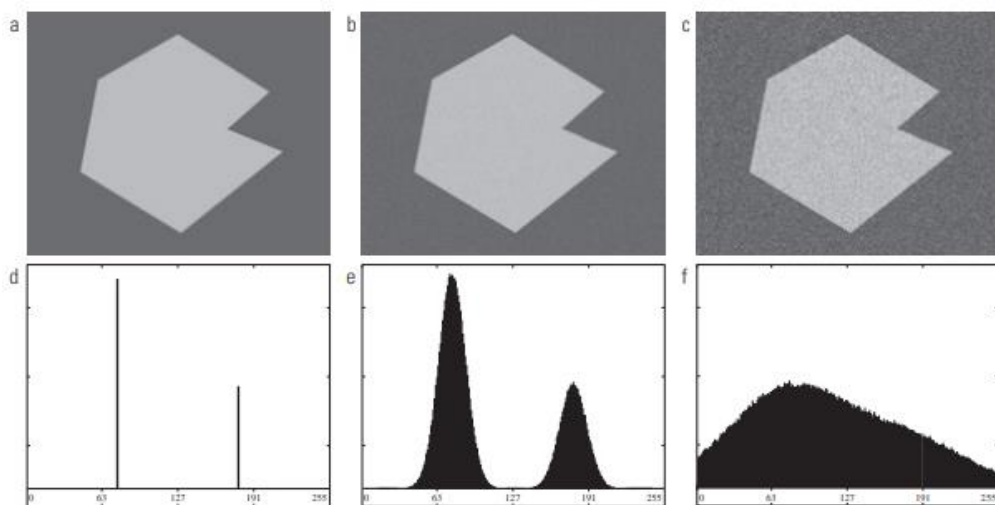
A relação sinal-ruído de uma imagem pode ser calculada conforme a Equação 4.

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (4)$$

Onde μ e σ são a média e o desvio padrão da intensidade dos pixels em uma imagem, respectivamente.

Na Figura 28, é possível observar diferentes versões de uma mesma imagem. A imagem observada em (a) não possui ruído e, conseqüentemente, seu histograma (d) é composto de dois modos de intensidade única, facilmente identificáveis. A imagem observada em (b) foi corrompida por ruído gaussiano de média 0 e desvio padrão de 10 níveis de intensidade, por conseguinte, o histograma obtido (e) apresenta modos mais amplos. Embora amplos, esses grupos também são de fácil limiarização tendo em vista a ampla região que separa os picos.

Figura 28 – (a) Imagem livre de ruído; (b) Imagem com ruído gaussiano de desvio padrão de 10 níveis de intensidade; (c) Imagem com ruído gaussiano de desvio padrão de 50 níveis de intensidade; (d), (e) e (f) seus respectivos histogramas.



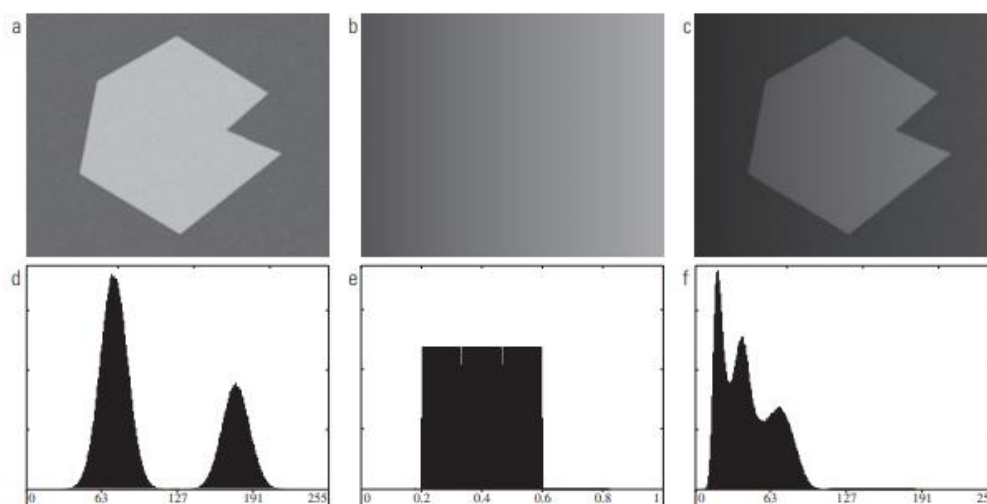
Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

Por fim, a imagem em (c), foi corrompida com ruído gaussiano de média 0 e desvio padrão de 50 níveis de intensidade. Observando o histograma resultante (f) dessa imagem, observa-se apenas um único modo com amplitude que engloba todos os níveis de intensidade observados. Nesse caso, a aplicação de um limiar global na imagem mostra-se inadequada.

3.6.3 Iluminância e Refletância na Limiarização de Imagens

A Figura 29 apresenta o resultado da multiplicação da imagem (b) da Figura 28 por uma função de intensidade variável, mais especificamente uma rampa de intensidades que pode ser observada na imagem (b) da Figura 29, com o objetivo de simular os efeitos da variação na iluminação.

Figura 29 – (a) Imagem com ruído gaussiano; (b) Rampa de intensidade; (c) Produto de (a) e (b); (d), (e) e (f) seus respectivos histogramas.



Fonte: WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. (2008).

Na imagem (c), observa-se o resultado com um padrão de sombreado e na imagem (f) o histograma resultante. A região que antes separava dois modos facilmente distinguíveis e tornava a limiarização simples foi totalmente eliminada, de forma que os pixels da imagem passaram a se concentrar na região mais a esquerda do histograma. Caso a iluminação fosse perfeitamente uniforme, mas a refletância da imagem não o fosse, resultados semelhantes seriam obtidos.

Logo, a correta segmentação de uma imagem deve ser feita em observância a fatores como a relação sinal ruído, iluminação e refletância da imagem de entrada. Porém, quando o controle desses fatores não é possível, como no presente projeto, três abordagens são propostas pela literatura: correção do padrão de sombreamento, abordagem morfológica e limiarização variável.

3.6.4 Limiarização Local

Conforme observado nas seções anteriores, caso a distribuição de intensidades dos pixels em uma imagem permita a correta segmentação, é possível utilizar um limiar global único para toda a imagem. No entanto, as imagens captadas pela câmera do celular muitas vezes não apresentam padrões bem estabelecidos de iluminação e refletância.

Nesse contexto, faz-se necessária a aplicação de uma limiarização variável baseada nas propriedades locais da imagem. Nesse tipo de limiarização é calculado um limiar para cada ponto (x, y) da imagem com base em propriedades de sua vizinhança, em um processo similar ao descrito na Seção 3.2.

Para o presente projeto optou-se por uma limiarização local baseada no cálculo da média da vizinhança em cada ponto. Conforme pode ser observado no capítulo subsequente, essa abordagem apresentou um bom desempenho, menor complexidade e custos computacionais razoáveis.

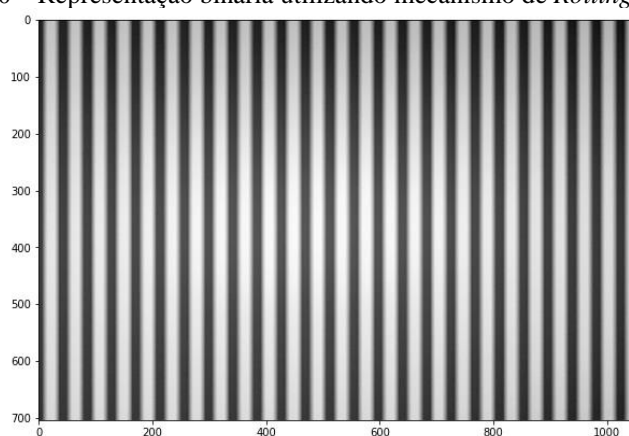
4 SISTEMA DESENVOLVIDO

4.1 Caracterização do Sinal

Conforme descrito na Figura 22, no processo de varredura para formação de uma imagem através dos sensores CMOS observa-se uma sobreposição das linhas (ou colunas) que compõem essa imagem. Essa desuniformidade faz com que para um mesmo nível lógico, captado pela câmera através do mecanismo de *Rolling Shutter*, o número de pixels não seja o mesmo.

Na Figura 30, observam-se diversas franjas verticais na coloração branca, indicando um bit de nível lógico alto cada e captadas pela câmera do *smartphone* utilizado nesse trabalho. Embora visualmente essas franjas verticais aparentem possuir a mesma largura, os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido pós-limiarização da faixa central da imagem demonstram o contrário.

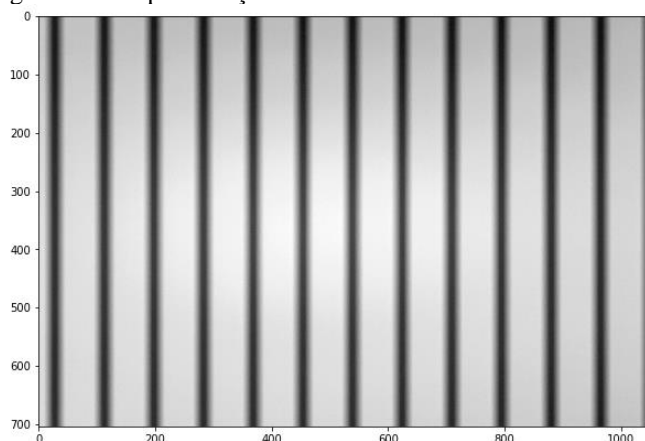
Figura 30 – Representação binária utilizando mecanismo de *Rolling Shutter*.



Fonte: Próprio Autor.

Restringindo-se a região central da imagem presente na Figura 30, as franjas brancas apresentam as seguintes larguras em pixels: 37, 30, 22, 24, 24, 24, 24, 25, 23, 23, 24, 23, 23, 23, 24, 24, 24, 24, 23, 23, 24, 24, 23, 29. É possível notar um padrão no qual os valores variam em torno de 23 pixels. Na Figura 31, o mesmo procedimento de transmissão foi adotado, porém aplicando-se 3 bits de nível lógico alto consecutivos (“111”), intercalando-os entre 0s, como por exemplo: “111011101110”.

Figura 31 – Representação binária intercalando três bits em nível alto.



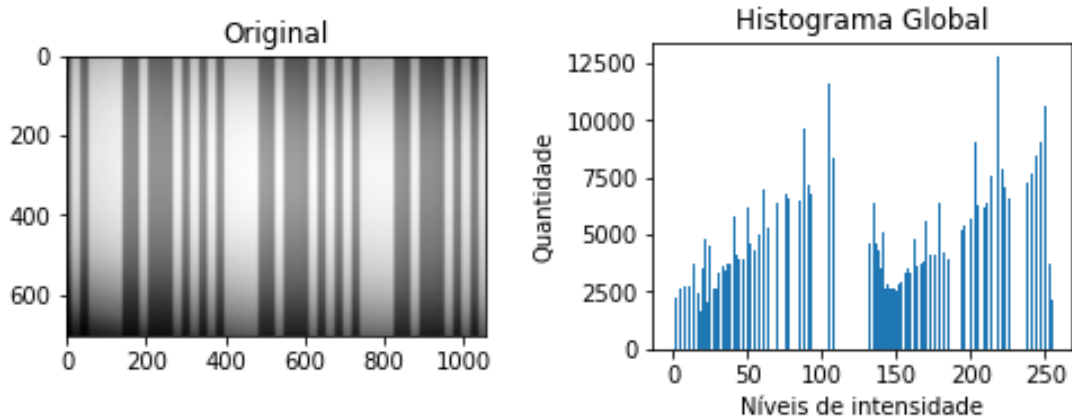
Fonte: Próprio autor.

Os conjuntos de três bits em nível lógico alto apresentam as seguintes larguras: 35, 58, 55, 55, 55, 56, 55, 56, 55, 56, 55, 55. Novamente, nota-se um padrão, no entanto, é importante observar que a relação entre a largura das franjas verticais e o número de bits não é linear, nem constante.

Enquanto na Figura 30 os bits em nível lógico alto (franjas verticais na cor branca) apresentam larguras em média de 23 pixels, na Figura 31 os valores variam em torno de 54 pixels. Além disso, quando são observados os valores das larguras das franjas para os bits em nível lógico baixo, fica evidente a não linearidade. Em ambas imagens as franjas de cor mais escura indicam um único bit 0 cada, porém as larguras obtidas na Figura 30 são as seguintes: 17, 19, 20, 19, 18, 19, 18, 19, 18, 18, 18, 18, 19, 19, 18, 18, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 15; enquanto na Figura 31 são como segue: 13, 31, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 31, 32, 31, 31.

Ademais, observa-se que o histograma de uma amostra pode conter diversos modos com amplitudes que englobam todos os níveis de intensidade observáveis. A Figura 32 exibe uma captura obtida pela câmera do celular e seu respectivo histograma. Nota-se que a amostra conta com diversos níveis de intensidade. Dessa forma, torna-se muito mais complexa a definição de um algoritmo que interprete as informações ali presentes de uma forma universal, adotando um *threshold* global e independentemente das frequências adotadas na transmissão.

Figura 32 – Histograma da imagem.

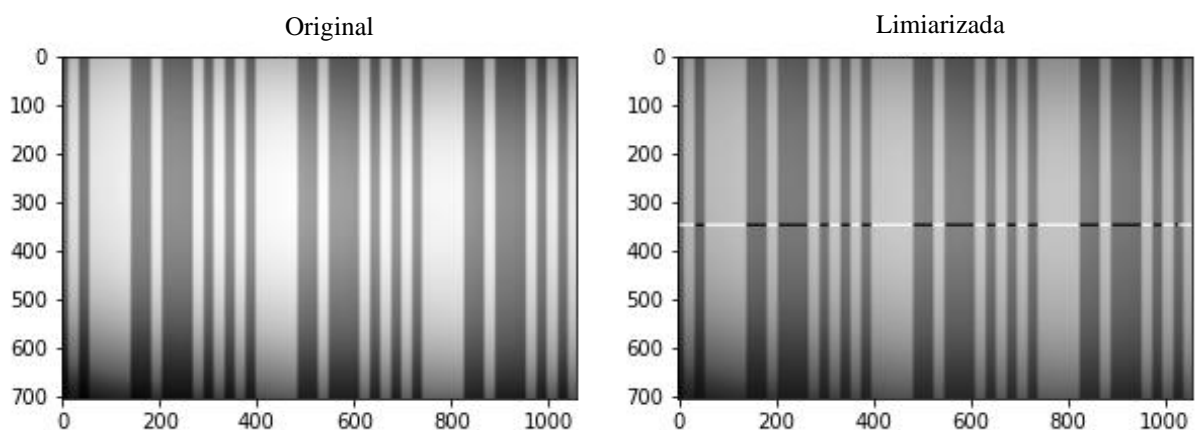


Fonte: Próprio autor.

4.2 Definição da Vizinhança de Limiarização e Região de interesse

As imagens capturadas pela câmera do celular através do aplicativo possuíam dimensões de 704 x 1056 pixels. Realizar o processo de limiarização em toda imagem, pixel a pixel, representaria um custo computacional muito grande. Para todos os pixels da imagem seriam necessários 743424 laços de repetição. Conseqüentemente, objetivando otimizar o processo foi definida uma região de interesse no centro da imagem contendo largura de 5 pixels e comprimento de 1056 pixels, conforme a Figura 33.

Figura 33 – Região de interesse para limiarização.



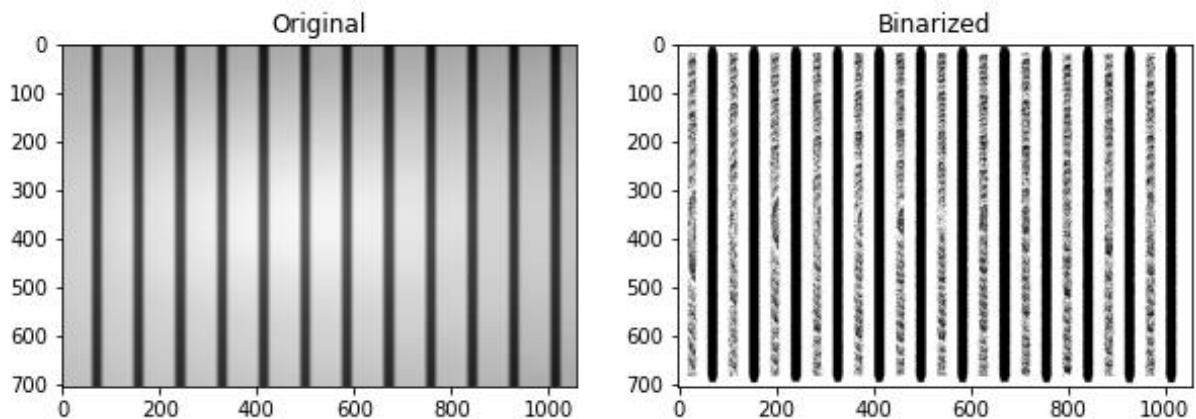
Fonte: Próprio autor.

Tendo em vista a região de interesse, não houve a necessidade de realizar o preenchimento com zeros em todas as bordas da imagem. Sendo assim, o preenchimento foi feito apenas nas laterais.

Vale ressaltar que a fim de otimizar o processo, o preenchimento foi realizado com metade das dimensões da vizinhança de limiarização de forma que a mesma estivesse sempre com seu centro posicionado na região delimitada pela imagem.

A vizinhança de limiarização foi definida através da observação da relação sinal ruído ou SNR (do inglês, *Signal noise ratio*) do sinal 2D, calculada conforme a Equação 3. Conforme a Figura 34 que evidencia a limiarização realizada sobre uma amostra idêntica a da Figura 31 com relação sinal-ruído de 5,23, a adoção de uma vizinhança de 45 x 45 durante o processo de limiarização resulta em uma imagem ruidosa com diversos artefatos que dificultam ou impossibilitam a correta decodificação.

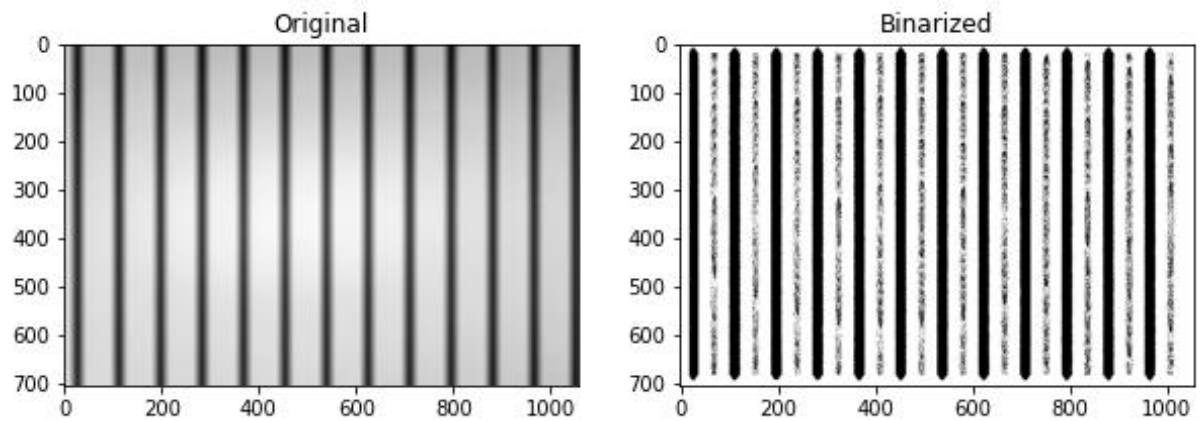
Figura 34 – Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 45x45.



Fonte: Próprio autor.

Utilizando a mesma vizinhança para um *frame* com relação sinal ruído maior (6,87) é possível observar uma leve melhora na imagem limiarizada, conforme a Figura 35.

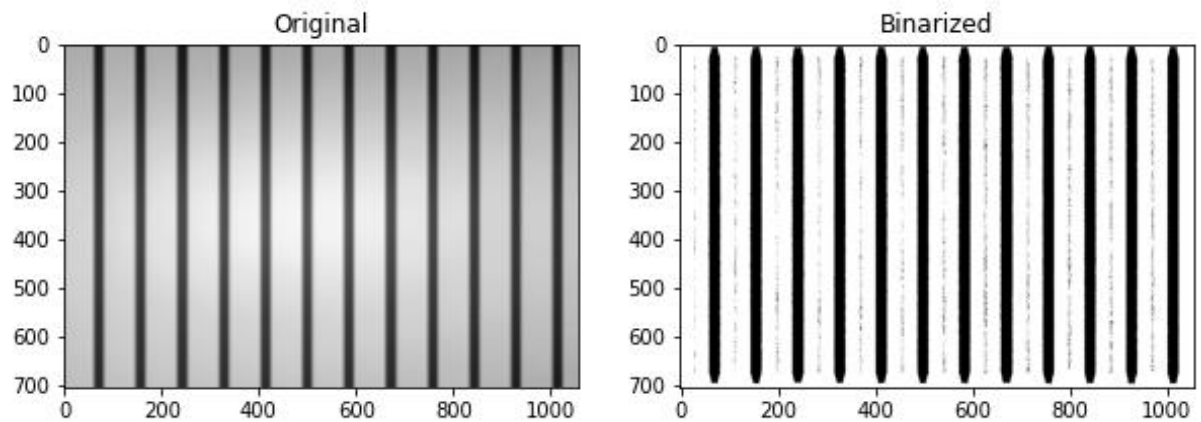
Figura 35 – Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança 45x45 e SNR superior.



Fonte: Próprio autor.

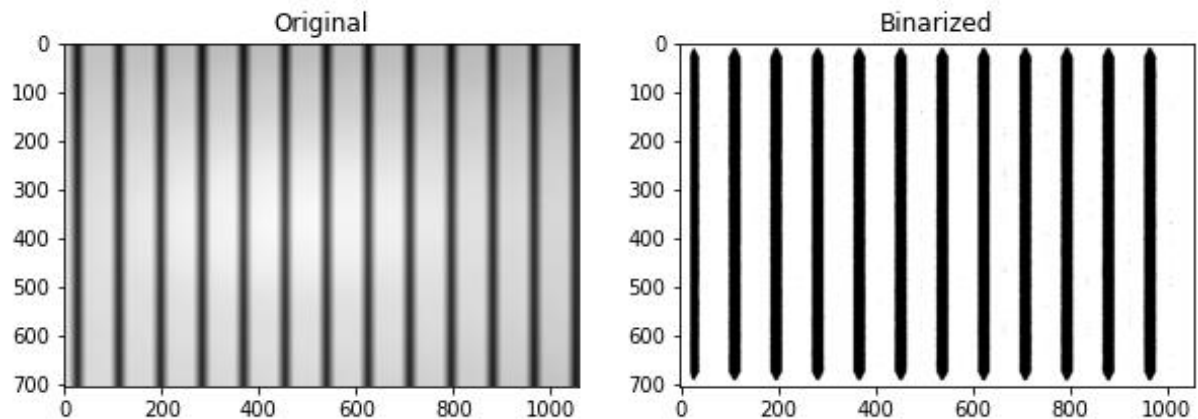
A relação sinal ruído revela-se, portanto, um ponto crítico para a limiarização da imagem com a precisão necessária para uma correta decodificação, conforme observado na Seção 3.5.2. Adotando uma vizinhança de 90x90 nas duas imagens anteriores, obtém-se os resultados das Figuras 36 e 37.

Figura 36 - Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 90x90.



Fonte: Próprio autor.

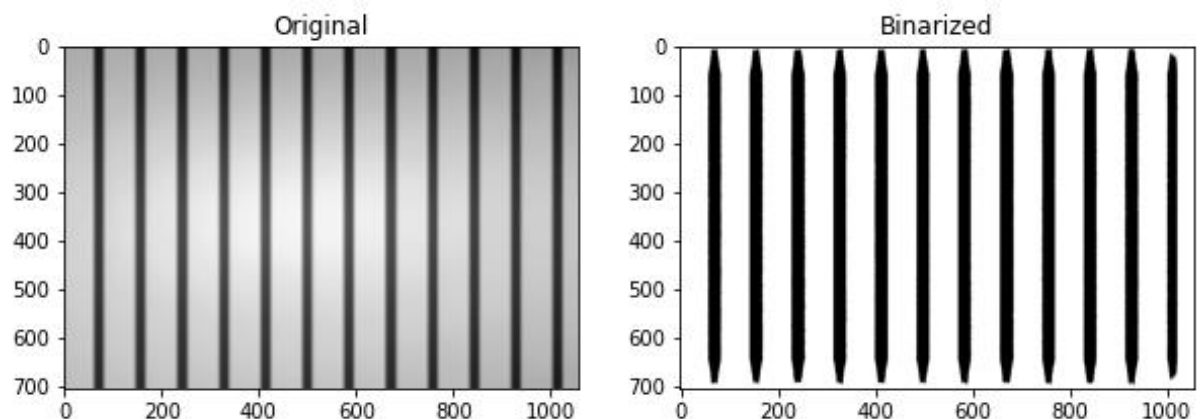
Figura 37 – Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 90x90 e SNR superior.



Fonte: Próprio autor.

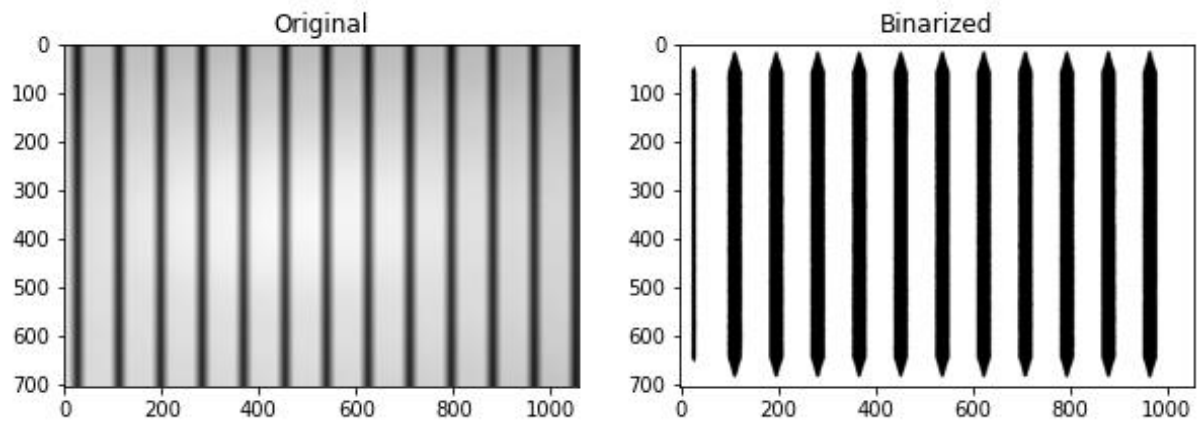
Nota-se uma evidente melhora com relação as imagens limiarizadas utilizando uma vizinhança de 45x45, porém a imagem com SNR inferior ainda apresenta certos artefatos em regiões críticas da imagem, podendo interferir negativamente na decodificação. Adotando uma vizinhança de 120x120, obtém-se os resultados presentes nas Figuras 38 e 39. De fato, essa vizinhança apresentou desempenho superior em cinco grupos distintos de amostras, sendo adotada como padrão para os testes realizados com frequência de transmissão fixada em 2 kHz e modulação *OOK*.

Figura 38 - Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 120x120.



Fonte: Próprio autor.

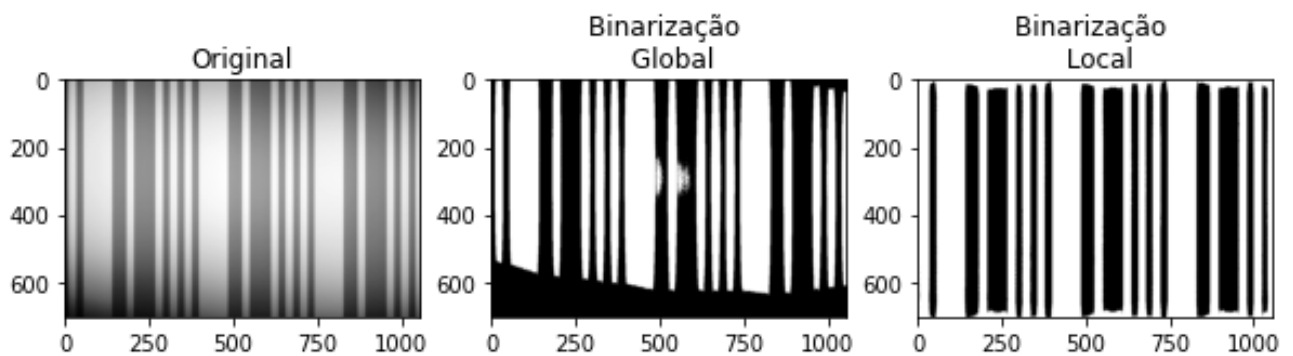
Figura 39 - Exemplo de imagem limiarizada com vizinhança de 120x120 e SNR superior.



Fonte: Próprio autor.

Outro ponto crítico no processo de limiarização refere-se aos padrões não uniformes de iluminância e refletância das imagens obtidas. Conforme pode ser observado na Figura 32, as imagens obtidas pelo *smartphone* não possuem padrões bem definidos que permitam o estabelecimento de um limiar global para a correta limiarização da imagem. A solução encontrada para contornar esse problema foi a aplicação de uma binarização variável local, com base no valor médio da intensidade dos pixels presentes na vizinhança de tamanho 120 x 120. De fato, a limiarização local apresentou resultados superiores, quando comparada a limiarização global, conforme é possível observar na Figura 40.

Figura 40 – Resultados das limiarizações global e local.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Filtros de Média e Mediana para Redução de Ruído

Verificou-se também os resultados da aplicação de um filtro espacial na imagem obtida através da câmera do *smartphone*. Notou-se, experimentalmente, que a limiarização da imagem muitas vezes apresenta diversos artefatos indesejados. Sendo assim, foram adotados os filtros de média e mediana citados nas Seções 3.3 e 3.4.

Segundo a literatura, os filtros de mediana são geralmente adotados para a redução de ruído aleatório pois apresentam resultados superiores com borramento consideravelmente menor. No entanto, a aplicação do filtro de mediana não implicou em uma melhora intrínseca na limiarização e posterior decodificação. Além disso, o poder computacional exigido para a aplicação dos filtros de mediana é maior, visto que sua aplicação está sujeita a ordenação dos valores de intensidade de cada pixel presente na vizinhança em ordem crescente.

Em ambos os casos, a aplicação tanto do filtro de média quanto do filtro de mediana representou um custo computacional muito superior, aumentando drasticamente o tempo de processamento e, conseqüentemente, mitigando os efeitos benéficos de sua aplicação nesse projeto.

4.4 Técnicas de Decodificação Implementadas

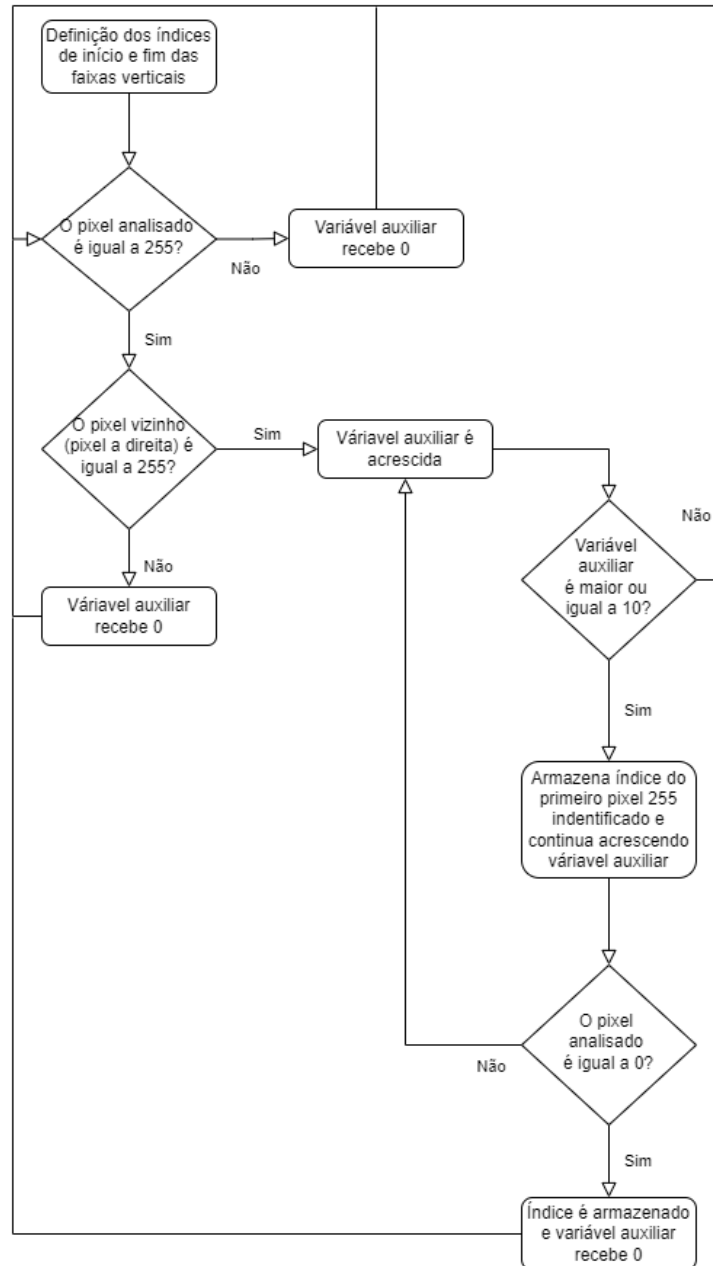
A limiarização da imagem demonstrou-se uma etapa crucial para a decodificação pois a imagem original, obtida diretamente da câmera do dispositivo móvel, contava com diversos níveis de intensidade distintos em sua composição, impossibilitando a definição de um limiar global. De fato, a variação de intensidades mostrou-se um impecilho inicial, porém é inevitável que nesse tipo de aplicação certas regiões da imagem recebam maior incidência luminosa.

A fim de otimizar o processo, a limiarização foi realizada apenas na região central da imagem, devido ao fato da luz incidente sobre a câmera ser mais intensa nessa região. A região delimitada possui largura de 5 pixels e comprimento de 1056 pixels. Dessa forma, reduz-se o custo computacional envolvido na realização da limiarização em toda a imagem e mantém-se a confiabilidade. O preenchimento com zeros nas bordas da imagem foi realizado conforme indicado na literatura, porém como o objetivo deste trabalho não envolve diretamente o tratamento das imagens capturadas pela câmera do *smartphone* e sim a decodificação da

informação ali contida, não houve a necessidade de excluir o preenchimento após terminado o processo, restringindo-se apenas a área de interesse.

Inicialmente, as tentativas de implementar uma lógica automatizada, capaz de decodificar as informações recebidas sem necessidade de ajustes iniciais e independentemente dos parâmetros estabelecidos na transmissão (como por exemplo: frequência e número de bits), se mostraram frustradas. Desenvolveu-se um algoritmo para definição dos pontos de início e fim entre as franjas (preto e brancas) decorrentes do mecanismo de varredura da câmera. A Figura 41 ilustra o procedimento adotado para determinação da largura das franjas verticais pós-limiarização.

Figura 41 – Algoritmo de definição de início e fim das franjas obtidas por meio do mecanismo de varredura da câmera.



Fonte: Próprio autor.

Após definidos os índices, estes foram armazenados em um vetor, tornando possível definir a largura (em pixels) das franjas pretas e brancas na imagem, subtraindo os valores alternadamente. Por exemplo, para uma amostra com o mesmo pacote com 1s e 0s alternados em configuração idêntica a da Figura 30, obteve-se o seguinte vetor de índices de início e fim das franjas: [120, 141, 154, 180, 200, 223, 243, 266, 285, 308, 328, 351, 371, 394, 413, 437, 456, 479, 498, 522, 543, 565, 584, 608, 627, 651, 670, 693, 712, 736, 755, 779, 798, 821, 840, 864, 884, 907, 926, 950, 969, 992, 1012, 1035, 1054, 1078, 1097, 1121, 1137]. A partir deste

vetor de índices foram obtidas as seguintes larguras para as franjas brancas (indicando nível lógico alto): [21, 26, 23, 23, 23, 23, 23, 24, 23, 24, 22, 24, 24, 23, 24, 24, 23, 24, 23, 23, 24, 24] e os seguintes valores para as franjas pretas (indicando nível lógico baixo): [13, 20, 20, 19, 20, 20, 19, 19, 19, 21, 19, 19, 19, 19, 19, 19, 20, 19, 19, 20, 19, 19, 16]. É possível perceber que os vetores indicando as larguras das franjas são resultados da subtração alternada dos elementos presente no vetor de índices.

Como citado anteriormente, as larguras obtidas não são completamente uniformes. Dessa forma, tentativas de relacionar esses valores, a fim de obter a quantidade de bits em cada franja se mostraram inconsistentes. Primeiramente, adotou-se uma estratégia baseada na divisão entre as larguras, garantindo que toda a imagem possuísse um trecho contendo bits em nível lógico alto e baixo de forma alternada a fim de definir a largura em pixels de um único bit 1 e de um único bit 0, estabelecendo assim a largura das menores franjas verticais possíveis dentro da imagem e utilizando esses valores como referência para a definição das demais franjas.

Melhor exemplificando, tendo em vista as larguras das franjas brancas do parágrafo anterior observa-se que a menor largura ali presente possui o valor de 21 pixels. Logo, para determinar a quantidade de bits representada em cada franja realizou-se a divisão de cada largura por 21. No entanto, observou-se que os menores valores de uma única franja vertical decorrente do mecanismo de *Rolling Shutter* em uma mesma imagem podiam variar entre 12 a 34 pixels. Daí decorre a variabilidade nos resultados das divisões e a inconsistência do método inicialmente proposto.

A fim de contornar o problema, foi desenvolvido um segundo método, garantindo a presença de um conjunto maior de 1s e 0s alternados na imagem, a fim de definir o conjunto das menores larguras possíveis em um mesmo *frame*, realizando posteriormente a média dessas larguras e utilizando esse valor como referência para as divisões. Novamente, a variabilidade das larguras apresentadas demonstrou-se um ponto crítico da implementação, impossibilitando a correta decodificação dos dados.

Por conseguinte, para a definição das larguras das franjas verticais utilizadas na determinação dos bits foi desenvolvido um algoritmo em linguagem Python, utilizando um notebook do Google Colab. Para tal, foram definidas diversas amostras intercalando um número crescente

de bits consecutivos. Exemplificando: inicialmente transmitiu-se um conjunto de 16 bits intercalando 1s e 0s, conforme o seguinte pacote: “1010101010101010”. A partir dessa amostra foram armazenados os valores das larguras em pixels das franjas observadas na imagem da varredura e com esses valores em mãos definiu-se um intervalo de valores seguro para a definição de um único bit em nível lógico alto ou baixo.

Em seguida, transmitiu-se o seguinte pacote: “1100110011001100”, contendo bits 0 e 1, dois a dois. O mesmo procedimento foi adotado e a faixa de valores para a definição de bits em nível lógico alto e baixo, dois a dois, foi obtida. O procedimento foi então realizado até a definição da faixa de valores apropriada para 8 bits consecutivos de mesmo nível lógico. Dessa forma, estabeleceu-se empiricamente um intervalo de valores nos quais as larguras das franjas variavam, realizando a correspondência entre as larguras e o número de bits. Esse método demonstrou maior robustez apresentando resultados satisfatórios.

4.5 Subamostragem

Durante as etapas de teste, com a lógica desenvolvida no *Google Colab* já embarcada no aplicativo para celular, verificou-se que durante o processamento, o aplicativo impedia que a câmera do celular continuasse a captura dos sinais recebidos enquanto o processamento do sinal recém amostrado não fosse finalizado. Esse processo de subamostragem induzia a perda de boa parte da informação transmitida. No entanto, tendo em vista o caráter desuniforme das imagens capturadas, para um mesmo conjunto de amostras enviadas o tempo de processamento não se manteve idêntico, embora houvesse certa similaridade. Na Tabela 1 observam-se os tempos de processamento de 10 *frames* para um mesmo pacote (“0100010011110101”) transmitido a uma frequência de 2 kHz.

Tabela 1 – Tempos de processamento para o mesmo conjunto de pacotes transmitido.

Pacote	Tempo de processamento (ms)
0	1509
1	1567
2	1541
3	1464
4	1564
5	1521
6	1467
7	1557
8	1538
9	1576

Fonte: Próprio autor.

Consequentemente, devido a essa desuniformidade, torna-se de complexa implementação a sincronização entre transmissor e receptor afim de mitigar o “desperdício” de informação. Sendo assim, a partir da delimitação da região de interesse para a limiarização, buscou-se reduzir o tempo de processamento dos *frames* e, conseqüentemente reduzir o número de pacotes “desperdiçados”.

5 RESULTADOS

5.1 Desempenho em Função da Distância

Conforme descrito na seção de Metodologia, para os testes de desempenho do sistema em função da distância, definiu-se um pacote de 16 bits no transmissor, a saber: “0100010011110101”, sendo enviado de forma ininterrupta aplicando-se modulação OOK em frequência de 2 kHz. Para cada distância testada foram enviados 6520 pacotes. A fim de verificar as potencialidades do sistema para diversas distâncias, foram utilizadas as lentes colimadoras descritas na seção de Metodologia.

No receptor, tendo obtido o sinal por intermédio do mecanismo de *Rolling Shutter* e após feita a correta limiarização, verificou-se a presença do pacote enviado e extraiu-se apenas a informação pertinente, ou seja, pacotes completos e idênticos ao pacote definido no transmissor. Por exemplo, para cada *frame* processado pelo aplicativo, tendo em consideração uma frequência de 2 kHz no transmissor, uma média de 50 bits são extraídos. Como cada pacote contém 16 bits, no máximo 2 pacotes podem ser extraídos por *frame*.

Sendo assim, para cada distância, em tempo real é feita a contagem dos pacotes enviados pelo transmissor de tal forma que a transmissão é interrompida quando o número de pacotes chega a 6520. No receptor são verificados a quantidade de *frames* processados, o número de pacotes decodificados e o tempo médio de processamento de cada *frame*. O objetivo é de obter dados quantitativos a respeito da capacidade do sistema em recuperar informação, ao mesmo tempo em que observa-se uma possível correlação entre a distância e a eficiência do *smartphone* na decodificação. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados obtidos para diferentes distâncias entre transmissor e receptor.

Distância (cm)	Quantidade de Frames processados	Pacotes Recuperados	Tempo médio de processamento dos frames (ms)
140	36	9	1706
130	40	79	1495
120	41	78	1474
110	41	82	1465
100	37	72	1596
90	40	76	1490
80	39	78	1506
70	39	78	1532
60	39	77	1496
50	40	79	1491
40	40	83	1501
30	40	80	1491
20	40	78	1504
10	40	80	1490

Fonte: Próprio autor.

Observa-se uma queda brusca na capacidade de processamento e decodificação para a distância de 140 cm, além de um tempo de processamento médio de *frames* acima dos demais. Por outro lado, para distâncias mais curtas, nota-se um certo padrão com uma quantidade de *frames* processados variando entre 39 e 41 e um tempo de processamento de *frames* variando em torno de 1502,38 ms. Com relação aos pacotes recuperados, nota-se uma variabilidade maior com valores entre 72 e 83.

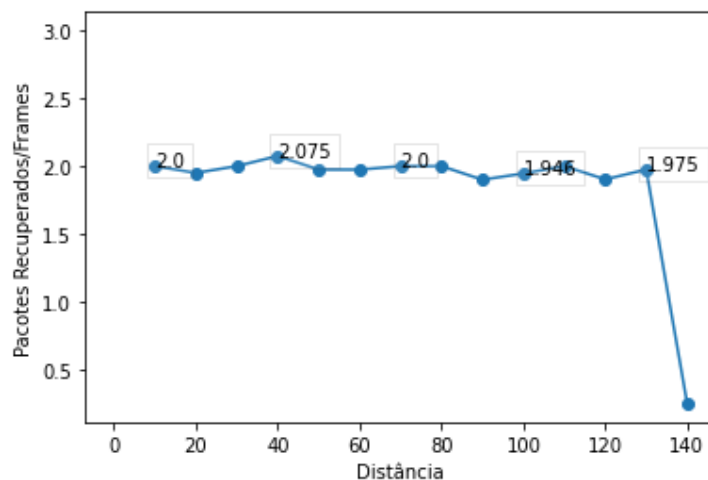
Dentro do intervalo de distâncias indo de 10 até 130 cm, observando os valores da Tabela 1, não é possível estabelecer uma correlação direta entre o número de pacotes recuperados e a distância entre transmissor e receptor. Porém, para valores maiores que 130 cm, a eficiência do algoritmo de decodificação cai bruscamente, não sendo possível recuperar nenhum pacote para distâncias superiores a 140 cm.

Vale ressaltar que para as amostras analisadas no intervalo de distância entre 10 e 130 cm todos os frames processados resultaram em ao menos um pacote decodificado. O mesmo não ocorreu para a distância de 140 cm na qual apenas 25% dos *frames* processados resultaram em

informação devidamente decodificada. De forma geral, observa-se que a porcentagem de pacotes recuperados é muito baixa. Para 6520 pacotes transmitidos, em média apenas 73,5 pacotes são recuperados. Esse número representa uma porcentagem de apenas 1,13% da informação enviada sendo efetivamente recuperada. De forma geral, tendo em consideração as distâncias de 10 a 130 cm, essa baixa porcentagem pode ser explicada pelo tempo de processamento médio dos *frames*. Concentrando-se mais especificamente sobre o resultado obtido para a distância de 140 cm, o baixo aproveitamento pode ser explicado pelo aumento da distância que induz uma redução na intensidade dos pixels na imagem, ocasionando uma redução da relação sinal-ruído e conseqüente aumento no erro observado. A Figura 42 ilustra esse processo, relacionando a razão entre o número de pacotes recuperados por *frame* com a distância entre transmissor e receptor.

Voltando-se novamente para a Tabela 2, concentrando-se sobre as amostras de 10 a 130 cm, observa-se um tempo médio de processamento 1502,38 ms. A frequência no transmissor é de 2 kHz, então a cada 8 ms (16 bits x 0,5 ms) um pacote completo é transmitido. No entanto, enquanto a aplicação processa (limiariza e decodifica) uma informação, a câmera fica inapta a receber informações, fazendo com que todos os dados enviados no intervalo de processamento de um *frame* sejam desperdiçados. Tendo em consideração o tempo médio de processamento de 1502,38 ms observa-se que em média, para cada *frame* processado, 187,8 pacotes transmitidos são desperdiçados (tempo médio de processamento ÷ tempo de envio do pacote completo).

Figura 42 – (Pacotes recuperados/ Frame) x distância.



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 42, é possível observar que a relação se mantém aproximadamente constante para distâncias menores ou iguais a 130 cm, com um desvio padrão de 0,0442 e média de 1,98 pacotes recuperados a cada *frame* processado nesse intervalo. Para 140 cm a capacidade de decodificação cai drasticamente e para distâncias maiores essa capacidade cai para zero.

5.2 Desempenho em Função da Frequência de Transmissão

De acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, a câmera do celular utilizado nesse projeto possui uma taxa de *frames* de 30 *fps*, ou seja, 1 *frame* é capturado a cada 33,33 ms. Tendo em consideração que as imagens capturadas possuem dimensões de 704 x 1056 pixels e que a câmera do *smartphone* utilizado nesse projeto implementa o mecanismo de *Rolling Shutter* por colunas, torna-se possível obter a taxa de amostragem aproximada da câmera, conforme as Equações 5 e 6.

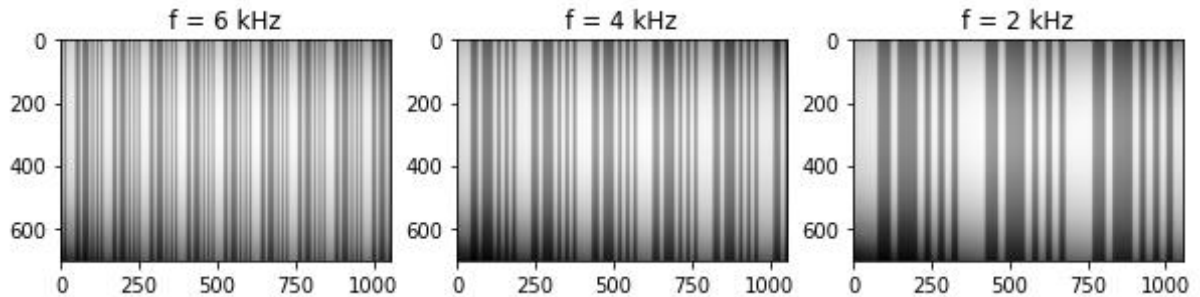
$$T_A = \frac{33,33 \times 10^{-3}}{1056} = 3,16 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (5)$$

$$f_A = \frac{1}{T_A} = 31,68 \text{ kHz} \quad (6)$$

Por conseguinte, conforme estabelecido pelo Teorema da Amostragem de Nyquist-Shannon, é possível recuperar as informações transmitidas via luz visível a uma frequência de até 15,84 kHz utilizando a câmera do celular testado nesse projeto.

O número de bits que podem ser representados em cada *frame* varia de acordo com a frequência do transmissor, de tal forma que quanto maior a frequência, menor é a largura das franjas que representam os níveis lógicos e, conseqüentemente, maior é o número de bits por *frame*. A Figura 43 ilustra essa propriedade. Nela foram registrados o mesmo pacote de 16 bits, a saber: “0100010011110101”, para frequências de 2, 4 e 6 kHz com transmissor e receptor distantes de 40 cm.

Figura 43 – Mecanismo de *Rolling Shutter* registrado para diferentes frequências de transmissão.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, embora segundo o Teorema da Amostragem seja possível recuperar informações transmitidas a uma frequência máxima de 15,84 kHz, na prática, tendo em consideração que a varredura da câmera não ocorre de forma ideal, ao aumentar a frequência faz-se necessário observar as larguras das franjas verticais obtidas. Com franjas verticais mais estreitas o processo de definição do número de bits representado em cada franja se torna mais complexo, em decorrência da maior dificuldade em estabelecer intervalos seguros para as larguras das franjas pós-limiarização.

5.2.1 Análise em Função da Frequência para um mesmo Intervalo de Tempo

A fim de definir a influência da frequência do sinal no número de pacotes recuperados pelo receptor o pacote de 16 bits: “0100010011110101” foi transmitido a frequências de 2, 4 e 6 kHz. Para essa etapa de testes foram observados os mesmos parâmetros do receptor: número de *frames* processados, número de pacotes recuperados e tempo médio de processamento dos *frames*, em um intervalo de tempo de 1 minuto, mantendo-se uma distância constante de 40 cm entre transmissor e receptor. Os resultados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos para diferentes frequências de transmissão.

Frequência (kHz)	Quantidade de Frames processados	Pacotes Recuperados	Tempo médio de processamento dos frames (ms)	Média de Bits/Frame
6	68	198	1262	100
4	51	170	1554	74
2	45	88	1531	50

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a quantidade de frames processados, bem como o número de pacotes recuperados aumentam de acordo com a frequência. De fato, o resultado encontra fundamento visto que com o aumento da frequência aumenta também o número de bits por *frame*. Também foi possível observar o aumento no número de bits por *frame* retratado na Figura 43. Outro fator importante é a diminuição da porcentagem de pacotes recuperados em relação aos pacotes enviados, conforme pode ser observado na Tabela 4.

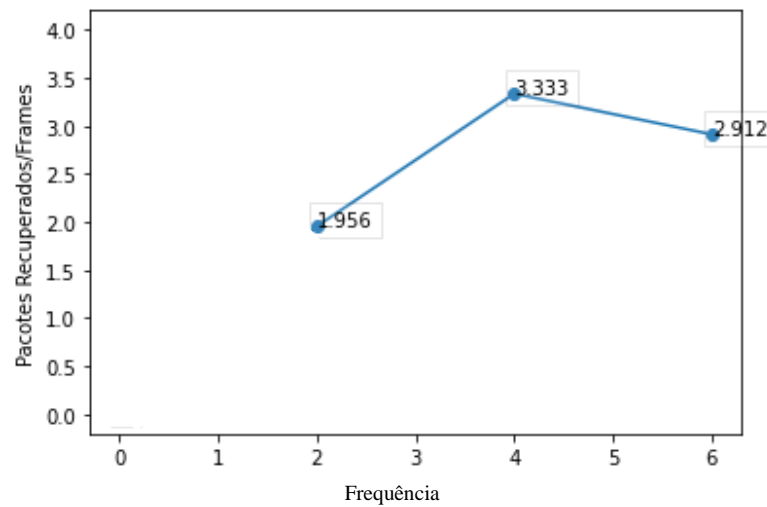
Tabela 4 – Porcentagem de pacotes recuperados em relação aos enviados.

Frequência (kHz)	Pacotes enviados	Pacotes Recuperados	Porcentagem de pacotes recuperados (%)
6	22500	198	0,8800
4	15000	170	1,1333
2	7500	88	1,1733

Fonte: Próprio autor.

A curva relacionando o número de pacotes recuperados por *frame* e a frequência de transmissão pode ser observada na Figura 44. Nota-se que, embora o aumento na frequência implique no aumento do número de pacotes recuperados e do número de frames processados para um mesmo intervalo de tempo, esse aumento não se aplica em relação a quantidade de pacotes recuperados por *frame*.

Figura 44 – (Pacotes Recuperados/Frame) x Frequência.



Fonte: Próprio autor.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato do aumento na frequência do transmissor implicar na produção de franjas verticais mais estreitas, decorrentes do mecanismo de *Rolling Shutter*. Ao produzir franjas mais estreitas faz-se necessário um ajuste mais preciso da vizinhança de limiarização para que não ocorra a produção de artefatos que possam vir a interferir na correta decodificação.

5.2.2 Análise em função da Frequência para um mesmo Número de Pacotes Transmitidos

Nessa terceira etapa de teste, novamente foram aplicadas as frequências de transmissão de 2, 4 e 6 kHz, porém transmitindo-se 7500 pacotes. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos para diferentes frequências de transmissão e 7500 pacotes transmitidos.

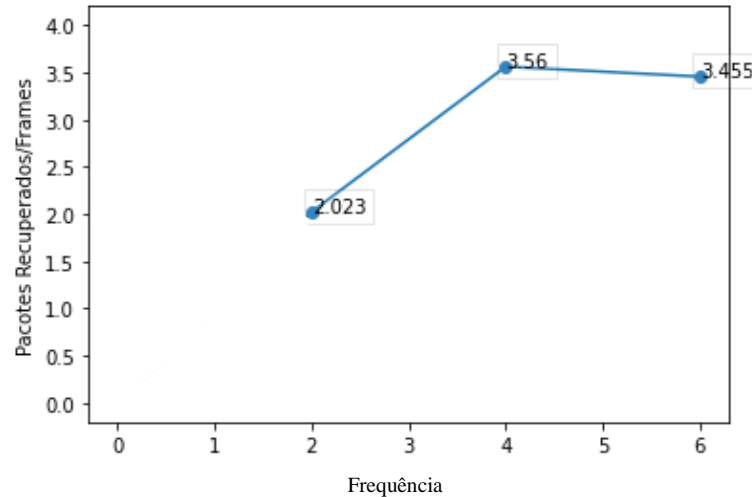
Frequência (kHz)	Quantidade de Frames processados	Pacotes Recuperados	Tempo médio de processamento dos frames (ms)
6	22	76	1253
4	25	89	1560
2	44	89	1537

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que, para um número fixo de pacotes o aumento na frequência de transmissão não implicou em um aumento no número de pacotes recuperados. Por outro lado, observando o

gráfico da Figura 45 que relaciona o número de pacotes recuperados por frame com a frequência, conclui-se que os resultados obtidos corroboram com os resultados obtidos na Seção 5.2.1.

Figura 45 – (Pacotes Recuperados/Frame) x Frequência para número fixo de pacotes.



Fonte: Próprio autor.

É possível constatar que, embora o aumento na frequência induza um aumento no número de bits por *frame*, esse aumento não se traduz, necessariamente, em um aumento no número de pacotes recuperados por *frame*. De fato, o número de pacotes recuperados em cada imagem está relacionado, simplesmente, a capacidade de processamento do celular e essa, por sua vez, está relacionado ao algoritmo de decodificação implementado. Essa conclusão também é suportada pelo gráfico da Figura 44.

Por conseguinte, para a redução de erros (ou redução do número de bits descartados devido o tempo de processamento de *frames*), realizando a subamostragem aqui proposta, faz-se necessário estabelecer uma frequência ótima. Nos casos em que é desejado transmitir mensagens mais longas, é inevitável o aumento na frequência de transmissão.

6 CONCLUSÃO E PROJETOS FUTUROS

O presente trabalho buscou verificar a aplicabilidade das câmeras de celular em sistemas de Comunicação via Luz Visível utilizando-se do mecanismo de *Rolling Shutter* (ou Varredura de Rolamento) em uma abordagem voltada ao Processamento Digital de Imagens.

Foi utilizado o serviço gratuito de computação em nuvem *Google Colaboratory*, para a caracterização do sinal recebido pela câmera do celular. Dessa forma, foi possível verificar a variabilidade em termos de relação sinal-ruído entre as imagens captadas e a natureza desuniforme das franjas verticais geradas pelo mecanismo de varredura da câmera. Partindo dessa caracterização inicial, verificou-se que a limiarização global da imagem produzia diversos artefatos que dificultavam, vezes impossibilitavam a correta decodificação. Logo, estabeleceu-se a limiarização local da imagem, definindo-se a correta vizinhança de limiarização tendo em vista a relação sinal ruído das imagens capturadas. Verificou-se empiricamente que para um sinal *OOK* (do inglês, *On-Off Keying*) transmitido a uma frequência de 2 kHz, uma vizinhança de limiarização de 120 x 120 apresenta resultados satisfatórios. Verificou-se também a aplicação de filtros lineares em uma etapa de pré-processamento, no entanto, os custos computacionais envolvidos não justificaram essa implementação. O processo de limiarização local em toda imagem, tendo em vista uma imagem de tamanho 704 x 1056 preenchida com N-1 zeros, sendo N igual a 120, resultaria em 967025 laços de repetição. Dessa forma, restringiu-se a uma faixa central de 5 pixels, reduzindo o número de laços de repetição para 5875.

Feitas as primeiras observações, tornou-se possível verificar a funcionalidade do algoritmo de decodificação pós-limiarização. Através desse algoritmo foram definidos os índices de início e fim das franjas presentes na imagem e posteriormente, utilizando os índices, foram estabelecidas as larguras das franjas. Devido a variabilidade das larguras obtidas, embora fosse observado um certo padrão, foi necessário estabelecer intervalos seguros, com base no algoritmo de calibração desenvolvido em *Python* no espaço colaborativo da *Google*, para a correta decodificação do sinal.

Determinados os parâmetros da etapa de recepção, a lógica foi embarcada no aplicativo para celular utilizando a IDE (do inglês, *Integrated Development Environment*) do sistema *Android*,

comercialmente conhecido como *Android Studio*. A partir dessa plataforma, observou-se como era esperado, a não linearidade do tempo de processamento de cada imagem (ou *frame*) recebido pelo *smartphone* e processado pelo aplicativo. Dessa forma, para fins de simplicidade, foi estabelecido um processo de subamostragem no qual eram enviados pacotes de 16 bits continuamente ao receptor, ultrapassando sua capacidade de processamento.

Estabelecido o sistema, o desempenho foi testado em função da distância entre transmissor e receptor e em função da frequência adotada na transmissão. Utilizando lentes colimadoras, foi possível estabelecer um enlace com transmissor e receptor distantes de 1,30 m, mantendo um desempenho regular. Por outro lado, para distâncias superiores a 1,30 m observou-se uma queda abrupta de desempenho. Em relação a frequência, o desempenho foi avaliado para duas situações: para um mesmo intervalo de tempo e para um mesmo número de pacotes transmitidos, aplicando frequências de 2, 4 e 6 kHz. Para a frequência de 6 kHz foi necessário um ajuste na vizinhança de limiarização, visto a largura estreita das franjas geradas pelo mecanismo de *Rolling Shutter*. Em ambas as situações testadas, notou-se que o aumento da frequência não necessariamente implica em um número maior de pacotes recuperados por *frame*. No entanto, para um mesmo intervalo de tempo, em frequências mais altas, o número de pacotes recuperados e de *frames* processados foi consideravelmente maior.

Portanto, pode-se concluir que, apesar do processo de subamostragem aplicado no sistema implicar em uma perda expressiva de informação, para aplicações que não sejam de tempo crítico, a proposta pode apresentar um bom funcionamento. Esse projeto pode ser aplicado, principalmente para fins de entretenimento ou para a leitura de informações básicas.

A fim de otimizar o processamento, recomenda-se o armazenamento de parte da imagem, buscando limitar-se a região central de cada *frame* capturado, diminuindo o número de iterações necessárias para a análise *frame a frame*. Ressalta-se que a delimitação da região de interesse deve ser feita em observância aos parâmetros necessários para uma correta limiarização, assim sendo, a delimitação não pode ser feita de forma indiscriminada. Outra estratégia se dá pela definição de vizinhanças com diferentes formatos, a fim de reduzir o número de cálculos realizados pixel a pixel. Outras formas de limiarização também podem ser testadas, como por exemplo a limiarização por particionamento da imagem. Além disso, recomenda-se o aprofundamento no estudo de Processamento Digital de Imagens, mais precisamente, nos

seguintes temas: convolução espacial, técnicas de limiarização/segmentação e filtragem no domínio espacial. Recomenda-se também a verificação da aplicação de *threads* no processamento, bem como o uso de *buffers* para o armazenamento de imagens, a fim de processar as imagens que são “desperdiçadas” seguindo a lógica implementada no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLAH, K.; SIHUA, S. A hybrid RF-VLC system for energy efficient wireless access. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, v. 2, n. 4, p. 932-944, 2018.
- ALTIBI, A. M.; KHOSRAVI, P. Machine Learning in Cardiovascular Medicine. **Academic Press**, 2020.
- ARNON, S. Visible Light Communication. 1. ed. Cambridge University Press, 2015.
- BBC. **Como devastação e aquecimento podem fazer Brasil deixar de ser potência agrícola global**. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-58325350>. Acesso em: 12 mar. 2022.
- BIGAS, M.; CABRUJA, E.; FOREST, J.; SALVI, J. Review of CMOS image sensors. **Microelectronics journal**, v. 37, n. 5, p. 433-451, 2006.
- BLOG E-MANIA. **Qual a diferença entre CMOS e CCD?**. Disponível em: <https://blog.emania.com.br/cmos-e-ccd/>. Acesso em: 23 ago. 2016.
- CHAN, V. W. Free-space optical communications. **Journal of Lightwave technology**, v. 24, n. 12, p. 4750-4762, 2006.
- CHEN, L. K., SHAO, Y., DI, Y. Underwater and water-air optical wireless communication. **Journal of Lightwave Technology**, 40(5), 1440-1452, 2022.
- CHOW, C. W.; CHEN, C. Y.; CHEN, S. H. Visible light communication using mobile-phone camera with data rate higher than frame rate. **Optics express**, v. 23, n. 20, p. 26080-26085, 2015.
- DANAKIS, C.; AFGANI, M.; POVEY, G.; UNDERWOOD, I.; HAAS, H. Using a CMOS camera sensor for visible light communication. **IEEE Globecom Workshops**, p. 1244-1248, 2012.
- ELECTRÓNICA EMBAJADORES. **Diodo LED 5 mm – Clear Vermelho Intermitente**. Disponível em: <https://www.electronicaembajadores.com/pt/Productos/Detalle/SMDL5CTT/semicondutores/diodos-e-displays-de-leds/diodo-led-5-mm-clear-vermelho-intermitente>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- HAAS, H.; ELMIRGHANI, J.; WHITE, I. Optical Wireless Communication. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 378, n. 2169, p. 20200051, 2020.
- HILLEBRAND, M.; STEVANOVIC, N.; HOSTICKA, B. J.; CONDE, J. S.; TEUNER, A.; SCHWARZ, M. High Speed camera system using a CMOS image sensor. *In: Intelligent Vehicles Symposium*, 2000. **Proceedings of the IEEE**. p. 656-661.

ISKANDER, M. F.; YUN, Z. Propagation prediction models for wireless communication systems. **IEEE Transactions on microwave theory and techniques**, v. 50, n. 3, p. 662-673, 2002.

ISMAIL, M.; ZHUANG, W. Network cooperation for energy saving in green radio communications. **IEEE Wireless Communications**, v. 18, n. 5, p. 76-81, 2011.

ISMAIL, S. N.; SALIH, M. H. A review of visible light communication (VLC) technology. **AIP Conference Proceedings**, v. 2213, n. 1, p. 020289, 2020.

KHAN, M. A.; SHARMA, M.; BRAHMANANDHA, P. R. FSM based Manchester encoder for UHF RFID tag emulator. *In: International Conference on Computing Communication and Networking*, 2015. **Proceedings of National Natural Science Foundation of China**. p 1-6.

KLEIN, A. A.; DJAIANI, G.N. Mobile phones in the hospital: past, present and future. **Anaesthesia**, v. 58, n. 4, p. 353-357, 2003.

LAIN, J. K., JHAN, F. C., & YANG, Z. D. Non-line-of-sight optical camera communication in a heterogeneous reflective background. *In: IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-8, 2019.

LIU, C. C.; CHAN, Y. T. **An Estimation Scheme of the Number of RFID Tags Based on Probability for Anti-Collision Algorithm**. Disponível em: http://163.17.20.49/AIT2010/ft_290.pdf. Acesso em: 13 mar. 2022.

MARQUES FILHO, O. VIEIRA NETO, H. **Processo Digital de Imagens**. Brasport.: Rio de Janeiro, 1999.

MOHAMED, K.; MOHAMED, A.; KHALID, Q. Energy efficient resource allocation for mixed RF/VLC heterogeneous wireless networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 34, n. 4, p. 883-893, 2016.

NEVES, J. L. C. **Adequação ao Requisito Cintilação em Sistemas de Comunicação via Luz Visível Mediante uso de Sinais OFDM com Envoltória Constante**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

NGUYEN, T., ISLAM, A., HOSSAN, T., JANG, Y. M. Current status and performance analysis of optical camera communication technologies for 5G networks. **IEEE Access**, v. 5, p. 4574-4594, 2017.

NICKLIN, S. P.; FISHER, R. D.; MIDDLETON, R. H. Rolling Shutter image compensation. *In: Robot Soccer World Cup*, 2006. **Proceedings of Robot Soccer World Cup**, p. 402-409.

QIU, X.; WEI, J.; LI, J.; LI, C.; WEI, C. A novel identification system based on visible light communication. *In: 22nd wireless and Optical Communication Conference*, 2013. **IEEE**. p. 649-652.

SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 5. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2012.

SCHWAB, A. J.; FISCHER, P. Maxwell, Hertz, and German radio-wave history. **Proceedings of the IEEE**, v. 86, n. 7, p. 1312-1318, 1998.

SEYMOUR, T.; SHAHEEN, A. History of wireless communication. **Review of Business Information Systems (RBIS)**, v. 15, n. 2, p. 37-42, 2011.

SINGH, S.; KAKAMANSHADI, G.; GUPTA, S. Visible light communication-an emerging wireless communication technology. *In: 2nd International conference on recent advances in engineering & computational sciences (RAECS), 2015. Proceedings of 2015 RAECS UIET Panjab University Chandigarh.* p 1-3.

STATISTA. **Smartphone subscriptions worldwide 2016-2027**. 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

TOKYO ELECTRON. What is a CMOS Image Sensor?. Disponível em: <https://www.tel.com/museum/exhibition/principle/cmos.html>. Acesso em: 13 mar. 2022.

TRONCO, T. R.; DE AVILA, L. F. **Fundamentos de Comunicações Ópticas**. 1. ed., 2007.

TSAI, T. T., CHOW, C. W., CHANG, Y. H., JIAN, Y. H., LIU, Y., & YEH, C. H. 130-m Image sensor based Visible Light Communication (VLC) using under-sample modulation and spatial modulation. *In: Optics Communications*, 519, 128405.

VASILAKIS, M. **Dynalight: A Dynamic Visible Light Communication Link for Smartphones**. 2015. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:6dc20955-c2ff-48b4-aa3c-1f91dffccba0>. Acesso em: 16 mar. 2022.

VAZQUEZ, A.; ANTELO, E. A high-performance significant BCD adder with IEEE 754-2008 decimal rounding. *In: 19nd IEEE Symposium on Computer Arithmetic, 2009. Proceedings of the IEEE*. p. 135-144.

VIEIRA, A. B. et al. Comunicação por Luz Visível: Conceito, aplicações e Desafios. *In: SBRC - Minicursos*, 6., 2017, Belém. **Anais [...]**. Belém: 2017. PDF.

WIKIVERSITY. **Radiation Astronomy/Diffractions**. 2021. Disponível em: https://en.wikiversity.org/w/index.php?title=Radiation_astronomy/Diffractions&oldid=2292069. Acesso em: 27 jul. 2022.

WOODS, R. E., GONZALEZ, R. C. **Digital image processing**. Itália: Pearson/Prentice Hall, 2008.

WORLDOMETER. **Current World Population**. 2022. Disponível em: <https://www.worldometers.info/world-population/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

YEH, N.; CHUNG, J. P. High-brightness LEDs - Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 2175-2180, 2009.

