

INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA
COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
TECNOLOGIA
EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Jeanderson das Neves Andrade

Sistema de transmissão de áudio analógico via FSO digital

João Pessoa, novembro de 2023.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha –IFPB, *Campus* João Pessoa

A554s Andrade, Jeanderson das Neves.
Sistema de transmissão de áudio analógico via FSO digital /
Jeanderson das Neves Andrade. – 2023.
46 f. : il.

TCC (Graduação – Tecnologia em Sistemas de
Telecomunicações) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB /
Coordenação de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações.
Orientador: Prof. Dr. Luís Romeu Nunes.

1. Comunicação óptica. 2. Sistema de comunicação simplex.
3. Sinal de áudio analógico. 4. Modulação digital. 5. Enlace
óptico. 6. Arduino Uno. I. Título.

CDU 621.391

Jeanderson das Neves Andrade

Sistema de transmissão de áudio analógico via FSO digital

**Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia
em Sistemas de Telecomunicações do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da
Paraíba, como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Tecnólogo em
Telecomunicações.**

Orientador: Dr. Luís Romeu Nunes

João Pessoa, novembro de 2023.

Jeanderson das Neves Andrade

Sistema de transmissão de áudio analógico via FSO digital

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia
em Sistemas de Telecomunicações do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da
Paraíba, como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Tecnólogo em
Telecomunicações.

Aprovado Pela Banca Examinadora em:

BANCA EXAMINADORA
Documento assinado digitalmente
 LUIS ROMEU NUNES
Data: 09/01/2024 07:36:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luís Romeu Nunes.

Orientador

Documento assinado digitalmente
 ROSSANA MORENO SANTA CRUZ
Data: 01/02/2024 09:30:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Rossana Moreno Santa Cruz

Membro da Banca



Prof. Dr. Lincoln Machado de Araújo

Membro da Banca

João Pessoa, novembro de 2023.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, agradeço também a minha esposa Fernanda, minha companheira para todos os momentos, melhor amiga e amor da minha vida. Você sempre me proporciona os melhores conselhos, me apoiando em todas as minhas decisões.

Gostaria de agradecer a minha mãe, que apesar das adversidades, sempre me incentivou na busca pelo conhecimento. Um agradecimento especial para a minha irmã Angeline, por ter sido pioneira em nossa família, mostrando que por mais que as coisas vãs dessa vida passem o que aprendemos fica conosco.

Agradeço aos meus colegas de curso, em especial, ao meu amigo Jonatas, o qual tive diversas conversas a respeito deste trabalho. Durante esses encontros foi possível desenvolver boa parte dos circuitos eletrônicos de forma descontraída. Espero retribuir sua ajuda em projetos futuros.

Agradeço ao meu orientador, professor Luís Romeu Nunes, por disponibilizar boa parte do seu tempo e não medir esforços para a realização deste trabalho, sempre me guiando e me passando conhecimento e experiência. A partir dos seus ensinamentos, pude evoluir boa parte das minhas habilidades como aluno e como pessoa. Gostaria de agradecer também à professora Rossana Moreno, pelo fornecimento dos materiais para a execução deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Visando o estudo de funcionamento dos sistemas de comunicação óptica em espaço livre, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de comunicação simplex, capaz de: amostrar um sinal de áudio analógico com oito bits de resolução, enviar dados por modulação digital de intensidade através de um enlace óptico composto por um LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) e um fotodiodo, processar os dados recebidos e converter em áudio analógico por meio de um DAC (*Digital to Analog Converter*) do tipo escada R2R. Para transmissão e recepção dos dados foram utilizadas duas plataformas Arduino Uno, o protocolo de comunicação selecionado foi o UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), com taxa de transmissão de bits em 1 Mbps, com reprodução de uma amostra de áudio na saída a cada 13,5 μ s, com cerca de 74.000 amostras por segundo. De acordo com os testes realizados, o sistema foi capaz de reproduzir com qualidade, sinais de áudio abaixo de 10 kHz com taxa de transmissão de bits final próxima à 740 kbps.

Palavras-Chave: Comunicação óptica, Arduino, fotodiodo.

ABSTRACT

Aiming to study the functioning of optical communication systems in free space, this work proposes the development of a simplex communication system, capable of: sampling an analog audio signal with eight bits of resolution, sending data by digital intensity modulation through an optical link composed by a LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) and a photodiode, processing the received data and converting it into analog audio using a DAC (Digital to Analog Converter) of the R2R ladder type. Two Arduino Uno platforms were used to transmit and receive data, the communication protocol selected was UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), with a bit transmission rate of 1 Mbps, with reproduction of an audio sample at the output every 13.5 μ s, with about 74,000 samples per second. According to the tests carried out, the system was able to reproduce audio signals below 10 kHz with quality with a final bit rate close to 740 kbps.

Keywords: Optical communication, Arduino, photodiode.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações de sistemas de comunicação FSO.	12
Figura 2 - Fotofone de Graham Bell.....	13
Figura 3 - Funcionamento do fotodiodo em modo fotocondutivo.....	14
Figura 4 - Fotodiodo PIN.....	15
Figura 5 - Fotodiodo de Avalanche.....	15
Figura 6 - Emissão estimulada de fótons.....	16
Figura 7 - LASER a gás.....	17
Figura 8 - Estrutura de um LASER semiconductor.....	17
Figura 9 - Diagrama de um sistema FSO.	19
Figura 10 - Interferência por turbulência atmosférica.....	20
Figura 11 - LASER modulado por corrente.	20
Figura 12 - Transmissor NRZ OOK.	21
Figura 13 - Diagrama em blocos do sistema proposto.	23
Figura 14 - Filtro passa-baixa de entrada.	24
Figura 15 - Circuito condicionador 1.	25
Figura 16 - Padrão de bits do protocolo UART.	27
Figura 17 - Tempo de envio de pacote de dados.	27
Figura 18 - Circuito driver LASER.	28
Figura 19 - Amplificador de transimpedância.	28
Figura 20 - Saídas digitais utilizadas no Arduino receptor.....	29
Figura 21 - Registradores Atmega 328.....	29
Figura 22 - Exemplo de DAC escada R2R.....	30
Figura 23 - DAC de escada R2R utilizado no sistema.	31
Figura 24 - Circuito condicionador 2.	32
Figura 25 - Sistema simulado sem canal óptico.	33
Figura 26 - Tempo do sinal amostrado no receptor em simulação.....	34
Figura 27 – Reconstrução do sinal em diferentes frequências (em simulação).....	35
Figura 28 - Reconstrução do sinal em diferentes frequências com filtro RC na saída (em simulação).....	35
Figura 29 - Esquema simulado com adição de capacitor na saída.	36

Figura 30 - Resposta do LASER.	37
Figura 31 - Resposta do circuito fotorreceptor.	37
Figura 32 - Sistema funcionando em bancada.	38
Figura 33 - Comparação entre sinal do DAC simulado e medido em bancada, em 10 kHz. ...	39
Figura 34 - Reconstrução do sinal em diferentes frequências (em bancada).	39
Figura 35 - Reconstrução do sinal em diferentes frequências com filtro RC na saída (em bancada).	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de tensão de referência do ADC do Arduino.....	23
Tabela 2 - Valores de prescaller do ADC do Atmega328.....	23

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

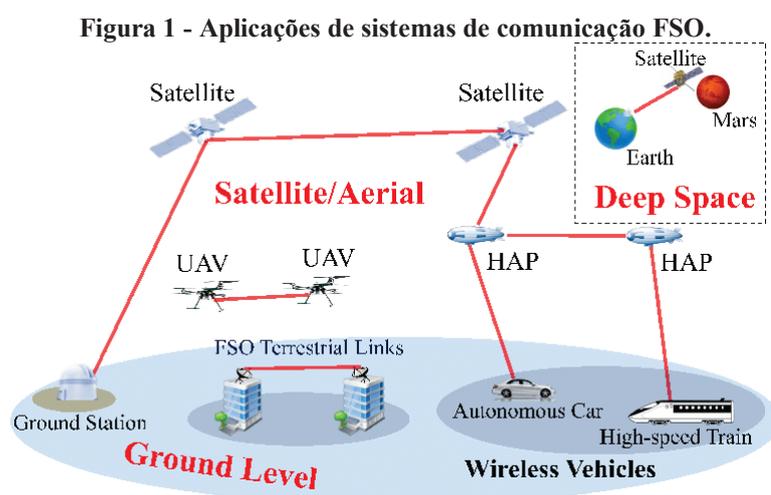
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor analógico para digital)
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i> (Conversor digital para analógico)
FSO	<i>Free Space Optical</i> (Óptica de espaço livre)
kHz	Quilohertz
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
Gbps	Gigabits por segundo
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Megahertz
NRZ OOK	<i>Not Return Zero On-Off Keying</i> (Chaveamento Liga-Desliga com Não retorno a zero)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (Receptor/Transmissor Universal Assíncrono)
μs	Microsegundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 FOTODIODO.....	14
2.2 LASER SEMICONDUTOR.....	16
2.3 ÓPTICA EM ESPAÇO LIVRE.....	18
2.4 MODULAÇÃO DE INTENSIDADE.....	20
3 SISTEMA PROPOSTO.....	23
3.1 FILTRO PASSA-BAIXA.....	23
3.2 CIRCUITO CONDICIONADOR 1.....	25
3.3 CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL.....	25
3.4 PROTOCOLO UART.....	27
3.5 CIRCUITO LASER.....	28
3.6 CIRCUITO FOTORRECEPTOR.....	28
3.7 PROCESSAMENTO DE DADOS.....	29
3.8 CIRCUITO CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO.....	30
3.9 CIRCUITO CONDICIONADOR 2.....	31
4 RESULTADOS.....	33
4.1 CRONOGRAMA.....	33
4.2 SISTEMA SIMULADO.....	33
4.3 TESTE DE CANAL ÓPTICO.....	36
4.4 TESTE DE SISTEMA EM BANCADA.....	38
5 CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE A – Programa desenvolvido para o Arduino Uno transmissor.....	45
APÊNDICE B – Programa desenvolvido para o Arduino Uno receptor.....	46

1 INTRODUÇÃO

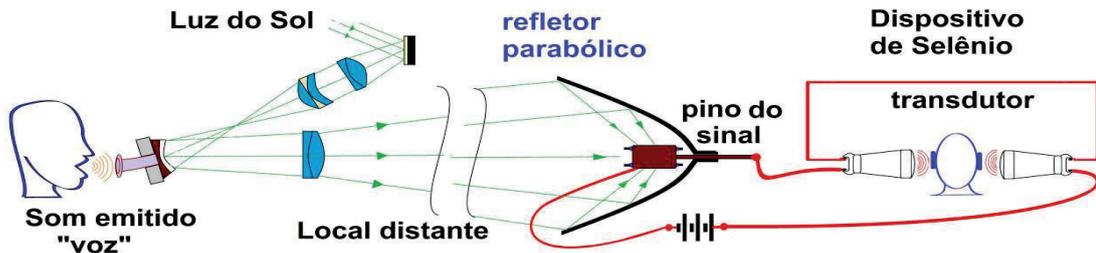
O emprego da tecnologia de Comunicação Óptica no espaço livre, conhecida por *free space optical* (FSO), tem se expandido consideravelmente como uma alternativa à tecnologia de Radiofrequência já existente em diversas aplicações, sendo algumas delas: Para comunicação militar (Sakamoto et al., 2008), comunicação em espaço profundo (Geisler, 2020), links de banda larga (Gebhart et al., 2004) e entre outras aplicações vide Figura 1. Essa tecnologia oferece a capacidade de gerenciar altas taxas de dados com consumo de energia reduzido e implementação de baixo custo. Além disso, é resistente a interferências eletromagnéticas e conta com um sistema de segurança robusto que pode detectar qualquer tentativa de interceptação de forma imediata (Hou et al., 2015).



Fonte: Le; Pham (2022).

O primeiro sistema FSO criado foi o Fotofone de Alexander Graham Bell, realizado no fim do século XIX. O dispositivo incluía um transmissor e um receptor. No transmissor, havia um espelho montado em um diafragma, onde a voz de uma pessoa era projetada, ondas sonoras vibravam o diafragma, fazendo com que o espelho refletisse a luz em direção ao receptor. O receptor, por sua vez, estava equipado com um painel fotossensível que detectava as variações na intensidade da luz causadas pelas vibrações do espelho no transmissor. Isso permitia que o som fosse recriado no receptor, permitindo que as palavras fossem "ouvidas" do outro lado da transmissão (Bell, 1880). Na Figura 2 é possível observar uma representação do Fotofone.

Figura 2 - Fotofone de Graham Bell.



Fonte: Adaptado de Bell (1880).

O Fotofone representou um marco importante na história das telecomunicações, pois demonstrou o princípio de transmitir som por meio de luz, embora tivesse algumas limitações práticas. A tecnologia do Fotofone, no entanto, não foi amplamente adotada para uso comercial, principalmente devido à necessidade de luz solar direta para funcionar e à falta de viabilidade em condições de pouca luz (Wilfert et al., 2008).

Com o avanço tecnológico, os sistemas de comunicação FSO foram aperfeiçoados, atualmente uma das suas aplicações mais comuns é a criação de links de alta velocidade entre edifícios, tornando-se uma solução vantajosa em ambientes urbanos onde a instalação de cabos ópticos é desafiadora ou dispendiosa. Empresas e instituições frequentemente utilizam sistemas FSO para estabelecer redes de alta velocidade entre escritórios, campi ou instalações próximas (Pathak et al., 2018).

Com o foco no estudo de sistemas FSO, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de comunicação simplex capaz de captar um sinal de áudio analógico, converter para forma digital, enviar via FSO e captar o sinal discreto convertendo-o em sinal analógico em sua saída.

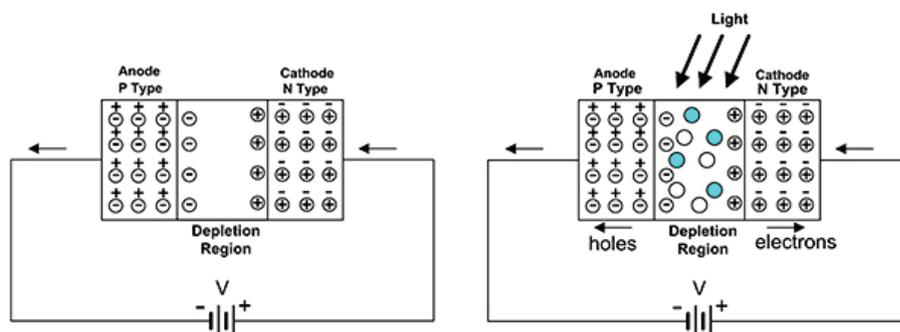
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FOTODIODO

O fotodiodo é um dispositivo semicondutor, que quando submetido a um feixe luminoso, uma corrente ou tensão é desenvolvida dependendo do seu modo de operação. Quando não submetido à polarização, o fotodiodo funciona no modo fotovoltaico e gerará uma pequena tensão de saída quando exposto à luz de uma fonte, desempenhando um papel semelhante ao de uma célula solar. O modo fotovoltaico é apropriado para aplicações de baixa frequência, geralmente abaixo de 350 quilohertz (kHz), e com nível de luz de baixa potência. A tensão gerada é de baixa magnitude, e, na maioria das situações, é necessário utilizar um amplificador (Pini, 2022).

Quando polarizado inversamente, o fotodiodo opera em modo fotocondutivo. É criada uma área de depleção na junção P-N do dispositivo. A largura dessa área de depleção aumenta à medida que a polarização é intensificada. Ao incidir uma determinada luz, permite a passagem de uma corrente elétrica, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Funcionamento do fotodiodo em modo fotocondutivo.



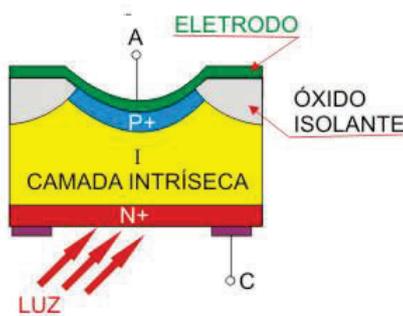
Fonte: Pini (2022).

Por apresentar maior velocidade de resposta, em sistemas de comunicações, os fotodiodos são utilizados geralmente como fotocondutores para detecção de sinais luminosos de alta frequência. Nesse modo, existem dois tipos de modelos amplamente utilizados, os fotodiodos do tipo PIN e do tipo avalanche (Raisa, 2023).

Desenvolvido no ano de 1959 o fotodiodo PIN é amplamente empregado em sensores industriais de alta velocidade até os dias atuais. A denominação "PIN" provém da presença de uma camada intrínseca (indicada como "I") situada entre as áreas P e N, quando um fóton atinge

um átomo dessa região, ele libera um elétron formando assim um par elétron-lacuna que migram em direções opostas produzindo uma corrente (Braga, 2023). Conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Fotodiodo PIN.

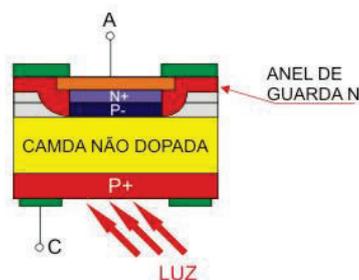


Fonte: Adaptado de Raisal (2023).

O fotodiodo de avalanche apresenta notáveis distinções em relação ao fotodiodo PIN convencional. A característica distintiva reside no processo de avalanche, no qual um único elétron gerado pela luz na região não dopada é multiplicado diversas vezes por meio desse processo. Como consequência, demonstra uma sensibilidade a ruídos muito superior e não mantém a linearidade, quando comparado ao fotodiodo PIN (Raisal, 2023).

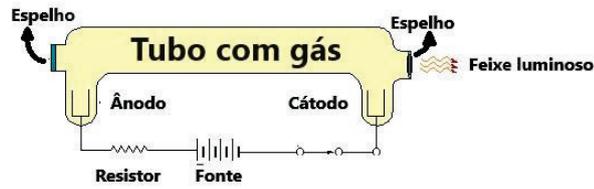
Sua estrutura é, adicionalmente, mais complexa. É requerido um anel de proteção do tipo "n" em torno da junção PN para reduzir o campo elétrico próximo à borda da junção. Seu ganho de corrente depende não apenas da polarização aplicada, mas também das flutuações térmicas. Portanto, é crucial garantir seu controle de temperatura. Na Figura 5 abaixo é possível visualizar a estrutura básica de um fotodiodo do tipo avalanche (Raisal, 2023).

Figura 5 - Fotodiodo de Avalanche.



Fonte: Adaptado de Raisal (2023).

Figura 7 - LASER a gás.

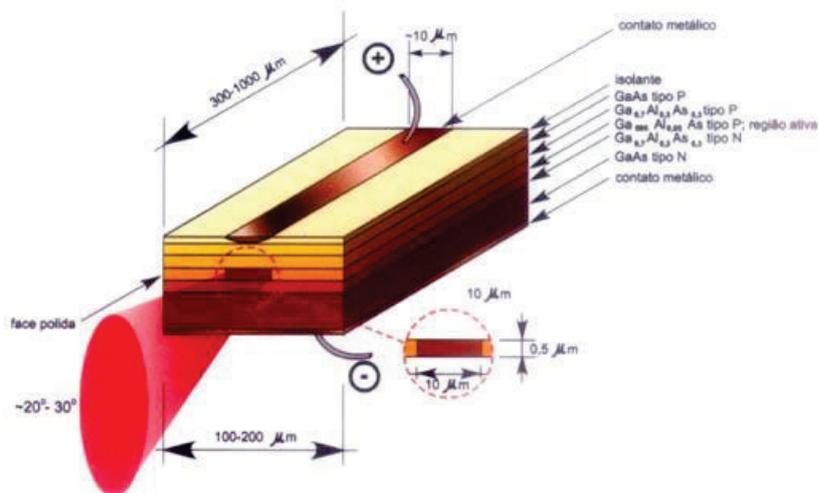


Fonte: Adaptado de Dionisio (1993).

Além do LASER a gás, há também o diodo LASER, o qual recebe bombeamento externo por meio da injeção de corrente na região ativa do semiconductor, localizada entre as camadas dopadas de tipo n (que contêm um excesso de elétrons) e tipo p (que apresentam um excesso de buracos ou vacâncias de elétrons), com a polarização direta (Barboza; Oliveira, 2021).

Um tipo de estrutura utilizada na confecção de diodos LASER é a heterojunção dupla, constituída de duas camadas tipo-p e duas camadas do tipo-n de materiais semicondutores diferentes, possui um limiar de corrente baixo, operando em temperatura ambiente. A radiação emitida por um laser semiconductor provém de uma área extremamente pequena com dimensões transversais da ordem de grandeza de micrômetros, graças ao confinamento tanto perpendicular quanto paralelo ao plano da camada ativa. Um típico feixe de saída exibe um ângulo de divergência de cerca de 30 graus na direção perpendicular à junção e cerca de 10 graus na direção paralela à junção (Barboza; Oliveira, 2021), como é possível observar na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura de um LASER semiconductor.



Fonte: Adaptado de Barboza; Oliveira (2021).

Devido às suas vantagens em termos de tamanho compacto, eficiência energética, confiabilidade e compatibilidade com circuitos eletrônicos, os lasers semicondutores se destacam como a principal fonte de luz em aplicações de comunicação. Eles superam os LEDs (*Light-Emitting Diode*) em desempenho, tornando-se a escolha preferida na indústria de Comunicação por Fibras Ópticas (Alkholidi, 2014).

Uma das principais diferenças entre LASERs e LEDs reside na emissão de luz estimulada e espontânea. Os LASERs têm a capacidade de emitir luz com intensidades muito mais elevadas e com coerência, tornando-os ideais para transmissões de alta velocidade, superando facilmente os 10 Gbps. No entanto, os LASERs possuem algumas desvantagens. Eles são intrinsecamente não lineares, o que pode dificultar as transmissões analógicas. Além disso, são sensíveis a flutuações de temperatura e corrente elétrica injetada, o que pode resultar em variações no comprimento de onda do sinal emitido. Em aplicações que requerem estabilidade absoluta das fontes óticas, são necessários circuitos mais complexos e mecanismos de realimentação para detectar e corrigir essas variações no comprimento de onda (Barboza; Oliveira, 2021).

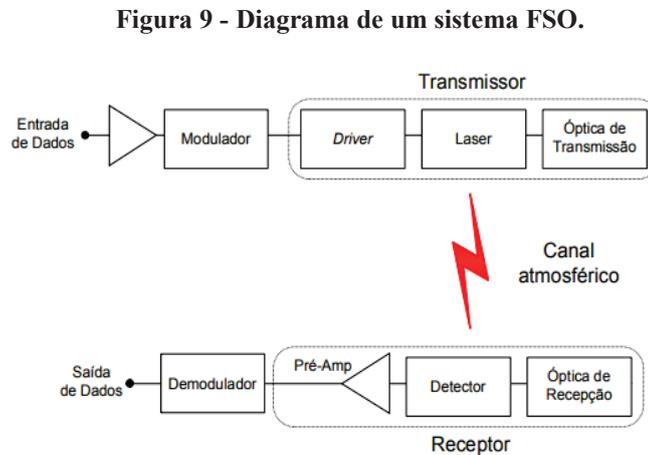
2.3 ÓPTICA EM ESPAÇO LIVRE

O avanço contínuo nas tecnologias de LASER possibilitou a exploração de uma parte significativa do espectro eletromagnético que, até então, era pouco utilizada nas telecomunicações. Essas aplicações abrangem uma variedade de cenários, desde a transmissão de imagens via satélite, que oferece economia de espaço físico e consumo de energia em comparação com sistemas convencionais de micro-ondas (que incluem antenas e vários guias de ondas), até enlaces infravermelhos de médio alcance (Gebhart et al., 2004) que garantem a interconexão segura de nós de redes em uma WAN (*Wide Area Network*).

Além disso, as tecnologias de comunicação por FSO também se estendem a aplicações de curto alcance, permitindo a interconexão eficiente de periféricos em diversos contextos. Isso destaca a versatilidade e o potencial das tecnologias de LASER na expansão das capacidades de comunicação em uma variedade de cenários, desde transmissões de longa distância até conexões de curto alcance (Sakamoto et al., 2008).

Os sistemas de comunicação óptica em espaço livre, bem como aqueles que utilizam canais de fibra óptica, têm como princípio fundamental a modulação de uma portadora óptica

por um sinal de informação em banda-base, que pode ser tanto digital quanto analógico. Segue na Figura 9 um diagrama de blocos simplificado de um sistema FSO convencional:



Fonte: Sakamoto et al. (2008).

As tecnologias de comunicação por FSO utilizam o ambiente atmosférico como meio de propagação, sendo que suas propriedades são variáveis aleatórias em função do espaço e do tempo. Isso torna as conexões FSO sensíveis às condições climáticas e à localização geográfica. Diversos fatores ambientais imprevisíveis, como nuvens, neve, nevoeiro, chuva e neblina, entre outros, têm um impacto significativo na atenuação do sinal óptico, limitando a distância que pode ser alcançada em uma conexão FSO.

No cenário idealizado em que a atmosfera não afeta a conexão, no chamado canal de espaço livre básico, o sinal é transmitido sem perdas. No entanto, quando se leva em conta os efeitos da extinção atmosférica, fica evidente que vários fatores contribuem para a degradação do sinal recebido. A transmissão através de nuvens densas e nevoeiro intenso, por exemplo, geralmente não é viável devido à alta atenuação, que pode chegar a várias dezenas de decibéis por quilômetro. Mesmo em condições climáticas mais favoráveis, as perdas no canal atmosférico ocorrem principalmente devido a fenômenos de absorção e dispersão (Alkholidi et al., 2014).

Um fator significativo de degradação é a turbulência atmosférica, um fenômeno aleatório que resulta em variações na temperatura e pressão da atmosfera ao longo do trajeto de propagação da luz. Essas variações causam a formação de células turbulentas, também conhecidas como turbilhões, que possuem diversos tamanhos e índices de refração diferentes. Esses turbilhões agem como prismas ou lentes naturais, provocando mudanças de fase nos

sinais ópticos à medida que o feixe de luz atravessa essas áreas turbulentas. Isso pode resultar em interferência construtiva ou destrutiva no feixe de propagação (Tang, 2012).

Interferências causadas pela turbulência atmosférica são particularmente pronunciadas quando as células turbulentas são maiores que a dimensão do feixe de luz. Isso pode levar a variações significativas na intensidade e na qualidade do sinal óptico em sistemas de comunicação FSO, impactando negativamente o desempenho da conexão. A Figura 10 ilustra tal fenômeno onde tais variações difratam o sinal luminoso.

Figura 10 - Interferência por turbulência atmosférica

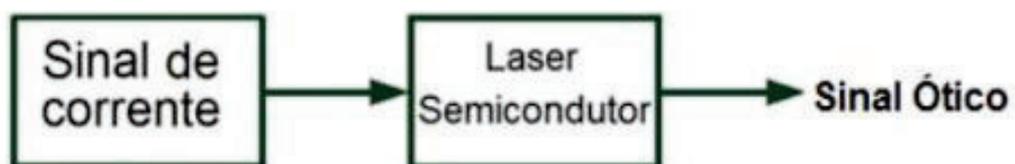


Fonte: Adaptado de Tang (2012).

2.4 MODULAÇÃO DE INTENSIDADE

A modulação direta de LASERs é uma das técnicas mais simples para transmitir informações em uma portadora óptica. Nesse processo, a informação que se deseja transmitir é diretamente modulada na corrente que alimenta o LASER. Essa corrente controla a intensidade da luz emitida pelo LASER, variando a intensidade de luz de acordo com o sinal da corrente (Barboza; Oliveira, 2021). Esse tipo de modulação resultante é chamado de modulação de intensidade, é possível observar na Figura 11, o esquema desta modulação.

Figura 11 - LASER modulado por corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

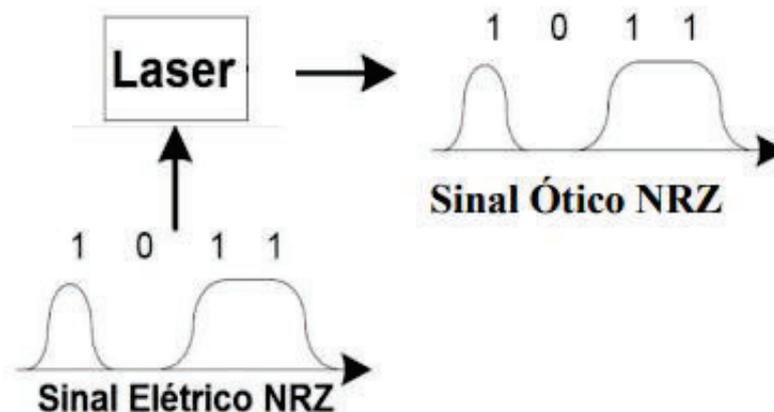
A principal desvantagem dos LASERs modulados diretamente para transmissões em longas distâncias e altas taxas de transmissão é um efeito chamado *chirp*. Isso se refere à modulação de fase residual que acompanha a modulação de intensidade desejada.

O *chirp* do LASER causa um alargamento do espectro óptico do sinal, o que pode dificultar a utilização da modulação direta em alguns sistemas de comunicação. Isso pode levar a distorções no sinal transmitido, prejudicando a qualidade da comunicação. Portanto, o *chirp* é uma consideração importante ao projetar sistemas de comunicação a LASER e pode requerer técnicas de compensação ou o uso de outros tipos de LASERs, dependendo dos requisitos específicos da aplicação (Da Silveira, 2009).

Um caso especial de modulação por intensidade, designado por *On-Off-Keying* (OOK), é um dos mais usados nos sistemas ópticos devido à sua simplicidade. O OOK é um esquema de modulação de intensidade onde a portadora é ligada para transmitir um sinal lógico “um” e desligada para transmitir um sinal lógico “zero” (Henniger; Wilfert, 2010).

Um dos esquemas de modulação mais utilizados historicamente, foi o NRZ OOK (*Non-Return-to-Zero On-Off Keying*), devido à largura de banda relativamente baixa para a sua transmissão e recepção, não sensibilidade ao ruído de fase do LASER e uma configuração mais simples de transceptores. Para a detecção de um sinal óptico OOK, um fotodiodo é utilizado no receptor, que converte a potência óptica do sinal em uma corrente elétrica, realizando assim a detecção direta. Um transmissor NRZ OOK é representado no diagrama de blocos na Figura 12.

Figura 12 - Transmissor NRZ OOK.

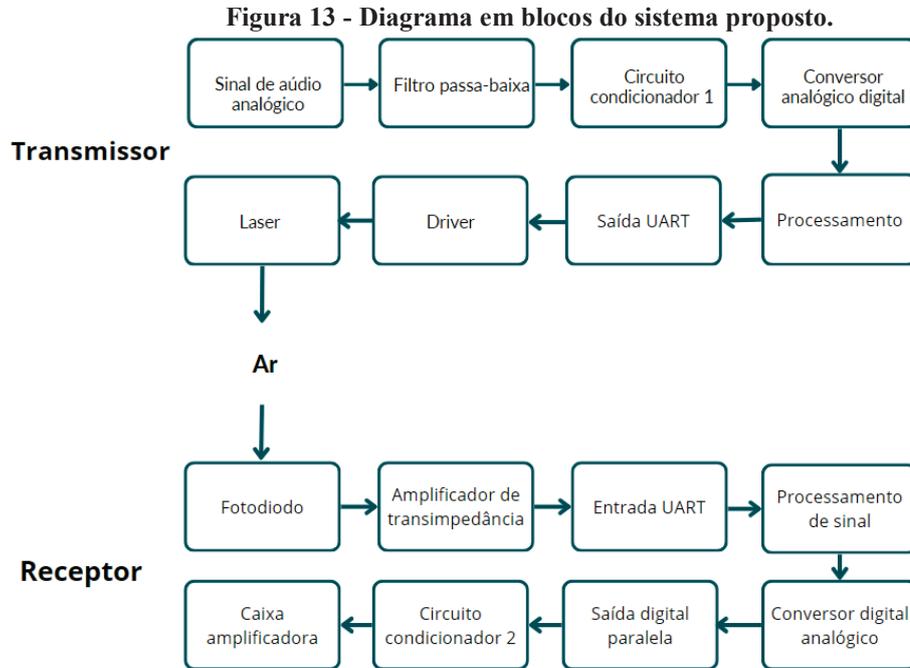


Fonte: Henniger; Wilfert (2010).

Sinais modulados em NRZ OOK podem levar a perdas de sincronização se forem transmitidas grandes sequências de uns e zeros. À medida que a comunicação óptica avança para taxas de dados mais elevadas nos últimos anos, o formato de modulação NRZ pode não ser a escolha mais adequada para sistemas ópticos de alta capacidade. No entanto, devido à sua simplicidade e ao seu uso histórico difundido, a modulação NRZ continua sendo uma referência valiosa para fins de comparação e análise (Henniger; Wilfert, 2010).

3 SISTEMA PROPOSTO

O Sistema de transmissão de áudio por comunicação FSO proposto tem sua arquitetura exemplificada pelo diagrama de blocos na Figura 13.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Um sinal de áudio proveniente de um celular é captado, filtrado, condicionado para valores de tensão compatíveis com o conversor analógico digital do microcontrolador, processado, enviado em protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), amplificado pelo driver de acionamento do LASER, convertido em sinal óptico pelo LASER, passando pelo ar, convertido em corrente elétrica pelo fotodiodo, condicionado para valores de tensão compatíveis com a entrada UART do microcontrolador de recepção, o qual processa os dados recebidos e converte em dados digitais paralelos para um conversor digital-analógico, onde o sinal é atenuado e condicionado para a caixa amplificadora que reproduz o som.

3.1 FILTRO PASSA-BAIXA

Para atender aos critérios de Nyquist, é essencial garantir que nenhuma energia em frequências acima da metade da taxa de amostragem seja direcionada para o conversor

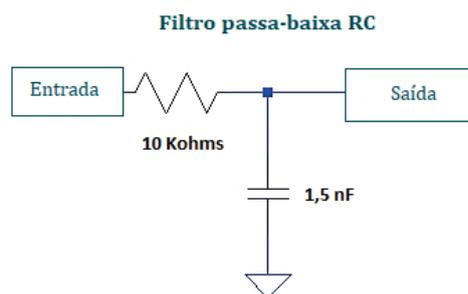
analógico-digital. Isso é fundamental porque a presença de energia de alta frequência pode “infiltrar-se” na faixa de áudio, causando um fenômeno indesejado conhecido como *aliasing*. É necessário aplicar uma etapa de pré-filtragem para prevenir tais efeitos indesejados (Lavry, 2004).

Filtros com ordens mais elevadas proporcionam uma melhor capacidade de rejeição do *aliasing*, entretanto, aumentam a complexidade do circuito e podem introduzir níveis mais elevados de ruído e distorção no sistema. Portanto, o projeto de sistemas de conversão de áudio envolve uma análise cuidadosa dos compromissos entre a qualidade do filtro, a complexidade do hardware e o tamanho dos dados, visando alcançar um desempenho adequado de acordo com os critérios de Nyquist e os requisitos específicos da aplicação.

A capacidade auditiva de um ouvido humano em boas condições pode distinguir sons com frequências entre 20 Hz e 20 kHz, embora a resposta para altas frequências diminua com a idade. Devido a características físicas do canal auditivo, a sensibilidade atinge o pico em 4 kHz decrescendo até um segundo pico de 12 kHz. Acima de 15 kHz a resposta é variável de indivíduo para indivíduo e bastante atenuada (Stolfi, 2016).

Baseando-se nas informações citadas, foi concebido um filtro para eliminar altas frequências na entrada do áudio. Devido à baixa complexidade e baixo custo, um filtro capacitivo foi desenvolvido com uma frequência de corte de 10 kHz, como é possível observar na Figura 14.

Figura 14 - Filtro passa-baixa de entrada.



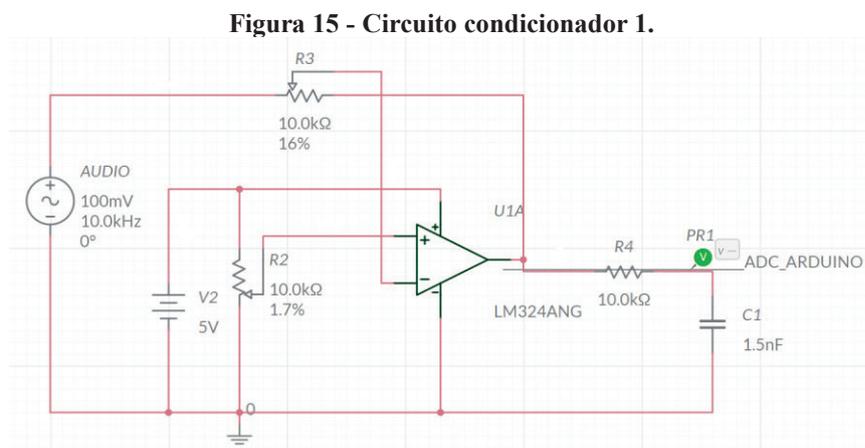
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O cálculo da frequência de corte do filtro utilizado se dá pela Equação (1), na qual f é a frequência de corte, C é o valor do capacitor, em Farads, e R é o valor do resistor, em Ohms:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

3.2 CIRCUITO CONDICIONADOR 1

A variação de tensão de um sinal de áudio oscila entre picos positivos e negativos, o que gera um obstáculo para a leitura do conversor AD do microcontrolador, que possui capacidade para ler sinais de tensão contínuo, com variação máxima de cinco volts. O ajuste da amplitude do sinal e a mudança de nível *offset* é necessário para uma boa conversão sem perdas de informação. Para tais ajustes, o circuito de condicionamento da Figura 15 foi projetado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O potenciômetro R3 é responsável pelo ajuste de amplitude do sinal, o potenciômetro R2 é responsável pelo nível de *offset* do sinal. O ajuste é feito manualmente até que o sinal de saída oscile entre zero e aproximadamente 1,1 volt, valor de referência escolhido para o conversor analógico-digital (ADC) do Arduino. O filtro passa baixa, formado pelo resistor R4 e C1, está localizado na saída do amplificador operacional LM324. O circuito é alimentado por uma fonte de 5 volts.

3.3 CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL

O Arduino Uno possui seis entradas para conversão analógico-digital, com três opções de referência de leitura, sendo uma delas a referência interna de 1,1 volt, escolhida para o sistema proposto por meio da seleção dos registradores do microcontrolador. É possível observar as outras tensões de referência na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de tensão de referência do ADC do Arduino.

REFS1	REFS0	Tensão de referência
0	0	Tensão em pino AREF
0	1	5v
1	0	Reservado
1	1	Interna de 1,1 v

Fonte: Atmel (2015).

A resolução do ADC do Arduino Uno é de dez bits, sendo oito desses bits armazenados em um registrador e os demais em outro. A resolução é configurável, e no sistema proposto foi setada para oito bits, tendo em vista o protocolo de envio de dados utilizado, melhor otimização de processamento no circuito receptor e maior taxa de amostragem quando comparada à resolução de dez bits.

A taxa de amostragem também pode ser configurada. O tempo de execução de uma leitura é de treze ciclos de *clock* do ADC, o valor que este *clock* pode atingir é definido através de um fator de divisão do oscilador principal do microcontrolador, conhecido por *prescaler*. Este parâmetro pode ser configurado por registradores de acordo, com a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de prescaler do ADC do Atmega328.

ADPS2	ADPS1	ADPS0	FATOR DE DIVISÃO
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

Fonte: Atmel (2015).

O *prescaler* selecionado foi de oito, o que gerou uma taxa de amostragem cerca de quinze vezes (153 kHz) maior que a frequência de corte do filtro passa-baixa (10 kHz), ou seja, cerca de 7,5 vezes maior que o limite mínimo determinado pelo teorema de Nyquist. Para fins de cálculo a Equação 2 foi utilizada para determinar o valor da taxa de amostragem do ADC.

$$\text{Taxa de amostragem} = \text{clock do processador} / (\text{prescaler} * 13)$$

$$\text{Taxa de amostragem} = (16 * 10^6 \text{ Hz}) / (8 * 13)$$

$$\text{Taxa de amostragem} \approx 153,846 \text{ kHz} \quad (2)$$

3.4 PROTOCOLO UART

O Arduino Uno possui uma interface UART configurável via software, sendo possível alterar valores de taxa de transmissão, número de bits enviados e outras características. Por padrão no Arduino, o protocolo envia uma sequência de dez bits, na seguinte sequência: um bit de início, oito bits de dados e um bit de parada. Conforme a Figura 16:

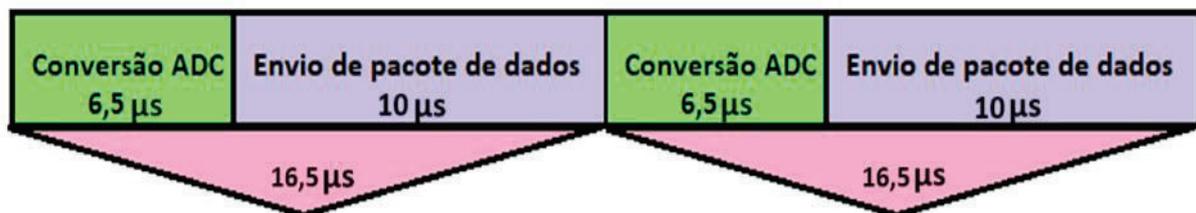
Figura 16 - Padrão de bits do protocolo UART.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para o sistema proposto, foi configurado o *bit rate* em 1 Mbps, o que significa que o tempo de um bit dura cerca de 1 μs . Foi selecionada a configuração padrão para o envio de dados. É possível estimar que o intervalo de tempo para envio de um pacote de dados, é a soma do tempo de amostragem do ADC com o tempo de envio dos dez bits. De acordo com a figura 17, estima-se que um pacote de dados é enviado a cada 16,5 μs .

Figura 17 - Tempo de envio de pacote de dados.



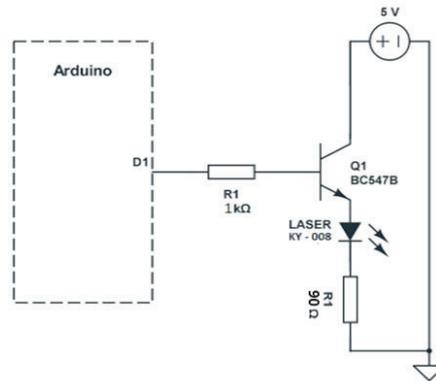
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.5 CIRCUITO LASER

O diodo LASER escolhido foi o KY-008, com tensão de trabalho de 5 volts e corrente de 30 mA. Tendo em vista que as saídas do microcontrolador do Arduino fornecem no máximo

20 mA de corrente e 5 volts de tensão, foi utilizado um transistor BC547B como driver de potência para evitar sobrecarga. Quando a saída D1 do Arduino é acionada, a corrente de base do transistor do circuito driver do LASER é de aproximadamente 2 mA e a corrente no emissor é de 20 mA. Como é possível observar na Figura 18.

Figura 18 - Circuito driver LASER.

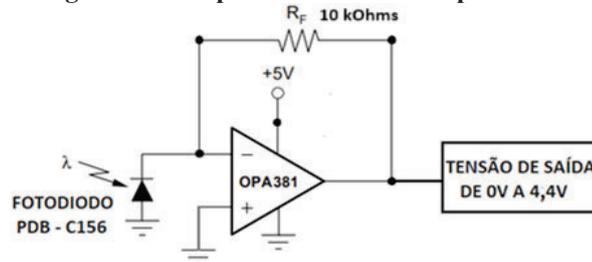


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.6 CIRCUITO FOTORRECEPTOR

Para o circuito de recepção de sinal óptico foi escolhido o fotodiodo PDB-C156 da Advanced Photonix. Com o propósito de conversão de corrente em sinal de tensão para a entrada digital do Arduino, foi utilizado o amplificador de transimpedância OPA 381 em modo comparador, de acordo com o circuito na Figura 19.

Figura 19 - Amplificador de transimpedância.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3.7 PROCESSAMENTO DE DADOS

O sinal de saída do amplificador de transimpedância é conectado na entrada do microcontrolador de recepção (pino de Rx), que está configurado com *bit rate* de 1 Mbps. Ele armazena o pacote de dados recebido em uma variável de oito bits e logo após atribui cada bit dessa variável para uma saída digital, ou seja, o microcontrolador faz uma conversão série-paralelo dos dados recebidos. A distribuição dos bits seguiu conforme a Figura 20.

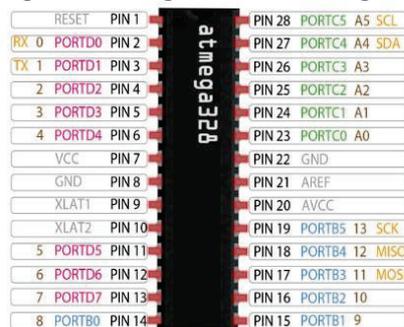
Figura 20 - Saídas digitais utilizadas no Arduino receptor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para uma maior velocidade na comutação das saídas digitais do Arduino, a programação direta dos registradores de saída do atmega328 foi priorizada, de forma que os seis bits mais significativos fossem alocados no registrador PORTB e os dois bits menos significativos no registrador PORTD, não sendo possível alocar em um único registrador em razão da utilização da entrada serial. A distribuição dos registradores do atmega328 pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 - Registradores Atmega 328.

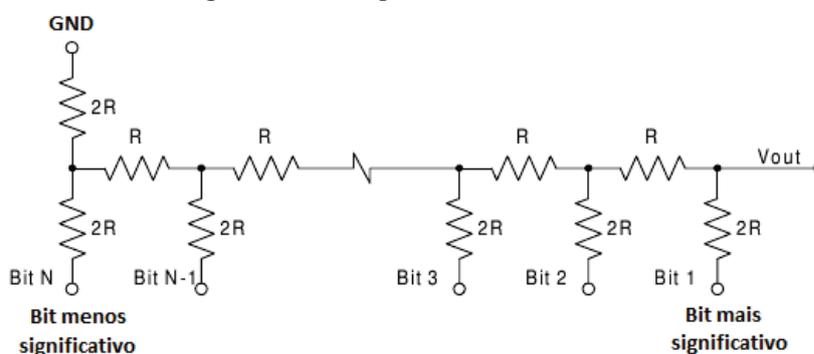


Fonte: Adaptado de Atmel (2015).

3.8 CIRCUITO CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO

A rede de resistores em escada oferece uma maneira simples e econômica de realizar uma conversão digital para analógica. Entre as redes mais populares, destacam-se a escada binária ponderada e a escada $R/2R$. Ambos os dispositivos têm a capacidade de converter informações de tensão digital em analógica, no entanto, a escada $R/2R$ conquistou maior popularidade devido à sua precisão inerente e ao processo de construção simplificado. É importante notar que a rede consiste apenas em dois valores de resistores: R e $2R$ (duas vezes o valor de R) (Seams, 1998). Segue um exemplo desta rede, na Figura 22.

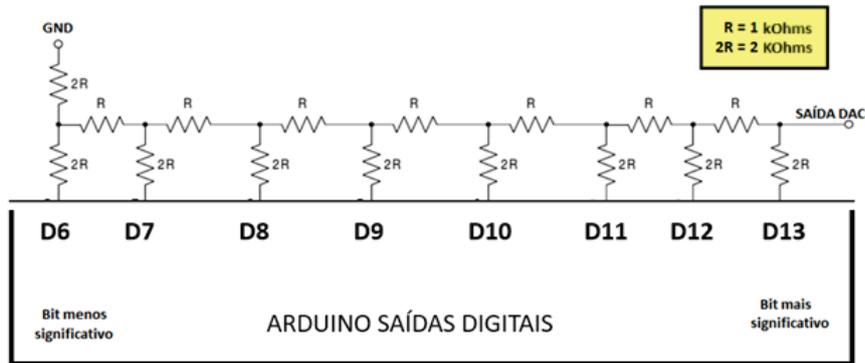
Figura 22 - Exemplo de DAC escada $R/2R$.



Fonte: Adaptado de Seams (2023).

O cálculo de tensão para cada bit em nível alto pode ser obtido através do teorema de superposição. O nível de tensão das saídas digitais do Arduino varia entre dois estados, zero volts (nível baixo) e cinco volts (nível alto). O valor que o primeiro bit incrementará na saída do circuito será da metade do valor nele aplicado, o valor do segundo bit será da ordem da metade do primeiro bit, seguindo essa lógica sucessivamente para os bits consecutivos, até o último bit, o menos significativo, por ter uma contribuição de tensão menor na saída. Para o projeto proposto, o seguinte circuito DAC (*Digital to Analog Converter*) $R/2R$ foi utilizado, conforme a Figura 23.

Figura 23 - DAC de escada R2R utilizado no sistema.



Fonte: Adaptado de Seams (2023).

A saídas digitais do Arduino Uno foram conectadas ao DAC R2R. A resolução deste circuito é equivalente à menor variação de tensão possível em sua saída, sendo obtida por:

$$\text{Resolução} = (\text{valor de tensão do nível lógico um}) \div 2^{(\text{número de bits})}$$

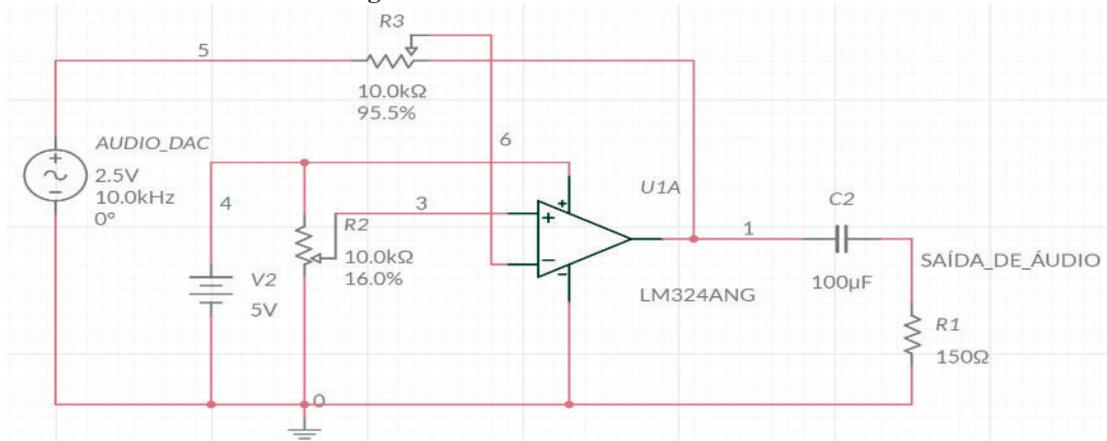
$$\text{Resolução} = 5 \text{ V} \div 2^8$$

$$\text{Resolução} \approx 0,1953 \text{ V} \quad (3)$$

3.9 CIRCUITO CONDICIONADOR 2

O sinal de saída do DAC é exclusivamente em nível de tensão contínuo variando entre zero e aproximadamente cinco volts. Sinais de áudio são geralmente excursionados em níveis de tensão alternados, podendo assumir valores positivos e negativos. Além disso os níveis de tensão de entrada de áudio de alguns dispositivos são geralmente na ordem de milivolts, para atender os requisitos da entrada de áudio, o circuito condicionador foi desenvolvido, de acordo com a Figura 24.

Figura 24 - Circuito condicionador 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A variação da resistência do potenciômetro R3 influencia na intensidade do sinal, o potenciômetro R2 é responsável por variar o nível de *offset* do sinal. O ajuste se dá de forma manual até que o sinal de saída tenha características próximas ao sinal da fonte geradora de áudio analógico.

O capacitor C2 em série com a saída do amplificador operacional é utilizado para eliminar níveis contínuos de tensão e o resistor R1 tem a função de proporcionar o casamento de impedância, necessário para que a saída do circuito entregue a máxima transferência de potência para a caixa de som amplificada.

4 RESULTADOS

4.1 CRONOGRAMA

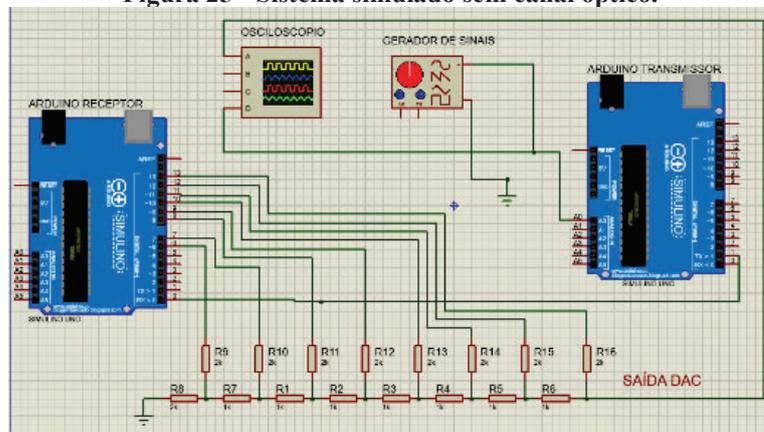
Este capítulo aborda resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho, adotando o seguinte cronograma:

- Simulação da comunicação serial, com ligação direta entre a saída do Arduino transmissor e a entrada do Arduino receptor, fio a fio, com *bit rate* de 1Mbps;
- Teste do canal óptico;
- Teste do sistema com gerador de funções;
- Teste do sistema com áudio.

4.2 SISTEMA SIMULADO

O simulador de circuitos utilizado para esta etapa do projeto foi o software Proteus da empresa Labcenter Electronics. De acordo com o cronograma estabelecido a primeira simulação validou o sistema sem a utilização dos dois circuitos condicionadores de áudio e do canal óptico, sendo este último substituído por uma ligação direta. Na Figura 25, é possível observar o esquema. Um gerador de frequências virtual é conectado à entrada analógica do Arduino transmissor, com tensão de pico em 1 volt e forma de onda senoidal. Um circuito DAC com escada resistiva R2R é utilizado nas saídas do Arduino receptor.

Figura 25 - Sistema simulado sem canal óptico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para definir a taxa de amostragem do sistema simulado, foi medido por meio de um osciloscópio virtual o tempo de padrão de cada amostra gerada pelo Arduino. Como é possível observar na Figura 26, este tempo foi de cerca de 13,5 μs , 3 μs mais rápido do que o estimado na Figura 17.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com o tempo de amostragem foi possível obter a taxa de amostragem do sinal, sendo de aproximadamente 74000 amostras por segundo, conforme a Equação 4:

$$\text{Taxa de amostragem} = \frac{1}{13,5 \cdot 10^{-6}\text{s}}$$

$$\text{Taxa de amostragem} \approx 74000 \text{ amostras por segundo} \quad (4)$$

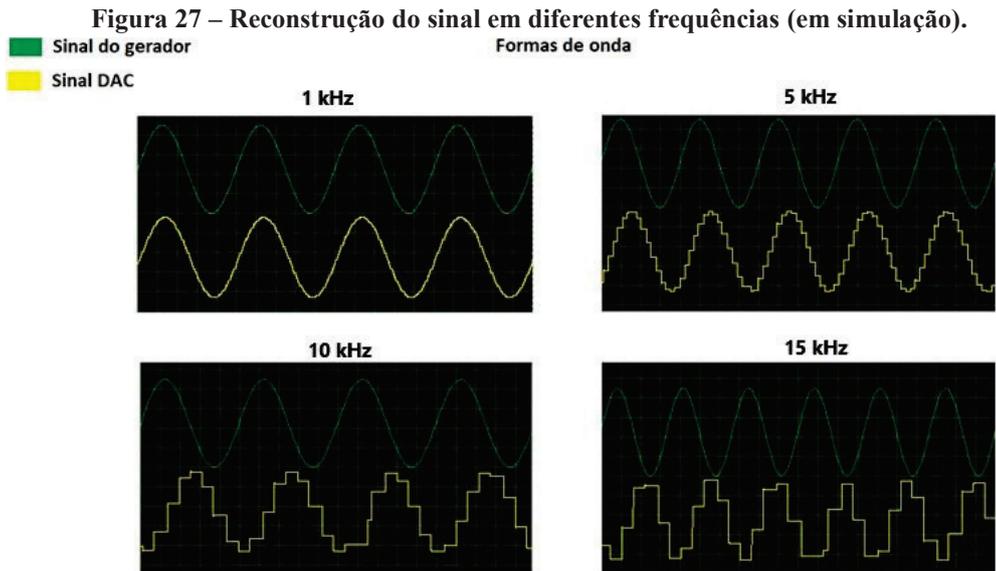
A partir do tempo de amostragem foi definido também a taxa de transmissão por meio da Equação 5, sendo de aproximadamente 740 kbps.

$$\text{Taxa de transmissão} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de bits enviados por pacote}}{\text{tempo entre envios}}$$

$$\text{Taxa de transmissão} = \frac{10 \text{ bits}}{13,5 \cdot 10^{-6}\text{s}}$$

$$\text{Taxa de transmissão} \approx 740 \text{ kbps} \quad (5)$$

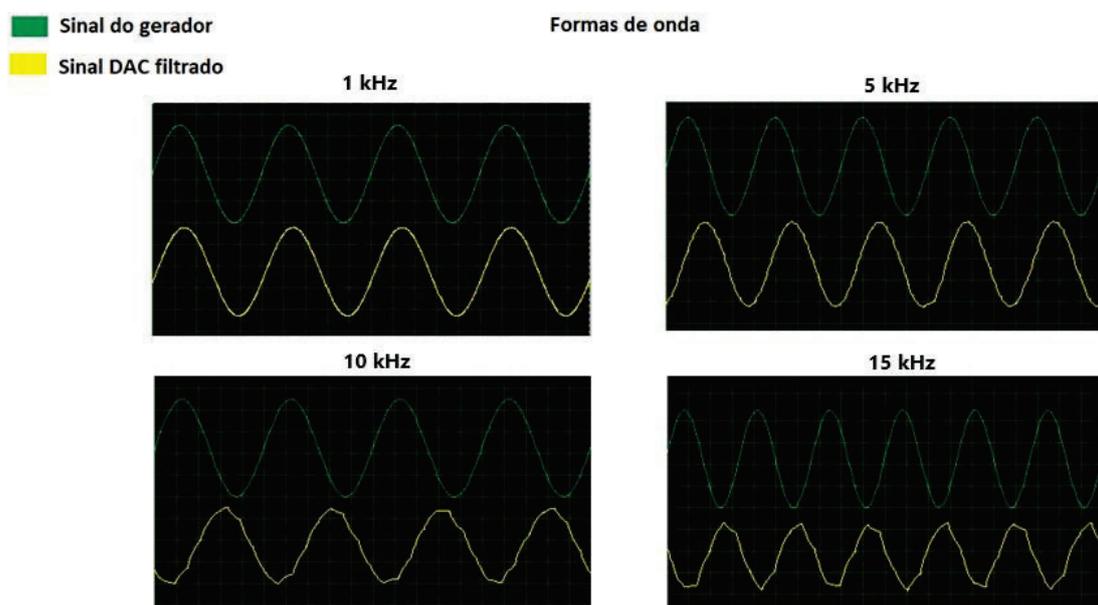
Com o objetivo de definir a capacidade de reconstrução do sinal original, a frequência do sinal de entrada do DAC foi alterada no gerador de sinais virtual. Os resultados podem ser observados na Figura 27.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É possível observar que o sinal amostrado perde similaridade em relação ao original com o aumento da frequência, devido à limitação encontrada na capacidade de transmissão de dados. Por meio da análise dos resultados, a frequência de 10 kHz foi escolhida como o limite máximo para saída do DAC. Para filtrar frequências acima disso e suavizar as partes discretas do sinal, um capacitor de 10 nF foi aplicado na saída do DAC para o ponto de aterramento. Como resultado, as seguintes formas de onda foram obtidas na Figura 28.

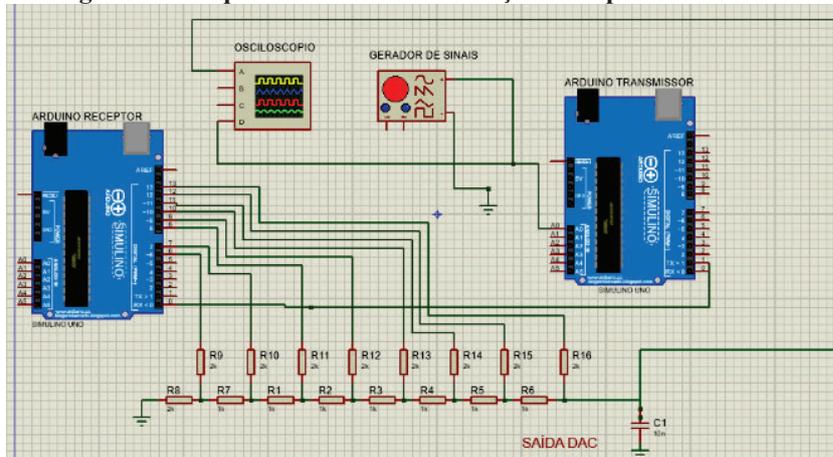
Figura 28 - Reconstrução do sinal em diferentes frequências com filtro RC na saída (em simulação).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com a adição do capacitor de filtro o esquema ficou da seguinte forma:

Figura 29 - Esquema simulado com adição de capacitor na saída.



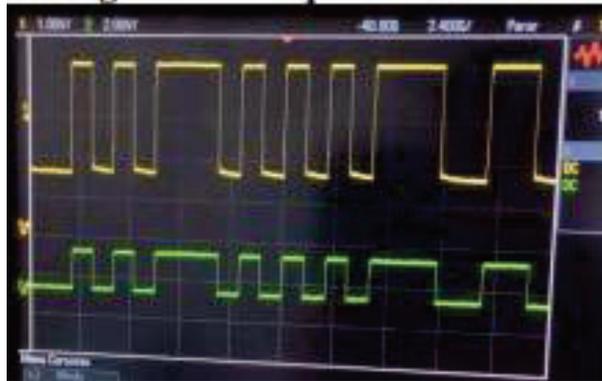
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3 TESTE DE CANAL ÓPTICO

O canal óptico do sistema proposto se resume a dois circuitos: LASER e fotorreceptor. Para garantir um bom funcionamento de ambos, foram realizados testes em bancada. Não há informações na folha de dados do diodo LASER KY-008 a respeito da taxa de chaveamento máxima suportada. No entanto, em sua placa, possui um resistor de 90 ohms em série para limitação de corrente. Por meio da variação de tensão nesse resistor, é possível medir indiretamente a resposta do LASER, uma vez que a tensão no resistor reflete a corrente no LASER.

Para validação da capacidade de transmissão, foi utilizado um Arduino chaveando o circuito driver com pulsos de no mínimo um microssegundo de duração. Com o auxílio do osciloscópio, foi possível observar que a resposta do LASER foi idêntica ao sinal aplicado, o qualificando para uso. Na Figura 30 é mostrado o sinal do Arduino em amarelo e o sinal do resistor do LASER em verde.

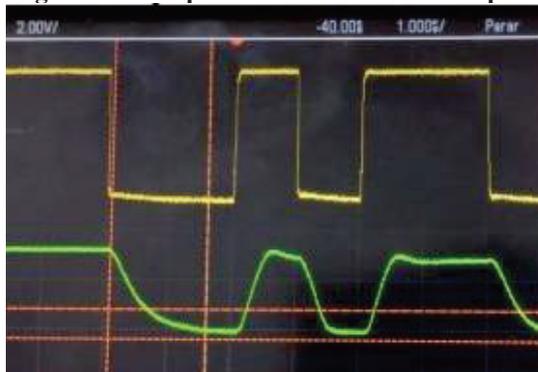
Figura 30 - Resposta do LASER.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para validar o circuito fotorreceptor, se fez necessário um alinhamento entre o feixe de luz modulado do LASER com o fotodiodo, captando o sinal gerado na saída do circuito fotorreceptor e o sinal proveniente do resistor do LASER. Na figura 31, é possível observar em amarelo o sinal do LASER e em verde o sinal do circuito fotorreceptor. O osciloscópio está ajustado para uma escala de $1\mu\text{s}$ por divisão.

Figura 31 - Resposta do circuito fotorreceptor.



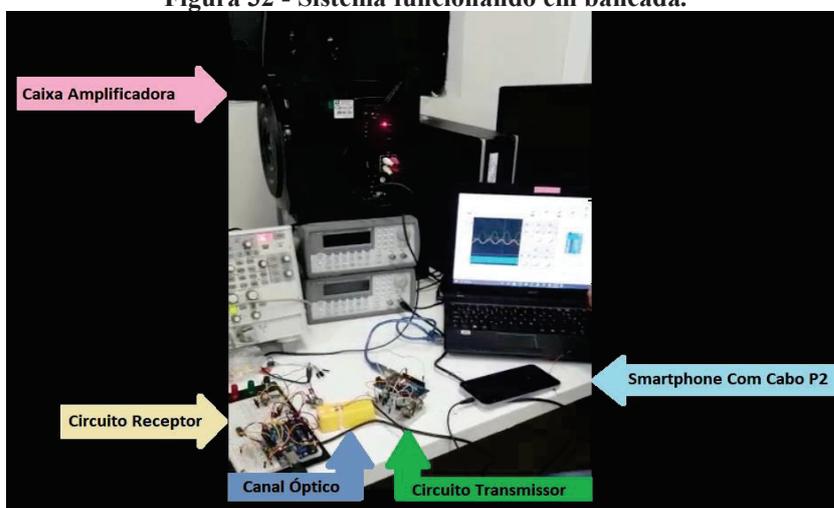
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É perceptível a distorção no sinal de saída do fotorreceptor, apresentando um tempo de subida e de descida mais lento, quando comparado ao sinal original. Apesar da distorção, o Arduino pôde interpretar corretamente todos os pulsos, não sendo um fator limitante no desenvolvimento do sistema.

4.4 TESTE DO SISTEMA EM BANCADA

Os circuitos foram projetados em bancada com a utilização de duas *protoboards*, com uma delas contendo os circuitos de amostragem e transmissão de dados e a outra contendo o circuito de recepção, o circuito DAC e o circuito condicionador de saída de áudio. Um cabo com plugue do tipo P2 foi utilizado para conexão da entrada do sistema com a saída de áudio do *smartphone*. A Figura 32 apresenta o sistema proposto em bancada, com o fotodiodo e o LASER alinhados à uma distância de aproximadamente 5 cm.

Figura 32 - Sistema funcionando em bancada.

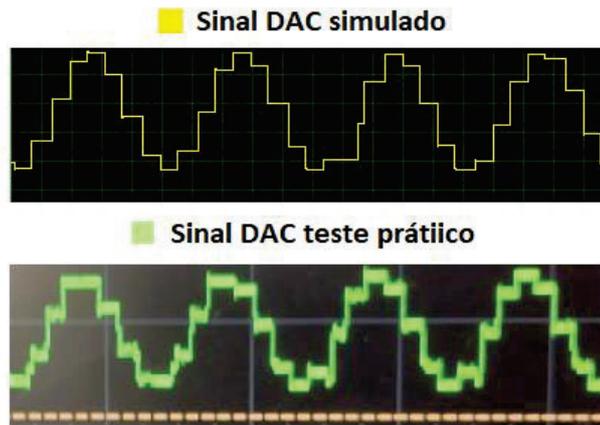


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O aplicativo FUNCTION GENERATOR, foi utilizado no *smartphone* para gerar um sinal senoidal com frequência em 10 kHz. O ADC do Arduino foi programado para ler sinais contínuos de até 1,1 volts, por meio de ajustes dos potenciômetros no circuito de condicionamento de áudio. O sinal na entrada do ADC foi excursionado para nível contínuo com amplitude máxima de 1 volt, garantindo que o sinal na entrada do ADC não fosse acima do limite configurado.

Com a utilização de um osciloscópio, foi possível capturar o sinal de saída do DAC. O resultado ao aplicar um sinal com frequência de 10 kHz na entrada do sistema foi similar ao simulado. Para efeitos de comparação, a Figura 33 apresenta os dois resultados, em amarelo tem-se o sinal simulado e em verde o sinal medido em bancada.

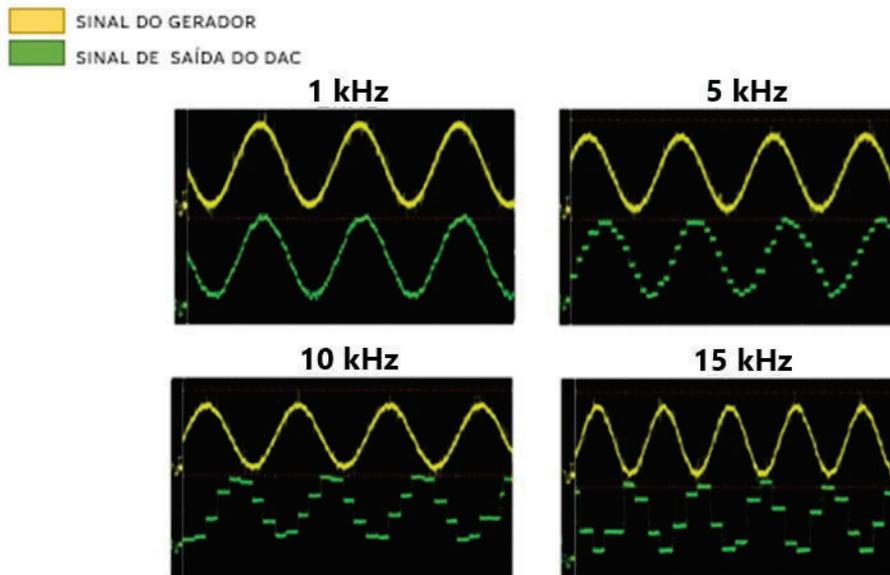
Figura 33 - Comparação entre sinal do DAC simulado e medido em bancada, em 10 kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para comparar com o sistema simulado, o mesmo teste elaborado na Figura 27, foi realizado no sistema em bancada, obtendo a resposta do sistema para um sinal senoidal na frequência de 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz e 15kHz. É possível observar o resultado desse teste na Figura 34, em amarelo tem-se o sinal do gerador e em verde a saída não filtrada do DAC R2R.

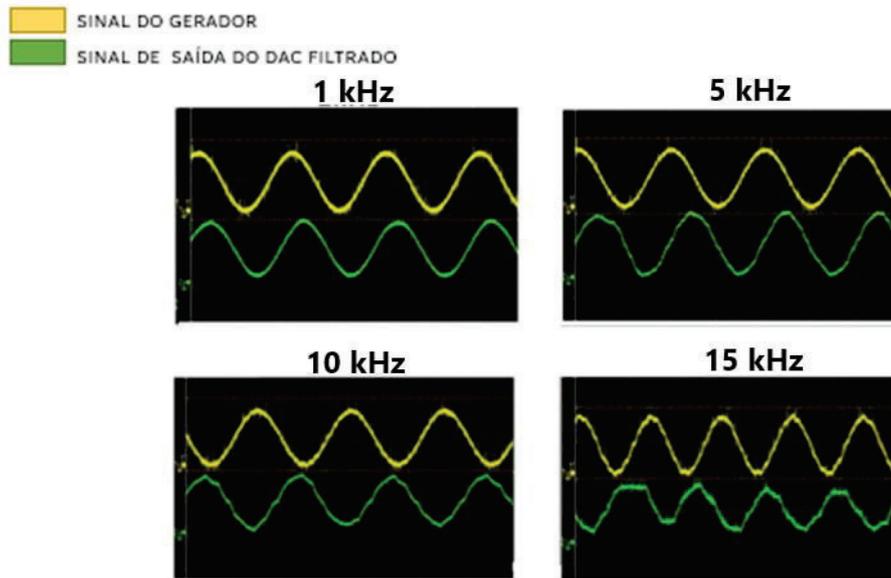
Figura 34 - Reconstrução do sinal em diferentes frequências (em bancada).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O sistema em bancada obteve um resultado próximo ao simulado, para mais uma comparação foi realizado um teste similar a Figura 28, onde foi aplicado um filtro passa-baixa RC com intuito de suavizar as imperfeições nas formas de onda, obtendo desta forma o resultado da Figura 35.

Figura 35 - Reconstrução do sinal em diferentes frequências com filtro RC na saída (em bancada).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Com o funcionamento do sistema sendo de acordo com o esperado, a saída de tensão do DAC foi condicionada para 125 milivolts de amplitude e *offset* em zero volts, características similares a saída de áudio do *smartphone*, compatível com os valores de entrada da caixa amplificadora utilizada.

Como conclusão da bateria de testes, uma música foi reproduzida no *smartphone* utilizando o sistema desenvolvido como meio de transmissão para execução do som na caixa amplificadora. Por meio da percepção auditiva foi identificada a falta de sons mais agudos na reprodução da música, isso ocorreu pela baixa capacidade do sistema, que ficou limitado a amostrar frequências em até 10 kHz.

4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi desenvolvido um protótipo de sistema de transmissão de áudio analógico via FSO, com o objetivo de compreender os princípios de um sistema desse tipo e desafios impostos. A taxa de reprodução do sinal de saída foi de aproximadamente 74 kHz e a taxa de transmissão digital foi cerca de 740 kbps. Embora a taxa de amostragem do sistema tenha sido superior ao limite de Nyquist para frequências do espectro audível (pelo menos 40 kHz), optou-se por uso de um filtro passa-baixa com frequência de corte em 10 kHz para evitar distorções no sinal de saída.

A escolha de duas placas Arduino Uno para recepção e transmissão, limitou o bit rate do protocolo UART em 1 Mbps. A escolha de uma plataforma de hardware com mais poder de processamento e transmissão de dados como, por exemplo, a placa de desenvolvimento STM-32F103, poderia mais que quadruplicar a velocidade de envio de dados, com o bit rate máximo de sua UART podendo chegar até 4,5 Mbps.

Outra possibilidade de melhoria no sistema seria a troca do esquema de modulação NRZ OOK, pela utilização de um esquema de modulação de intensidade multinível, onde símbolos seriam enviados, cada símbolo representando uma sequência bits. O tamanho de cada símbolo dependeria diretamente da capacidade do receptor de identificar níveis diferentes no sinal, fazendo-se necessário um estudo aprofundado, a criação de um protocolo específico e modificações nos circuitos de transmissão e recepção.

Algumas análises no sistema podem ser realizadas como, por exemplo, a comparação com outro sistema de transmissão de áudio que utilize modulação analógica com os mesmos componentes para o canal óptico, um teste para determinar a taxa de erro de bit e a determinação do alcance máximo distanciando receptor e transmissor.

REFERÊNCIAS

- ALKHOLIDI, Abdulsalam Ghalib et al. Comunicações ópticas em espaço livre – Teoria e práticas. *Questões Contemporâneas em Comunicações Sem Fio*, v. 5, p. 159-212, 2014.
- ATMEL, “ATMEGA328P, 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash”, 2015. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf, acesso em 2023.
- BAGNATO, V. S.; Física na Escola, v. 2, n. 2; Os fundamentos da luz laser, 2001.
- BARBOZA, Priscila Mayana Torres; OLIVEIRA, Abinael De Brito. SOBRE LASERS SEMICONDUCTORES. *Acta Scientia*, v. 2, n. 2, 2021.
- BELL, Alexander Graham. ART. XXXIV.--On the production and reproduction of sound by light. *American Journal of Science (1880-1910)*, v. 20, n. 118, p. 305, 1880. FLEMING, J. A. "The Photophone: Its Claims and Limitations." *Nature*, vol. 30, no. 768, 1884, pp. 615-617.
- BRAGA, Newton de Carvalho. Artigo 1181 - Como Funcionam Os Fotodiodos, disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/4715-art1181>, acesso em: 15 out. 2023.
- DA SILVEIRA, Clenilson Rodrigues. Estudo de formatos especiais de modulação digital para comunicações ópticas. USP, São Carlos-SP, Teses de Mestrado, 2009.
- DIONISIO, Paulo Henrique. Será a luz de um laser necessariamente polarizada, completamente coerente e rigorosamente monocromática?. *Caderno catarinense de ensino de física. Florianópolis*. Vol. 10, n. 1 (abr. 1993), p. 53-58, 1993.
- GEBHART, Michael et al. Comunicações via satélite, óptica de espaço livre e LAN sem fio combinadas: Acesso mundial de banda larga sem fio independente da infraestrutura terrestre. In: *Anais da 12ª Conferência Eletrotécnica IEEE Mediterrânea (IEEE Cat. No. 04CH37521)*. IEEE, 2004. p. 449-452.
- GEISLER, David J. Modem module development for NASA's Orion spacecraft: Achieving FSO communications over lunar distances. In: *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2020. p. Th3J. 1.

- HENNIGER, Hennes; WILFERT, Otakar. An Introduction to Free-space Optical Communications. *Radioengineering*, v. 19, n. 2, 2010.
- HOU, Rui et al. A brief survey of optical wireless communication. In: *Proc. Australas. Symp. Parallel Distrib. Comput.(AusPDC 15)*. 2015. p. 41-50.
- LAVRY, Dan. Sampling theory for digital audio. Lavry Engineering, disponível em: http://www.lavryengineering.com/documents/Sampling_Theory. Acesso em: 15 out. 2023.
- LE, Hoang D.; PHAM, Anh T. Link-layer retransmission-based error-control protocols in FSO communications: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 24, n. 3, p. 1602-1633, 2022.
- NETO, C. P. S.; JÚNIOR, O. F. Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações. *Rev. Bras. de Ensino de Física*, v. 39, n. 1, 2017.
- PATHAK, Vivek; KUMAR, Vinay; BARIK, Rabindra K. Bobina transceptora baseada em comunicação por indução magnética e modelagem de estrutura de guia de ondas para RSSFs não convencionais. In: *2018 9ª conferência internacional sobre tecnologias de computação, comunicação e redes (ICCCNT)*. IEEE, 2018. p. 1-7.
- PINI, disponível em: <https://www.digikey.com.br/pt/articles/the-basics-of-photodiodes-and-phototransistors-and-how-to-apply-them>, acesso em: 15 out. 2023.
- RAISA, disponível em: <https://blog.raisa.com.br/teoria-de-operacao-do-fotodiodo/>, acesso em: 15 out. 2023.
- SAKAMOTO, Braulio Fernando R.; FEGADOLLI, Willian; OLIVEIRA, José Edimar Barbosa. Emprego Militar de Comunicação Óptica em Espaço Livre–FSO. *IX Simpósio de Aplicações Operacionais (IX SIGE)*, p. 1-6, 2008.
- SEAMS, J.; *R/2R Ladder Networks, Application Note IRC/ AFD006*, 1998.
- STOLF, G. Percepção Auditiva e Compreensão de áudio, PTC2547 - PRINCÍPIOS DE TELEVISÃO DIGITAL, 2016.
- TANG, Xuan. Polarisation shift keying modulated free-space optical communication systems. 2012. Tese de Doutorado. Northumbria University.

WILFERT, Otakar; HENNIGER, Hennes; KOLKA, Zdenek. Optical communication in free space. In: 16th Polish-Slovak-Czech Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics. SPIE, p. 17-28, 2008.

APÊNDICE A – Programa desenvolvido para Arduino o Uno transmissor

```
const unsigned char PS_8 = (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0); //PRESCALLER

void setup() {

Serial.begin(1000000);      //CONFIGURA PORTA SERIAL PARA 1 MHZ
ADCSRA &= ~PS_128;        //LIMPA CONFIGURAÇÃO DA BIBLIOTECA DO ARDUINO
ADCSRA |= PS_8;          //PRESCALLER ADC EM 2MHZ
ADMUX = 0;                //SELECIONA PORTA ANALOGICA A0
ADMUX |= _BV(REFS0);     //SETA REFERÊNCIA EM 1,1 V
ADMUX |= _BV(REFS1);     //SETA REFERÊNCIA EM 1,1 V
ADMUX |= _BV(ADLAR);     //SETA PARA Resolução para 8 Bits

ADCSRA |= _BV(ADSC);     //INICIA PRIMEIRA LEIURA DE 25 CICLOS DE CLOCK
loop_until_bit_is_set(ADCSRA, ADIF); // ENCERRA AO TRAVAR

}

void loop() {

    ADCSRA |= _BV(ADSC); //INICIA LEIURA
    loop_until_bit_is_set(ADCSRA, ADIF); // EM LOOP ATÉ TERMINO LEITURA DO
ADC
    Serial.write(ADCH); //ENVAIA 8 BIS DO REGISTRADOR DE LEITURA DO ADC

}
```

APÊNDICE B – Programa desenvolvido para o Arduino Uno receptor

```
byte leitura=0; // VARIÁVEL PARA LEITURA DOS DADOS NA SERIAL

void setup() {

  DDRD = B11000000; // DEFINE PINOS 6 e 7 COMO SAIDAS, 2 BITS MENOS SIGNIFICATIVOS
  DO DAC
  DDRB = B00111111; // PINO 8 9 10 11 12 13 6 BITS MAIS SIGNIFICATIVOS DO DAC

  Serial.begin(1000000); // CONFIGURA UART PARA 1 MBPS

}

void loop() {

  if(Serial.available())
  {

    leitura = Serial.read();
    PORTB = leitura>>2; //INSERE OS 2 BITS MENOS SIGNIFICATIVOS NA PORTA B
    PORTD = leitura<<6; // INSERE OS 6 BITS MAIS SIGNIFICATIVOS NA PORTA D

  }

}
```

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC Jeanderson

Assunto:	TCC Jeanderson
Assinado por:	Adaildo Gomes
Tipo do Documento:	Tese
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Documento Original

Documento assinado eletronicamente por:

- Adaildo Gomes D Assuncao Junior, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCSTST-JP , em 14/03/2024 09:40:10.

Este documento foi armazenado no SUAP em 14/03/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1115370

Código de Autenticação: bf83b0da1c

