

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

RAFAEL TELES ESPINDOLA

Transferência de dados via ondas sonoras

São José - SC

Julho/2023

TRANSFERÊNCIA DE DADOS VIA ONDAS SONORAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Roberto Wanderley da Nóbrega, Dr.

São José - SC

Julho/2023

RESUMO

O protocolo proposto a ser desenvolvido será capaz de realizar um enlace ponto-a-ponto usando um canal sem-fio através do som. A camada física utilizada possui características, como a baixa taxa de dados, baixo alcance, e ausência de detecção de acesso ao meio. A comunicação será digital, full-duplex e assíncrona. Não será utilizada nenhuma comunicação utilizando antenas, mas sim apenas um par de microfones e alto-falantes. Para a modulação será utilizado a técnica de modulação FSK que consiste em associar uma frequência à um símbolo que represente um ou uma sequência de bits. A aplicação final que permitirá a troca de mensagens entre os usuários não é o foco, mas sim uma exemplificação de como pode ser utilizado o protocolo.

Palavras-chave: Protocolo de comunicação. Transferência de dados por ondas sonoras. FSK.

ABSTRACT

The proposed protocol to be developed will be able to perform a point-to-point link using a wireless channel through sound. The physical layer used has characteristics such as low data rate, low range, and absence of medium access detection. Communication will be digital, full-duplex and asynchronous. No communication using antennas will be used, just a pair of microphones and speakers. For the modulation, the FSK modulation technique will be used, which consists of associating a frequency with a symbol that represents one or a sequence of bits. The final application that will allow the exchange of messages between users is not the focus, but an example of how the protocol can be used.

Keywords: Communication protocol. Data transfer by sound waves. FSK.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Efeito aliasing	13
Figura 2 – Modulação FSK	13
Figura 3 – Máquina de estados finito do codificador	17
Figura 4 – Exemplo de saída onda sonora	18

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo de entrada e saída da camada codificador	16
Quadro 2 – Cronograma de atividades	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FSK Frequency-shift keying.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos	10
1.2	Organização do texto	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Som	12
2.2	Amostragem e o Teorema de Nyquist	12
2.3	Modulação FSK	13
3	PROPOSTA	14
3.1	Transmissor	16
3.1.1	Codificador	16
3.2	Transmissor	16
3.3	Receptor	17
3.4	Decodificador	18
3.5	Camada de Enquadramento	18
4	METODOLOGIA	19
4.1	Etapas do Projeto	19
4.2	Cronograma de Trabalho	19
4.3	Resultados Esperados	19
	REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

A rápida evolução tecnológica das telecomunicações nos permite transmitir dados sem fio em altas taxas de transmissão através de ondas eletromagnéticas com tecnologias como o Wi-Fi e Bluetooth e também permitem à grandes distâncias como o LoRa e satélites. Essas tecnologias trazem em sua bagagem uma alta complexidade de hardware e software e podem ser um meio de comunicação inconveniente devido à complexidade, características indesejadas como a interferência, não permeabilidade no meio como nos casos subaquáticos e o custo de se implementar um hardware novo num equipamento já instalado.

Cada tecnologia de comunicação sem fio possui suas vantagens e desvantagens. Tais características vão se ressaltar melhor para cada tipo de cenário na qual se deseja cumprir a missão de realizar uma comunicação sem fio. Realizar uma troca de informação tendo como meio físico de transmissão o som, mas sem esquecer que o som se propaga também em outros meios como objetos sólidos e líquidos e que é possível também utilizar o protocolo proposto nesses meios, traz características diferentes das outras tecnologias que utilizas as ondas eletromagnéticas e isso é vantajoso em alguns casos.

Transmitir informação por ondas mecânicas tem a vantagem de não ter interferência nenhuma com ondas eletromagnéticas, o alcance é limitado naturalmente por barreiras simples como paredes, traz uma facilidade para utilizar hardware já existentes em eletrônicos com um simples buzzer e microfone e penetram na água com muito mais profundidade do que ondas eletromagnéticas.

É sensato se questionar o porquê utilizar ondas sonoras ao invés das comuns eletromagnéticas. Ondas mecânicas, como neste caso o som, não são boas de atravessar objetos e se atenuam rapidamente, o que à primeira vista pode parecer ruim, mas não é. Tudo depende do objetivo da aplicação. O fato de não atravessar paredes pode ser positivo em uma aplicação na qual deseja-se certificar que a comunicação seja restrita em uma pequena sala enquanto o fato de funcionar apenas em curtas distâncias permite uma reutilização da mesma faixa de frequência em locais mais próximos por não causarem interferência entre si a grandes distâncias, um isolamento acústico também é mais simples e barato do que um isolamento eletromagnético porque qualquer material isola o som, já uma onda eletromagnética não. Transmitir dados sobre o som também abre uma nova possibilidade alternativa a lugares onde não seja permitido trabalhar com ondas eletromagnéticas por questões de interferência além de permitir aproveitar hardware já existente. Essa prática não é inovadora e já existente em sonares nos submarinos, exemplos online pela internet ([RYPULA, 2015](#)) e até mesmo produtos no varejo como o

Chromecast (SEPPALA, 2014).

As ondas sonoras e eletromagnéticas compartilham uma característica muito abordada nesse trabalho: a frequência. Realizar uma comunicação sem fio utilizando-se como meio de transporte físico ondas sonoras é possível manipulando tal característica. Não é a única forma de fazer isso, existem mais técnicas possíveis como modulação por amplitude, fase e até combinações delas entre si, porém é a escolhida neste trabalho. A modulação da frequência de uma onda para transportar informação é denominada de modulação por chaveamento de frequência (FSK, do inglês *Frequency-shift keying (FSK)*), ou seja, “a modulação FSK é caracterizada pela informação contida na frequência da portadora” (SKLAR et al., 2001).

A intenção final desse projeto é realizar um protocolo no qual possa ser utilizado de forma livre com qualquer aplicação para realizar uma comunicação através de ondas sonoras. De forma ilustrativa também será criado o programa que testará a aplicação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Criar protocolo de comunicação sem fio que utilize ondas sonoras como meio físico de transporte da informação.
- Permitir a comunicação entre dois usuários utilizando uma aplicação simples com o objetivo apenas de demonstração prática do protocolo funcionando.

1.1.2 Objetivos específicos

- Criar um protocolo de enlace ponto-a-ponto para camada física.
- Criar um transmissor FSK.
- Criar um receptor FSK.
- Sintetizar o transmissor e o receptor em um único protocolo que receba e transmita informação de forma bidirecional e assíncrona.
- Utilizar técnicas de garantias de entrega e retransmissão
- Criar uma aplicação simples para demonstração do protocolo.

1.2 Organização do texto

No [Capítulo 2](#) é apresentada a fundamentação teórica, no [Capítulo 3](#) a proposta e no [Capítulo 4](#) a metodologia para este projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Som

A definição mais geral de som é a de uma onda longitudinal que se propaga em um meio. Pode se propagar no meio gasoso, líquido ou sólido. As ondas sonoras mais simples são as ondas senoidais, as quais possuem valores definidos para a amplitude, a frequência e o comprimento de onda. O ouvido humano é sensível aos sons com frequências compreendidas entre 20 e 20000 Hz, que delimitam o intervalo audível, mas usamos também a palavra som no caso de frequências maiores (ultrassom) ou frequências menores (infrassom) do que os limites do intervalo audível segundo [Young e Freedman \(2012\)](#).

Dentre suas características, a mais importante para esse protocolo será a frequência. Ela traz fatores importantes que determinam se o som será detectável ou não por humanos, máquinas e animais. A faixa escolhida nesse protocolo será a faixa audível ao ouvido humano, mais especificamente de 1000 a 3100 Hz aproximadamente. Essa faixa foi escolhida porque os microfones são equipamentos que por muitas vezes são otimizados a obter a frequência de uma voz humana e para manter uma maior probabilidade de que qualquer microfone funcione com o protocolo, essa faixa é excelente. O protocolo não é limitado à frequência utilizada, porém o hardware sim.

2.2 Amostragem e o Teorema de Nyquist

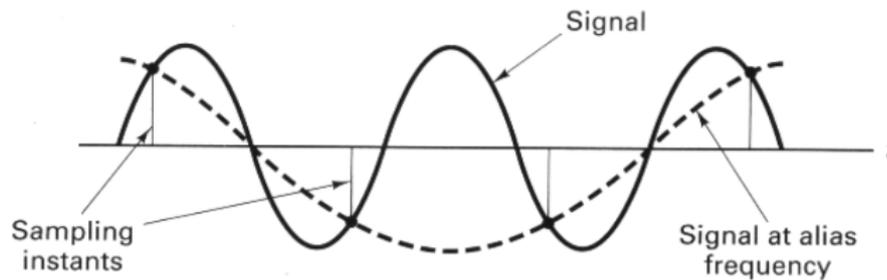
Segundo [Sklar et al. \(2001\)](#) a amostragem é uma técnica crucial para a codificação de sinais contínuos em sinais discretos. A taxa de amostragem é a quantidade de amostras por unidade de tempo e é um parâmetro crítico que afeta a fidelidade do sinal codificado. De acordo com o Teorema de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes maior que a maior frequência presente no sinal original para garantir que não haja distorção.

O sinal sonoro na natureza é contínuo e para conseguir ser processado deve ser transformado em um sinal discreto. Para transformar um sinal contínuo em discreto é necessário realizar a amostragem que é basicamente uma coleta periódica do sinal contínuo. Cada coleta é armazenada e esse conjunto de amostras formam uma cópia discreta do sinal original. Como a amostragem obtém apenas algumas amostras no tempo, isso significa que ela gera uma perda de informação em relação ao sinal original e, mesmo se a frequência de amostragem for muito alta, sempre haverá perdas. Porém ainda sim é uma excelente aproximação que nos permite processá-la digitalmente e recuperar um cópia do sinal

original muito fiel.

A frequência de amostragem é um parâmetro que está relacionada com a qualidade que o sinal. Um sinal analógico por mais caótico que seja ainda sim pode ser derivado em senóides de diferentes frequências somadas. Para amostrar um sinal fielmente é necessário conseguir amostrar todas as senóides e isso inclui desde a menor até a sua de maior frequência. Se a senóide de maior frequência for amostrada com sucesso, a de menor também será. Para amostrar sua senoide de maior frequência é necessário no mínimo duas amostras por período, ou seja, deve-se seguir o teorema de Nyquist. Caso a frequência de amostragem não seja suficientemente alta, ocorrerá o efeito aliasing ilustrado na [Figura 1](#)

Figura 1 – Efeito aliasing

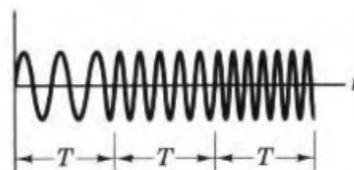


Fonte: Sklar et al. (2001)

2.3 Modulação FSK

FSK (Frequency Shift Keying) é uma técnica de modulação digital em que a frequência da portadora é modulada para representar dados digitais. A forma de onda ilustrada na [Figura 2](#) mostra a típica mudança de frequência na transição de símbolos. Nessas transições de símbolo, a figura descreve uma mudança suave de uma frequência (tom) para outra. No caso geral do MFSK, a mudança para um tom diferente pode ser bastante abrupta, pois não há exigência de que a fase seja contínua (SKLAR et al., 2001)

Figura 2 – Modulação FSK



Fonte: Sklar et al. (2001)

A modulação FSK coerente e não coerente são duas formas diferentes de implementar a modulação FSK. Na coerente utiliza-se a fase da portadora para detectar o sinal enquanto na não coerente, a fase não tem importância e isso traz facilidades na implantação da técnica, porém sua performance é pior.

3 PROPOSTA

A proposta desse projeto de TCC é desenvolver um protocolo de que se destina a implantar enlaces ponto-a-ponto usando um canal sem-fio com ondas sonoras. A camada física a ser utilizada tem certas particularidades, como baixa taxa de dados, baixo alcance, e ausência de detecção de acesso ao meio. Os serviços prestados serão:

- Protocolo de enlace ponto-a-ponto para camada física
- Encapsulamento de mensagens com até 32 bytes
- Recepção de mensagens livres de erros
- Garantia de entrega

O serviço não possuirá:

- Controle de acesso ao meio
- Conexão (estabelecimento de sessão)

O protocolo aplicará alguns mecanismos para oferecer o serviço especificado e por mecanismos entendem-se funcionalidades relacionadas a como as comunicações acontecem no protocolo.

- Enquadramento
- Detecção de erros
- Garantia de entrega no protocolo de enlace
- Formato de quadro do protocolo

O protocolo será dividido em camadas:

- Aplicação
- ARQ
- Enquadramento
- Transporte

As camadas se comunicarão entre si através de quadros que são compostos por:

- 1 byte de controle
- De 1 a 32 bytes de Dados

Para o **host transmissor** as camadas podem ser divididas com suas funções da seguinte forma:

- **Camada de Aplicação:** Será a camada responsável por preencher o quadro no campo de dados em bytes e envia-lo para a camada inferior (ARQ) em formato de quadro.
- **Camada ARQ:** Recebe um quadro com os dados para alterar o byte de controle e adicionar nele a numeração do quadro que serve para referenciar o ACK, após isso envia o quadro para a camada inferior (Enquadramento).
- **Camada Enquadramento:** Recebe o quadro da ARQ e os transforma numa sequência pura de bytes. A partir dessa sequência são obtidos os bytes de verificação do CRC e os concatena com a sequência de bytes do quadro.
- **Camada de Transporte:** Recebe os bytes da camada de enquadramento, transforma-os numa lista de símbolos de frequências, adiciona os símbolos de começo e fim de transmissão, transforma-o numa onda sonora e emite ao meio.

Já para o **host receptor** as camadas podem ser descritas desta forma:

- **Camada de Transporte:** Recebe em áudio a informação e as recompõe em bytes novamente na qual são enviados para a camada de enquadramento.
- **Camada Enquadramento:** Recebe os bytes da camada de transporte na qual confere o CRC e caso esteja correto envia o quadro para a camada de cima.
- **Camada ARQ:** Confere se o quadro é da numeração correta e entrega para a camada de aplicação
- **Camada de Aplicação:** Recebe os dados e faz o que quiser com isso. Neste caso a aplicação apenas apresentará na tela a informação.

3.1 Transmissor

A camada de transmissão é a que mais apresenta desafios. Ela será dividida em duas partes: A receptora e a transmissora.

A parte transmissora receberá a informação da camada superior em bytes e a partir deles irá gerar uma sequência de símbolos. Nessa sequência será adicionado um símbolo de start e um outro de end para a parte receptora abrir e fechar a recepção de dados. Essa parte é denominada de Codificador.

3.1.1 Codificador

O codificador será a camada do software responsável pela esquematização do arranjo de frequências dispostas sequencialmente que representem a informação recebida em bytes pela camada superior. Ele funcionará agrupando os bytes em conjuntos de dois bits. Cada conjunto é representado por até duas frequências seguindo a máquina de estados da [Figura 3](#).

Utiliza-se oito frequências para representar quatro conjuntos de bits com a intenção de facilitar para o receptor. Dessa forma sequências de bits iguais terão sempre frequências diferentes a cada dois bits para que o receptor não tenha que se preocupar com a duração de cada símbolo. O início e o fim de um símbolo se dá pela alternância das frequências. O codificador não define exatamente a frequência, mas sim o conceito delas. Essa camada apenas tem como premissa que as frequências de F0 a F7 são distintas, possuem uma largura de faixa de distância entre si e não podem se repetir sequencialmente. O [Quadro 1](#) mostra algumas sequências de exemplo a partir de entradas binárias.

Quadro 1 – Exemplo de entrada e saída da camada codificador

Entrada de bytes	Saída em frequências
01100001	[F1, F2, F0, F1]
11111111	[F3, F7, F3, F7]
00001111	[F0, F4, F7, F3]
01101011	[F1, F2, F6, F7]

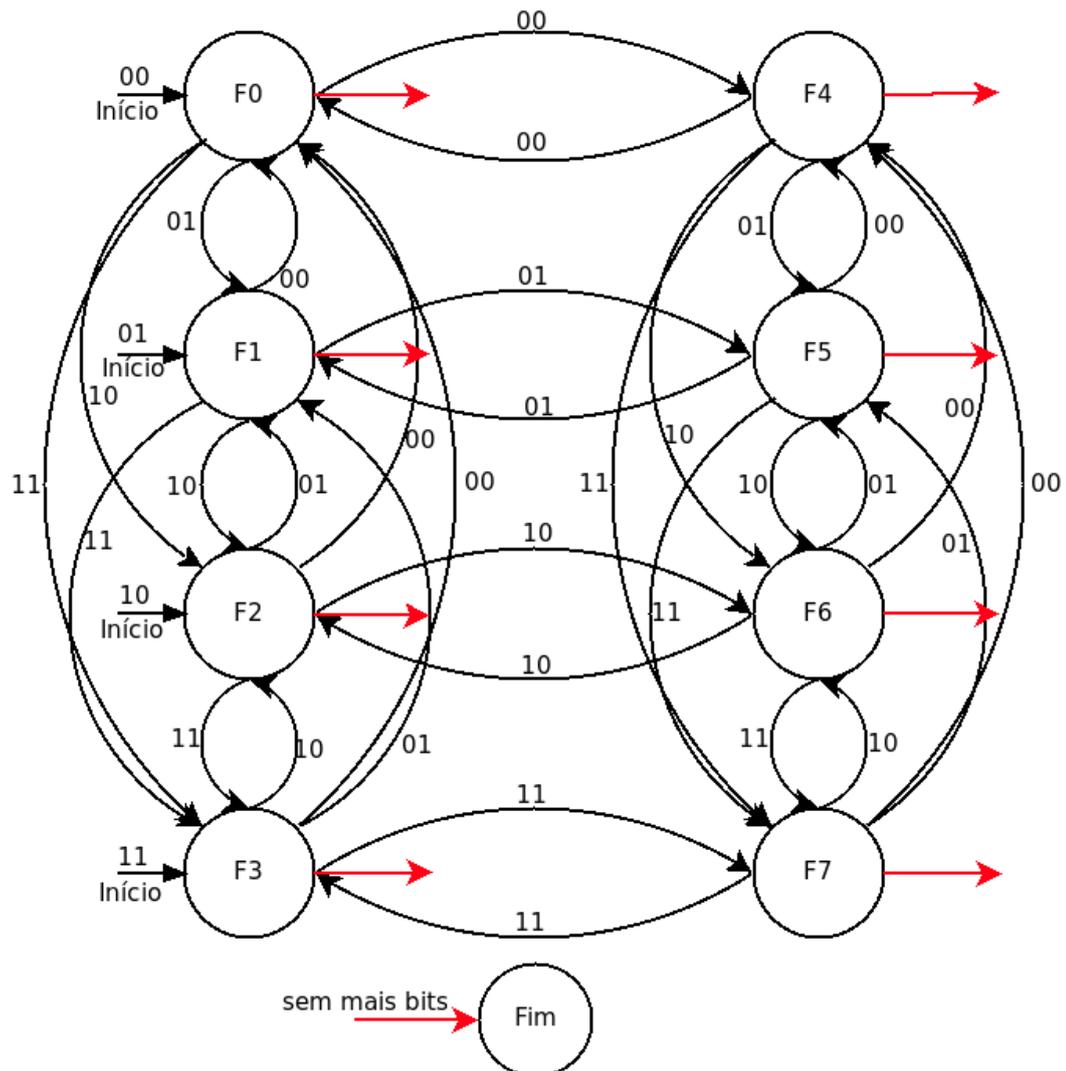
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o codificador gerar a sequência, ele irá concatenar com o start simbol e o end simbol que são as frequências que iniciam e terminam o sinal gerado.

3.2 Transmissor

O transmissor será a camada que recebe a sequência de frequências do codificador. A partir dessa sequência gera-se uma onda sonora a ser transmitida pela mesma camada.

Figura 3 – Máquina de estados finito do codificador



Fonte: Desenvolvida pelo autor

As frequências exatas que serão emitidas ficam no transmissor, elas estão dispostas de 1000 a 3100 Hz e respectivamente representadas de F0 a F7.

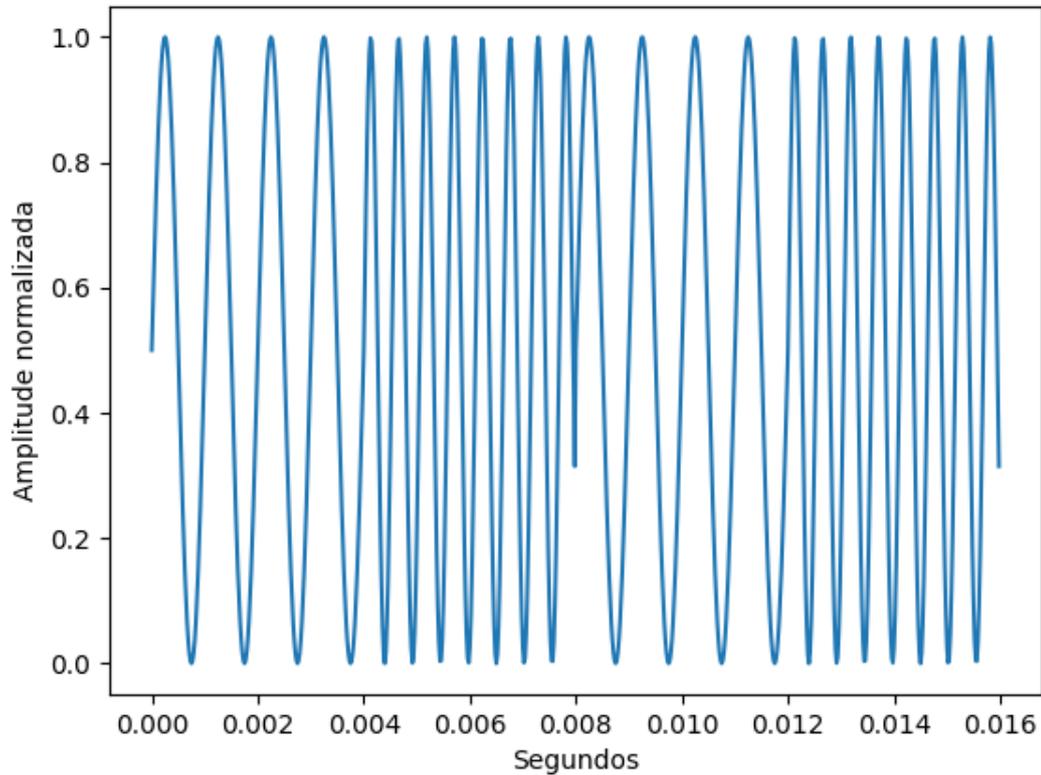
Um exemplo de uma onda sonora gerada a partir do caractere '3' em ASCII que é representado pela sequência de bits '00110011' na qual foi codificada pelas frequências [F0, F3, F0, F3] é representada pela Figura 4

Esse sinal será emitido e recebido pela parte receptora do host receptor.

3.3 Receptor

O receptor é a parte mais desafiadora disso porque tudo o que chegar nele terá que ser filtrado entre informação e ruído. Além disso ele deverá ser capaz de trabalhar em tempo real, realizar um janelamento inteligente para conseguir se sincronizar automaticamente

Figura 4 – Exemplo de saída onda sonora



Fonte: Desenvolvida pelo autor

com a informação recebida e realizar a transformada de Fourier e enviar para o codificador decodificar.

3.4 Decodificador

O decodificador será uma parte do codificador, a partir de um entrada de sequência de frequências, realizar a conversão para símbolos e posteriormente para bytes. É simplesmente o inverso do codificador.

3.5 Camada de Enquadramento

Essa camada tem como estratégia definir quando uma comunicação se abre, quando ela se encerra e o que é esperado dela. Qualquer troca de informação é feita através de um quadro que possui control byte e data bytes. O quadro não tem tamanho fixo pois a parte que carrega a informação útil (data bytes) pode variar de 1 a 32 bytes. Existe uma parte adicional denominada de control byte que serve para carregar informações de controle do quadro como numeração e se ele é ACK ou DATA.

4 METODOLOGIA

4.1 Etapas do Projeto

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- **Etapa 1:** Realizar a camada de aplicação.
- **Etapa 2:** Realizar a camada de ARQ
- **Etapa 3:** Realizar a camada de Enquadramento.
- **Etapa 4:** Realizar a parte de codificação da Transmissão.
- **Etapa 5:** Realizar a parte de decodificação da Transmissão.
- **Etapa 6:** Testar a comunicação com ruído e sem.
- **Etapa 7:** Realizar ajustes e revisões.

4.2 Cronograma de Trabalho

A expectativa de conclusão de cada etapa do projeto se dará de acordo com o cronograma do [Quadro 2](#)

4.3 Resultados Esperados

O resultado esperado no fim da fase de experimentos e testes é que o protocolo forneça a possibilidade de comunicação entre as aplicações em situações favoráveis e desfavoráveis.

Quadro 2 – Cronograma de atividades

Atividade	Mês				
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
Etapa 1	X				
Etapa 2	X				
Etapa 3	X				
Etapa 4		X			
Etapa 5			X		
Etapa 6			X		
Etapa 7				X	X

REFERÊNCIAS

RYPULA, R. *Audio Network - send data over sound in JavaScript*. 2015. Disponível em: <<https://audio-network.rypula.pl/>>. 9

SEPPALA, T. J. *Chromecast's ultrasonic device pairing is much simpler than it sounds*. 2014. Disponível em: <<https://www.engadget.com/2014-06-27-chromecast-ultrasonic-pairing.html>>. 10

SKLAR, B. et al. *Digital communications*. [S.l.]: Prentice hall Upper Saddle River, NJ, USA., 2001. v. 2. 10, 12, 13

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *University Physics*. 12. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2012. 12