

# Protocolo de Transmissão por Proximidade com Dados sobre Som

**Marcelo Ribeiro Tormim**

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação

Instituto de Biotecnologia

Universidade Federal de Catalão (UFCAT)

Catalão - GO

`marcelo_ribeiro@discente.ufcat.edu.br`

**Resumo.** *As características particulares de ondas sonoras tornam a transmissão de dados sobre som uma alternativa com elementos atraentes quando em comparação a outras soluções de comunicação sem fio. O desenvolvimento de protocolos de descoberta de dispositivos e transporte de dados baseados nesse método de comunicação é necessário para que ele possa ser explorado em aplicações diversas nas áreas de cidades inteligentes e internet das coisas. Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um protocolo de descoberta e transmissão utilizando dados sobre som.*

## 1. Introdução

A tecnologia de dados sobre som, conhecida como *data-over-sound* ou DoS, é um mecanismo para comunicação entre dispositivos através de informação codificada em forma de ondas sonoras. Frequências audíveis ou frequências além da faixa de audição comum para humanos adultos podem ser empregadas para a codificação de dados. Dependendo de variações entre situações de uso e implementações específicas, a tecnologia é capaz de transmitir entre 50 a 100 bits por segundo.

O estabelecimento de um protocolo para comunicação entre dispositivos utilizando dados sobre som possibilita o aproveitamento desse método de transmissão de dados em diversas potenciais aplicações em cidades inteligentes e internet das coisas. As características particulares da conectividade por DoS possibilitam um meio de comunicação sem fio um-para-muitos sem necessidade de pareamento ou hardware de rede adicional, sendo um meio atraente para

fácil transmissão de pequenas quantidades de dados entre dispositivos próximos quando comparado a outras soluções como Wi-Fi e Bluetooth [6].

Um protocolo de descoberta de dispositivos determina como os dispositivos se anunciam e são percebidos por outros dispositivos em um ambiente compartilhado. Protocolos como BLE implementam mecanismos de descoberta de dispositivos por meio de envio de anúncios periódicos que podem ser detectados por dispositivos próximos [5]. Um protocolo de transporte de dados é o protocolo que de fato permite o envio de bytes entre dispositivos que foram previamente reconhecidos.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protocolo de descoberta de dispositivos e transporte de dados que faça uso de dados sobre som para aplicações em cidades inteligentes.

Este artigo está organizado em sete seções. A seção 1 introduz o tema abordado. A seção 2 apresenta informações sobre a tecnologia DoS. A seção 3 apresenta os protocolos de comunicação DoS que estudamos para este trabalho. A seção 4 descreve detalhes técnicos do ggwave, escolhido como solução da camada física sobre a qual nosso protocolo DoS, de atuação na camada de enlace, é construído. A seção 5 detalha os experimentos que realizamos com ggwave para avaliar seu desempenho. A seção 6 apresenta o projeto de nosso protocolo DoS e o experimento que realizamos para avaliá-lo. A seção 7 conclui o artigo, com exposição de nossas considerações a respeito dos resultados obtidos.

## **2. Transmissão de Dados sobre Som**

A tecnologia de dados sobre som é um mecanismo para comunicação entre dispositivos através de informação codificada em forma de ondas sonoras. Frequências audíveis (abaixo de 15 kHz) ou frequências além da faixa de audição comum para humanos adultos (entre 15 kHz e 20 kHz usualmente, embora frequências ultrassônicas se estendam adiante) podem ser empregadas para a codificação de dados.

Passos do processo de comunicação incluem a codificação por um dispositivo de dados na forma de som, reprodução por um alto-falante do som resultante, captação dessa transmissão por um microfone e decodificação por um dispositivo do som para recuperar a informação. Dependendo de variações entre situações de uso e implementações específicas, a tecnologia é capaz de trans-

mitir entre 50 a 100 bits por segundo.

A transmissão de dados através do uso de ondas sonoras é uma tecnologia que pode ser implementada em diversas soluções almejando as ideias de cidades inteligentes e internet das coisas [11, 1]. As características particulares de ondas sonoras tornam a transmissão de dados sobre som uma alternativa com elementos atraentes quando em comparação a outras soluções de comunicações sem fio [6].

O uso de som para transmissão de dados em situações envolvendo comunicação de curto alcance pode oferecer uma experiência descomplicada e eficaz. Abordagens comumente empregadas em tais situações têm problemas que as tornam menos desejáveis. Certas tecnologias (NFC, QR code) têm limitações diversas de acessibilidade: só comunicação de um sentido é permitida, linha de visão entre os dispositivos é necessária, comunicação só é possível com muita proximidade, entre outros. Os desafios listados não se aplicam à comunicação por som.

Considerando o emprego da tecnologia de dados sobre som, dispositivos não necessitam de funcionalidade/hardware adicional para suportá-la (apenas alto-falante e microfone convencionais), permitindo suporte fácil à dispositivos legado. O sistema operacional rodando nos dispositivos comunicantes não afeta o funcionamento da tecnologia, comunicação pode ocorrer entre dispositivos a certa distância (alguns metros) e comunicação dois sentidos é possível.

Outra situação em que a tecnologia DoS se destaca são ambientes sensíveis ao uso de rádio frequência (RF). Isso inclui UTIs de hospitais, certos laboratórios científicos, locais com estruturas metálicas que dificultam a propagação de sinais de rádio, entre outros [7]. As ondas sonoras utilizadas para transmissão são ondas mecânicas, diferentemente das ondas eletromagnéticas de tecnologias de rádio transmissão como Wi-Fi e Bluetooth, sendo seguras em tais ambientes e especialmente úteis em situações envolvendo elementos móveis em que conexões cabeadas não são possíveis.

Certas características específicas de ondas sonoras conferem algumas particularidades à tecnologia DoS que a tornam especialmente útil em certas aplicações e inviabilizam seu uso em outras. Diferentemente das ondas de rádios usadas em outras soluções, ondas sonoras (especialmente as de maior frequência) têm propagação limitada através de obstáculos físicos como pare-

des, restringindo comunicação apenas ao interior de uma sala, e uma velocidade de propagação muitas vezes inferior, tornando-as consideravelmente mais susceptíveis às consequências indesejadas de ecos e do efeito Doppler [2].

A transmissão de dados via som, assim como outros métodos de comunicação sem fio, requer um conjunto de protocolos estabelecendo as regras que governam os diversos aspectos envolvidos no processo de comunicação, incluindo sinalização, correção de erro e demais elementos necessário para o funcionamento do sistema. Apesar de muitas implementações de DoS apresentarem similaridades entre si, com elementos como o emprego da técnica de modulação por chaveamento de frequência (FSK) usualmente comuns entre elas, as características específicas do ambiente e dos dispositivos almejados precisam guiar escolhas associadas ao balanceamento entre taxa de dados e robustez da comunicação empregadas por cada implementação para garantir desempenho adequado.

### **3. Trabalhos Relacionados**

Diversos protocolos de comunicação baseados em dados sobre som têm sido desenvolvidos. Quiet é uma biblioteca que utiliza liquid-dsp (uma biblioteca de processamento digital de sinal de código aberto) para transmissão de dados através de som [9]. Ela possui múltiplos perfis com parâmetros que controlam os processos de codificação e decodificação de dados, havendo perfis adequados para transmissão via cabo (codificação em todo o espectro disponível) ou que fazem uso apenas de sinais ultrassônicos, e um binding JavaScript disponível [10].

AstroMech é um protocolo de troca de dados por áudio para Arduino [12]. Ele opera com 16 frequências audíveis (cada som reproduzido corresponde a quatro bits) que são transmitidas por um emissor em uma taxa de 20 sons/segundo para um ou múltiplos receptores e adiciona código Reed-Solomon às mensagens como método de correção de erro. Além das restrições de uso inerentes associadas a uma biblioteca desenvolvida para uma plataforma específica, seu uso de frequências audíveis para codificação de dados torna seu emprego em muitas aplicações práticas problemático, dada a maior susceptibilidade ao ruído de fundo em um ambiente e o fato de que a emissão de sons audíveis durante a transmissão de dados simplesmente não é aceitável em certas aplicações (como rastreamento digital de contatos).

SoniTalk é um projeto visando desenvolver um protocolo aberto e transpa-

rente para comunicação ultrassônica entre dispositivos [14]. O protocolo criado envia informações como mensagens individuais codificadas em binário formadas por vários blocos, com os blocos inicial e final, usados para a detecção de uma mensagem, possuindo, em ordem ascendente, a metade mais baixa das frequências e a metade mais alta, respectivamente.

#### **4. Protocolo Físico do ggwave**

O ggwave é uma biblioteca de dados sobre som, cujo protocolo de transmissão utiliza de modulação por chaveamento de frequência (*frequency-shift keying*; FSK).

A taxa de largura de banda das transmissões pode variar de 2 a 16 bytes/s de acordo com os parâmetros escolhidos para o protocolo de transmissão, o qual pode apresentar variações em relação ao número de repetições de cada elemento em uma transmissão e em relação a faixa de frequências empregada (uma faixa de 4,5 kHz é usada e variantes de menor taxa de transferência restritas a 1/3 ou 1/6 de tal faixa – denominadas Dual-Tone e Mono-Tone, respectivamente – são oferecidas para situações em que frequências utilizáveis são limitadas).

A porção do espectro de frequências sonoras empregada nas transmissões pode ser configurada, permitindo codificação de dados na forma de ondas sonoras audíveis ou ondas ultrassônicas de acordo com a aplicação almejada.

Os dados a serem transmitidos são divididos em porções de quatro bits. Durante a transmissão, o protocolo utiliza uma faixa de frequências sonoras de até 4,5 kHz, dividida em frequências individuais espaçadas com saltos iguais de 46,875 Hz entre cada uma (a frequência inicial e final de tal faixa varia de acordo com parâmetros do protocolo escolhidos). Até três bytes dos dados podem ser transmitidos a cada momento, com uma forma de onda composta por soma de até seis sons dentre as frequências da faixa sonora sendo utilizada. Um som nesse contexto consiste de uma onda sonora sinusoidal (oscilação periódica simples descrita por uma função seno ou cosseno) composta por uma única frequência, sendo que qualquer onda mais complexa pode ser decomposta em um certo conjunto de tais ondas através de uma técnica matemática conhecida como transformada de Fourier. O valor de frequência de cada som combinado para produção da forma de onda a ser transmitida codifica quatro bits, corres-

pondo a uma das porções em que os dados são divididos.

O início e fim de transmissões é demarcado com marcadores predefinidos para que um receptor seja capaz de identificá-los e então gravar o áudio entre eles para decodificação de frequências. O marcador de início é composto por 16 das 32 frequências iniciais da faixa de transmissão e o marcador de fim é composto pelas 16 frequências restantes. As 32 frequências iniciais de amostras de entrada são analisadas com comparação da força relativa de frequências vizinhas para identificação de um marcador. Para evitar que ruído aleatório seja capaz de produzir um marcador, 16 frequências são empregadas para manter mínimo o número de falsos positivos.

Os dados de uma mensagem são transmitidos acrescidos de códigos de correção de erro Reed-Solomon (ECC) [3]. O uso de Reed-Solomon permite a identificação e correção de bytes corrompidos de uma mensagem se a quantidade de erros não ultrapassa metade do número de bytes ECC contidos na mensagem. A quantidade de bytes ECC em uma mensagem depende do tamanho dos dados que a constituem.

O número de bytes ECC acrescidos a uma mensagem corresponde a 40% do comprimento de dados a ser transmitidos. Dado um número  $x$  de bytes a ser transmitidos, a função  $ComprimentoECC(x) : x < 4096 : \max(4, 2 * \lceil x/5 \rceil)$  é empregada para definir o número de bytes ECC utilizados. A implementação de correção de erros utilizada por ggwave é capaz de codificar até 256 caracteres por mensagem. Considerando que 40% do tamanho de mensagens é dedicado para bytes ECC, cada transmissão limita-se a até 183 bytes de conteúdo ( $183 + 40\% \text{ ECC} = 256$ ).

## 5. Avaliação da Transmissão de Dados sobre Som

Esta seção apresenta experimentos para avaliação do desempenho do protocolo de dados sobre som do ggwave e a sua aplicabilidade em cenários de cidades inteligentes. Os experimentos avaliaram o efeito da distância, de ruído ambiente e obstáculos físicos na taxa de sucesso da transmissão de mensagens. Nos testes conduzidos, nós contabilizamos o número de mensagens recebidas corretamente por um dispositivo receptor em diferentes distâncias em relação ao receptor e de acordo com a presença ou ausência de obstrução física entre eles em uma sala fechada com ruído ambiente ou silenciosa.

## 5.1. Ambiente de Experimentação

Os experimentos foram baseados na versão 0.4.2 do ggwave através de seus bindings Python, em computadores com Python 3.10.4 e a biblioteca PyAudio 0.2.12<sup>1</sup>. Nós utilizamos um código (disponível no repositório GitHub associado a este artigo<sup>2</sup>) nos testes para a transmissão a cada três segundos de uma mensagem. Cada experimento consistiu no envio de 25 mensagens de 60 bytes de comprimento em intervalos de três segundos. Ao final, coletamos o número de mensagens recebidas com sucesso em cada situação analisada.

Os testes avaliaram o desempenho das transmissões audíveis e ultrassônicas de ggwave em seus protocolos padrões (`protocolId = 1` e `protocolId = 4`, respectivamente). Ambas as variantes empregam uma faixa de frequências sonoras de 4,5 kHz, tendo como frequência inicial 1875 Hz para o protocolo audível e 15000 Hz para o protocolo ultrassônico. A taxa de transferência de dados utilizada nesses protocolos é a configuração *Fast*, que corresponde a uma taxa de 16,76 B/s.

Nós conduzimos o experimento no Laboratório de Sistemas Digitais da Universidade Federal de Catalão (Sala 16 do Bloco J). Os dispositivos utilizados consistem em um microfone de mesa e uma caixa de som externa conectados a computadores por cabos P2 estéreo de 3,5 mm. A Figura 1 apresenta as especificações técnicas dos dispositivos, assim como dos computadores.

Para os testes, nós ajustamos a sensibilidade do microfone de mesa de acordo com os níveis de som captados por ele no cenário silencioso do ambiente de experimentação, de modo a mantê-los todos abaixo de aproximadamente -30 dB, confortavelmente distantes do nível máximo que ele é capaz de reproduzir. Com esse objetivo, aplicamos uma atenuação de -18,06 dB ao microfone, o que correspondeu à configuração de 50% do volume da entrada de áudio do computador conectado. Configuramos o volume de 100% para a saída de áudio do computador conectado à caixa de som externa.

## 5.2. Efeito de Distância na Transmissão

Para avaliar a influência de distância na transmissão, nós variamos a distância entre transmissor e receptor, variando de 150 a 300 cm em incrementos de 30 cm após cada avaliação. A Figura 2 apresenta os resultados de percentual de

---

<sup>1</sup><https://pypi.org/project/PyAudio/0.2.12/>

<sup>2</sup><https://github.com/Dell851/artigo-pfc-marcelotormim-dataoversound>

Figura 1: Especificações técnicas dos dispositivos utilizados para o experimento

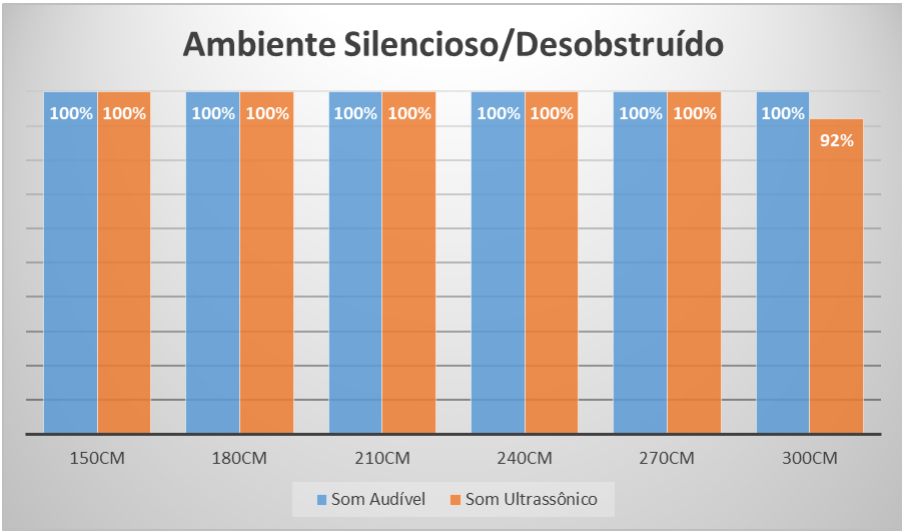
Microfone		Caixa de som	
Redução de ruído	Não	Potência de saída	3 watts
Resposta em frequência	100 – 12.000 Hz	Impedância	4 ohms
Impedância	2.200 ohms	Intervalo de frequência	280 Hz – 16.000 Hz
Sensibilidade	-45 dB	Relação sinal-ruído	Maior ou igual a 95 dB
Nível de pressão de som	115 dB		
Padrão de captação	Omnidirecional		
Relação sinal-ruído	58 dB		
Tipo de sensor	Condensador		

Computador receptor		Computador transmissor	
Processador	Intel Core i5-2400 3,10 GHz	Processador	Intel Core i3-3217U 1,80 GHz
Sistema operacional	Lubuntu 22.04 LTS	Sistema operacional	Linux Mint 20.1 MATE 64-bit
Interface de memória	DDR3 SDRAM	Interface de memória	DDR3 SDRAM
Velocidade de disco	7200 RPM	Velocidade de disco	5400 RPM
Disco rígido	500 GB	Disco rígido	500 GB
Interface de disco	SATA	Interface de disco	SATA
Memória	8 GB	Memória	2 GB

sucesso de recepção de mensagens de acordo com distância.

Figura 2: Taxa de sucesso na entrega de mensagens em relação à distância no cenário silencioso e sem obstruções



Ambos os protocolos testados atingiram desempenho máximo nesse cenário ao longo de todas as distâncias avaliadas, excetuando a perda de duas mensagens transmitidas a 300 cm do receptor com o protocolo ultrassônico. Nós especulamos que tal resultado levemente inferior verificado em transmissões ultrassônicas pode ser atribuído ao fato de que a faixa de frequências em que operam não corresponde aos intervalos de resposta uniforme dos dispositivos utilizados para emissão e captação de áudio. As especificações técnicas desses



dispositivos, listadas na Figura 1, indicam que a faixa de frequências acima de 15000 Hz do protocolo ultrassônico está além das frequências que a caixa de som e especialmente o microfone são projetados para reproduzir idealmente.

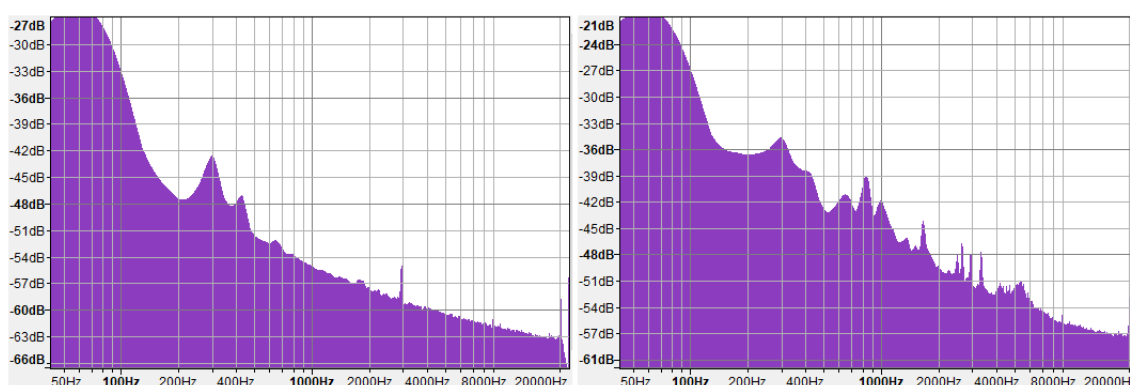
A partir dos testes realizados inferimos que, sem a presença de obstáculos físicos ou ruído ambiente significativo, transmissões com taxa de sucesso total de recepção de mensagens entre dispositivos separados por menos de três metros são possíveis. Entretanto, caso a distância entre os componentes seja de pelo menos três metros, consideração adicional é necessária para assegurar que os equipamentos de áudio empregados apresentem desempenho satisfatório em relação a faixa de frequências selecionada para transmissão.

### 5.3. Influência de ruídos no ambiente

Para avaliar a influência de ruídos na transmissão, aproveitamos ruídos encontrados no próprio laboratório, produzidos por duas fontes: um ar-condicionado e um switch de rede em operação. O ruído gerado pelo switch quando ligado é anômalo e de alta intensidade.

A Figura 3 apresenta o espectro de frequência do som captado com os aparelhos ligados e desligados. O gráfico foi gerado com auxílio do editor de áudio Audacity<sup>3</sup> no laboratório com e sem as fontes de ruído.

Figura 3: Comparação de espectro de frequência de ambiente silencioso e com ruído

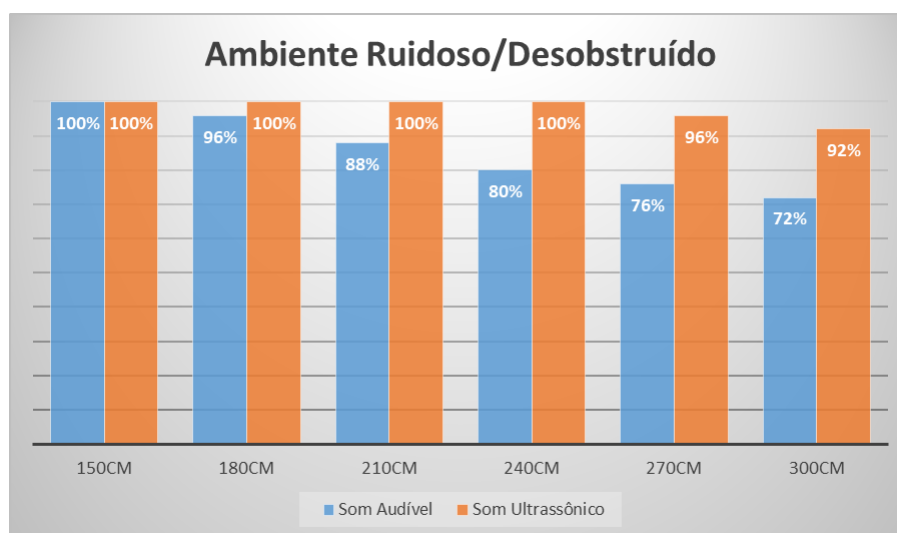


O gráfico da Figura 4 apresenta o percentual de sucesso de recepção de mensagem de acordo com distância, e com a presença do ruído ambiente anteriormente caracterizado. Os testes realizados durante o experimento demonstra-

<sup>3</sup><https://www.audacityteam.org/>

ram o efeito que ruído ambiente pode exercer sobre a taxa de erros verificados dentre as mensagens transmitidas. A presença de ruído ambiente teve grande efeito sobre a qualidade da comunicação quando utilizamos o protocolo audível, especialmente a medida que a distância entre dispositivos aumenta, com perdas de mensagens superiores a 25% na maior distância entre transmissor e receptor. O protocolo ultrassônico, apresentou desempenho essencialmente equivalente aos seus resultados em ambiente silencioso, expostos na Figura 2.

Figura 4: Taxa de sucesso na entrega de mensagens em relação à distância no cenário ruidoso e sem obstruções



A comparação de espectro de frequência entre ambiente silencioso e com ruído presente na Figura 3 possibilita verificar aumento significativo da intensidade do sinal captado pelo microfone, com elevação geral de pelo menos seis decibéis. A porção de espectro em que o protocolo audível opera (entre 1875 Hz e 6375 Hz), apresenta ruído entre -57 dB e -60 dB quando os aparelhos não estão em operação, valores que se elevam para entre -48 dB e -51 dB quando estão ligados, um aumento expressivo de nove decibéis. Essa elevação significativa do nível de ruído presente levou a degradação de desempenho do protocolo audível verificada em relação aos resultados registrados em ambiente silencioso.

Os espectros de frequência derivados das amostras de ruído captadas indicam que a intensidade de ruído presente na faixa de frequências empregada pelo protocolo ultrassônico (entre 15000 Hz e 19500 Hz) é significativamente inferior ao restante do espectro em ambas as situações. O ambiente silencioso apresenta ruído inferior a -63 dB na faixa quase ultrassônica, e o ambiente com

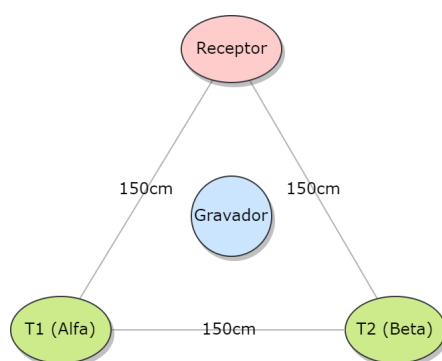
ruído, embora contenha uma elevação da intensidade dessas frequências para valores inferiores -57 dB, concentra suas frequências mais intensas em porções mais baixas do espectro. Nós atribuímos o similaridade do desempenho do protocolo ultrassônico com ou sem a presença de ruído ao fato de que a intensidade de frequências em sua faixa de operação permaneceu, apesar das diferenças verificadas, similarmente baixa em ambos os cenários, não ultrapassando -57 dB.

#### 5.4. Interferências entre Transmissões Simultâneas

Em um cenário alternativo, realizamos testes para determinação do efeito de múltiplos dispositivos transmitindo de forma simultânea. A configuração para esses testes envolveu um dispositivo receptor recebendo mensagens diferentes (palavra 'Alfa' e palavra 'Beta') de dois transmissores operando simultaneamente.

Nós capturamos as diversas transmissões nesse cenário, com alternância entre os protocolos oferecidos por ggwave, e geramos espectrogramas das gravações com o editor de áudio Audacity para análise, visualização e maior compreensão dos resultados coletados. Utilizamos um smartfone (Asus ZenFone 5 T00J com Android 5.0) rodando seu aplicativo padrão de gravação de áudio para as gravações. Devido à compressão com perda de dados nos arquivos gerados pelo aplicativo eliminarem áudio na faixa quase ultrassônica empregada pelos protocolos inaudíveis de ggwave, registramos apenas transmissões com protocolo audível para análise com espectrograma. A Figura 5 ilustra a disposição utilizada para os dispositivos no ambiente durante realização dos testes de comunicação simultânea.

Figura 5: Representação da disposição de elementos utilizada no teste de comunicação simultânea



A partir dos testes realizados, determinamos que o sinal emitido por dispositivos ao transmitir uma mensagem pode ser severamente afetado por si-

nais alheios no meio de transmissão. A situação testada no experimento de comunicação simultânea se mostrou suficiente para inviabilizar completamente a comunicação entre dispositivos, levando a falhas de recepção de virtualmente todas as mensagens enviadas.

A sobreposição do sinal de um transmissor com outros sinais no meio de transmissão com frequências similares leva, após a realização de FFT para gerar o espectro Fourier, a um número maior do que o esperado (com base nos protocolos definidos) de barras de frequência com valor de amplitude significativo, inviabilizando a determinação das frequências corretas a serem decodificadas pelo receptor para obtenção de mensagem. A Figura 6 apresenta espectrogramas gerados a partir de uma instância do problema, com exemplo de transmissões ocorrendo isoladamente e também de forma simultânea, situação em que pode-se observar claramente a sobreposição de frequências que leva a existência de mais barras de frequência com intensidade significativa em qualquer instante do que é especificado pelos protocolos.

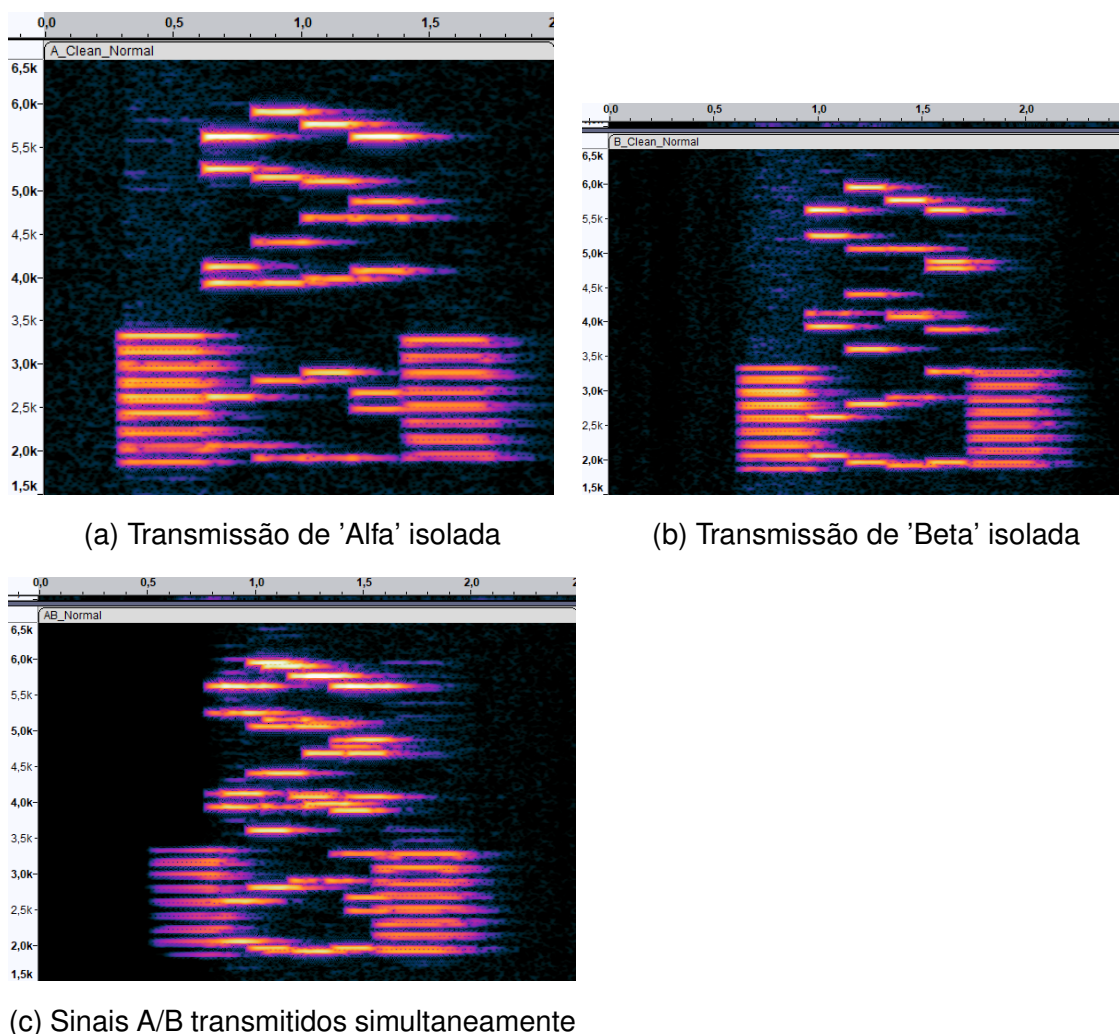
## **5.5. Influência de Obstáculos Físicos**

Para avaliar a influência de obstáculos físicos na transmissão, nós repetimos o experimento das seções 5.2 e 5.3 utilizando como obstrução física caixas de papelão posicionadas a um metro de distância do dispositivo receptor. No total, a obstrução era composta de quatro pilhas, cada uma com quatro caixas, em uma mesa diante do receptor. As caixas continham monitores LED de 23 polegadas em seu interior (modelo Dell P2317H) e dimensões 59 cm x 37 cm x 17 cm.

Os gráficos da Figura 7 e da Figura 8 apresentam os resultados de percentual de sucesso de recepção de mensagens em relação à distância com presença de obstrução física nos cenários silencioso e ruidoso, respectivamente. A obstrução física introduzida entre transmissor e receptor no experimento teve efeito negativo considerável sobre a qualidade da comunicação nas distâncias testadas, com perdas de 20% ou mais das mensagens nas situações em que separamos os dispositivos por uma distância de pelo menos 180 cm. O protocolo ultrassônico foi especialmente afetado, com percentual de perdas significativamente mais expressivo em relação à sua contraparte audível em todas as distâncias testadas.

A atenuação de sinal causada pela fileira de pilhas de caixas foi suficiente para causar números elevados de perda de mensagens em todas as avaliações

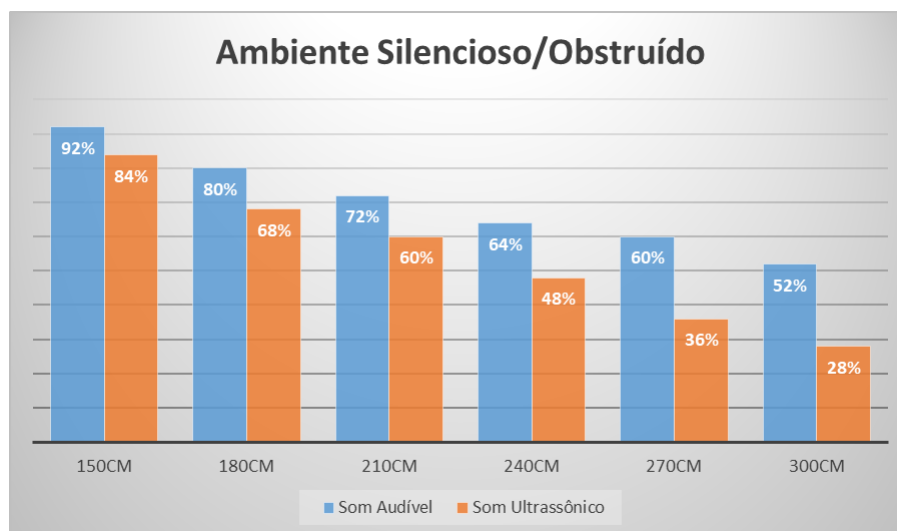
Figura 6: Espectrogramas do sinal captado durante transmissão simultânea



envolvendo distâncias superiores a 150 cm. O comprimento total da barreira física criada por todas as caixas (aproximadamente 240 cm), provavelmente contribuiu para a elevação da taxa de erros verificada em relação à distância, ao obstruir mesmo reflexões do sinal que poderiam ser captadas pelo microfone. Nós especulamos que o desempenho inferior produzido pelas transmissões ultrassônicas pode ser explicado pela influência da frequência de ondas sonoras em seu nível de atenuação por um material [13, 8], com frequências mais baixas se propagando mais adiante por sofrerem menor absorção.

Em caráter complementar, realizamos testes para determinação do efeito de paredes como obstáculo físico na comunicação. O teste envolveu envio de mensagens entre um transmissor e um receptor em ambientes diferentes separados por uma parede de 15 centímetros de espessura.

Figura 7: Taxa de sucesso na entrega de mensagens em relação à distância no cenário silencioso e com obstruções



Nós capturamos as transmissões com um smartfone (Asus ZenFone 5 T00J com Android 5.0) rodando seu aplicativo padrão de gravação de áudio e geramos espectrogramas das gravações com o editor de áudio Audacity. Devido à compressão com perda de dados nos arquivos gerados pelo aplicativo eliminarem áudio na faixa quase ultrassônica empregada pelos protocolos inaudíveis de ggwave, registramos apenas transmissões com protocolo audível para análise com espectrograma. A Figura 9 ilustra a disposição utilizada para os dispositivos no ambiente durante realização dos testes de comunicação através de parede.

Os testes realizados demonstraram que obstáculos de alta espessura e suficientemente densos como paredes podem ser capazes de bloquear quase completamente a propagação de ondas sonoras. Dentre as instâncias do experimento realizadas, nenhuma delas apresentou recepção bem sucedida de mais do que duas das cinco mensagens transmitidas. As transmissões dos protocolos ultrassônicos, naturalmente mais susceptíveis a absorção pelo meio devido às altas frequências em que operam, foram completamente atenuadas pela parede, com nenhuma das tentativas de transmissão de mensagem (independentemente das configurações utilizadas) sendo bem sucedida.

A Figura 10 apresenta espectrogramas gerados a partir de uma instância da transmissão através de parede, apresentando exemplo de sinal isolado e do mesmo sinal após passagem pelo obstáculo. Essa comparação evidencia a atenuação quase completa dos marcadores de início/fim da transmissão, ne-

Figura 8: Taxa de sucesso na entrega de mensagens em relação à distância no cenário ruidoso e com obstruções

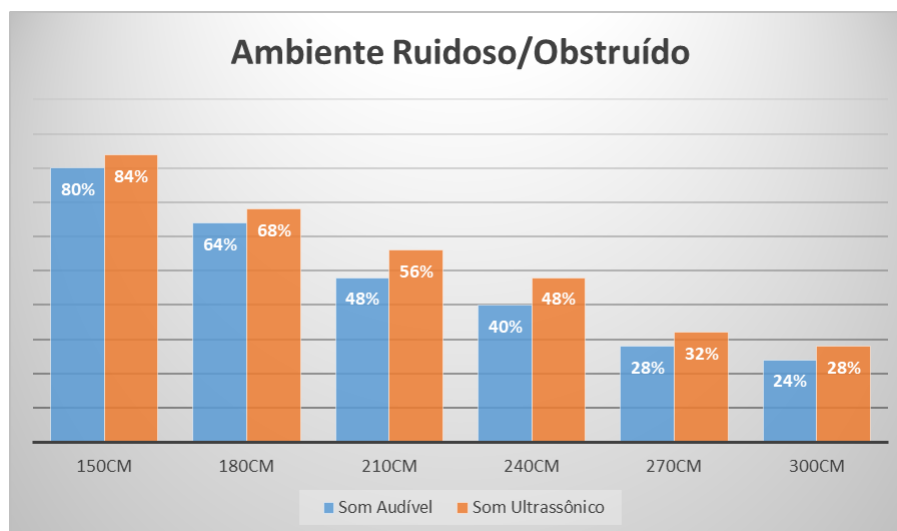
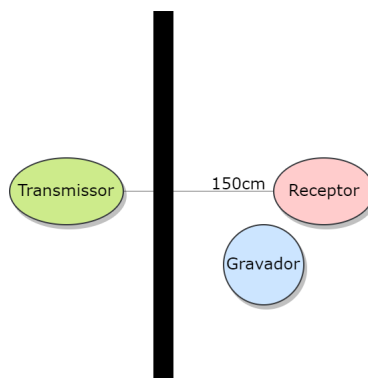


Figura 9: Representação da disposição de elementos utilizada no teste de comunicação simultânea



cessários para detecção pelo receptor de que o áudio sendo captado pelo seu microfone contem uma mensagem a ser decodificada.

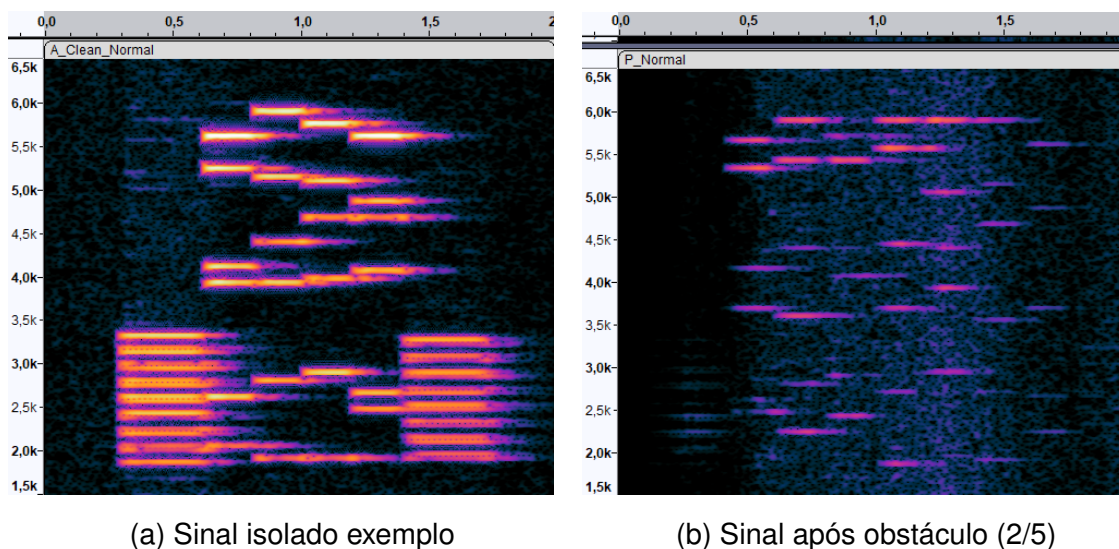
## 6. Transmissão de Mensagens por Proximidade

Esta seção apresenta um experimento para avaliação da possibilidade de uso do nosso protocolo de dados sobre som para transmissão de mensagens por proximidade entre múltiplos dispositivos. O experimento avaliou a possibilidade de comunicação além do alcance de transmissão convencional de cada estação por meio de retransmissões de mensagens alheias pelas estações.

Nós utilizamos três computadores como estações receptoras/transmissoras de mensagens, posicionados de modo que o alcance de



Figura 10: Espectrogramas do sinal captado durante transmissão através de parede



transmissão de cada um deles não cobre as demais máquinas confiavelmente. Assim, a retransmissão de mensagens entre estações se faz necessária para possibilitar disseminação de uma mensagem entre todos os computadores.

### 6.1. Cenário de Experimentação

O experimento foi baseado na versão 0.4.2 do ggwave através de seus bindings Python, em computadores com Python 3.10.4 e a biblioteca PyAudio 0.2.12<sup>4</sup>. Nós executamos um código (disponível no repositório GitHub associado a este artigo) nos três computadores para habilitar a recepção e transmissão/retransmissão de mensagens. Observamos se estações, posicionadas fora do alcance de transmissão de uma mensagem, receberam tal mensagem através de retransmissão por sua estação mais próxima.

Devido à incapacidade de reprodução de frequências na faixa quase ultrassônica dos alto-falantes internos dos computadores utilizados, testamos apenas transmissões audíveis de ggwave em seu protocolo padrão (`protocolId = 1`) no experimento. Uma faixa de frequências sonoras de 4,5 kHz é empregada para transmissões, tendo como frequência inicial 1875 Hz. A taxa de transferência de dados utilizada no protocolo é a configuração *Fast*, que corresponde a uma taxa de 16,76 B/s.

<sup>4</sup><https://pypi.org/project/PyAudio/0.2.12/>



Nós conduzimos o experimento no Laboratório de Sistemas Digitais da Universidade Federal de Catalão (Sala 16 do Bloco J). Os dispositivos utilizados consistem em computadores HP Elite 8200 SFF conectados a microfones de mesa por cabos P2 estéreo de 3,5 mm. Suas especificações técnicas são listadas na Figura 1, sob "Computador receptor" e "Microfone". As transmissões ocorreram com os próprios alto-falantes internos das estações.

Para os testes, nós ajustamos a sensibilidade dos microfones de mesa de acordo com os níveis de som captados por eles no cenário silencioso do ambiente de experimentação, de modo a mantê-los todos abaixo de aproximadamente -30 dB, confortavelmente distantes do nível máximo que eles são capazes de reproduzir. Com esse objetivo, aplicamos uma atenuação de -18,06 dB aos microfones, o que correspondeu à configuração de 50% do volume da entrada de áudio dos computadores conectados. Configuramos o volume de 100% para os alto-falantes internos dos computadores.

## 6.2. Implementação do Protocolo

O protocolo identifica as estações por meio de UUIDs (Universally Unique Identifiers) da versão 4, na qual identificadores são gerados aleatoriamente. As mensagens trocadas apresentam um campo contendo o identificador de sua estação de origem, um campo contendo sua numeração e um campo contendo seu conteúdo. Mensagens de ggwave têm um limite de 140 bytes de comprimento para o payload de cada transmissão, dos quais 32 bytes são consumidos pelo endereço de origem baseados em UUID, restando 108 bytes para o conteúdo das mensagens.

O protocolo serializa as mensagens a serem transmitidas pela camada física com Protocol Buffers [4], um formato multiplataforma e de código aberto para serializar dados estruturados. A definição Proto criada para as mensagens contém um campo de tipo `string` denominado `senderid` para inclusão do UUID da estação, um campo de tipo `int32` denominado `msgnum` para inclusão da numeração da mensagem e um campo de tipo `string` denominado `content` para inclusão do conteúdo da mensagem. A Figura 11 apresenta o arquivo `.proto` de definição que produzimos para nossas mensagens.

A implementação foi feita em Python. O código de transmissão/recepção especifica uma classe com um método para transmissão e outro, para recepção de mensagens. Quando o código é inicializado em uma estação, os métodos

Figura 11: Código contido em nosso arquivo .proto de definição

```
syntax = "proto2";

package soundcomm;

message Message {
    optional string senderid = 1;
    optional int32 msgnum = 2;
    optional string content = 3;
}
```

são executados alternadamente. A alternância entre modo de transmissão e de recepção ocorre por meio da criação de duas threads, as quais se comunicam entre si com o uso de `events` do módulo `threading` de modo a executarem alternadamente os métodos citados.

Ao serem inicializadas, todas as estações entram primeiramente em modo de recepção. As estações permanecem nesse modo por um intervalo aleatório entre 15 e 30 segundos e então alternam para o modo de transmissão. Os textos produzidos como conteúdo para cada mensagem transmitida pelas estações no experimento realizado consiste em uma string de 18 bytes contendo um número real com ponto flutuante gerado aleatoriamente com o método `random()` do módulo `random`. Após o envio de uma mensagem, a estação retorna para o modo de recepção, no qual permanece durante um novo intervalo aleatório entre 15 e 30 segundos antes de retornar ao modo de transmissão.

Mensagens recebidas durante a execução do laço responsável pelo modo de recepção são adicionadas a uma lista acessível também pelo modo de transmissão. Quando a thread para transmissão é reativada, essa lista é verificada e, caso exista alguma entrada presente, sua última mensagem é removida e retransmitida pela estação em substituição a uma mensagem própria. Com isso, a mensagem em questão pode potencialmente se propagar para estações além do alcance de transmissão de sua estação de origem.

### 6.3. Discussão

Durante o experimento, ao definir individualmente a execução do modo de recepção ou de transmissão em cada estação, foi possível observar o recebimento das mensagens de uma estação, retransmitidas por sua estação vizinha, pela estação posicionada além de seu alcance de transmissão. Entretanto,

quando inicializamos todas as estações sem controle individual dos momentos em que cada uma se encontra em modo de transmissão ou recepção, transmissões simultâneas entre estações se tornou constante, levando a erros de decodificação persistentes e impedindo observação da disseminação de mensagens entre estações distantes desejada.

O método rudimentar de intervalos aleatórios para definição dos momentos de recepção e de transmissão de mensagem pelas estações se mostrou inadequado, resultando em erros de decodificação frequentes causados pela interferência gerada por transmissões simultâneas. O experimento que realizamos demonstrou a necessidade de um método mais sofisticado para escolha do momento em que estações transmitem mensagens, que busque detectar quando outras transmissões estão ocorrendo para reduzir substancialmente a ocorrência de colisões.

## **7. Conclusão**

Os experimentos que realizamos com ggwave demonstraram, em situações com ausência de obstáculos físicos ou ruído ambiente significativo, sua capacidade para transmissões de mensagens com taxa de sucesso total entre dispositivos separados por menos de três metros. Além dessa distância nós recomendamos, com base nos resultados que obtivemos, consideração adicional para assegurar que os equipamentos de áudio empregados apresentam desempenho satisfatório em relação a faixa de frequências selecionada para comunicação.

Situações envolvendo ruído ambiente significativo resultaram em diminuição considerável de desempenho, levando a perdas de mensagens do protocolo audível excedendo 10% em distâncias superiores a dois metros. Uso do protocolo ultrassônico se mostrou efetivo para contornar a interferência do ambiente ruidoso que criamos, com resultados equivalentes aos medidos no cenário silencioso. Nós inferimos a partir desse resultado que, em situações de uso que envolvem ruído ambiente de característica similar, emprego do protocolo ultrassônico de ggwave pode solucionar problemas de interferência.

O cenário com obstruções físicas que criamos, envolvendo uma fileira de pilhas de caixas contendo monitores, se mostrou suficiente para redução drástica de desempenho, com perdas de 20% ou mais de mensagens em distâncias de pelo menos 180 cm. O protocolo ultrassônico apresentou desempenho consideravelmente inferior ao protocolo audível quando ruído ambiente não estava

também presente. Nós especulamos que tal diferença pode ser atribuída à influência da frequência de ondas sonoras em seu nível de atenuação por um material. Em situações com presença de obstáculos físicos densos e de dimensões substanciais, nós recomendamos distâncias entre dispositivos de até 150 cm para boa qualidade de comunicação.

Nosso experimento de transmissão de mensagens por proximidade com nosso protocolo objetivou verificar a viabilidade de disseminação de mensagens em um ambiente via retransmissões e identificar potenciais limitações de nosso código. O experimento avaliou a disseminação de mensagens entre estações, considerando que as duas estações mais distantes não conseguem transmitir diretamente uma para a outra, a partir de retransmissões de mensagens alheias pelas estações para possibilitar sua propagação pelo ambiente. O código que produzimos possibilitou a recepção de uma mensagem pelas estações fora do alcance de transmissão de sua estação de origem. Entretanto, não possuímos um método efetivo para reduzir a ocorrência de transmissões simultâneas entre as estações e a faixa de frequências disponível para comunicação acústica representa um obstáculo na criação de múltiplos canais de comunicação para mitigar tais problemas.

## Referências

- [1] D. Bubley. Data over sound technology: device-to-device communications & pairing without wireless radio networks. *Disruptive Analysis Ltd*, page 29, 2017.
- [2] V. Gerasimov and W. Bender. Things that talk: Using sound for device-to-device and device-to-human communication. *IBM Systems Journal*, 39(3.4):530–546, 2000.
- [3] G. Gerganov. ggwave. *ggwave Github Project*, 2022.
- [4] Google. Protocol buffers. *Google Developers Site*, 2022.
- [5] J. Liu, C. Chen, Y. Ma, and Y. Xu. Energy analysis of device discovery for bluetooth low energy. In *2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pages 1–5. IEEE, 2013.
- [6] K. Marneweck, J. Nesfield, A. Mehrabi, and D. Jones. Why data-over-sound is an integral part of any iot engineer’s toolbox: Chirp + arm = frictionless low power connectivity. Technical Report White Paper, ARM, 2019.
- [7] M. Periyasam and R. Dhanasekaran. Electromagnetic interference on critical medical equipments by rf devices. In *2013 International Conference on Communication and Signal Processing*, pages 78–82, 2013.
- [8] T. Pritz. Frequency power law of material damping. *Applied Acoustics*, 65(11):1027–1036, 2004.
- [9] Quiet. Quiet modem project. 2022.
- [10] Quiet-js. Quiet-js: javascript binding for libquiet. 2022.
- [11] F. Taurer. *UNITA-Ultrasonic Network for IoT Applications*. PhD thesis, St. Pölten University of Applied Sciences, 2020.
- [12] V. Weckbach. Astromech. *AstroMech Github Project*, 2022.
- [13] Wikibooks. Engineering acoustics/outdoor sound propagation — wikibooks, the free textbook project, 2020. [Online; accessed 14-July-2023].
- [14] M. Zeppelzauer and A. Ringot. Sonitalk: An open protocol for data-over-sound communication. Technical report, IETF Draft (inactive), 2019.