

# Relatório Final do Projeto em Engenharia de Computadores e Informática

Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal

Grupo 12

Universidade de Aveiro

David Pelicano

Henrique Ferreira

Martina Duque

Pedro Melo

Sofia Marrafa

Tomás Oliveira

Orientadores: Daniel Albuquerque e Guilherme Campos



# Relatório Final do Projeto em Engenharia de Computadores e Informática

Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal

Universidade de Aveiro

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>David Pelicano</b>    | (113391) davidpoetapelicano@ua.pt         |
| <b>Henrique Ferreira</b> | (113600) ferreira.manuel.henrique04@ua.pt |
| <b>Martina Duque</b>     | (113261) martina.duque18@ua.pt            |
| <b>Pedro Melo</b>        | (114208) pedro.m.melo@ua.pt               |
| <b>Sofia Marrafa</b>     | (114591) sofiamarrafa@ua.pt               |
| <b>Tomás Oliveira</b>    | (113939) tomas.esteves.oliveira@ua.pt     |

8 de junho de 2025

# Conteúdo

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1      | Contexto . . . . .   | 4         |
| 1.2      | Motivação . . . . .  | 5         |
| 1.3      | Objetivos . . . . .  | 6         |
| 1.4      | Organização do Documento . . . . .                           | 8         |
| <b>2</b> | <b>Metodologia</b>   | <b>10</b> |
| 2.1      | Etapas de Desenvolvimento . . . . .                          | 10        |
| <b>3</b> | <b>Cenário, Levantamento de requisitos e Arquitetura</b>     | <b>11</b> |
| 3.1      | Cenário . . . . .  | 11        |
| 3.1.1    | Cenário Principal: Hotel (Comunicação via Wi-Fi) . . . . .   | 11        |
| 3.2      | Levantamento de Requisitos e Arquitetura . . . . .           | 13        |
| 3.2.1    | Requisitos Funcionais . . . . .                              | 13        |
| 3.2.2    | Requisitos Não Funcionais . . . . .                          | 14        |
| 3.2.3    | Arquitetura do Sistema . . . . .                             | 14        |
| <b>4</b> | <b>Trabalhos Relacionados, Ferramentas e Tecnologias</b>     | <b>18</b> |
| 4.1      | Trabalhos Relacionados . . . . .                             | 18        |
| 4.2      | Descrição do sistema proposto pela Sonos . . . . .           | 20        |
| 4.2.1    | Modelos e Características Específicas . . . . .              | 20        |
| 4.2.2    | Vantagens da Tecnologia Sonos . . . . .                      | 20        |
| 4.2.3    | Desafios e Limitações da Tecnologia Sonos . . . . .          | 21        |
| 4.2.4    | Conclusão e Lições aprendidas . . . . .                      | 21        |
| 4.3      | Ferramentas e Tecnologias . . . . .                          | 22        |
| 4.3.1    | Comunicação via Wi-Fi . . . . .                              | 22        |
| 4.3.2    | Protocolos de Transmissão de Dados . . . . .                 | 24        |
| 4.3.3    | Componentes . . . . .  | 24        |
| 4.3.4    | Tecnologias Utilizadas na Implementação . . . . .            | 25        |
| 4.4      | Parâmetros de Áudio e Codec . . . . .                        | 26        |
| 4.4.1    | Codec de Áudio: <i>Opus</i> . . . . .                        | 26        |
| 4.4.2    | Taxa de Amostragem (Sample Rate) . . . . .                   | 27        |
| 4.4.3    | Taxa de Bits (Bitrate) . . . . .                             | 27        |
| 4.4.4    | Canais de Áudio (Audio Channels) . . . . .                   | 27        |
| 4.4.5    | Protocolos de Streaming de Áudio . . . . .                   | 27        |
| 4.4.6    | Considerações Finais sobre as Tecnologias Adotadas . . . . . | 28        |
| <b>5</b> | <b>Implementação</b>   | <b>29</b> |
| 5.1      | Transmissor: Nó Central . . . . .                            | 29        |
| 5.2      | Recetor: Nós Recetores . . . . .                             | 30        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.3      | Fluxo de Funcionamento: Nó Central - Nó Recetor . . . . .                                       | 31        |
| 5.3.1    | Deteção e Conexão de Recetores . . . . .  | 31        |
| 5.3.2    | Envio de Atualizações e Configurações . . . . .   | 32        |
| 5.3.3    | Envio de Áudio (Distribuição Multicast) . . . . .   | 33        |
| 5.4      | Interface Gráfica de Controlo . . . . .   | 34        |
| 5.5      | Autenticação e Segurança . . . . .  | 38        |
| <b>6</b> | <b>Testes e Resultados</b>  | <b>40</b> |
| 6.1      | Ambiente de Testes . . . . .  | 40        |
| 6.2      | Testes Realizados . . . . .   | 40        |
| <b>7</b> | <b>Desafios Encontrados</b>   | <b>44</b> |
| 7.1      | Restrições da Rede Eduroam e Necessidade de Infraestrutura Dedicada . . . . .                   | 44        |
| 7.2      | Limitações da Transmissão UDP Multicast Básica e Adoção de Ferramentas Especializadas . . . . . | 44        |
| 7.3      | Desempenho do Router com Tráfego Multicast e Otimização da Taxa de Transmissão Wi-Fi . . . . .  | 44        |
| <b>8</b> | <b>Conclusão</b>  | <b>46</b> |
| 8.1      | Considerações Finais . . . . .  | 46        |
| 8.2      | Trabalho Futuro . . . . .   | 47        |
| 8.2.1    | Otimização com Hardware Dedicado para os Nós Recetores . . . . .                                | 47        |
| 8.2.2    | Implementação de Funcionalidades Avançadas de Processamento de Áudio .                          | 47        |
| 8.2.3    | Exploração de Redes Mesh (Malha) para Maior Cobertura e Resiliência . .                         | 47        |
| 8.2.4    | Integração de um Sistema de Agendamento de Conteúdo . . . . .                                   | 48        |

## Resumo

Este projeto centra-se no desenvolvimento de um sistema de difusão de áudio digital multi-canal sem fios, concebido para proporcionar uma maior versatilidade e fidelidade sonora em diferentes ambientes.

Através da utilização de tecnologias wireless, o sistema é composto por uma unidade de controlo central, responsável por gerir a distribuição eficiente de múltiplos canais de áudio para diversas colunas ativas equipadas com recetores integrados.

Esta arquitetura permitiu a criação de uma rede de áudio sincronizada, por forma a garantir uma reprodução com qualidade e a possibilidade de uma gestão remota, com personalização em tempo real das saídas de áudio. Assim, cada zona pode ser configurada de forma independente, adaptando-se às necessidades específicas do espaço.

O desenvolvimento deste projeto foi realizado em várias etapas, iniciando-se com a análise e integração de tecnologias existentes de transmissão e receção de áudio. Seguiu-se o design e a implementação do hardware e software necessários para a unidade de controlo e os recetores, assegurando a compatibilidade e eficiência do sistema. Por fim, foi conduzida uma fase de testes em diferentes cenários, com o objetivo de validar o desempenho e garantir a fiabilidade da solução final.

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto

O áudio assume, atualmente, um papel essencial na vida quotidiana, estando presente em múltiplas esferas da atividade humana — desde ambientes domésticos e automóveis até espaços comerciais e institucionais.

A evolução das tecnologias de transmissão sonora, como o Bluetooth, Wi-Fi e protocolos dedicados ao streaming de áudio, tornou o acesso a conteúdos sonoros mais prático e personalizável. No entanto, grande parte das soluções disponíveis centra-se no controlo do áudio pelo utilizador final, o que limita a possibilidade de uma gestão centralizada e, consequentemente, dificulta a coordenação eficiente em espaços partilhados. Neste contexto, o presente projeto, intitulado “Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal”, insere-se na área da Engenharia de Computadores e Informática, com foco no desenvolvimento de sistemas distribuídos para difusão sonora.

Assim sendo, este projeto propõe uma abordagem inovadora para a difusão de áudio digital sem fios, centrada na distribuição inteligente e centralizada de conteúdos sonoros. O principal objetivo consiste no desenvolvimento de um sistema capaz de transmitir áudio para múltiplos recetores, permitindo o ajuste dinâmico dos canais de reprodução e garantindo, assim, uma experiência auditiva consistente e adaptável às necessidades específicas de cada ambiente.

Posto isto, a proposta deste projeto visa oferecer um sistema versátil o que o torna adequado para diversos cenários, desde pequenos estabelecimentos comerciais e escritórios até infraestruturas de grande escala, como centros comerciais, hotéis, aeroportos e espaços de eventos. A implementação de um modelo centralizado não só otimiza a gestão dos conteúdos transmitidos mas também facilita a configuração e adaptação a diferentes requisitos acústicos.

O sistema proposto baseia-se em uma unidade de controlo central, responsável pela gestão e distribuição de múltiplos canais de áudio em diferentes zonas, que se adapta dinamicamente ao ambiente e à finalidade de cada espaço. Esta abordagem permite a criação de uma rede de áudio, onde os recetores, integrados nas colunas, garantem uma reprodução personalizada para cada área de transmissão, conforme ilustrado na Figura 1.

A coordenação remota do áudio através do sistema central de difusão possibilita uma experiência auditiva ajustável às necessidades específicas de cada espaço, garantindo uma instalação mais simples graças à utilização de tecnologias sem fios. A eliminação de cablagem extensa não só reduz custos e complexidade logística, como também aumenta a flexibilidade na disposição e configuração do sistema.

O desenvolvimento deste projeto foi estruturado em várias fases, começando pela seleção das tecnologias mais adequadas para a transmissão e receção de áudio, tendo em conta os espaços para os quais as transmissões seriam realizadas. Seguiu-se o desenvolvimento do hardware e firmware necessários, e, posteriormente, a realização de testes com o objetivo de avaliar fatores como a qualidade do som e a latência do sistema em diferentes cenários de utilização. O objetivo final

foi criar uma solução fiável e de fácil implementação, capaz de responder às exigências de espaços com diferentes dimensões e finalidades — desde pequenos estabelecimentos comerciais até grandes infraestruturas, como centros comerciais, hotéis e espaços de conferência.

Este projeto foi conduzido sob a orientação dos Professores Daniel Albuquerque e António Guilherme Campos, do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, em colaboração com o Instituto de Telecomunicações, o que proporcionou acesso a conhecimentos especializados e recursos técnicos essenciais à sua concretização. O presente relatório documenta todo o processo de desenvolvimento do sistema de difusão de áudio, explorando de forma detalhada as etapas de pesquisa, conceção, implementação, dificuldades encontradas e validação da solução proposta.

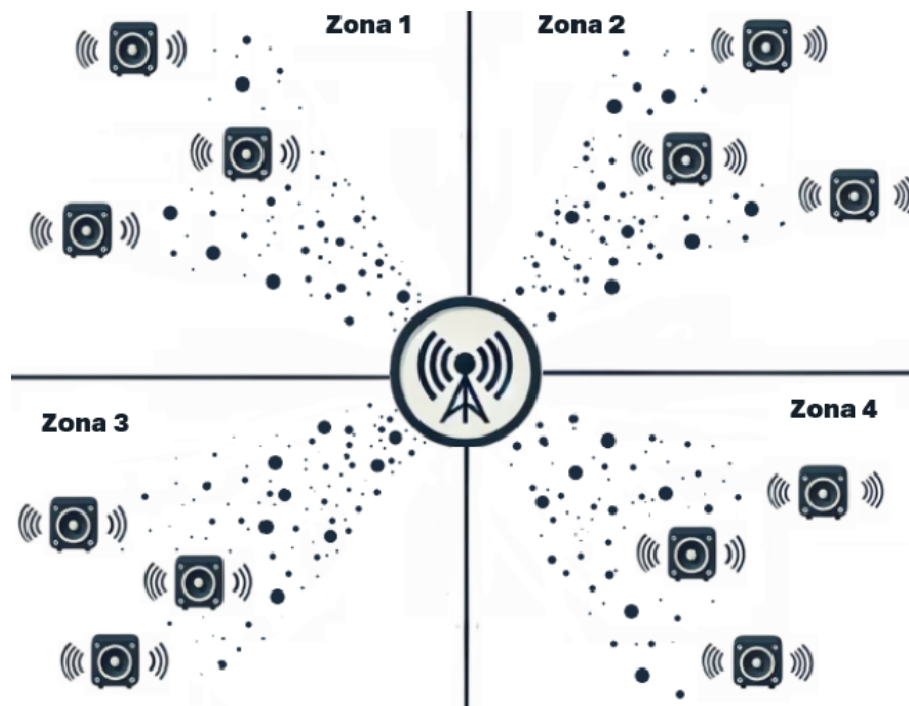


Figura 1: Sistema de difusão de áudio digital multi-zona sem fios.

## 1.2 Motivação

Atualmente, a maioria dos sistemas comerciais de distribuição de áudio em larga escala baseia-se em infraestruturas cabladas que, apesar da sua fiabilidade, apresentam limitações significativas em termos de flexibilidade, escalabilidade e custos de instalação. Estas soluções, embora robustas, implicam frequentemente instalações complexas e dispendiosas, com pouca margem para reconfigurações ágeis ou expansão modular do espaço sonoro.

Por contraste, as soluções sem fios tendem a ser mais comuns em contextos residenciais ou comerciais de pequena escala. Em ambientes profissionais de maior dimensão, continuam a ser raras e, quando existentes, são muitas vezes restritas a aplicações específicas, como a difusão de música ambiente doméstica ou transmissões de radiodifusão. Esta fragmentação tecnológica revela

uma lacuna no mercado: a inexistência de uma solução de código aberto, acessível, e com qualidade profissional, que permita a distribuição de áudio sem fios multicanal adaptável a diferentes escalas e contextos de utilização.

O projeto proposto surge precisamente para colmatar essa lacuna, oferecendo uma solução digital e sem fios que combina versatilidade, personalização e facilidade de gestão. A arquitetura do sistema — composta por uma unidade de controlo central e recetores distribuídos — permite uma implementação escalável e adaptável, como ilustrado na Figura 1, suportando desde pequenos espaços comerciais até infraestruturas mais complexas como hotéis, centros empresariais ou grandes superfícies comerciais.

O sistema possibilita a configuração dinâmica dos canais de áudio em tempo real, ajustando a distribuição sonora consoante as necessidades específicas de cada zona. Para além da elevada qualidade sonora e capacidade de adaptação, destaca-se ainda pela simplicidade de instalação e custo reduzido, eliminando a necessidade de infraestruturas físicas complexas e minimizando os encargos operacionais e de manutenção. Com um modelo de controlo centralizado e uma gestão remota intuitiva, esta solução posiciona-se como uma alternativa inovadora e eficiente face aos sistemas tradicionais, aplicável tanto em contextos públicos como privados.

### 1.3 Objetivos

Este projeto visa desenvolver uma solução inovadora que atenda às necessidades crescentes de distribuição de áudio em ambientes diversos, por forma a superar as limitações dos sistemas tradicionais. Foram estabelecidos objetivos específicos que abrangem desde o desenvolvimento do hardware até à implementação do software necessário, priorizando a qualidade sonora, a flexibilidade de configuração e a facilidade de gestão. Estes objetivos foram definidos considerando as exigências técnicas da transmissão de áudio digital e as necessidades práticas de utilizadores em diferentes contextos, como estabelecimentos comerciais, hotéis e espaços corporativos. A seguir, são apresentados os principais objetivos técnicos e funcionais do sistema:

#### 1. Desenhar a Unidade de Controlo Central:

Este projeto envolve o desenvolvimento de uma unidade central capaz de distribuir diversas entradas de áudio, incluindo microfone, ficheiros de áudio locais e streams de áudio online, para canais e zonas específicas. Para garantir maior qualidade de som, a unidade conta com funcionalidades de processamento de áudio, incluindo compressão. Além disso, foi desenvolvida uma interface de utilizador intuitiva, projetada para facilitar a gestão e configuração do sistema, permitindo que os utilizadores ajustem e controlem facilmente o áudio de acordo com as necessidades específicas dos espaços.

#### 2. Adicionar Capacidades Sem Fios:

Com vista a estabelecer a comunicação sem fios, a unidade de controlo central é integrada com um sistema de difusão sem fios (baseado em Wi-Fi), estabelecendo uma comunicação



direta e eficiente. É essencial garantir a fiabilidade e a qualidade da transmissão digital, o que é alcançado através de técnicas como buffering e o uso de codecs de áudio. Além disso, o sistema permite uma distribuição de áudio adequada à zona onde se encontra a ser reproduzido e sincronizada em todas as saídas de áudio dentro da mesma zona, possibilitando uma experiência auditiva consistente e de qualidade.

### **3. Desenhar o Recetor:**

O projeto inclui um dispositivo que atua como intermediário entre a unidade de controlo central e as colunas. Esse dispositivo é o responsável por receber sinais de áudio transmitidos e converter esses sinais em sinal elétrico apropriado para ser emitido pela coluna de som.

### **4. Desenvolver o Protocolo de Comunicação:**

O desenvolvimento de um protocolo de comunicação dedicado é essencial para garantir a transmissão eficiente de áudio entre a unidade central e os recetores. Este protocolo foi baseado em técnicas de comunicação sem fios otimizadas para áudio digital, assegurando baixa latência e elevada qualidade sonora, mesmo em redes Wi-Fi partilhadas.

O sistema incluiu uma estrutura que permite a distribuição simultânea de múltiplos fluxos de áudio para diferentes recetores, maximizando a utilização da largura de banda da rede. Cada recetor foi projetado para ser capaz de identificar e processar apenas o canal que lhe é atribuído, possibilitando uma configuração personalizada de acordo com as necessidades específicas de cada zona.

Adicionalmente, foi implementado um canal de controlo separado para permitir a configuração remota dos recetores, possibilitando ajustes como o controlo de volume, seleção de canais e outras funções administrativas. Esta abordagem garante uma operação coordenada e centralizada de todo o sistema, facilitando a gestão e manutenção da infraestrutura.

Adicionalmente, foi concebido um protocolo para a deteção de nós, que permitirá à unidade central identificar e registar automaticamente novos recetores assim que estes se conectem à rede. Este mecanismo simplificará a integração de novos dispositivos no sistema, assegurando uma gestão centralizada e eficiente de todos os componentes da infraestrutura de áudio.

## 1.4 Organização do Documento

Neste relatório, organizámos a informação de modo a apresentar claramente o projeto 'Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal'. A nossa abordagem cobre todas as etapas: desde a conceção inicial, passando pelos pormenores da implementação e dos testes, até à apresentação dos resultados. Para facilitar a consulta, o documento está estruturado da seguinte forma:

- **Introdução:** Fornece uma visão geral do projeto, incluindo o contexto em que se insere (Secção 1.1), a motivação para o seu desenvolvimento (Secção 1.2), os objetivos específicos que se pretendeu alcançar (Secção 1.3) e esta presente organização do documento (Secção 1.4).
- **Metodologia:** Detalha a abordagem e as etapas seguidas no desenvolvimento do projeto (Secção 2.1).
- **Trabalhos Relacionados, Ferramentas e Tecnologias:** Explora soluções e sistemas comerciais existentes no âmbito da difusão de áudio (Secção 4.1 e Secção 4.2). Descreve as principais ferramentas, protocolos e tecnologias de software e hardware escolhidas para a implementação do sistema (Secção 4.3), as tecnologias específicas utilizadas na implementação (Secção 4.3.4), justificando as escolhas em termos de parâmetros de áudio, codecs (Secção 4.4), protocolos de streaming (Secção 4.4.5) e uma conclusão sobre as escolhas tecnológicas (Secção 4.4.6).
- **Cenário, Levantamento de Requisitos e Arquitetura:** Apresenta um cenário de aplicação principal (Hotel) e outros cenários possíveis (Secção 3.1). Detalha os requisitos funcionais (Secção 3.2.1) e não funcionais (Secção 3.2.2) que nortearam o desenvolvimento do sistema e descreve a arquitetura global do sistema (Secção 3.2.3), incluindo o Nó Central, os Nós Recetores e as suas interações.
- **Implementação:** Descreve em pormenor o desenvolvimento técnico dos componentes centrais do sistema. Detalha a implementação do Transmissor (Nó Central) (Secção 5.1), dos Nós Recetores (Secção 5.2), o fluxo de funcionamento entre eles (Secção 5.3) e a interface gráfica de controlo (Secção 5.4).
- **Testes e Resultados:** Apresenta o ambiente onde os testes foram conduzidos (Secção 6.1) e descreve os diferentes testes realizados para validar o funcionamento, a robustez e o desempenho do sistema (Secção 6.2).
- **Desafios Encontrados:** Descreve os principais obstáculos técnicos e de infraestrutura enfrentados, como as restrições da rede Eduroam (Secção 7.1), limitações da transmissão UDP Multicast básica (Secção 7.2) e questões de desempenho do router com tráfego multicast (Secção 7.3), e as soluções adotadas.
- **Trabalho Futuro:** Sugere possíveis melhorias e expansões futuras para o sistema, como otimização com hardware dedicado para os Nós Recetores (Secção 8.2.1), implementação de funcionalidades avançadas de processamento de áudio (Secção 8.2.2), exploração de redes Mesh (Secção 8.2.3) e integração de um sistema de agendamento de conteúdo (Secção 8.2.4).

- **Conclusão:** Sumariza as principais contribuições do projeto, o grau de cumprimento dos objetivos iniciais e o potencial impacto da solução desenvolvida. (Ver Secção 8)
- **Webgrafia:** Lista todas as fontes e referências externas consultadas durante a investigação e desenvolvimento do projeto. (Ver Secção 8.2.4)

## 2 Metodologia

A metodologia adotada neste projeto foi concebida para orientar o desenvolvimento de maneira organizada e prática. Optámos por dividir o trabalho em fases distintas, desde a análise pormenorizada dos requisitos até à validação completa do sistema. Esta abordagem progressiva possibilitou o teste e o aperfeiçoamento de cada componente ao longo do seu desenvolvimento, visando garantir uma solução final que correspondesse às necessidades reais e funcionasse de modo eficiente.

### 2.1 Etapas de Desenvolvimento

O projeto seguiu a seguinte estrutura metodológica:

- **Levantamento de Requisitos:** Identificação e definição das necessidades funcionais e técnicas do sistema, incluindo o número esperado de recetores, a qualidade de áudio desejada, o suporte a múltiplas fontes de áudio (local, streaming e microfone), a organização por zonas, e os requisitos da interface de controlo.
- **Pesquisa Tecnológica:** Avaliação de alternativas de comunicação (Ethernet, Wi-Fi, PLC, RF) e protocolos de transmissão de áudio (RTP, UDP, RTSP etc.). Análise de codecs de áudio (Opus selecionado pela eficiência e baixa latência).
- **Definição da Arquitetura:** Escolha de uma arquitetura centralizada (Nó Central/Servidor em Python/Flask) baseada em Raspberry Pi (ou PC equivalente), onde um nó central transmite áudio via Wi-Fi para múltiplos recetores (Nós Clientes em Python) distribuídos por diferentes zonas, utilizando comunicação multicast para os fluxos de áudio e broadcast/unicast UDP para controlo.
- **Implementação do Protótipo:** Desenvolvimento da aplicação em Python, com uso de bibliotecas específicas para gestão de rede, interface web, interação com base de dados, e controlo de processos externos.
- **Testes em Ambiente Controlado:** Realização de testes em diferentes ambientes (inicialmente em ambiente controlado, rede local) para avaliar a latência, qualidade do áudio, robustez do sistema e testes funcionais das diversas características: adição de músicas, criação de playlists, streaming do YouTube, interrupções por microfone, controlo de zonas e volumes.
- **Validação e Otimização:** Ajustes nos parâmetros de codificação, buffer e configuração de rede para otimizar o desempenho do sistema.

## 3 Cenário, Levantamento de requisitos e Arquitetura

### 3.1 Cenário

#### 3.1.1 Cenário Principal: Hotel (Comunicação via Wi-Fi)

Clara, gerente de um hotel, está a organizar o ambiente de áudio para diferentes zonas do hotel durante uma tarde movimentada. O sistema de difusão de áudio permite uma gestão eficiente e centralizada, por forma a garantir que cada área do hotel tenha um ambiente sonoro adequado às suas necessidades específicas.

No hotel, existem diferentes tipos de zonas com requisitos sonoros distintos:

- **Receção e Lobby:** Música ambiente suave e relaxante para proporcionar uma experiência acolhedora aos hóspedes que estão a chegar ou que aguardam atendimento.
- **Restaurante:** Fundo musical discreto para criar uma atmosfera confortável sem interferir na comunicação entre os clientes.
- **Salas de Conferências e Eventos:** Transmissões de áudio direcionadas, garantindo que palestras e apresentações sejam ouvidas com clareza.
- **Área da Piscina e Jardim:** Playlist animada e leve, adaptada à dinâmica do espaço.

Todas as zonas são conectadas ao sistema de transmissão digital por meio de uma rede Wi-Fi dedicada, garantindo qualidade de áudio sem interrupções.

Clara interage com o sistema através de uma interface web a partir do seu PC.

O painel de controlo permite-lhe ajustar, em tempo real, o volume em cada zona e alternar entre diferentes playlists conforme necessário. Por exemplo, ao notar um aumento de movimento na piscina, ela pode rapidamente alterar para uma playlist mais vibrante e apropriada para o espaço, garantindo que a experiência dos hóspedes seja sempre personalizada e ajustada ao ambiente.

Com a solução de Wi-Fi, Clara garante a flexibilidade e o controlo total sobre a transmissão de áudio, assegurando que cada área do hotel recebe o som adequado sem comprometer a experiência dos hóspedes.

## Outros Cenários de Aplicação

Embora este sistema é particularmente vantajoso para o setor hoteleiro, a sua aplicação pode ser estendida a outros cenários, como:

- **Centros Comerciais:** Em grandes superfícies comerciais, o sistema permite uma gestão flexível e segmentada do som, adaptando o conteúdo áudio às características de cada espaço. Cada loja pode dispor de um canal de áudio independente, adequado à sua identidade e público-alvo. Áreas comuns, como zonas de restauração, cinemas ou espaços infantis, podem receber conteúdos diferenciados — desde música ambiente relaxante até mensagens promocionais ou conteúdos específicos para crianças. Esta capacidade de personalização contribui para uma experiência mais agradável e envolvente para os visitantes.
- **Universidades e Instituições de Ensino:** Em ambientes educacionais, salas de aula podem receber áudios diferenciados conforme as necessidades dos professores, incluindo transmissões de aulas remotas ou mensagens institucionais.
- **Escritórios e Espaços Corporativos:** Empresas podem usar este sistema para criar um ambiente produtivo, gerindo a distribuição de música ambiente em escritórios abertos ou fornecendo mensagens direcionadas para diferentes departamentos.

## 3.2 Levantamento de Requisitos e Arquitetura

Esta secção apresenta a identificação dos requisitos do sistema de difusão de áudio digital multicanal, tanto funcionais como não funcionais, que serviram de base para o seu desenvolvimento. De seguida, é descrita a arquitetura geral da solução, com destaque para os principais componentes, as suas responsabilidades e as interações entre eles. A definição clara destes elementos foi fundamental para garantir a escalabilidade, flexibilidade e fiabilidade do sistema

### 3.2.1 Requisitos Funcionais

O sistema de difusão de áudio digital multi-canal deve cumprir os seguintes requisitos funcionais:

- **RF01:** O sistema deve permitir a criação e gestão de múltiplos canais de áudio.
- **RF02:** Cada canal deve poder ser associado a uma fonte de áudio: ficheiro local, playlist de ficheiros locais, stream de áudio da Internet (YouTube), ou entrada de microfone.
- **RF03:** O sistema deve permitir a criação e gestão de múltiplas áreas (zonas).
- **RF04:** Cada área deve poder ser associada a um canal de áudio específico.
- **RF05:** O sistema deve permitir o controlo de volume individual para cada área.
- **RF06:** O sistema deve permitir a descoberta e registo de nós recetores na rede.
- **RF07:** Os nós recetores devem reproduzir o áudio do canal associado à sua área.
- **RF08:** O sistema deve permitir a transmissão de interrupções de áudio (voz de microfone) para áreas ou canais específicos, sobrepondo-se ao áudio normal.
- **RF09:** O sistema deve possuir uma interface web para administração e controlo.
- **RF10:** A interface web deve permitir:
  - Gestão (CRUD) de canais, áreas, nós.
  - Upload e gestão de músicas e playlists.
  - Adição e gestão de streams.
- **RF11:** O sistema deve suportar a reprodução de ficheiros de audio.
- **RF12:** O sistema deve utilizar um codec para a transmissão de áudio.
- **RF13:** A comunicação de controlo entre servidor e nós deve ser feita via UDP.

### 3.2.2 Requisitos Não Funcionais

O sistema de difusão de áudio digital multi-canal deve atender aos seguintes requisitos não funcionais:

- **RNF01:** Qualidade de Áudio: O sistema deve fornecer boa qualidade de áudio, com clareza e sem ruídos ou distorções significativas.
- **RNF02:** Baixa Latência: A latência entre a fonte de áudio e a reprodução nos nós deve ser minimizada para evitar atrasos perceptíveis, especialmente para interrupções de voz.
- **RNF03:** Sincronização: O áudio reproduzido por diferentes nós na mesma área ou em áreas adjacentes (se partilhando o mesmo stream) deve ser razoavelmente sincronizado.
- **RNF04:** Usabilidade: A interface web deve ser intuitiva e fácil de usar.
- **RNF05:** Escalabilidade: O sistema deve ser capaz de suportar um número razoável de áreas e nós (ex: dezenas).
- **RNF06:** Fiabilidade: O sistema deve ser estável e recuperar de falhas menores (ex: reconexão de nós).
- **RNF07:** Segurança: Acesso à interface de administração deve ser protegido por autenticação.
- **RNF08:** Custo-Efetividade: A solução deve ser implementável com hardware e software de baixo custo ou open-source.

### 3.2.3 Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema é baseada num modelo cliente-servidor, onde o Nó Central atua como servidor e os Nós Recetores como clientes. A comunicação é predominantemente via Wi-Fi, permitindo flexibilidade na instalação e posicionamento dos componentes.

A Figura 2 apresenta um diagrama de alto nível da Arquitetura do Sistema. Esta imagem ilustra os principais componentes e as suas interligações, incluindo o Nó Central, o PC do Cliente (que acede à interface web), os Microfones como dispositivos de entrada, e a representação de uma Zona contendo Unidades de Reprodução (Colunas) conectadas através de um Router. Esta figura oferece uma visão geral de como as diferentes partes do sistema se relacionam para fornecer a funcionalidade de sonorização.

A Figura 3 foca-se especificamente no Nó Central, oferecendo uma representação mais detalhada da sua arquitetura interna. Destacam-se componentes chave como o Gestor (responsável pela lógica de controlo), a Base de Dados (para armazenamento de configurações), os módulos de processamento para diferentes tipos de áudio (Áudio Microfone, Áudio Local, Áudio Streaming), o Servidor Web (que fornece a interface ao PC do Cliente), e o componente de Difusão (responsável por enviar os fluxos de áudio para o Router e, conseqüentemente, para as Zonas). Esta figura detalha como o Nó Central orchestra as diversas funcionalidades do sistema.



- **Nó Central (Servidor):** Funciona como o cérebro do sistema, sendo o núcleo de controlo e processamento responsável por gerir todas as fontes de áudio, configurações e distribuição dos fluxos sonoros. Este componente lida com diversas fontes de áudio, incluindo microfones para entrada de áudio ao vivo (anúncios e interrupções), ficheiros locais armazenados numa biblioteca interna (músicas, jingles) que permitem a criação de playlists, e streams online que se integram com serviços de streaming externos. O processamento de áudio prepara os sinais das diferentes fontes para transmissão. A orquestração e distribuição controla qual conteúdo é enviado para cada zona. Todas as configurações do sistema são armazenadas numa base de dados central, incluindo definição de zonas, dispositivos associados, playlists, fontes de áudio e permissões. Uma interface web acessível remotamente permite aos administradores configurar e controlar o sistema.
- **Nós de Reprodução (Recetores):** São os dispositivos distribuídos fisicamente pelas diferentes zonas, funcionando como pontos de saída de áudio responsáveis por receber e reproduzir o áudio transmitido pelo Nó Central. Estes nós ligam-se à rede local via Wi-Fi e comunicam com o Nó Central para receber instruções e fluxos de áudio. Possuem capacidade de descoberta, podendo anunciar a sua presença na rede para que o Nó Central os reconheça e os possa gerir automaticamente. Atuam com base em comandos recebidos do servidor, como seleção do canal de áudio a reproduzir, ajuste de volume ou resposta a interrupções prioritárias.
- **Dispositivo do Administrador (Interface do Utilizador):** Representa qualquer dispositivo com navegador web utilizado para aceder à interface de gestão fornecida pelo Nó Central. Esta interface permite aos administradores definir zonas, associar nós de reprodução, gerir canais e fontes de áudio e monitorizar o estado do sistema em tempo real. A interface web responsiva facilita o controlo completo do sistema a partir de qualquer localização dentro da rede.
- **Infraestrutura de Rede:** O router e a rede Wi-Fi/Ethernet funcionam como meio de comunicação que facilita toda a interação entre o Nó Central, os Nós de Reprodução e os PCs Clientes. Esta infraestrutura é fundamental para o transporte eficiente dos fluxos de áudio e dos comandos de controlo, garantindo a sincronização de todo o sistema. A configuração adequada da rede é essencial para o desempenho ideal do sistema, especialmente quando se trata de garantir qualidade de serviço para transmissões de áudio em tempo real.

### Interações e Fluxos Principais

- **Configuração Inicial:** O administrador utiliza a interface web no PC Cliente para definir zonas, registar Nós de Reprodução, e associar cada zona a um canal de áudio específico (que pode ser alimentado por ficheiros locais, streaming ou microfone).
- **Distribuição de Áudio:** O Nó Central processa a fonte de áudio selecionada para um canal e transmite-a via multicast. Os Nós de Reprodução configurados para essa zona/canal sintonizam o stream multicast e reproduzem o áudio.

- **Controlo Dinâmico:** O administrador pode alterar dinamicamente o conteúdo a ser reproduzido em cada zona, ajustar volumes, ou iniciar/parar transmissões através da interface web. Estas ordens são comunicadas pelo Nó Central aos Nós de Reprodução relevantes.
- **Sistema de Interrupções:** Quando uma interrupção (ex: anúncio por microfone) é ativada, o Nó Central pode sobrepor-se ao áudio normal nas zonas designadas, transmitindo o áudio da interrupção prioritariamente. Após a interrupção, o áudio programado anteriormente é retomado.
- **Descoberta de Dispositivos:** Os Nós de Reprodução, ao ligarem-se à rede, podem ser detetados pelo Nó Central, facilitando a sua adição e configuração no sistema.

Esta arquitetura modular permite que o sistema seja facilmente escalável, adicionando novas zonas e nós recetores conforme necessário, sem comprometer o desempenho ou exigir reconfigurações complexas.

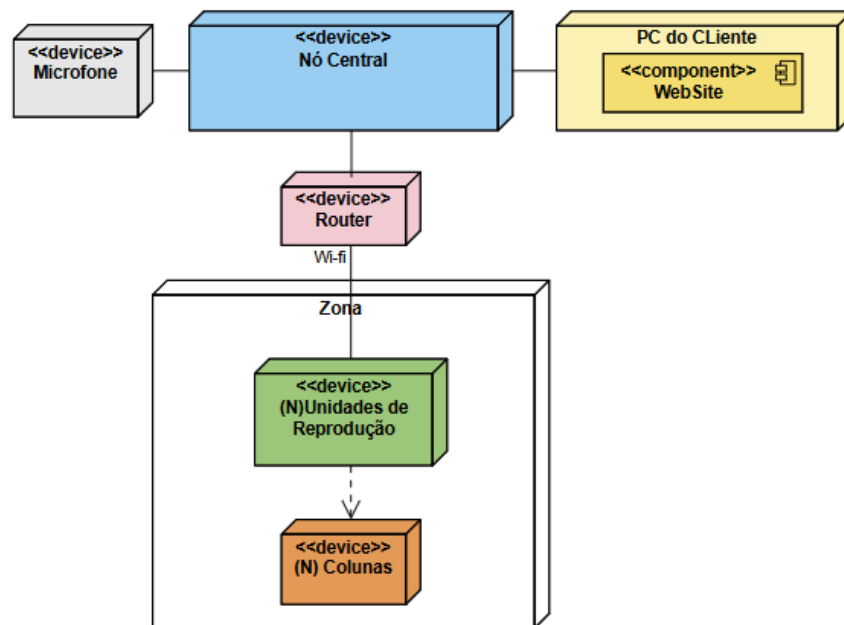


Figura 2: Diagrama de Arquitetura do Sistema.

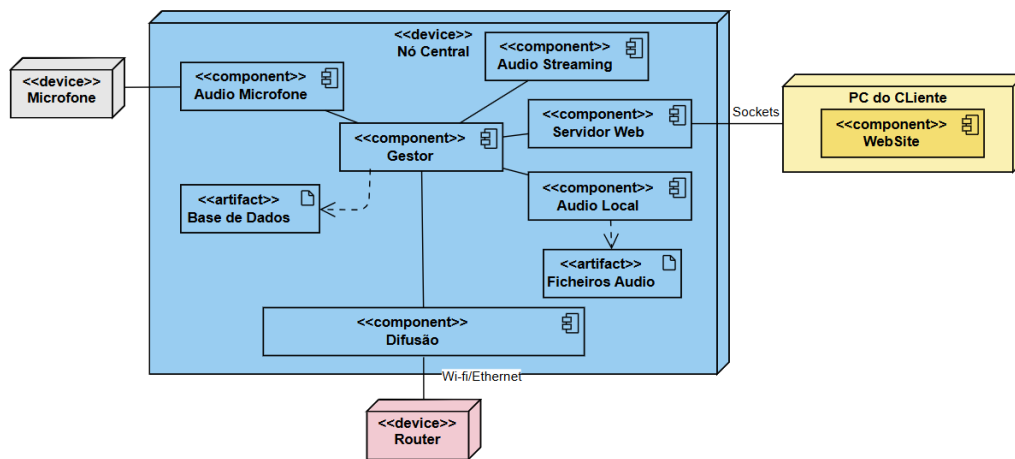


Figura 3: Nó Central.

## 4 Trabalhos Relacionados, Ferramentas e Tecnologias

### 4.1 Trabalhos Relacionados

A evolução dos sistemas de difusão de áudio tem sido impulsionada por avanços tecnológicos que visam melhorar a qualidade sonora, a flexibilidade de instalação e a eficiência da transmissão.

Desde os primeiros sistemas analógicos até as atuais soluções digitais e inteligentes, o setor tem sofrido por uma transformação significativa e atualmente, coexistem soluções cabladas e sem fios, tendo cada uma delas vantagens e limitações, dependendo do contexto de aplicação.

Os sistemas cablados, como os oferecidos pela Bosch e Yamaha, são amplamente utilizados em ambientes onde a fiabilidade e a qualidade do sinal são cruciais, como em instalações empresariais, auditórios e infraestruturas de grande escala. Estes são sistemas que garantem uma transmissão estável, minimizando as interferências e permitindo ainda um maior controlo sobre o processamento de áudio. Para além disso, são utilizados protocolos como o Dante e AES67, que permitem a distribuição de áudio sobre redes IP com baixa latência e alta qualidade. No entanto, a sua instalação e manutenção podem ser complexas e dispendiosas, exigindo um planeamento detalhado da infraestrutura.

Apesar das vantagens dos protocolos Dante e AES67, estes não foram selecionados para o presente projeto devido ao seu custo elevado, à necessidade de hardware dedicado e à complexidade de implementação em ambientes de pequena a média escala. O objetivo deste projeto foi desenvolver uma solução acessível, flexível e baseada em tecnologias open-source, o que motivou a escolha de alternativas como o Wi-Fi e protocolos de transmissão baseados em software livre, mais adequados ao contexto e aos recursos disponíveis.

Aprofundando brevemente os conceitos citados, o protocolo **Dante** (Digital Audio Network Through Ethernet) consiste em uma tecnologia desenvolvida pela Audinate para transmissão de áudio digital em redes IP. Este permite a comunicação de múltiplos dispositivos de áudio através de uma rede padrão Ethernet, o que elimina a necessidade de ligações analógicas e acaba por reduzir a complexidade da instalação. Este é amplamente adotado em aplicações profissionais, pois oferece baixa latência, alta qualidade de som e suporte para centenas de canais simultaneamente. Além disso, conta com funcionalidades avançadas de roteamento e gestão remota de dispositivos, o que o torna uma solução eficiente para grandes infraestruturas de áudio.

O **AES67**, por sua vez, é um padrão aberto que visa garantir a integração entre diversos protocolos de áudio sobre IP, tais como Dante, Ravenna e Livewire. Desenvolvido pela Audio Engineering Society (AES), este protocolo define diretrizes comuns para a transmissão de áudio digital, permitindo que sistemas de diferentes fabricantes comuniquem-se de forma integrada. O AES67 é particularmente útil em ambientes onde há necessidade de compatibilidade entre diversas tecnologias, como em estúdios de radiodifusão e instalações de sonorização distribuída. A sua flexibilidade e compatibilidade tornam-no uma escolha popular para projetos que exigem integração de sistemas de áudio diversos.

Por outro lado, empresas como a **Sonos** e a **Bose** têm apostado em soluções sem fios, que proporcionam maior flexibilidade e facilidade de instalação, sendo ideais para ambientes domésticos e comerciais de menor dimensão. A **Sonos** desenvolveu um ecossistema de colunas inteligentes interligadas via Wi-Fi, permitindo a transmissão sincronizada de áudio entre múltiplos dispositivos e possibilitando a configuração personalizada de zonas sonoras, como descrito no artigo “**Com estas colunas da Sonos vai encher a casa de música**”. Essa abordagem elimina a necessidade da utilização de cablagem extensa e oferece ainda um controlo intuitivo através de aplicações móveis.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre algumas marcas e suas soluções de transmissão de áudio.

| Marca  | Tecnologia                 | Pontos Fortes                          | Pontos Fracos                                 |
|--------|----------------------------|--|---|
| Bosch  | Cablado (Dante, AES67)     | Alta qualidade, estabilidade           | Instalação complexa, custo elevado            |
| Yamaha | Cablado (Dante)            | Qualidade profissional, baixa latência | Infraestrutura fixa necessária                |
| Sonos  | Sem fio (Wi-Fi)            | Flexibilidade, fácil instalação        | Dependência de conexão Wi-Fi                  |
| Bose   | Sem fio (Wi-Fi, Bluetooth) | Qualidade premium, estabilidade        | Latência maior em relação a sistemas cablados |

Tabela 1: Comparação entre marcas e suas soluções de transmissão de áudio.

Um exemplo notável deste avanço é a linha de colunas *Sonos Era 300 e Era 100*, destacada no artigo anteriormente mencionado “Com estas colunas da Sonos vai encher a casa de música”. Estes dispositivos incorporam tecnologias avançadas de espacialização sonora, adaptando-se a diferentes ambientes e proporcionando uma experiência imersiva. Além disso, a capacidade de integração com diversos serviços de streaming e a compatibilidade com padrões de áudio de alta resolução tornam estes sistemas uma referência no mercado de áudio doméstico.

Embora os sistemas sem fios atuais ofereçam uma experiência conveniente e de alta qualidade, a maioria das soluções comerciais permanece focada em aplicações domésticas ou em espaços de menor escala.

Recentemente, algumas empresas começaram a explorar soluções híbridas, utilizando tecnologias como Bluetooth Low Energy (BLE) e Wi-Fi 6 para melhorar a estabilidade e reduzir a latência da transmissão sem fios. Essas tecnologias permitem reduzir a latência, melhorar a estabilidade do sinal e oferecer uma experiência de áudio mais fluida, especialmente em ambientes onde a conectividade sem fios pode ser um desafio. Algumas das empresas envolvidas nesse estudo são, por exemplo, a *Telit Cinterion*, *Insight SIP* e *Silicon Labs*, que têm investido no desenvolvimento de módulos e sistemas que combinam essas tecnologias para otimizar a transmissão de áudio e comunicação sem fios.

## 4.2 Descrição do sistema proposto pela Sonos

Para compreender melhor o panorama dos sistemas de áudio sem fios, analisou-se o ecossistema da Sonos, uma referência no mercado de áudio doméstico multi-room, com base em informações públicas e artigos como o mencionado "Com estas colunas da Sonos vai encher a casa de música".

### 4.2.1 Modelos e Características Específicas

**Era 100:** Este modelo é a evolução das colunas Sonos One, mantendo um design compacto que se adapta facilmente a qualquer ambiente doméstico. A Era 100 oferece conectividade Wi-Fi, permitindo o acesso direto a serviços de streaming sem a necessidade de outros dispositivos intermediários. Esta coluna também incorpora uma interface tátil para controle de volume e reprodução, e suporta a funcionalidade de assistente de voz quando conectada via Wi-Fi, o que amplia suas capacidades de uso sem depender de interações físicas.

**Era 300:** Destinado a espaços maiores, o Era 300 é conhecido por sua capacidade de emitir "som espacial", criando uma experiência auditiva mais imersiva. Além da conectividade Wi-Fi, este modelo suporta áudio multicanal, permitindo que os usuários desfrutem de som surround sem a necessidade de múltiplas colunas. Assim como a Era 100, ela pode ser controlada via app Sonos, oferecendo uma integração perfeita com o ecossistema de produtos Sonos.

### 4.2.2 Vantagens da Tecnologia Sonos

**Flexibilidade:** As colunas Sonos oferecem uma configuração extremamente flexível, permitindo aos utilizadores conectar várias colunas numa rede Wi-Fi doméstica. Isso possibilita a reprodução sincronizada de música em múltiplos ambientes ou a reprodução de faixas diferentes em cada espaço, tudo controlável através de um aplicativo intuitivo.

**Qualidade de Áudio Superior:** Graças à conectividade Wi-Fi, as colunas Sonos são capazes de transmitir áudio de alta resolução, proporcionando uma qualidade sonora significativamente superior à de muitas outras tecnologias sem fio, como o Bluetooth.

**Integração com Serviços de Streaming:** As colunas Sonos integram-se perfeitamente com uma vasta gama de serviços de streaming de música, facilitando o acesso a bibliotecas extensas e diversas de conteúdo musical sem a necessidade de hardware adicional.

### 4.2.3 Desafios e Limitações da Tecnologia Sonos

**Dependência de uma Conexão Wi-Fi Estável:** Uma das principais limitações das colunas Sonos é a necessidade de uma conexão Wi-Fi constante e estável. Interrupções na rede podem afetar diretamente a reprodução de música, resultando em interrupções ou perda de conectividade.

**Alcance Limitado:** O alcance da conectividade Wi-Fi é também uma restrição, especialmente em ambientes maiores ou com múltiplas barreiras físicas, como paredes densas, que podem interferir e limitar a distribuição do sinal.

**Ecossistema Fechado:** Embora potente, é um sistema proprietário, com custos associados e menor flexibilidade para integrações profundas ou personalizações de baixo nível em comparação com soluções open-source.

### 4.2.4 Conclusão e Lições aprendidas

Ao explorar o sistema de áudio multicanal via Wi-Fi da Sonos, certas lições podem ser valiosas no desenvolvimento do nosso sistema. A integração de várias colunas numa rede doméstica destaca a eficácia da tecnologia Wi-Fi em proporcionar uma experiência auditiva consistente e de qualidade.

A flexibilidade do sistema Sonos em permitir o controlo individual ou sincronizado das colunas em diferentes ambientes ilustra a importância de um design centrado no utilizador. Este aspecto deve ser considerado ao desenvolver um novo sistema, onde o utilizador pode gerir a experiência auditiva dos clientes remotamente, através de um website. A facilidade de uso é essencial para permitir que o proprietário possa iniciar/parar o áudio bem como ajustes do volume desejado nas diferentes zonas, oferecendo um ambiente sonoro que pode ser modificado dinamicamente para atender às preferências dos clientes ou ao tema do evento que irá ocorrer.

A capacidade de manter a qualidade do som através da rede Wi-Fi ressalta a necessidade de escolher tecnologias de transmissão adequadas que suportem a fiabilidade de áudio desejada.

Com o que aprendemos com estas lições, foi possível desenvolver um sistema de áudio multicanal via Wi-Fi que não só atenda às expectativas modernas de funcionalidade e desempenho, mas que também proporcione uma experiência auditiva adaptável.

## 4.3 Ferramentas e Tecnologias

A seleção de ferramentas e tecnologias para este projeto foi guiada por critérios de eficiência, flexibilidade, custo-benefício, facilidade de implementação e o vasto suporte da comunidade open-source.

### 4.3.1 Comunicação via Wi-Fi

A comunicação entre o nó central (servidor) e os nós recetores é realizada exclusivamente através de Wi-Fi, tirando partido da sua ampla disponibilidade, facilidade de configuração e suporte a redes sem fios de alta velocidade.

Sempre que possível, são utilizadas redes Wi-Fi dedicadas, de modo a evitar congestionamentos e garantir maior estabilidade na transmissão de áudio. Esta abordagem reduz significativamente a necessidade de cablagem, o que facilita a instalação e manutenção, além de aumentar a flexibilidade do sistema.

A escolha do Wi-Fi como tecnologia de comunicação baseou-se nas suas vantagens em termos de flexibilidade — permitindo a fácil movimentação e adição de nós recetores sem necessidade de nova infraestrutura física —, simplicidade de instalação e relação custo-benefício, sobretudo quando comparado com alternativas como Ethernet ou Power Line Communication (PLC).

A Tabela 2 ilustra as principais vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias de transmissão.



| Tecnologia                     | Vantagens e Desvantagens   |
|--------------------------------|--|
| Ethernet                       | <b>Vantagens:</b>  |
|                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexão estável</li> <li>• Baixa latência</li> <li>• Alta confiabilidade</li> </ul>   |
|                                | • Largura de banda consistente   |
|                                | <b>Desvantagens:</b>   |
| Wi-Fi                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer cabeamento dedicado</li> <li>• Instalação mais complexa</li> <li>• Custo elevado em ambientes com exigência de mobilidade</li> </ul> |
|                                | <b>Vantagens:</b>  |
|                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande flexibilidade</li> <li>• Fácil configuração</li> </ul>   |
|                                | • Acessível e amplamente compatível  |
| PLC (Power Line Communication) | <b>Desvantagens:</b>   |
|                                | • Suscetível a interferências  |
|                                | • Possível congestionamento em redes partilhadas   |
|                                | <b>Vantagens:</b>  |
| RF (Rádio Frequência)          | • Usa a rede elétrica existente  |
|                                | • Evita instalação de novos cabos  |
|                                | <b>Desvantagens:</b>   |
|                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcance limitado</li> <li>• Interferências por flutuações na rede elétrica</li> </ul>   |
|                                | <b>Vantagens:</b>  |
|                                | • Grande alcance   |
|                                | • Adequado para locais remotos   |
|                                | <b>Desvantagens:</b>   |
|                                | • Sujeito a interferências na mesma frequência   |
|                                | • Pode exigir conformidade com normas legais   |

Tabela 2: Comparação entre diferentes tecnologias de transmissão.

### 4.3.2 Protocolos de Transmissão de Dados

A transmissão de áudio no sistema é baseada no protocolo UDP (User Datagram Protocol), escolhido pela sua baixa sobrecarga e elevada eficiência na comunicação em tempo real. Neste tipo de aplicação, a perda ocasional de pacotes é geralmente mais aceitável do que a latência introduzida por protocolos orientados à conexão, como o TCP.

Para a distribuição dos fluxos de áudio, é utilizado o protocolo multicast, que permite otimizar a largura de banda ao enviar dados apenas para os dispositivos que optam por recebê-los. Através do multicast, uma única fonte (nó central) transmite um fluxo de pacotes que é replicado pela rede apenas para os recetores subscritos a esse grupo multicast.

Cada canal de áudio ou interrupção utiliza um endereço IP multicast e uma porta distinta. Esta abordagem evita tráfego redundante, reduz o consumo de recursos e melhora significativamente a eficiência da rede, sendo especialmente indicada para sistemas de áudio e vídeo com múltiplos recetores simultâneos.

Complementarmente, o sistema recorre ao broadcast UDP para funções específicas. O servidor utiliza esta técnica para enviar informações de configuração e estado (como ficheiros SDP, comandos de teste ou alterações de volume) a todos os nós na rede local. Os clientes, por sua vez, utilizam broadcast para se anunciarem ao servidor durante o processo de descoberta.

Ao contrário do multicast, o broadcast envia pacotes para todos os dispositivos da rede, independentemente de estarem interessados na informação. Esta característica pode gerar tráfego desnecessário, aumentar a latência e sobrecarregar a infraestrutura da rede, sobretudo em ambientes de grande escala. Por isso, o uso de broadcast é limitado a situações pontuais, como a descoberta inicial dos nós recetores.

| Protocolo | Implementação                              | Desvantagens  |
|-----------|--|---|
| Broadcast | Emissão para todos os dispositivos da rede | Maior tráfego desnecessário, podendo impactar o desempenho da rede                        |
| Multicast | Emissão para dispositivos pré-definidos    | Requer configuração nos grupos de recepção, pode exigir suporte da infraestrutura de rede |

Tabela 3: Comparação entre Broadcast e Multicast.

### 4.3.3 Componentes

O sistema é controlado por um nó central, implementado como uma aplicação Python (Flask) correndo num dispositivo como um Raspberry Pi ou PC.

Este nó desempenha um papel fundamental na arquitetura, sendo responsável por múltiplas funções críticas: a gestão de diversas fontes de áudio (incluindo ficheiros locais, streams do YouTube e entradas de microfone), o processamento e codificação do áudio utilizando codecs eficientes, e a transmissão dos fluxos de áudio para os nós recetores através de protocolos otimizados para redes sem fios. Além disso, o nó central disponibiliza uma interface web intuitiva que permite o controlo

remoto completo do sistema, possibilitando que os utilizadores ajustem configurações de áudio, criem playlists e gerenciem zonas de reprodução a partir de qualquer dispositivo conectado à rede. Toda a configuração do sistema, incluindo áreas, nós e canais, é armazenada e gerida através de uma base de dados integrada, garantindo persistência e consistência das configurações mesmo após reinicializações

Os recetores do sistema foram implementados com recurso a Raspberry Pi ou PCs, embora possam ser consideradas abordagens alternativas com dispositivos de menor custo, dependendo dos requisitos finais do projeto. Estes nós recetores são responsáveis por escutar continuamente os fluxos de áudio e comandos enviados pelo nó central através da rede, e por reproduzir o áudio recebido. A ligação entre o nó central e os recetores é feita via Wi-Fi, o que garante mobilidade e facilita a instalação, ao eliminar a necessidade de cablagem adicional.

#### 4.3.4 Tecnologias Utilizadas na Implementação

A implementação do sistema recorre a um conjunto de ferramentas robustas para garantir a aquisição, codificação e reprodução eficiente de fluxos de áudio:

- **Linguagem de Programação:** Python, linguagem escolhida pela sua versatilidade, vasta gama de bibliotecas, facilidade de desenvolvimento rápido e forte suporte comunitário.
- **Servidor Web e API:** Flask, um microframework web leve e flexível, usado para criar a interface de utilizador e os endpoints da API de controlo.
- **Comunicação em Tempo Real (UI):** Flask-SocketIO, para comunicação bidirecional entre o servidor e a interface web, o que permite atualizações dinâmicas como a exibição da música em reprodução.
- **ORM e Base de Dados:** SQLAlchemy como ORM para interagir com uma base de dados SQLite, usada para persistir configurações de canais, áreas, nós, músicas, playlists e outras informações do sistema.
- **Socket (UDP):** Em Python, a biblioteca nativa `socket` é usada para toda a comunicação de rede de baixo nível, incluindo envio de pacotes de áudio codificados via protocolo UDP multicast e broadcast. Este método permite distribuir um mesmo fluxo para múltiplos recetores com elevada eficiência de largura de banda.
- **Processamento de Áudio e Streaming:** FFmpeg, ferramenta de linha de comando essencial invocada como subprocesso para:
  - Capturar áudio de dispositivos ALSA (microfones)
  - Ler ficheiros de áudio locais e playlists (usando o filtro `concat`)
  - Ingerir streams de áudio externos
  - Codificar áudio para o formato Opus

- Transmitir áudio via RTP multicast
- Converter formatos de áudio (ex: MP3 para WAV no upload)
- **Codec de Áudio:** Opus foi escolhido por ser altamente eficiente, oferecendo compressão com baixa latência e excelente qualidade de som, mesmo em redes com instabilidade ou largura de banda limitada.
- **Obtenção de Streams de Vídeo/Áudio:** `yt-dlp`, biblioteca Python e ferramenta de linha de comando usada para extrair URLs diretos de fluxos de áudio de vídeos ou transmissões ao vivo do YouTube.
- **Reprodução de Áudio no Cliente:** `ffplay`, reprodutor multimídia simples, parte do projeto FFmpeg, usado nos nós recetores para decodificar e reproduzir os fluxos RTP multicast recebidos.
- **Gestão de Dispositivos de Áudio (Linux):** `arecord` (parte de `alsa-utils`), usado para listar os dispositivos de captura de áudio (microfones) disponíveis no sistema onde o servidor corre.
- **Outras bibliotecas Python:** O sistema utiliza diversas bibliotecas nativas como `os`, `subprocess`, `threading`, `json`, `uuid`, `hashlib`, `wave`, `enum`, `shutil` e `werkzeug` para funções de suporte em todo o sistema.

Esta combinação de tecnologias permitiu construir um sistema robusto, escalável e responsivo, capaz de gerir múltiplos canais de áudio e transmiti-los através da rede com alta qualidade e baixa latência. As ferramentas open-source selecionadas oferecem excelente desempenho e adaptabilidade, o que permite que o sistema seja implementado em diversos ambientes e configurações.

## 4.4 Parâmetros de Áudio e Codec

A qualidade e eficiência da transmissão de áudio no sistema dependem crucialmente da escolha e configuração de diversos parâmetros fundamentais. Estes parâmetros foram definidos no ficheiro `app.py` e são aplicados durante o processamento e codificação do áudio pelo FFmpeg.

### 4.4.1 Codec de Áudio: *Opus*

Um *codec* (codificador/descodificador) é um algoritmo utilizado para comprimir e descomprimir dados de áudio digital. A compressão reduz o tamanho dos dados para facilitar o armazenamento e a transmissão.

Foi escolhido o *codec* **Opus**. Este é um *codec* de áudio moderno, aberto e isento de *royalties*, conhecido pela sua alta qualidade em diversas taxas de bits e pela sua baixa latência. É versátil, adaptando-se bem tanto para a transmissão de voz (como em interrupções por microfone) quanto para música. A sua eficiência permite manter uma boa qualidade de áudio mesmo com a taxa de bits de baixa e contribui para a robustez da transmissão em redes Wi-Fi.

A combinação destes parâmetros e a escolha do *codec* Opus são fundamentais para garantir que o sistema de difusão de áudio ofereça uma experiência sonora de qualidade, de forma eficiente e adaptada às exigências de uma rede sem fios com múltiplos recetores e fontes de áudio.

#### 4.4.2 Taxa de Amostragem (Sample Rate)

A taxa de amostragem indica o número de amostras de áudio capturadas por segundo de um sinal analógico para o converter num sinal digital.

Foi escolhida uma taxa de amostragem de 48000 Hz (48 kHz) que é uma taxa comumente utilizada em áudio profissional.

#### 4.4.3 Taxa de Bits (Bitrate)

A taxa de bits representa a quantidade de dados (bits) transmitidos ou processados por unidade de tempo, geralmente por segundo (bps ou kbps). Em áudio comprimido, como o usado no projeto, a taxa de bits influencia diretamente a qualidade do áudio e o tamanho do ficheiro ou a largura de banda necessária para a transmissão. Uma taxa de bits mais alta geralmente resulta em melhor qualidade, mas consome mais dados.

Para os fluxos de áudio codificados com *Opus*, foi definida uma taxa de bits de 128 kbps. O *codec Opus* é altamente eficiente, e esta taxa de bits proporciona um excelente equilíbrio entre qualidade de áudio (adequada para música e voz) e a utilização da largura de banda da rede, especialmente importante num sistema multicast com múltiplos canais.

#### 4.4.4 Canais de Áudio (Audio Channels)

Indica o número de fluxos de áudio individuais que compõem o sinal. Os formatos mais comuns são mono (1 canal) e stereo (2 canais).

O sistema está configurado para transmitir os fluxos principais em mono (1 canal). Esta decisão visa otimizar a largura de banda, pois um sinal mono requer metade dos dados de um sinal stereo com a mesma qualidade. Para um sistema de difusão sonora em áreas amplas, onde a imagem stereo pode não ser consistentemente percebida por todos os ouvintes, a transmissão em mono é uma escolha pragmática e eficiente. Ficheiros locais podem ser stereo, mas são processados para mono no fluxo de transmissão principal.

#### 4.4.5 Protocolos de Streaming de Áudio

Para a transmissão eficiente de áudio em tempo real através da rede, o sistema usa uma combinação de protocolos e tecnologias de codificação especializados:

- **RTP (Real-Time Transport Protocol):** É o protocolo padrão para o transporte de áudio e vídeo em redes IP. No sistema desenvolvido, o FFmpeg é configurado para encapsular o áudio codificado em pacotes RTP e enviá-los via UDP multicast.

O RTP foi escolhido por fornecer mecanismos essenciais para transmissão em tempo real, como carimbos temporais, numeração sequencial de pacotes e identificação do tipo de conteúdo, permitindo a sincronização adequada e deteção de perdas de pacotes.

- **SDP (Session Description Protocol):** Para cada fluxo RTP, o sistema gera automaticamente ficheiros `.sdp` que descrevem os parâmetros da sessão multimédia, como o codec, o endereço IP, a porta, entre outros. Estes ficheiros são enviados aos clientes através do canal de controlo e permitem que o `ffplay`, nos nós recetores, se conecte ao stream correto e configure a descodificação de forma adequada. O SDP funciona como um "contrato" entre transmissor e recetor, assegurando que ambos utilizem os mesmos parâmetros de comunicação.
- **Codec de Áudio Opus:** No que diz respeito ao codec de áudio, a nossa escolha recaiu sobre o Opus. Um dos fatores determinantes nesta decisão foi a sua excelente compatibilidade e integração com o FFmpeg. Visto que o FFmpeg já desempenhava um papel central no nosso sistema para diversas outras tarefas, a possibilidade de o utilizar também para codificar o áudio para Opus no servidor e descodificá-lo nos clientes simplificou significativamente o desenvolvimento.

A combinação destes protocolos e tecnologias assegura uma transmissão de áudio eficiente e fiável, com capacidade para lidar com potenciais perdas de pacotes em ambientes Wi-Fi. Garante ainda a qualidade sonora exigida e uma latência baixa para os utilizadores finais.

#### 4.4.6 Considerações Finais sobre as Tecnologias Adotadas

A escolha das ferramentas e tecnologias para este projeto foi guiada por critérios como eficiência, flexibilidade, custo-benefício e facilidade de implementação. A utilização de Wi-Fi como meio de comunicação garante uma instalação simplificada e acessível, enquanto o uso de protocolos adequados para transmissão de áudio (RTP/Opus) assegura qualidade e baixa latência.

O sistema centralizado baseado em Raspberry Pi (ou equivalente) com Python e FFmpeg proporciona uma solução robusta e escalável, permitindo ajustes conforme as necessidades do utilizador.

Através da combinação dessas tecnologias modernas e acessíveis, o projeto visa oferecer uma solução eficiente para a transmissão de áudio multicanal, adequada para ambientes audiovisuais, com foco na estabilidade, integração simplificada e flexibilidade operacional.

## 5 Implementação

Esta secção descreve a implementação do sistema de difusão de áudio digital multi-canal, detalhando os principais componentes desenvolvidos para o seu funcionamento. O sistema é composto por um nó central responsável pela transmissão do áudio e por múltiplos nós receptores distribuídos na rede. A implementação foi feita em Python, utilizando bibliotecas especializadas para captura, codificação, transmissão e reprodução do áudio em tempo real. As decisões técnicas foram guiadas pelos requisitos de escalabilidade, desempenho e usabilidade do sistema em redes sem fio.

### 5.1 Transmissor: Nó Central

O nó central tem a responsabilidade de coordenar e efetuar a transmissão de áudio digital para os restantes nós da rede. Foram integradas ferramentas para aquisição e envio contínuo do áudio por meio de transmissão multicast via protocolo UDP. O objetivo principal foi garantir que o áudio é enviado em tempo real com qualidade aceitável, mesmo em redes com possíveis perdas de pacotes, como em ambientes Wi-Fi.

A transmissão é realizada com a ferramenta `ffmpeg`, que codifica o áudio utilizando o codec *Opus* e envia o fluxo em formato RTP (*Real-time Transport Protocol*) encapsulado sobre UDP. Cada fluxo de áudio corresponde a um canal e é associado a um endereço multicast específico do tipo `rtp://239.255.X.Y:12345`. O valor de `X` indica o tipo de canal — sendo 0 para transmissões locais e streaming e 1 para transmissões provenientes de microfones. Já o valor de `Y` representa o identificador numérico do canal, atribuído pelo Nó Central. Antes de iniciar a transmissão, o sistema gera automaticamente um ficheiro SDP, que descreve os parâmetros da sessão de áudio (codec, IP, porta, etc.) e é utilizado pelos nós recetores para configurar corretamente a receção do fluxo.

Além da transmissão de áudio, o nó central é responsável por comunicar periodicamente com os nós recetores através de pacotes UDP de controlo. Esses pacotes incluem informações essenciais, como a atribuição de canais, o conteúdo dos ficheiros SDP, o volume por área e comandos especiais (como testes de conectividade ou interrupções por microfone). Esta sincronização garante que todos os nós se mantenham atualizados mesmo em contextos de rede dinâmica.

O nó central gerencia o estado do sistema (canais, nós, fontes, etc.) utilizando uma base de dados SQLAlchemy.

O processamento das fontes de áudio inclui:

- Ficheiros locais: Upload e gestão.
- Listas de reprodução (playlists): Coleções de músicas geridas na base de dados.
- YouTube: Integração com `yt-dlp` para pesquisa e obtenção das URLs de stream.
- Microfones: Utilização do `arecord` para listar microfones disponíveis e `FFmpeg` para transmitir o áudio capturado.

A lógica de controlo, configuração e gestão do sistema é acessível através de uma interface web, descrita na próxima subsecção.

## 5.2 Recetor: Nós Recetores

O papel dos nós recetores é receber e reproduzir o áudio digital transmitido pelo nó central através da rede multicast UDP. Cada nó escuta o endereço multicast e porta correspondente ao canal atribuído, utilizando as informações contidas nos ficheiros SDP para configurar a receção do fluxo RTP.

Os nós são responsáveis por decodificar o áudio usando o codec `Opus`, garantindo a reprodução em tempo real com baixa latência e qualidade adequada, mesmo diante de possíveis perdas de pacotes na rede. A implementação dos nós receptores foi realizada em Python, integrando bibliotecas especializadas para captura do fluxo RTP, decodificação e reprodução do áudio.

A reprodução do áudio é feita através da ferramenta `ffplay`, controlada por um processo `subprocess`, que conecta ao fluxo RTP definido pelo ficheiro SDP e realiza a decodificação e reprodução do áudio em tempo real. Quando ocorre uma troca de canal ou uma interrupção (por exemplo, ativação do microfone), o processo `ffplay` em execução é terminado e um novo processo é iniciado para garantir que a nova fonte de áudio seja corretamente reproduzida.

Além disso, os nós monitorizam pacotes de controlo enviados periodicamente pelo transmissor para ajustar configurações como volume, canal ativo — que pode ser alterado dinamicamente conforme comando do nó central — e receber comandos de teste ou interrupção de microfone, assegurando uma operação sincronizada e controlada do sistema de difusão.

Os comandos de teste consistem em transmissões de áudio específicas reproduzidas localmente pelas colunas. Estes áudios servem para confirmar que cada coluna está corretamente conectada e a funcionar, além de ajudar na sua localização física quando existem várias próximas umas das outras, facilitando a identificação visual e auditiva dos dispositivos na rede.



### 5.3 Fluxo de Funcionamento: Nó Central - Nó Recetor

O funcionamento do sistema de difusão de áudio baseia-se na interação contínua entre o nó Central e os nós Recetores, seguindo um fluxo bem definido para deteção, conexão, atualização de configurações e distribuição do áudio. Esta comunicação é crucial para a operação sincronizada e controlada de todo o sistema.

#### 5.3.1 Deteção e Conexão de Recetores

A fase inicial de deteção e conexão garante que novos recetores sejam identificados e configurados para receber o áudio. Este processo, ilustrado no Diagrama de Sequência da Figura 4, ocorre da seguinte forma:

1. **Broadcast de Identificação:** O nó recetor, ao ser inicializado, envia periodicamente uma mensagem de *broadcast* contendo o seu nome e endereço MAC. Este *broadcast* é o mecanismo pelo qual o nó recetor anuncia a sua presença na rede.
2. **Verificação e Resposta do Nó Central:** O nó central, ao receber o *broadcast*, consulta a base de dados e verifica se o endereço MAC do recetor já está registado.
3. **Atribuição de Configuração:**
  - Se o recetor for **novos**, o nó central regista-o na base de dados e atribui uma configuração inicial.
  - Se o recetor for **existente**, o nó central recupera a configuração previamente associada a esse dispositivo.
4. **Confirmação "OK":** Após a verificação e obtenção da configuração, o nó central envia uma mensagem "OK" ao nó recetor, confirmando a sua deteção e prontidão para receber as configurações.
  - Se o nó recetor não receber a mensagem "OK" dentro de 1 segundo, volta ao passo 1 e reenvia o *broadcast* de identificação.
5. **Envio da Configuração:** Finalmente, o nó central envia ao nó recetor as configurações necessárias, incluindo a informação sobre o canal a sintonizar e o ficheiro SDP correspondente à transmissão de áudio.

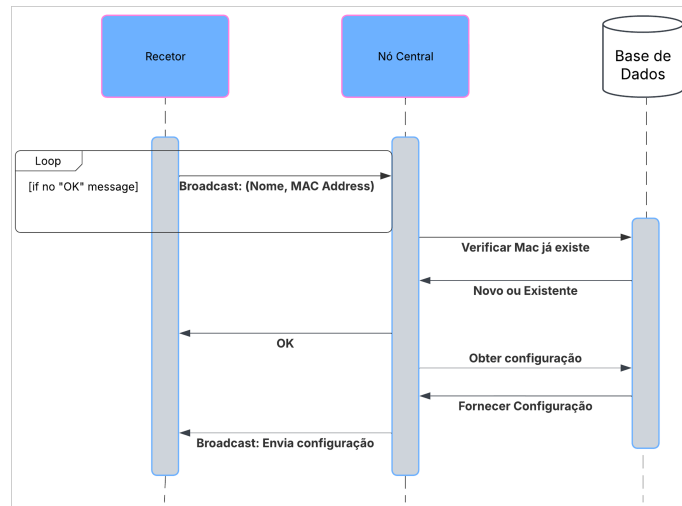


Figura 4: Comunicação entre o nó central e os recetores durante o processo de deteção e ligação.

### 5.3.2 Envio de Atualizações e Configurações

Uma vez conectados, os Nós Recetores necessitam de manter as suas configurações atualizadas dinamicamente. Para isso, o Nó Central envia pacotes de controlo via *broadcast* quando ocorrem alterações nas configurações que envolvam um determinado nó, como detalhado na Figura 4, último passo do tópico descrito anteriormente (Envio de Configuração). Por exemplo, quando há um aumento do volume na zona onde o nó está colocado, ou uma alteração no canal associado.

Estas atualizações são enviadas via *broadcast* UDP e contêm uma matriz de configuração que abrange múltiplos níveis de detalhe:

- **1º Nível: MAC Address:** As atualizações podem ser direcionadas a recetores específicos, identificados pelo seu endereço MAC. Desta forma, cada Nó Recetor acessa apenas as configurações que lhe são destinadas, garantindo assim o isolamento e personalização da configuração.
- **2º Nível: Detalhes de Configuração:** Dentro de cada MAC address, são definidos os seguintes parâmetros:
  - **Volume:** Permite ajustar o nível de volume de reprodução em cada nó recetor.
  - **Canal:** Define o canal de áudio que o nó recetor deve sintonizar. Esta funcionalidade é essencial para possibilitar a troca dinâmica de fontes de áudio.
  - **Ficheiro de configuração RTP:** Inclui as informações do ficheiro SDP (`session_<id>.sdp` ou `mic_<id>.sdp`), necessárias para que o nó recetor configure corretamente a receção do fluxo RTP.

Esta abordagem garante que os Nós Recetores estejam sempre sincronizados com o estado atual do sistema, permitindo mudanças em tempo real na distribuição do áudio.

### 5.3.3 Envio de Áudio (Distribuição Multicast)

A distribuição de áudio é o cerne do sistema, realizada através de transmissão multicast RTP sobre UDP, conforme ilustrado na Figura 5.

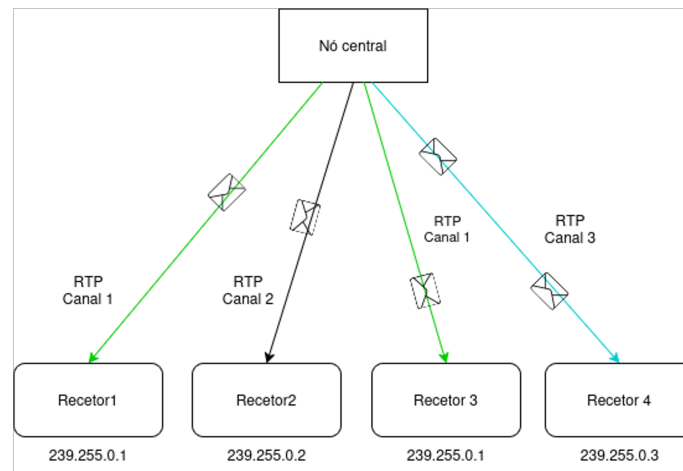


Figura 5: Distribuição de Áudio na Rede

- **Canais Multicast:** Cada fluxo de áudio é associado a um canal específico e transmitido para um endereço IP multicast no formato `rtp://239.255.X.Y:12345`.
- **Sintonização dos Recetores:** Os Nós Recetores, após receberem as configurações de canal e o ficheiro SDP, sintonizam o endereço multicast correspondente. A ferramenta `ffplay` é utilizada para conectar-se ao fluxo RTP, decodificar o áudio *Opus* e reproduzi-lo em tempo real.
- **Flexibilidade e Escalabilidade:** A arquitetura multicast permite que múltiplos Nós Recetores recebam o mesmo fluxo de áudio simultaneamente, otimizando o uso da largura de banda e facilitando a escalabilidade do sistema. A separação dos canais em endereços multicast distintos oferece flexibilidade para a criação de diferentes zonas ou ambientes de áudio.

Este fluxo de funcionamento garante que o sistema de difusão de áudio seja robusto, dinâmico e capaz de gerir a deteção de novos recetores, a distribuição de configurações e a entrega contínua de áudio em tempo real.

## 5.4 Interface Gráfica de Controlo

O sistema disponibiliza uma interface gráfica avançada que permite o controlo completo da transmissão de áudio em múltiplos canais, suportando reprodução de músicas locais, transmissões em fluxo contínuo (streaming) e utilização de microfones. A seguir, apresenta-se uma descrição detalhada das funcionalidades oferecidas por esta interface.

A **gestão de canais** é uma das funcionalidades centrais do sistema. São criados automaticamente três canais padrão designados por **Canal 1**, **Canal 2** e **Canal 3**, como se observa na Figura 6. Cada canal pode assumir diferentes tipos, nomeadamente **LOCAL**, que permite a reprodução de músicas armazenadas localmente e **STREAMING**, que possibilita a transmissão de áudio proveniente de URLs externas, como o YouTube.



Figura 6: Interface de Gestão de Canais de Áudio

Para adicionar conteúdo multimédia ao sistema, utiliza-se a secção *Edit Media*, representada na Figura 7. Na secção **LOCAL**, o utilizador pode adicionar músicas armazenadas no computador ou pesquisar e incorporar faixas diretamente do YouTube. Também é possível criar, editar ou remover playlists existentes, bem como adicionar ou remover músicas dessas playlists. Na secção **STREAMING**, o sistema permite introduzir links de transmissões ao vivo, pesquisar por streams no YouTube e gerir os streams guardados (renomear ou eliminar). Na secção de microfones, os dispositivos disponíveis podem ser sincronizados, renomeados ou removidos.

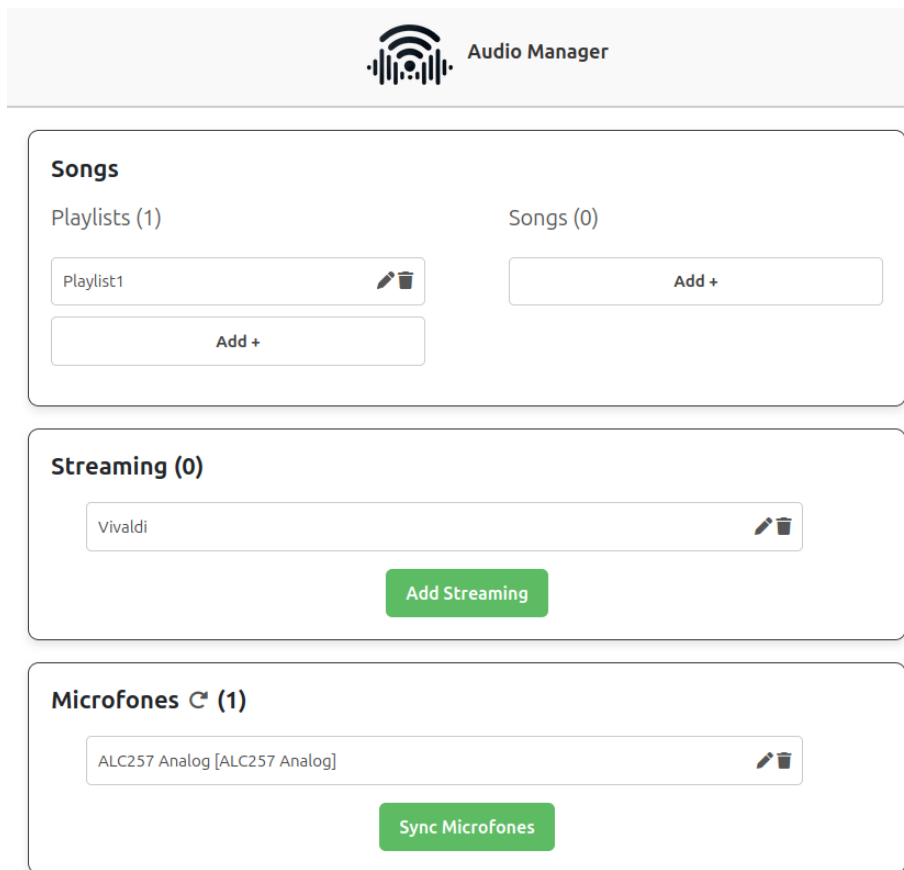


Figura 7: Configuração de playlists, músicas, streams e microfones.

A configuração específica de um canal, ilustrada na Figura 8, permite a atribuição de playlists, músicas ou transmissões em direto ao canal, bem como a alteração do seu nome. Apenas canais corretamente configurados podem ser ativados.

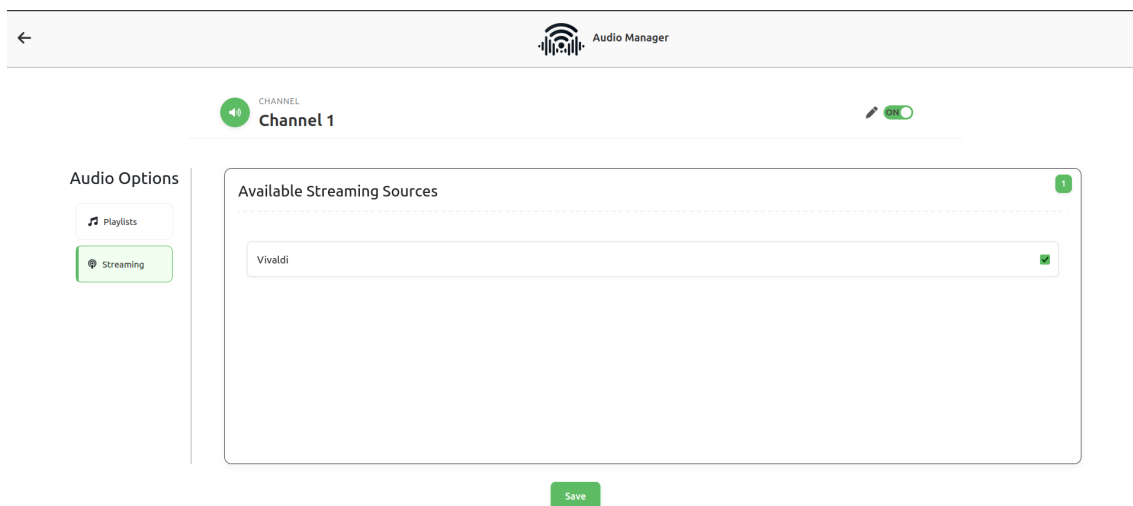


Figura 8: Configuração de um canal específico

Relativamente à **gestão de áreas e nós**, o sistema permite a criação e remoção de áreas (ou zonas) e a associação de dispositivos de áudio (nós) a estas áreas. Em cada área, é possível ajustar individualmente o volume e definir o canal de transmissão que estará ativo, conforme mostrado na

Figura 9.

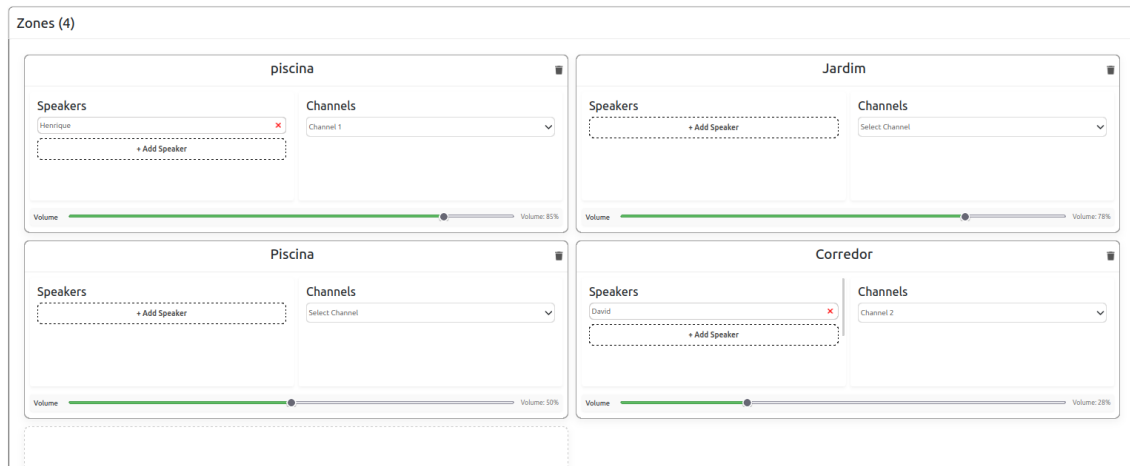


Figura 9: Gestão de áreas

Os nós são detetados automaticamente na rede e podem ser renomeados, testados (através do envio de um tom de teste com duração de cinco segundos), associados ou removidos de áreas, e o seu estado de ligação (conectado ou desconectado) pode ser verificado. Além disso, é possível consultar informação técnica dos dispositivos, como o endereço IP e o MAC address, conforme ilustrado na Figura 10.

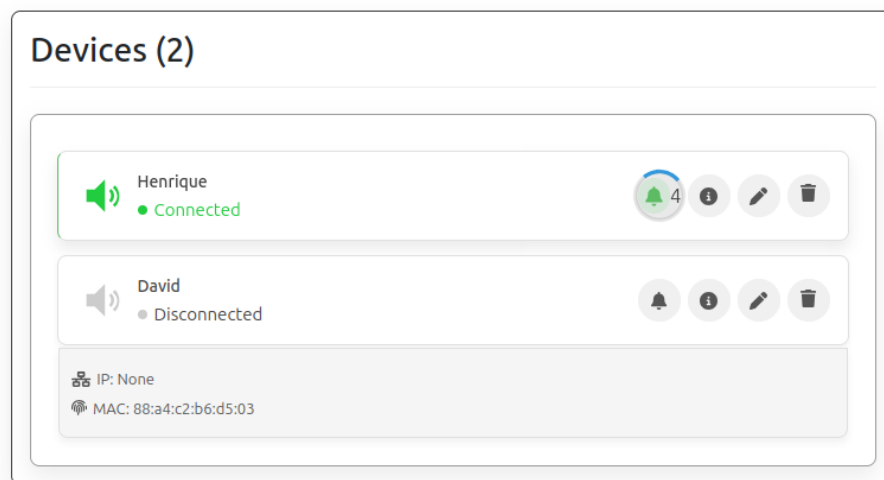


Figura 10: Dispositivos

Uma funcionalidade essencial é o controlo de **interrupções com microfone**, que permite sobrepor a transmissão de áudio em curso por uma fonte de voz em tempo real. O sistema permite associar microfones a áreas ou canais específicos com prioridade, como ilustrado na Figura 11. É possível ativar ou desativar estas interrupções, verificar se uma determinada área já tem uma interrupção ativa e removê-las se necessário. Os microfones disponíveis são listados através da ferramenta **arecord**, sendo também possível atualizar esta lista sempre que necessário.

Figura 11: Adição de Interrupção

No que diz respeito à **gestão de músicas e listas de reprodução**, o sistema oferece funcionalidades robustas. É possível carregar ficheiros de áudio locais nos formatos MP3 ou WAV, os quais são automaticamente convertidos para o formato WAV no Nó Central.

Para cada música, é gerado um *hash* único para identificar e prevenir ficheiros duplicados. Além do carregamento direto, o sistema permite pesquisar músicas no YouTube, com sugestões em tempo real, e descarregá-las diretamente para o Nó Central, onde são guardadas como ficheiros *.wav*. As músicas, quer sejam carregadas localmente ou obtidas do YouTube, podem ser editadas (ex: renomeadas) ou eliminadas.

As listas de reprodução (*playlists*) também são completamente gerenciáveis: podem ser criadas, ter os seus nomes editados ou serem removidas. Músicas individuais podem ser adicionadas ou removidas de qualquer lista, e existe a funcionalidade de importar uma coleção de músicas para uma *playlist* existente. A ordem das músicas dentro de uma *playlist* pode ser definida pelo utilizador. Durante a reprodução de uma lista de áudio local, o sistema suporta o modo de ciclo infinito (*loop*) e exibe continuamente a informação da música que está a ser reproduzida.

A funcionalidade de **transmissão em fluxo contínuo (*streaming*)** permite integrar fontes de áudio *online*. O sistema possibilita a pesquisa de transmissões ao vivo no YouTube, oferecendo sugestões de pesquisa em tempo real para facilitar a descoberta de conteúdo.

Adicionalmente, transmissões podem ser adicionadas diretamente através da inserção do seu URL. Uma vez identificadas, estas *streams* podem ser guardadas na base de dados do sistema, renomeadas para melhor identificação, ou eliminadas caso deixem de ser relevantes.

Na secção de **configurações e cópias de segurança**, é possível exportar e importar todas as configurações do sistema, incluindo dados de nós, áreas e canais, utilizando ficheiros no formato JSON.

As Figuras 12 e 13 ilustram os interfaces gráficos associados a estas funcionalidades.

- A **Figura 12** mostra o ecrã de exportação de configurações. Através desta interface, o utilizador pode gerar um ficheiro *.json* contendo todas as definições atuais do sistema. Esta funcionalidade é especialmente útil para criar cópias de segurança ou para transferir configurações entre diferentes instalações.

- A **Figura 13** apresenta o ecrã de importação de configurações. Aqui, o utilizador pode carregar um ficheiro `.json` previamente exportado, restaurando assim os dados e parâmetros do sistema. Esta opção permite uma recuperação rápida e eficiente em casos de falha ou migração.

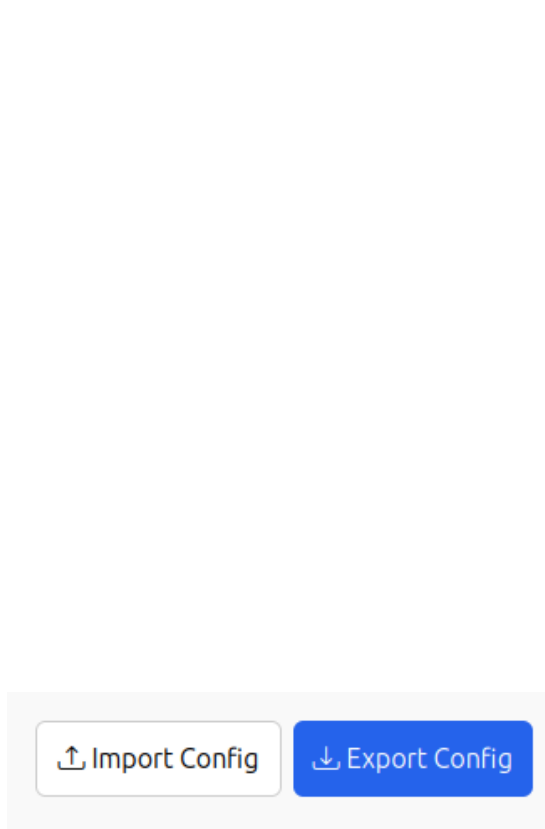


Figura 12: Exportação de Configurações

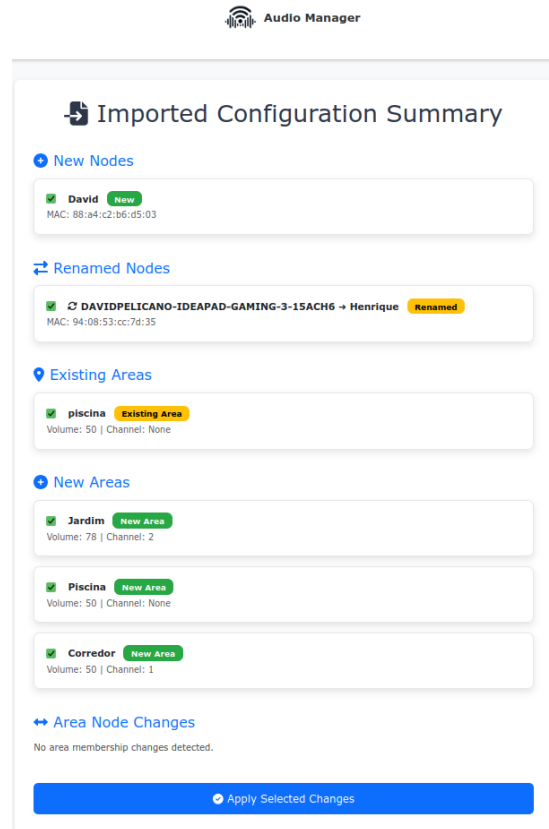


Figura 13: Importação de Configurações

## 5.5 Autenticação e Segurança

A interface gráfica do sistema inclui funcionalidades de autenticação e gestão de utilizadores, assegurando que apenas pessoal autorizado tenha acesso às configurações e controlo do sistema.

O fluxo de autenticação é gerido pela biblioteca Flask-Session, que permite o controlo seguro de sessões de utilizador. Após o login, uma sessão é iniciada, protegendo as rotas sensíveis do sistema e garantindo que apenas utilizadores autenticados conseguem aceder às configurações administrativas.

As **Figuras 14 e 15** ilustram as interfaces de login e registo de utilizadores respetivamente. O registo de novos utilizadores é feito através da inserção de um nome de utilizador único e uma palavra-passe. O processo de login valida as credenciais e inicia uma sessão para o utilizador.



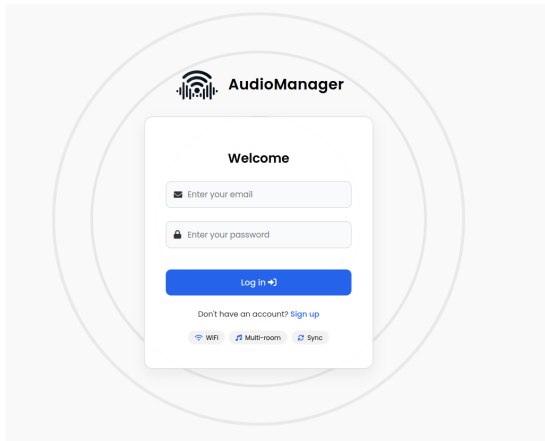


Figura 14: Página de Login dos Utilizadores

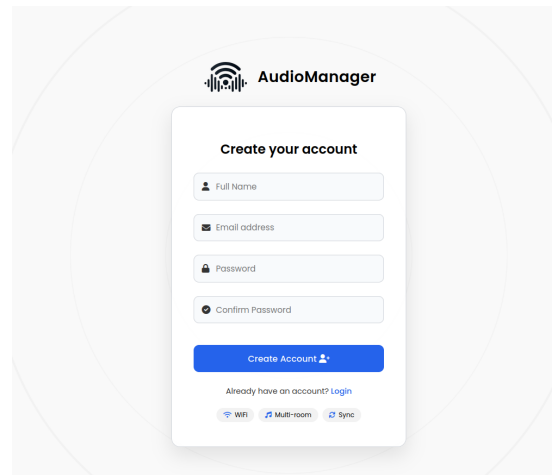


Figura 15: Página de Registo dos Utilizadores

## 6 Testes e Resultados

### 6.1 Ambiente de Testes

Os testes ao sistema de difusão de áudio foram conduzidos em diversos contextos dentro da Universidade, com o intuito de validar o seu funcionamento e desempenho em condições reais de utilização. Importa salientar que, **neste projeto, a latência do sistema não constituiu uma preocupação central**, uma vez que a emissão e a reprodução do áudio decorrem em locais distintos, o que implica que pequenos atrasos não afetam negativamente a experiência final.

Uma análise prévia da infraestrutura de rede universitária, e em particular da *eduroam*, revelou uma limitação crítica: por questões de segurança e desempenho em ambientes partilhados, a *eduroam* **não permite qualquer tráfego entre clientes, incluindo unicast, multicast e broadcast**. Uma vez que o sistema de difusão de áudio depende fundamentalmente destas funcionalidades para uma distribuição eficiente do áudio, tornou-se evidente que a sua operação direta nesta rede era impossível. Esta constatação foi decisiva para a tomada de decisão de implementar uma rede própria, dedicada ao sistema, com controlo total sobre os parâmetros de tráfego.

Consequentemente, a maioria dos testes foi conduzida nesta rede própria, isolada do tráfego da universidade e especialmente desenvolvida para o funcionamento do sistema. Esta rede dedicada permitiu uma análise mais precisa dos parâmetros do sistema, eliminando variáveis externas e simulando um ambiente mais controlado e próximo do cenário final de utilização. Importa sublinhar que esta rede não foi usada apenas em ambiente de testes, mas faz parte integrante da arquitetura do sistema.

Esta abordagem mista, que considerou as limitações de redes partilhadas e utilizou um ambiente controlado, permitiu validar a robustez do sistema, assegurando resultados mais completos e fiáveis.

### 6.2 Testes Realizados

A metodologia de testes foi desenvolvida em **múltiplas etapas**, combinando verificações funcionais observacionais com análises de desempenho mais sistemáticas.

Inicialmente, foram conduzidos **testes manuais** focados em validar a transmissão e receção do áudio. O objetivo primordial era confirmar se o áudio chegava aos recetores de forma inteligível, contínua e **sem falhas**, mesmo em situações de maior exigência. Cada zona de audição possuía um recetor dedicado, configurável remotamente, que subscrevia aos canais multicast desejados e reproduzia o áudio localmente.

Durante estes testes, também se monitorizou o fluxo de dados para aferir a ordem de grandeza do tráfego gerado. Embora não tivessem uma documentação formal rigorosa ou recolha sistemática de métricas detalhadas (como *screenshots* ou registos de dados exaustivos), as observações permitiram confirmar o funcionamento básico da difusão de áudio e a robustez da solução face às condições da rede implementada. Foi neste período que se detetou uma **limitação de desempenho inerente ao router utilizado, que afetava a capacidade máxima de tráfego e o número de canais simultâneos suportados**. Este desafio e a solução será detalhado na secção 7.3.

Após esta fase de validação funcional e identificação das limitações iniciais do hardware, foram

realizados **testes de desempenho mais sistemáticos** para otimizar os parâmetros do sistema e quantificar a perda de pacotes. Estes testes focaram-se na análise da **perda de pacotes** na variação do **número de canais a transmitir simultaneamente**, tal como ilustrado na Figura 16.

Para tal, foram testadas diferentes configurações de **frame duration**, sendo a percentagem de perda de pacotes (%) avaliada em função do número de canais utilizados. A **frame duration** influencia indiretamente o tamanho dos pacotes ao definir o intervalo de tempo entre os envios: *frames* mais curtos resultam num maior número de pacotes por segundo, aumentando o tráfego de rede e, consequentemente, a probabilidade de perda de pacotes à medida que o número de canais cresce. Por outro lado, *frames* mais longos (como 100 ms ou 120 ms) reduzem a frequência de envio, diminuindo a carga na rede, o que se traduz numa menor perda de pacotes mesmo com mais canais ativos.

Contudo, observou-se que essas configurações ainda apresentavam perdas superiores à configuração com 80 ms. Esta particularidade ocorre devido ao **limite de MTU (Maximum Transmission Unit) de 1500 bytes**, que, uma vez ultrapassado, resulta na fragmentação dos pacotes. A fragmentação, por sua vez, aumenta o tráfego e a probabilidade de perda.

Estes resultados evidenciam um **compromisso inerente entre latência e confiabilidade**: *frame durations* curtas reduzem a latência do sistema (o que, como referido, não era uma preocupação crítica para este projeto), contudo, aumentam a vulnerabilidade a perdas em ambientes com muitos canais; já *frames* mais longos favorecem a estabilidade da transmissão, mas com maior risco de fragmentação. Com base nesta análise aprofundada e nos testes realizados, a **frame duration ótima de 80ms foi explicitamente determinada**. Esta configuração otimiza a qualidade do áudio transmitido e a escalabilidade do sistema de difusão, em função do número de canais.

Adicionalmente, foi analisada a influência da capacidade de envio simultâneo de diferentes fluxos de áudio (canais distintos) em recetores distintos, mantendo constante o emissor. Para este ensaio, utilizaram-se dois computadores recetores: um Lenovo Ideapad Gaming 3 e um MacBook Air com processador M1. Observou-se uma variação significativa no desempenho: no Lenovo, foi possível receber até 200 canais sem perdas perceptíveis, enquanto no MacBook Air o limite encontrava-se próximo dos 50 canais.

Esta disparidade demonstra que o **desempenho do sistema está diretamente relacionado com as características da placa de rede** e a capacidade de processamento de cada recetor, sendo fatores relevantes a considerar em implementações futuras.

## 7. Progressos

O desenvolvimento do projeto foi estruturado em etapas sequenciais, com um foco inicial na simplicidade de implementação e validação incremental das funcionalidades nucleares.

A primeira fase concentrou-se na utilização da rede Wi-Fi, escolhida pela sua simplicidade e ampla disponibilidade.

O objetivo inicial foi estabelecer a capacidade de gerir três canais de áudio distintos: um para *streaming* de voz (microfone), outro para reprodução de ficheiros de áudio locais e um terceiro para transmissão em tempo real (como *streams* da Internet). Os trabalhos iniciais focaram-se na

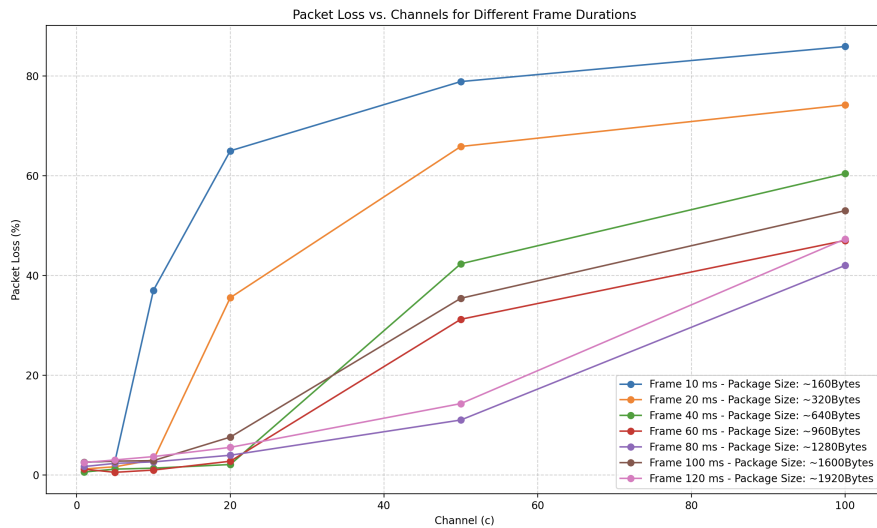


Figura 16: Perda de Pacotes em Função do Número de Canais e Frame Duration

extração e reprodução destas fontes de áudio no mesmo computador, uma etapa que se revelou mais demorada do que o previsto, especialmente no que concerne ao *streaming* de voz e à transmissão em tempo real, devido à sua maior complexidade inerente.

Posteriormente, o projeto evoluiu para a transmissão de áudio para um segundo computador. Inicialmente, esta comunicação foi implementada utilizando o protocolo UDP em modo **unicast**, o que permitiu validar a transmissão básica entre emissor e recetor. No entanto, para suportar múltiplos recetores de forma eficiente, a transição para **transmissão multicast** tornou-se imperativa.

Esta fase apresentou alguns desafios, pois as tentativas iniciais de envio direto de dados em multicast não se mostraram eficazes. A superação deste obstáculo deu-se com a descoberta e integração de ferramentas e protocolos mais robustos, nomeadamente o **FFmpeg** para processamento e *streaming* de áudio, o protocolo **RTP (Real-time Transport Protocol)** para o transporte dos dados de áudio, e o codec **Opus** pela sua eficiência e baixa latência. Ficheiros **SDP (Session Description Protocol)** foram também introduzidos para descrever os parâmetros da sessão de *streaming* aos recetores.

Com a transmissão multicast funcional, desenvolveu-se uma aplicação de terminal (linha de comandos) para testar e validar a lógica de gestão do sistema. Esta aplicação permitiu gerir:

- **Nós (Recetores):** Implementou-se a descoberta automática de nós na rede (via **broadcast** UDP), a capacidade de adicionar nós manualmente (útil para testes, especificando o IP), renomeá-los e removê-los. Cada nó era identificado pelo seu endereço MAC.
- **Zonas:** Era possível criar zonas, associar-lhes nós específicos, atribuir um canal de áudio a cada zona e controlar o volume individualmente.
- **Canais:** Os canais podiam ser configurados para um de três tipos de transmissão: **LOCAL** (para ficheiros locais), **STREAMING** (para URLs de *streams online*), ou **MICROFONE** (para entrada de áudio em tempo real a partir de um dispositivo de captura). Era possível associar a fonte respetiva a cada tipo de canal.

- **Fontes de Áudio:** Suporte para adicionar músicas através de ficheiros locais, *streams* através de URLs diretos e captura de áudio de microfones (utilizando **arecord** para listar dispositivos ALSA e FFmpeg para a captura).
- **Base de Dados:** Todas as configurações (nós, zonas, canais, fontes) eram persistidas numa base de dados **SQLite**.

A etapa seguinte consistiu na evolução desta lógica para uma **interface gráfica web**, utilizando **Flask** como *framework* e **Flask-SocketIO** para comunicação em tempo real com o *frontend*. Esta interface expandiu significativamente as funcionalidades e a usabilidade:

- **Gestão de Média Melhorada:**
  - Pesquisa *online* de músicas e *streams* ao vivo diretamente no YouTube.
  - Criação, edição e gestão de *playlists* com músicas locais ou importadas do YouTube.
- **Interrupções por Microfone:** Decidiu-se refinar a funcionalidade do microfone. Em vez de um canal dedicado contínuo, implementou-se um sistema de **interrupções prioritárias**. Esta abordagem é mais adequada para anúncios ou avisos, onde o áudio do microfone sobrepõe-se temporariamente à transmissão normal em zonas ou canais selecionados. A interface permite criar, ativar/desativar e gerir estas interrupções, associando-as a microfones específicos.
- **Gestão de Configurações:** Adicionou-se a funcionalidade de exportar e importar a configuração completa do sistema (nós, áreas, canais, *playlists*, etc.) em formato **JSON**, facilitando *backups* e a replicação de configurações.
- **Autenticação de Utilizadores:** Implementou-se um sistema de registo e *login* para proteger o acesso às funcionalidades de administração.
- **Teste de Dispositivos:** Adicionou-se uma funcionalidade para enviar um tom de teste a um nó específico, auxiliando na sua identificação e verificação de funcionamento.
- **Atualizações Dinâmicas:** A interface web é atualizada dinamicamente (ex: estado dos canais, música em reprodução) sem necessidade de recarregar a página, graças ao **SocketIO**.

Esta abordagem iterativa e modular permitiu construir um sistema robusto, flexível e com um conjunto abrangente de funcionalidades para a difusão de áudio digital multicanal.

## 7 Desafios Encontrados

Durante o desenvolvimento e implementação do Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal, a equipa deparou-se com diversos obstáculos técnicos que exigiram investigação, adaptação e a procura de soluções alternativas. Estes desafios foram cruciais para a evolução do projeto e para a obtenção da robustez da solução final.

### 7.1 Restrições da Rede Eduroam e Necessidade de Infraestrutura Dedicada

O primeiro e mais significativo desafio surgiu ao tentar utilizar a infraestrutura de rede da universidade, especificamente a rede Eduroam. Constatou-se que esta rede, por motivos de segurança e gestão de tráfego, impõe restrições à comunicação direta entre dispositivos (*peer-to-peer*), bloqueando tráfego **unicast**, **multicast** e **broadcast** essencial para o nosso sistema. Esta limitação impedia a descoberta de nós e a distribuição eficiente dos fluxos de áudio.

A solução passou pela aquisição de um **router dedicado**. Esta medida permitiu-nos criar uma rede local isolada, sobre a qual teríamos controlo total dos fluxos de dados, possibilitando a comunicação multicast e broadcast necessária para o funcionamento do sistema.

### 7.2 Limitações da Transmissão UDP Multicast Básica e Adoção de Ferramentas Especializadas

Mesmo com a rede dedicada, a transmissão inicial de áudio, que consistia no envio dos dados áudio no seu formato original (PCM) diretamente via sockets UDP multicast, revelou-se problemática. A natureza não fiável do UDP, que não garante a entrega nem a ordem dos pacotes, resultava frequentemente em perdas de dados e desordenação, levando a interrupções e uma qualidade de som deficiente.

Para ultrapassar esta limitação, foi necessário recorrer a um conjunto de ferramentas e protocolos mais robustos e especializados para o *streaming* de áudio. Integrámos o **FFmpeg** para o processamento e codificação do áudio, o protocolo **RTP (Real-time Transport Protocol)** para o transporte dos fluxos de áudio, e o codec **Opus** pela sua eficiência na compressão e baixa latência. Esta transição resultou numa melhoria substancial da qualidade e estabilidade da transmissão.

### 7.3 Desempenho do Router com Tráfego Multicast e Otimização da Taxa de Transmissão Wi-Fi

Apesar das melhorias significativas com a introdução do FFmpeg, RTP e Opus, persistia um constrangimento de desempenho quando se aumentava consideravelmente o número de canais simultâneos. Após investigação mais aprofundada, revelou-se que o problema residia na forma como muitos *routers* Wi-Fi gerem o tráfego multicast.

Por defeito, para garantir a máxima compatibilidade e alcance com todos os dispositivos cliente, os *routers* tendem a transmitir pacotes multicast e broadcast utilizando as taxas de dados mais

baixas suportadas pelo padrão Wi-Fi em vigor (conhecidas como "*basic rates*" ou taxas básicas). No nosso caso, isto significava que o tráfego multicast estava potencialmente a ser enviado a taxas tão baixas como 1 Mbps (correspondente ao padrão 802.11b, por exemplo), independentemente da capacidade superior da rede e dos dispositivos mais modernos. Esta taxa reduzida tornava-se um gargalo, limitando a quantidade de dados que poderiam ser transmitidos eficientemente para múltiplos recetores.

A solução passou por **reconfigurar as definições do router** para desativar as taxas de dados mais baixas para o tráfego multicast, forçando-o a utilizar taxas mínimas mais elevadas. Especificamente, ajustámos o *router* para que utilizasse, no mínimo, as taxas de dados do padrão **IEEE 802.11n para a banda de 2.4GHz** e **IEEE 802.11ac para a banda de 5GHz**, como ilustrado na **Figura 17**. Consultando a imagem fornecida, ambas estas especificações suportam uma taxa de dados mínima de 6.5 Mbps (correspondente ao MCS0), um valor consideravelmente superior ao 1 Mbps que estava a limitar o sistema inicialmente. Esta alteração permitiu um aumento significativo na capacidade de transmissão de canais multicast simultâneos com fiabilidade, melhorando drasticamente o desempenho geral do sistema.

Estes desafios, embora complexos, foram fundamentais para a aprendizagem da equipa e para o desenvolvimento de uma solução mais resiliente e performante.

IEEE 802.11a: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, and 54Mbps  
IEEE 802.11b: 1, 2, 5.5, and 11Mbps  
IEEE 802.11g: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, and 54Mbps  
IEEE 802.11n (2.4GHz): from 6.5 to 300Mbps (MCS0–MCS15)  
IEEE 802.11n (5GHz): from 6.5 to 300Mbps (from MCS0 to MCS15)  
IEEE 802.11ac (5GHz): from 6.5 to 867Mbps (from MCS0 to MSC9)

Figura 17: DataRates do Router D-LINK DIR-842

## 8 Conclusão

### 8.1 Considerações Finais

O desenvolvimento do Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal revelou-se uma experiência enriquecedora, tanto do ponto de vista técnico como organizacional. Este projeto permitiu a conceção de uma solução robusta e versátil, capaz de responder de forma eficiente às exigências de sonorização distribuída em ambientes de pequena a grande escala.

Ao longo da execução, foi possível validar uma série de conceitos-chave de engenharia, nomeadamente na transmissão de áudio em tempo real sobre redes Wi-Fi, à utilização de multicast e broadcast para otimização da largura de banda e à implementação de uma arquitetura centralizada, capaz de gerir múltiplas zonas de reprodução de forma dinâmica e escalável. A escolha de tecnologias como o protocolo RTP e o codec Opus, aliados ao FFmpeg e à framework Flask para a interface de gestão, foram fundamentais para garantir a qualidade sonora, a baixa latência e a facilidade de operação do sistema.

Durante o processo, enfrentámos diversos desafios, desde as restrições de comunicação da rede Eduroam até às limitações impostas pela gestão de tráfego multicast nos routers convencionais. A necessidade de contornar estes obstáculos, através da criação de uma infraestrutura de rede dedicada e da reconfiguração das taxas de transmissão Wi-Fi, proporcionou aprendizagens práticas valiosas sobre redes sem fios e comunicação em tempo real.

A solução final não só atendeu aos requisitos inicialmente estabelecidos, como também demonstrou uma capacidade de adaptação a diferentes cenários de aplicação, tais como hotéis, centros comerciais, universidades e espaços corporativos. O sistema permite uma gestão centralizada eficiente de múltiplos fluxos de áudio, assegurando uma experiência auditiva personalizada por zona, com elevada qualidade e simplicidade na operação.

Adicionalmente, a implementação de uma interface gráfica web intuitiva e a introdução de funcionalidades como o controlo de interrupções por microfone e a gestão dinâmica de playlists e streams online reforçaram a usabilidade e a flexibilidade do sistema, tornando-o apto para ambientes exigentes e em constante mutação.

Em suma, o projeto provou ser uma solução tecnicamente sólida e inovadora para o problema da difusão de áudio em múltiplas zonas via redes sem fios, abrindo caminho para futuras melhorias e aplicações em contextos profissionais. A experiência acumulada e as competências desenvolvidas ao longo do projeto constituem um alicerce importante para desafios mais complexos na área das redes, multimédia e sistemas distribuídos.



## 8.2 Trabalho Futuro

O Sistema de Difusão de Áudio Digital Multi-Canal, na sua forma atual, representa uma solução robusta e funcional. No entanto, existem diversas vias de desenvolvimento e expansão que poderiam enriquecer ainda mais as suas capacidades, aplicabilidade e desempenho. As seguintes áreas são identificadas como potenciais direções para trabalho futuro:

### 8.2.1 Otimização com Hardware Dedicado para os Nós Recetores

Atualmente, os nós recetores podem ser implementados em dispositivos genéricos como Raspberry Pis ou PCs. Uma evolução natural seria investigar e desenvolver soluções baseadas em *hardware* dedicado e mais otimizado para a receção e reprodução de áudio. Isto poderia incluir o uso de microcontroladores com capacidade de rede e processamento de áudio (DSPs – *Digital Signal Processors*) ou *System-on-Chips* (SoCs) especificamente desenhados para aplicações de áudio em rede. Tal abordagem poderia levar a uma redução de custos por nó, menor consumo energético, um formato físico mais compacto e, potencialmente, um desempenho mais estável e previsível em ambientes com muitos recetores.

### 8.2.2 Implementação de Funcionalidades Avançadas de Processamento de Áudio

Embora o sistema atual permita o controlo de volume por zona, futuras iterações poderiam incorporar funcionalidades de processamento de áudio mais sofisticadas. Isto incluiria, por exemplo:

- **Equalização por Zona/Canal:** Permitir ajustes finos de equalização (graves, médios, agudos) para cada área ou mesmo para cada canal de áudio, adaptando a sonoridade às características acústicas do espaço ou ao tipo de conteúdo.
- **Controlo Dinâmico de Amplitude (Compressão/Limitação):** Implementar compressores ou limitadores para evitar picos de volume indesejados e manter um nível de áudio mais consistente.
- **Cancelamento de Eco ou Redução de Ruído:** Especialmente útil para as interrupções por microfone, melhorando a clareza da voz.

Estas funcionalidades poderiam ser implementadas no nó central, aplicando os efeitos antes da codificação e transmissão.

### 8.2.3 Exploração de Redes Mesh (Malha) para Maior Cobertura e Resiliência

Para instalações de grande dimensão ou com topologias complexas onde a cobertura Wi-Fi de um único *router* pode ser um desafio, a transição para uma arquitetura de rede em malha (*Mesh*) para os nós recetores poderia oferecer vantagens significativas. Numa rede *Mesh*, os nós podem comunicar entre si, reencaminhando dados e estendendo o alcance da rede de forma dinâmica. Isto aumentaria a resiliência do sistema a falhas de pontos de acesso individuais e melhoraria a cobertura em áreas extensas, garantindo que todos os recetores mantêm uma ligação estável.

#### 8.2.4 Integração de um Sistema de Agendamento de Conteúdo

Uma adição valiosa seria a capacidade de agendar a reprodução de diferentes canais, *playlists* ou interrupções em horários específicos ou em função de eventos. Por exemplo, poderia ser agendada a mudança automática da música ambiente de um restaurante entre o período do almoço e do jantar, ou a emissão de anúncios programados num centro comercial. Este sistema de agendamento aumentaria a autonomia e a automatização do sistema, reduzindo a necessidade de intervenção manual constante e permitindo uma gestão mais proativa do ambiente sonoro.

A concretização destas futuras linhas de trabalho permitiria não só expandir as funcionalidades do sistema, mas também refinar a sua performance e adaptabilidade a um leque ainda mais vasto de cenários de aplicação, consolidando-o como uma solução de difusão de áudio ainda mais completa e profissional.

## Referências Bibliográficas

- **Bosch Security.** (s.d.). *Soluções de áudio comercial para endereços públicos.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.boschsecurity.com/xl/pt/solucoes/solucoes-para-enderecos-publicos/sistemas-de-audio-comercial/>
- **Yamaha Corporation.** (s.d.). *Professional Audio.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.yamaha.com/2/proaudio/>
- **Sonos.** (s.d.). *Página oficial da Sonos.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.sonos.com>
- **Sonos.** (s.d.). *Com estas colunas da Sonos vai encher a casa de música.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.must.jornaldenegocios.pt/viver/detalhe/com-estas-colunas-da-sonos-vai-encher-a-casa-de-musica>
- **Sonos.** (s.d.). *Sonos Era 300.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.sonos.com/en-us/shop/era-300>
- **Bose Corporation.** (s.d.). *Página oficial da Bose.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.bose.com>
- **The Verge.** (2022). *How Sonos Changed the Way We Listen to Music at Home.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.theverge.com/22676424/sonos-multiroom-speaker-ecosystem>
- **Telit Cinterion.** (s.d.). *IoT Modules and Connectivity Solutions.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.telit.com/>
- **Insight SIP.** (s.d.). *Ultra-miniature RF modules.* Acedido em 27 de novembro de 2022, de <https://www.insightsip.com/>
- **Silicon Labs.** (s.d.). *Wireless and IoT Solutions.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://www.silabs.com/>
- **K2Ponto.** (s.d.). *O que é o protocolo RTSP e para que ele serve?.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://k2ponto.com.br/blog/o-que-e-o-protocolo-rtsp-e-para-que-ele-serve/>
- **NetSecCloud.** (s.d.). *Understanding Multicast and Broadcast: A Beginner's Guide.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://netseccloud.com/understanding-multicast-and-broadcast-a-beginner-s-guide>
- **Wikipedia.** (s.d.). *Icecast.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://en.wikipedia.org/wiki/Icecast>
- **Wikipedia.** (s.d.). *PLC.* Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://pt.wikipedia.org/wiki/PLC>

- **Wikipedia.** (s.d.). *RTSP*. Acedido em 27 de novembro de 2024, de <https://pt.wikipedia.org/wiki/RTSP>