

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Romano Sabetzki Weirich

**Desenvolvimento de um sistema de auxílio auditivo  
para inclusão de pacientes**

Florianópolis

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Romano Sabetzki Weirich

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUXÍLIO  
AUDITIVO PARA INCLUSÃO DE PACIENTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica .

Orientador:

Prof. Dr. Eng. Djones Vinicius Lettnin

Florianópolis

2017

Weirich, Romano Sabetzki

Desenvolvimento de um sistema multimídia de auxílio auditivo para inclusão de pacientes. / Romano Sabetzki Weirich; orientador, Djones Vinicius Lettnin. - Florianópolis, SC, 2017.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Streamer de áudio. 2. dispositivos multimídia. 3. sistemas embarcados. 4. auxílio auditivo I. Lettnin, Djones Vinicius. II. Universidade Federal de Santa Catarina. III. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Desenvolvimento de um sistema multimídia de auxílio auditivo para inclusão de pacientes.

Romano Sabetzki Weirich

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUXÍLIO  
AUDITIVO PARA INCLUSÃO DE PACIENTES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 21 de março de 2017.

---

Marcelo Lobo Heldwein, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Djones Vinicius Lettnin, Dr. Eng.  
Orientador

---

Bartolomeu Ferreira Uchôa-Filho, Dr. Eng.

---

Guillaume François Gilbert Barrault,  
Dr. Eng.

---

Hector Bessa Silveira, Dr. Eng.



*À minha mãe, Jeanete do Rocil Sabetzki,  
que tornou o impossível realidade,  
e me permitiu chegar até aqui.*



## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Jeanete do Rocil Sabetzki, por todo seu esforço, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo em todos esses anos de estudo.

À WaveTech - Soluções Tecnológicas, pela estrutura, pelo apoio financeiro e pela oportunidade de fazer parte da equipe. Um agradecimento especial aos diretores Guillaume François Gilbert Barrault e Alexandre André Ferreira pela orientação profissional e por todos os ensinamentos.

À Acústica Amplivox, por todo suporte e pelas valiosas informações relacionadas ao contexto da perda auditiva e pela experiência de fazer parte de um projeto tão rico em inovação.

Ao Prof. Djones Vinicius Lettnin, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos e por todas as contribuições que certamente aprimoraram este trabalho e documento.

Ao Prof. Eduardo Augusto Bezerra, pela qualidade de suas disciplinas e por ter despertado em mim o interesse na área de programação de sistemas embarcados

Ao Laboratório de Vibrações e Acústicas e toda sua equipe, pelos equipamentos. Em especial aos membros João Paulo Ristow e Marina Bousfield, por todas as riquíssimas discussões relacionadas à interpretação de sinais de áudio.

Aos meus grandes amigos João Pedro dos Reis, Eduardo Fensterseifer Schmidt e Giulia Ciprandi, pelas incansáveis revisões do texto, momentos de descontração e conversas que moldaram o andamento deste trabalho.

Ao meu grande amigo João Marcos de Aguiar por todo o seu esforço e competência na tomada de decisões durante todo o desenvolvimento. Sem ele este trabalho não seria possível.

Aos meus colegas de trabalho Priscila Vargas Borges, André Vicente Milack e Yuri Juppa, pelo auxílio em tempo integral na empresa, pelas contribuições pertinentes quanto à etapa de modelagem e apresentação dos resultados obtidos.

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, a todos os professores do departamento; e à CAPES pela bolsa de pesquisa.



*"É curioso que passemos mais tempo  
parabenizando pessoas de sucesso do que  
encorajando as que não o obtiveram".*

Neil deGrasse Tyson



## RESUMO

A perda auditiva afeta cerca de 360 milhões de pessoas mundialmente. Ela atinge todas as faixas etárias e figura entre as doenças mais onerosas à sociedade. No Brasil, estima-se que 5% da população apresente algum grau de surdez. Com a crescente exposição a níveis de ruído cada vez maiores, a ocorrência de casos de perda auditiva severa vem aumentando em todas as idades. Em crianças, a perda auditiva está vinculada a dificuldades de aprendizado, e em adultos, a problemas ligados às atividades de trabalho e convívio; e em ambos os casos, percebe-se uma influência negativa da perda de sensibilidade auditiva na interação dos afetados em eventos sociais, tais como visitas guiadas e o ato de assistir televisão em grupo, levando ao isolamento e à diminuição da qualidade de vida. O efeito é agravado em ambientes ruidosos, como salas de aula, palestras e reuniões. As soluções comerciais disponíveis no mercado e voltadas para este problema não são compatíveis com todas as situações cotidianas vivenciadas pelos usuários. Os produtos dedicados ao uso com dispositivos multimídia não são apropriados nas situações em que o uso envolve a utilização de um microfone por parte do interlocutor, e vice-versa. Nesse contexto, a WaveTech - Soluções Tecnológicas, em parceria com a Acústica Amplivox, propõe o desenvolvimento de um sistema de auxílio auditivo voltado a ambas situações descritas anteriormente. Este documento descreve detalhadamente o fluxo de projeto desde a identificação das dificuldades enfrentadas pelos pacientes até a modelagem e implementação dos componentes de hardware e software embarcado que compõem o sistema. A solução proposta é formada por duas unidades: uma transmissora, que vai conectada à fonte sonora, e uma receptora, que disponibiliza para o usuário o som compreensível e livre de ruído. A transmissão de áudio entre as duas unidades é estabelecida através de um protocolo de comunicação sem fio adequado para todos os casos previstos. Através da realização de uma série de testes, concluiu-se que o protótipo desenvolvido atende a todos os requisitos identificados no início das atividades e que é superior aos concorrentes em termos de funcionalidades e custo.

**Palavras-chave:** Streamer de Áudio. Dispositivos Multimídia. Sistemas Embarcados. Auxílio Auditivo.



## ABSTRACT

Hearing loss affects around 360 million people worldwide. It affects all age groups and is among the most economically costly diseases to society. Only in Brazil, it is estimated that 5% of the population presents some degree of hearing impairment. The increasing exposure to high noise levels has increased the occurrence of severe hearing loss at all ages. In children, hearing loss is commonly linked to learning difficulties, and in adults, to social activities and work related problems. In both cases, a negative influence of the auditory sensitivity loss is observed in the interaction of the affected subject in social events such as guided visits and watching television in group, leading to isolation and to an overall decrease in quality of life. The effect is even worse in noisy environments, such as classrooms, lectures, and meetings. There are several commercially available products which claim they can solve this problem, but none of them is fully compatible with all daily situations experienced by the targeted users. For instance, products aiming at situations involving multimedia devices are not suitable when the sound source is a speaker using a microphone, and vice versa. In this context, WaveTech Soluções Tecnológicas, a Florianópolis based company has partnered with market leader Acústica Amplivox to propose a hearing aid device focused specifically on the aforementioned problem. This document describes in detail the complete project flow, starting at the identification of the difficulties faced by the patients, and passing through the whole modeling and implementation stages of the embedded hardware and software components comprising the system. The final solution consists of two units: a transmitter, which is connected to a generic sound source, and a receiver, which provides the user with a high quality, noise-free version of the original audio. The communication between the two units is established through a wireless protocol suitable for all cases discussed. A series of functional and performance tests determined that the developed prototype meets all the initial requirements and that it surpasses the competitors in terms of functionality and cost.

**Keywords:** Audio Streamer. Multimedia Devices. Embedded Systems. Hearing Aid.



---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	WaveTech - Soluções Tecnológicas . . . . .	2
1.2	Acústica Amplivox . . . . .	2
1.3	Motivação e justificativa . . . . .	3
1.4	Objetivos . . . . .	4
1.4.1	Objetivos Gerais . . . . .	4
1.4.2	Objetivos Específicos . . . . .	4
1.5	Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>7</b>
2.1	Deficiência auditiva . . . . .	7
2.2	Aparelhos auditivos . . . . .	9
2.2.1	Telecoil . . . . .	10
2.2.2	NFMI . . . . .	11
2.3	Auxílio auditivo em ambientes ruidosos . . . . .	12
2.3.1	Sistemas de auxílio auditivo disponíveis no mercado . . . . .	13
2.4	Sincronia de áudio e leitura labial . . . . .	14
2.5	Dimensões de salas de aula catarinenses . . . . .	16
2.6	Contexto brasileiro de televisores . . . . .	17
2.7	Métodos para transmissão de áudio sem fio . . . . .	17

2.7.1	Bluetooth . . . . .	18
2.7.2	Wi-Fi . . . . .	18
2.7.3	FM . . . . .	20
2.8	Sistemas embarcados . . . . .	20
2.9	Interfaces de comunicação de sistemas embarcados . .	22
2.9.1	I2C . . . . .	22
2.9.2	UART . . . . .	23
2.9.3	I2S . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Análise do Problema e Identificação dos Requisitos Funcionais</b>	<b>27</b>
3.1	Cenários de aplicação do produto . . . . .	27
3.2	Requisitos . . . . .	30
3.3	Análise de Viabilidade . . . . .	32
3.4	Decomposição em Módulos . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Projeto do Sistema</b>	<b>37</b>
4.1	Hardware . . . . .	38
4.1.1	Tau . . . . .	38
4.1.1.1	Especificações . . . . .	38
4.1.1.2	Soluções propostas . . . . .	39
4.1.1.2.1	Módulo de interface com o usuário . . . . .	40
4.1.1.2.2	Módulo de interface de áudio . . . . .	42
4.1.1.2.3	Módulo de gerenciamento de energia . . . . .	45
4.1.1.2.4	Módulo de processamento . . . . .	49
4.1.1.2.5	Consumo e bateria . . . . .	53
4.1.1.3	Estimativa de custo . . . . .	54
4.1.2	Ro . . . . .	54
4.1.2.1	Especificações . . . . .	54
4.1.2.2	Soluções propostas . . . . .	57
4.1.2.2.1	Módulo de interface com o usuário . . . . .	58
4.1.2.2.2	Módulo de interface com o Tau . . . . .	59
4.1.2.2.3	Módulo de interface com dispositivos <i>mobile</i> . . . . .	59

4.1.2.2.4	Módulo de condicionamento e reprodução do som . . . . .	62
4.1.2.2.5	Módulo de gerenciamento de energia . . . . .	64
4.1.2.2.6	Módulo de processamento . . . . .	65
4.1.2.2.7	Consumo e bateria . . . . .	66
4.1.2.3	Estimativa de custo . . . . .	67
4.2	Firmware . . . . .	68
4.2.1	Tau . . . . .	70
4.2.1.1	Casos de uso . . . . .	70
4.2.1.2	Arquitetura . . . . .	71
4.2.1.3	Diagrama de classes . . . . .	72
4.2.1.3.1	BtnCtrl . . . . .	73
4.2.1.3.2	I2C . . . . .	74
4.2.1.3.3	FMTX . . . . .	74
4.2.1.3.4	EMgt . . . . .	75
4.2.1.3.5	CHX . . . . .	75
4.2.1.4	Diagrama de eventos . . . . .	76
4.2.1.5	Diagrama de sequência . . . . .	78
4.2.2	Ro . . . . .	81
4.2.2.1	Casos de uso . . . . .	81
4.2.2.2	Arquitetura . . . . .	83
4.2.2.3	Diagrama de classes . . . . .	83
4.2.2.3.1	BtnCtrl . . . . .	84
4.2.2.3.2	I2C . . . . .	85
4.2.2.3.3	UART . . . . .	86
4.2.2.3.4	FMRX . . . . .	86
4.2.2.3.5	BT . . . . .	86
4.2.2.3.6	AMux . . . . .	87
4.2.2.3.7	EMgt . . . . .	88
4.2.2.3.8	CHX . . . . .	88
4.2.2.4	Diagrama de eventos . . . . .	88
4.2.2.5	Diagrama de sequência . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Implementação</b>	<b>99</b>
5.1	Hardware . . . . .	99
5.1.1	Tau . . . . .	100
5.1.1.1	Montagens em protoboard . . . . .	100

5.1.1.2	Protótipo modular . . . . .	103
5.1.1.3	Protótipo unificado . . . . .	104
5.1.1.4	Protótipo final . . . . .	105
5.1.2	Ro . . . . .	107
5.1.2.1	Montagens em protoboard . . . . .	107
5.1.2.2	Protótipo modular . . . . .	110
5.1.2.3	Protótipo unificado . . . . .	112
5.1.2.4	Protótipo final . . . . .	113
5.2	Firmware . . . . .	114
5.2.1	Tau . . . . .	116
5.2.2	Ro . . . . .	118
5.2.3	Técnicas Utilizadas . . . . .	119
5.2.4	Dificuldades Encontradas . . . . .	121
<b>6</b>	<b>Testes e resultados</b>	<b>123</b>
6.1	Testes elétricos . . . . .	123
6.1.1	Ruído de trepidação . . . . .	124
6.1.2	Consumo . . . . .	124
6.2	Testes funcionais . . . . .	126
6.2.1	Carga e descarga da bateria . . . . .	127
6.2.2	Persistência da visão . . . . .	128
6.2.3	Canais de transmissão . . . . .	129
6.2.4	Alcance . . . . .	130
6.3	Testes de qualidade do som . . . . .	131
6.3.1	Atraso . . . . .	133
6.3.2	Resposta em frequência . . . . .	134
<b>7</b>	<b>Discussão dos Resultados</b>	<b>137</b>
7.1	Testes elétricos . . . . .	137
7.1.1	Ruído de trepidação . . . . .	137
7.1.2	Consumo . . . . .	138
7.2	Testes funcionais . . . . .	139
7.2.1	Carga e descarga da bateria . . . . .	139
7.2.2	Persistência da visão . . . . .	139
7.2.3	Canais de transmissão . . . . .	139
7.2.4	Alcance . . . . .	140
7.3	Testes de qualidade do som . . . . .	141
7.3.1	Atraso . . . . .	141

---

7.3.2	Função de transferência . . . . .	141
7.4	Comparação com dispositivos comerciais . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>145</b>
8.1	Conclusão . . . . .	145
8.2	Trabalhos Futuros . . . . .	148



---

## Lista de Figuras

---

2.1	Tipos de aparelhos auditivos. Adaptado de [27] . . . . .	10
2.2	Telecoil dentro de um aparelho auditivo. Adaptado de [44]. . . . .	11
2.3	Antena NFMI em um aparelho auditivo. Adaptado de [11]	12
2.4	Dispositivos atualmente no mercado . . . . .	16
2.5	Esquema típico de um sistema FM completo (receptor e transmissor). Adaptado de [20] . . . . .	21
2.6	Fluxo I2C. Adaptado de [23] . . . . .	24
2.7	Diagrama UART. Adaptado de [12] . . . . .	25
2.8	Formato do pacote de dados UART. Adaptado de [17] .	25
2.9	Diagrama de tempo do protocolo de comunicação I2S. Adaptado de [37] . . . . .	26
3.1	Diagrama de blocos do sistema. . . . .	28
3.2	Ilustração esquemática de uma das aplicações do sistema proposto. Um usuário com perda auditiva tem a experiência de assistir televisão aprimorada. . . . .	29
3.3	Diagrama de blocos do transmissor . . . . .	33
3.4	Diagrama de blocos de receptor. . . . .	34

4.1	Circuito utilizado para a filtragem do ruído de trepidação dos botões. . . . .	41
4.2	Circuito Charlieplexing usando 4 pinos. . . . .	42
4.3	Esquemático utilizado com o transmissor FM Si4713. . . . .	45
4.4	Esquemático utilizado com o carregador de bateria BQ24266. . . . .	48
4.5	Esquemático utilizado com o monitor de bateria BQ27411. . . . .	50
4.6	Conexões do microcontrolador MSP430G2553IPW20. . . . .	53
4.7	Esquemático utilizado com o receptor FM Si4705. . . . .	60
4.8	Esquemático utilizado com o módulo Bluetooth BM23. . . . .	62
4.9	Filtro passa-baixas LC utilizado. . . . .	64
4.10	Conexões do microcontrolador MSP430G2553IPW28. . . . .	67
4.11	Principais casos de uso modelados para o software embarcado. . . . .	70
4.12	Arquitetura proposta para o software embarcado do Tau. . . . .	71
4.13	Diagrama de classes simplificado do firmware proposto para o Tau. . . . .	73
4.14	Diagrama de eventos do firmware proposto para o Tau. . . . .	77
4.15	Diagrama de sequência de operação normal do sistema. . . . .	79
4.16	Diagrama de sequência considerando uma troca de canal. . . . .	80
4.17	Diagrama de sequência considerando o desligamento do sistema após uma ciclo de operação normal. . . . .	81
4.18	Principais casos de uso modelados para o software embarcado. . . . .	82
4.19	Diagrama de classes do <i>firmware</i> . . . . .	84
4.20	Diagrama de eventos do firmware proposto para o Ro. . . . .	90
4.21	Diagrama de sequência de operação normal do sistema. . . . .	93
4.22	Diagrama de sequência considerando uma troca de canal. . . . .	94
4.23	Diagrama de sequência considerando o envio de um comando de pareamento. . . . .	95
4.24	Diagrama de sequência considerando o envio de um comando para aumentar o volume. . . . .	96
4.25	Diagrama de sequência considerando o desligamento do sistema após uma ciclo de operação normal. . . . .	97
5.1	Placa de desenvolvimento <i>Launchpad</i> MSP430G2 da Texas Instruments. . . . .	101

5.2	Placa de desenvolvimento do Si4713 fabricado pela Adafruit. . . . .	101
5.3	Placas auxiliares criadas para os circuitos integrados do Módulo de gerenciamento de energia. À esquerda, está a placa dedicada para o BQ27411 e, à direita, a placa dedicada para o BQ24266. . . . .	102
5.4	Placa auxiliar criadas para o Charlieplexing de quatro pinos utilizado no display luminoso do Módulo de interface com o usuário. . . . .	102
5.5	Layout da placa base em que os demais módulos do Tau são acoplados. . . . .	104
5.6	Protótipo modular do Tau montado. . . . .	105
5.7	<i>Layout</i> da placa do protótipo unificado do Tau. . . . .	105
5.8	Protótipo unificado do Tau. . . . .	106
5.9	<i>Layout</i> da placa do protótipo final do Tau. . . . .	106
5.10	Protótipo final do Tau. . . . .	107
5.11	Protótipo final do Tau dentro da carcaça fabricada em impressora 3D. . . . .	107
5.12	Placa de desenvolvimento do Si4705 fabricado pela SparkFun. . . . .	108
5.13	Placa auxiliar criada para o módulo Bluetooth BM23 utilizado no Módulo de interface com dispositivos <i>mobile</i> . . . . .	109
5.14	Montagem em <i>protoboard</i> para teste do circuito e do <i>software</i> . . . . .	109
5.15	Placas auxiliares com os circuitos integrados utilizados na unidade receptora. . . . .	110
5.16	<i>Layout</i> da placa eletrônica em que as PCIs auxiliares são acopladas. . . . .	111
5.17	Protótipo com todos os módulos conectados. . . . .	111
5.18	<i>Layout</i> da placa do protótipo unificado do Ro. . . . .	112
5.19	Protótipo unificado do Ro. . . . .	113
5.20	<i>Layout</i> da placa do protótipo final do Ro. . . . .	114
5.21	Protótipo final do Ro. . . . .	114
5.22	Emulador de flash da Texas Instruments. . . . .	115
5.23	Captura de tela da janela principal do GRACE em um projeto que utiliza o MSP430G2553. . . . .	116
6.1	Ruído de trepidação sem o filtro. . . . .	124

6.2	Sinal do botão após a aplicação do filtro. . . . .	125
6.3	Gráfico do consumo do prototipo. . . . .	125
6.4	Display Charlieplexing com todos os LEDs aparentemente acesos. . . . .	128
6.5	Sinais de controle de um pino do Charlieplexing. . . . .	129
6.6	Arranjo de testes utilizado na determinação dos canais de transmissão. . . . .	130
6.7	Determinação dos canais de transmissão. . . . .	131
6.8	Arranjo de testes utilizado na medição da influência do sistema na qualidade do som reproduzido. . . . .	132
6.9	Esquemático de conexões entre a placa de aquisição de dados e o sistema desenvolvido. . . . .	132
6.10	Correlação cruzada entre o sinal emitido e adquirido. . . . .	133
6.11	Espectrograma dos sinais emitido e medido. . . . .	134
6.12	Resposta em frequência entre os sinais de excitação e medido. . . . .	135
6.13	Resposta em frequência entre os sinais de excitação e medido com representação em bandas de 1/6 de oitava. . . . .	135

---

## Lista de Tabelas

---

2.1	Níveis de deficiência auditiva e recomendações . . . . .	8
2.2	Tabela de análise de mercado. . . . .	15
2.3	Quantidade anual de televisores analógicos, com tela de plasma e com tela de LCD vendidos no período entre 2008 e 2014. . . . .	17
2.4	Classes do Bluetooth . . . . .	19
2.5	Características dos padrões Wi-Fi . . . . .	19
4.1	Modos de operação do carregador de bateria BQ24266 da Texas Instruments . . . . .	48
4.2	Descrição dos pinos necessários na interface com os demais módulos do Tau . . . . .	52
4.3	Lista de modos de operação do MSP430G2553 . . . . .	52
4.4	Descrição do consumo dos módulos que compõe o Tau. . . . .	54
4.5	Descrição dos pinos necessários na interface com os demais módulos do Tau. . . . .	55
4.6	Descrição dos pinos necessários na interface com os demais módulos do Ro. . . . .	66
4.7	Descrição do consumo dos módulos que compõem o Ro. . . . .	68
4.8	Estimativa de custo com componentes eletrônicos para a montagem do Ro. . . . .	69

---

4.9	Descrição dos estados da máquina de estados (FSM) do Tau. . . . .	78
4.10	Descrição dos eventos de transição do diagrama . . . .	78
4.11	Descrição dos estados da máquina de estados (FSM) do Ro. . . . .	91
4.12	Descrição dos eventos de transição do diagrama. . . .	92
5.1	Arquivos que compõem o firmware do Tau. . . . .	117
5.2	Arquivos que compõem o firmware do Tau. . . . .	118
6.1	Descrição do consumo dos módulos que compõe o Tau. . . . .	126
6.2	Descrição do consumo dos módulos que compõe o Ro. . . . .	126
6.3	Tabela de duração da bateria . . . . .	127
6.4	Alcance do sistema. . . . .	131
7.1	Tabela de análise de mercado. . . . .	143

---

## Lista de Abreviaturas

---

**AASI** Aparelhos de Amplificação Sonora Individual.

**ABS** *Anti-lock breaking system*, ou sistema de frenagem à prova de travamento das rodas, em tradução livre.

**ACK** *Acknowledgement Signal*, um dos sinais gerados durante a comunicação I2C.

**A/D** *Analog to Digital Converter*, ou conversor analógico-digital, em tradução livre.

**AM** *Amplitude Modulation*, ou modulação em amplitude, em tradução livre.

**ANVISA** Agência Nacional de Vigilância Sanitária.

**BLE** *Bluetooth Low Energy*, uma versão de baixo consumo do protocolo Bluetooth.

**BR** *Bit Rate*, ou taxa de transmissão de bits, em tradução livre.

**BTE** *Behind The Ear hearing aid*, ou aparelho auditivo atrás do ouvido, em tradução livre.

**CAD** *Computer-Aided Design*, ou desenvolvimento assistido por computador, em tradução livre.

- CCS** Code Composer Studio, o ambiente de desenvolvimento integrado da Texas Instruments.
- CIC** *Completely In Canal hearing aid*, ou aparelho auditivo completamente dentro do canal, em tradução livre.
- D/A** *Digital to Analog Converter*, ou conversor digital-analógico, em tradução livre.
- VINDPM** *Dynamic Power Management*, uma rotina de otimização do gerenciamento de carga e descarga de bateria.
- DSP** *Digital Signal Processor*, ou processador digital de sinais, em tradução livre.
- EDR** *Enhanced Data Ratio*, uma modificação do protocolo Bluetooth que oferece maior capacidade de transmissão de dados.
- ESD** *Electrostatic discharge*, ou descarga eletrostática, em tradução livre
- FET** *Flash-Emulation Tool*, ou emulador de Flash, em tradução livre.
- FIFO** *First In, First Out*, uma estrutura do tipo fila, em que o primeiro dado armazenado é o primeiro a ser lido.
- FM** *Frequency Modulation*, ou modulação em frequência, em tradução livre.
- FRF** Função Resposta em Frequência.
- FSM** *Finite State Machine*, ou máquina de estados finitos, em tradução livre.
- GFSK** *Gaussian Frequency Shift Keying*, uma técnica de modulação digital.
- GPIO** *General-Purpose Input/Output*, ou porta digital de entrada e saída de propósito geral, em tradução livre.
- GRACE** *Graphical Peripheral Configuration Tool*, uma ferramenta gráfica para geração automática de código de alguns microcontroladores da Texas Instruments.

- HFP** *Hands-Free Profile*, um perfil de Bluetooth para transmissão de áudio e comandos.
- I2C** *Inter-Integrated Circuit*, uma interface digital voltada à comunicação serial síncrona.
- I2S** *Inter-IC Sound*, um protocolo de comunicação digital voltado à transmissão de sinais de áudio.
- IBGE** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IDE** *Integrated Development Environment*, ou ambiente de desenvolvimento integrado, em tradução livre.
- IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, ou instituto de engenheiros eletricitistas e eletrônicos, e tradução livre.
- I/O** *Input / Output digital port*, ou porta digital de entrada e saída, em tradução livre.
- IoT** *Internet of Things*, ou internet das coisas, em tradução livre.
- ITC** *In The Canal hearing aid*, ou aparelho auditivo dentro no canal.
- ITE** *In the Ear Hearing aid*, ou aparelho auditivo dentro do ouvido, em tradução livre.
- LCD** *Liquid-crystal display*, ou display de cristal líquido, em tradução livre.
- LED** *Light-Emitting Diode*, ou diodo emissor de luz, em tradução livre.
- LPM** *Low-Power Mode*, ou modos de baixo consumo, em tradução livre.
- LVA** Laboratório de Vibrações e Acústica.
- MCU** *Microcontroller Unit*, ou microcontrolador, em tradução livre.
- NFMI** *Near Field Magnetic Induction*, uma interface digital voltada à comunicação sem fio.
- NIDCD** *National Institute on Deafness and Other Communication Disorders*, ou Instituto Nacional de Surdez e Outras Disfunções de Comunicação, em tradução livre.

**OMS** Organização Mundial da Saúde.

**PCI** Placa de Circuito Impresso.

**PGEAS** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

**PGEEL** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

**QoS** *Quality of Service*, ou qualidade de serviço, em tradução livre.

**RBDS** *Radio Broadcast Data System*, o sistema americano de transmissão de dados digitais usando emissores de radiodifusão em FM.

**RCA** *Radio Corporation of America*, empresa que desenvolveu o padrão RCA.

**RDS** *Radio Data System*, o sistema de transmissão de dados digitais usando emissores de radiodifusão em FM.

**RPS** *Receive Power Scan*, ou leitura da potência recebida, em tradução livre.

**SBW** *Spy-Bi-Wire*, um protocolo de comunicação serial desenvolvido pela Texas Instruments.

**SCL** *Serial Clock*, o terminal da interface I2C responsável pela transmissão do sinal de relógio.

**SDA** *Serial Data*, o terminal da interface I2C responsável pela transmissão de dados.

**SIG** *Special Interest Group*.

**SUS** Sistema único de saúde.

**TI** Texas Instruments.

**UART** *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, uma interface digital voltada à comunicação serial assíncrona.

**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina.

**UHF** *Ultra-High Frequency*, uma faixa do espectro de frequências entre 300 MHz e 3 GHz.

**USB** *Universal Serial Bus*, uma interface de comunicação digital

**WMM** *Wireless Media Extension*, um padrão de Wi-Fi que oferece qualidade de serviço.



# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

---

A perda auditiva é definida como a incapacidade parcial ou total de se ouvir estímulos sonoros. Uma pessoa considerada surda apresenta pouquíssima ou nenhuma audição. Em humanos, a perda auditiva pode afetar as duas orelhas independentemente e pode ser temporária ou permanente. A presbiacusia, que é a perda da capacidade auditiva em função do envelhecimento, é uma consequência natural da idade. Em geral, a audição humana começa a se deteriorar partir dos 30 ou 40 anos de idade e a deterioração avança quando se atinge a faixa etária de 80 anos. Entretanto, a crescente exposição a níveis cada vez mais altos de ruído vem aumentando o número de casos de pessoas com graus severos de deficiência auditiva em todas as idades. Em crianças, a deficiência é comumente relacionada a dificuldades de aprendizado; já em adultos, existem problemas associados às atividades de trabalho. E, em ambos os casos, percebe-se grande influência negativa da perda auditiva em seus convívios sociais e em suas qualidades de vida [26].

Com base no contexto exposto e a partir de uma demanda identificada pelas empresas WaveTech - Soluções Tecnológicas e Acústica Amplivox, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo multimídia de auxílio auditivo capaz de promover a inclusão social de

deficientes auditivos, protetizados ou não, através do aprimoramento do sinal sonoro disponibilizado a eles.

## 1.1 WaveTech - Soluções Tecnológicas

A WaveTech - Soluções Tecnológicas é uma *startup* incubada no Parque Tecnológico Alfa em Florianópolis/SC. É uma empresa de alta tecnologia voltada à área de engenharia biomédica, e foi fundada em 2012. Iniciou suas atividades através de consultorias nas áreas de bioengenharia e processamento de sinais. Devido à sua experiência com ênfase em aparelhos auditivos e implantes cocleares, a empresa foi contratada para supervisionar e desenvolver, em conjunto com outras duas empresas, o primeiro chip de aparelho auditivo digital feito no Brasil.

A WaveTech é a representante de tecnologia e inovação de uma de suas empresas parceiras chamada Amplivox. Elas trabalham em conjunto no desenvolvimento de soluções inseridas no contexto de dispositivos indicados para usuários com perda auditiva.

Atualmente, a empresa conta com aproximadamente 30 colaboradores e o primeiro aparelho auditivo produzido pela WaveTech está nas etapas finais de produção. A empresa aguarda a aprovação da ANVISA para iniciar a comercialização deste produto através da rede de saúde do Sistema Único de Saúde (SUS).

## 1.2 Acústica Amplivox

A Acústica Amplivox é uma empresa pioneira na fabricação de aparelhos auditivos no Brasil com diversas sedes localizadas no Rio Grande do Sul. Ela está há mais de 30 anos no mercado e sua infraestrutura conta com uma fábrica, diversos laboratórios e uma rede de lojas para distribuição de seus produtos. Além de aparelhos auditivos, a Amplivox oferece peças e acessórios inseridos no contexto de perda auditiva.

No momento, a empresa está ampliando seu portfólio e optou por investir no desenvolvimento tecnológico de soluções de auxílio auditivo para incorporar seu catálogo. Com a proposta de projeto que deu origem a este trabalho, a Amplivox foi selecionada em 2013 para participar do programa TECNOVA-RS, que é um programa de incentivo e

fomento ao desenvolvimento de produtos, serviços ou processos inovadores. A verba utilizada durante desenvolvimento deste projeto foi concedida pelo programa.

### **1.3 Motivação e justificativa**

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), atualmente a perda auditiva é umas deficiências mais comuns. Ela afeta cerca de 360 milhões de pessoas mundialmente e figura entre as doenças mais onerosas à sociedade [42]. Por diversos motivos, como o aumento da intensidade do ruído de fundo em muitos ambientes e o mau uso de equipamentos eletrônicos, existe uma previsão de que essa deficiência progrida 8 posições no encargo mundial de doenças até 2030, atingindo a sétima posição [43]. A população de baixa renda é a mais afetada, principalmente pela falta de acesso à prevenção, cuidados médicos e pela incapacidade financeira para a compra e manutenção de próteses auditivas adequadas [43]. O Censo de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) contabilizou 9,8 milhões de brasileiros com deficiência auditiva, o que representa 5,2% da população do país. Deste total, 2,6 milhões eram surdos e 7,2 milhões apresentavam grande dificuldade de ouvir [15].

Comumente, a perda auditiva está associada à dificuldades na comunicação e, conseqüentemente, ao isolamento social e a diminuição da qualidade vida. Tradicionalmente, o tratamento conta com a utilização de aparelhos de amplificação sonora individual (AASI) [8]. Entretanto, durante o uso de aparelhos como telefones e televisores, a percepção do deficiente pode ser prejudicada pela interação inadequada entre estes dispositivos e o AASI, ou pela competição do áudio de interesse com o ruído ambiente. Além disso, em eventos sociais, como assistir à televisão em grupo, é comum deficientes apresentarem dificuldades. Nessas circunstâncias, aumentar o volume do televisor causa desconforto e irritação às pessoas com audição normal, e pode não ser uma solução satisfatória para o deficiente em termos de inteligibilidade. A situação descrita é fonte frequente de discórdia e pode levar a dificuldades de interação, inclusão e, novamente, ao isolamento do deficiente.

Problemas semelhantes são encontrados quando uma pessoa com

perda auditiva vai ao cinema, assiste uma palestra, vai à sala de aula, participa de uma visita guiada, reuniões, ou qualquer atividade cujo som é transmitido para um grande grupo de pessoas. O deficiente auditivo não recebe o som emitido de forma clara, tornando difícil a comunicação.

Para amenizar este problema, muitos AASI apresentam interfaces de comunicação sem fio que permitem a transmissão direta som para o aparelho auditivo, eliminando o ruído proveniente do ambiente.

Nesse contexto, a Amplivox e a WaveTech propõem, através deste trabalho, o desenvolvimento de um equipamento de auxílio auditivo indicado para todas as idades, com uma interface simples, moderna e intuitiva capaz de aprimorar o áudio de aparelhos eletrônicos, como televisores e telefones.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivos Gerais**

O principal objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um sistema de transmissão e recepção de áudio portátil e sem fio que auxilie deficientes auditivos de qualquer idade nas suas funções diárias, como assistir televisão, aulas e palestras. Objetiva-se proporcionar inclusão social a estes usuários, diminuindo as dificuldades enfrentadas em ambientes ruidosos e facilitando a realização de atividades sociais com pessoas de audição normal.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Mais especificamente, o projeto possui os seguintes objetivos:

- Avaliar técnicas e metodologias presentes na literatura utilizadas no enlace de transmissão de áudio para deficientes auditivos;
- Modelar o funcionamento de uma solução para o problema descrito;
- Desenvolver e implementar a solução proposta;
- Avaliar o desempenho do sistema desenvolvido;

- Comparar os resultados com dispositivos disponíveis no mercado.

## 1.5 Organização do Trabalho

Este documento está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 faz uma introdução a alguns fundamentos teóricos necessários para o entendimento do trabalho, incluindo tópicos relacionado à perda auditiva e tecnologias utilizadas na transmissão de áudio;
- O Capítulo 3 apresenta as expectativas das empresas em relação ao produto desenvolvido durante este trabalho. A partir delas, os principais requisitos foram identificados. O capítulo termina com a divisão do sistema em módulos funcionais, utilizados para orientar o projeto;
- O Capítulo 4 descreve o fluxo de projeto adotado para o hardware e firmware do sistema desenvolvido. Justifica-se a escolha de todos os dispositivos eletrônicos utilizados e todas as suas funcionalidades são apresentadas. Do ponto de vista da modelagem do software embarcado desenvolvido, diagramas de casos de uso, arquitetura, classes, eventos e sequência são apresentados.
- O Capítulo 5 apresenta os principais detalhes de implementação do sistema, relatando os avanços cronológicos do hardware e as ferramentas e técnicas utilizadas no desenvolvimento do firmware.
- O Capítulo 6 apresenta a metodologia aplicada aos testes realizados e os principais resultados obtidos. Testes elétricos, funcionais e de qualidade do som são abordados.
- O Capítulo 7 realiza uma breve discussão sobre os resultados apresentados no capítulo anterior.
- O Capítulo 8 finaliza o documento, relatando de forma sucinta as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho,

e descreve os trabalhos futuros que possam dão continuidade ao que foi apresentado.

# CAPÍTULO 2

---

## Fundamentação Teórica

---

Este capítulo introduz brevemente alguns conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho e de seus requisitos. Os tópicos abordados incluem noções básicas sobre deficiência auditiva e aparelhos auditivos, e algumas questões relacionadas ao alcance, interfaces de áudio e qualidade do som também estão presentes. Adicionalmente, três tecnologias voltadas a transmissão de áudio sem fio e alguns princípios básicos relacionados a sistemas embarcados são abordados.

Aspectos mais pragmáticos são discutidos nos capítulos referentes às etapas de projeto e aos detalhes de implementação do sistema desenvolvido.

### **2.1 Deficiência auditiva**

Segundo a OMS mais de 360 milhões de pessoas ao redor do mundo sofrem de algum grau de deficiência auditiva [42]. A origem da perda de sensibilidade pode estar associada a diversas inconformidades em diferentes elementos do sistema adutivo e pode ter um padrão irregular ao longo do espectro de frequências audíveis [45].

De acordo com a OMS, a deficiência auditiva é dividida em 4 níveis

Tabela 2.1: Níveis de deficiência auditiva e recomendações

Nível	Valor Audiométrico ISO Equivalente	Performance	Recomendação
0	25 dB ou melhor (melhor ouvido)	Nenhum ou pouco problema de audição. Capaz de ouvir sussuros.	
1	26-40 dB (melhor ouvido)	Capaz de ouvir e repetir palavras faladas em voz normal há 1 metro.	Assistência. Aparelhos auditivos podem ser necessários.
2	41-60 dB (melhor ouvido)	Capaz de ouvir e repetir palavras faladas em voz elevada a um metro.	Aparelhos auditivos normalmente recomendados.
3	61-80 dB (melhor ouvido)	Capaz de ouvir algumas palavras quando gritado no melhor ouvido.	Aparelho auditivo necessário. Se nenhum aparelho auditivo estiver disponível, leitura de lábios e linguagem de sinais devem ser ensinadas.
4	81 dB ou mais (melhor ouvido)	Incapaz de ouvir e entender mesmo com voz gritada.	Aparelhos auditivos podem ajudar a entender palavras. Reabilitação adicional necessária. Leitura labial e, algumas vezes, linguagem de sinais.

que representam a sua gravidade [41]. Para determinar-se o nível de perda de sensibilidade realiza-se um teste chamado audiometria. Nele o paciente é exposto a tons sonoros puros através de fones de ouvido e sinaliza ao aplicador o limiar de audição para frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 Hz. O nível de audição em decibéis (*decibel Hearing Level* - dB HL) é uma escala normalizada utilizada em audiometrias, na qual o nível de audição considerado normal é corrigido para 0 dB em todas as frequências. A Tabela 2.1 define cada nível e apresenta as respectivas recomendações propostas pela OMS [41]. Perdas maiores que 40 dB HL (nível 2 ou maior), em que dificuldades de interação social podem ser significativas, são consideradas deficiências auditivas incapacitantes.

De acordo com a Tabela 2.1, observa-se a recomendação do uso de aparelhos de auxílio auditivo na maioria dos casos.

## 2.2 Aparelhos auditivos

Um aparelho auditivo é um dispositivo eletrônico composto basicamente por um microfone, um amplificador e um alto falante. Ele amplifica diferentemente o som ao longo do espectro de frequências audíveis de acordo com as necessidades de cada paciente. O aparelho permite ao usuário ouvir e se comunicar melhor, mesmo com algum grau de perda auditiva, e, conseqüentemente, participar de atividades diárias de maneira mais completa. A produção de aparelhos auditivos atende a menos de 10% da necessidade global [43] e, em países em desenvolvimento, apenas 1 entre cada 40 pessoas que necessitam da prótese tem a oportunidade de utilizá-la [26].

O Instituto Nacional de Surdez e Outras Disfunções de Comunicação (NIDCD) dos Estados Unidos classifica os aparelhos auditivos em três categorias: Retroauricular (BTE), Intra-Auricular (ITE) e Canal [27].

Os aparelhos auditivos retroauriculares são compostos por uma caixa de plástico posicionada atrás do ouvido e conectada a um molde auricular. O molde se encaixa dentro da parte externa do ouvido do paciente. O som parte do aparelho e viaja para dentro do ouvido através do molde auricular. Este tipo de aparelho é indicado para pacientes de todas as idades com perda auditiva leve a profunda [27].

Existe uma variação do aparelho BTE chamado de retroauricular de adaptação aberta. É pequeno e cabe completamente atrás do ouvido. O tubo inserido no canal auditivo é fino, mantendo-o aberto. É indicado para usuários com perda auditiva em rampa leve ou moderadamente severa [27].

Um ITE cabe completamente na parte exterior da cavidade da orelha. A carcaça que envolve os componentes eletrônicos é feita de plástico rígido. Este tipo de aparelho é indicado para situações de perda auditiva leve a severa. Raramente é indicado para crianças, pois o crescimento do ouvido exigiria a troca periódica do dispositivo [27].

Os aparelhos do tipo canal são indicados para pacientes com perdas auditivas leves a moderadamente severas. Adicionalmente, são ramificados em dois estilos: O intra-canal (ITC) e o completamente dentro do canal (CIC). O ITC é moldado para encaixar no tamanho e forma do canal auditivo do usuário, enquanto o CIC é praticamente escondido dentro do canal [27].

A Figura 2.1 mostra cada um dos tipos de aparelho auditivos mencionados anteriormente.



Figura 2.1: Tipos de aparelhos auditivos. Adaptado de [27]

Alguns destes dispositivos, além de auxiliarem na audição do som ambiente, permitem a utilização de tecnologias de transmissão de áudio direto para o aparelho auditivo, facilitando tarefas como atender o telefone ou assistir aulas e palestras. Dentre essas tecnologias destacam-se o telecoil (t-coil) e o NFMI.

### 2.2.1 Telecoil

Telecoil é nome que se dá para uma pequena bobina presente no interior dos aparelhos auditivos. Ela funciona como um pequeno receptor que captura o sinal do sistema em laço que funciona como um campo magnético. O sinal gerado é interpretado como um sinal áudio analógico [44]. A Figura 2.2 mostra o telecoil dentro de um aparelho auditivo.

O telecoil foi desenvolvido em 1938 com o propósito de facilitar o uso do telefone por deficientes auditivos, e sua evolução permitiu que fosse utilizado em outras funções. Por exemplo, com o advento



Figura 2.2: Telecoil dentro de um aparelho auditivo. Adaptado de [44].

das salas com laço de indução, usuários que possuem telecoil em seus aparelhos auditivos podem usufruir de um som mais limpo em ambientes ruidosos, como salas de aula e palestras. Isso ocorre pois o usuário recebe diretamente o áudio transmitido pelo emissor sem o ruído inserido pelo ambiente [18].

### 2.2.2 NFMI

Uma das abordagens mais comuns para a comunicação sem fio em aparelhos auditivos é o *Near-Field Magnetic Induction* (NFMI), cuja comunicação é semelhante a do telecoil. A gama de frequências utilizada varia de 3MHz a 15MHz [11].

A tecnologia NFMI apresenta algumas vantagens. Primeiramente, o hardware utilizado para realizar a transmissão de dados está bem estabelecido no mercado, de forma que todos os fabricantes de aparelhos auditivos têm acesso. Além disso, o NFMI opera em uma banda de frequência que se propaga facilmente através e ao redor da cabeça e do corpo humano, o que permite a comunicação ouvido-a-ouvido entre os aparelhos auditivos, essencial para a processamento digital de sinais binaural [11].

A principal desvantagem da tecnologia NFMI é a sua distância de transmissão limitada a aproximadamente 1 metro. A Figura 2.3 mostra uma antena NFMI dentro de um aparelho auditivo.

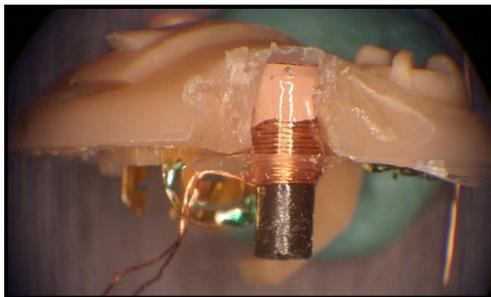


Figura 2.3: Antena NFMI em um aparelho auditivo. Adaptado de [11]

### 2.3 Auxílio auditivo em ambientes ruidosos

O ruído de fundo, que inclui o som do tráfego, música, crianças brincando e reverberação, é considerado o principal problema no uso de aparelhos auditivos. Um estudo recente aponta que em ambientes silenciosos há, essencialmente, pouca alteração no processamento dos estímulos sonoros realizado pelo nervo da cóclea em indivíduos com e sem perda auditiva. Entretanto, repetindo o teste em um ambiente ruidoso, observou-se uma maior falta de sincronia no nervo de pessoas com perda auditiva do que em pessoas com audição normal, provocando queda de eficácia mais significativa no sistema neural do ouvido. O estudo conclui, portanto, que ambientes ruidosos provocam um efeito muito mais severo na diminuição da inteligibilidade do discurso para indivíduos com perda auditiva [13].

Apesar dos avanços feitos na área de processamento de sinais, ainda é muito difícil cancelar eficientemente o ruído de fundo captado pelos aparelhos auditivos sem afetar o sinal de interesse. Nesse contexto, uma tendência atual é a indicação do uso de dispositivos que transmitam o áudio para os aparelhos auditivos através de ondas eletromagnéticas, imunes aos efeitos do ruído de fundo. Entre esses sistemas, dois tipos se destacam, os que utilizam uma bobina indutiva, e os que transmitem o áudio através do protocolo de comunicação Bluetooth.

Os dispositivos compostos por bobinas indutivas utilizam a energia eletromagnética para transmitir o som. Usualmente, envolvem quatro módulos: uma fonte sonora (microfone, televisão, telefone), um amplificador, uma bobina instalada ao redor da sala onde acon-

tecerá a transmissão e um receptor *wearable* utilizado pelo deficiente auditivo. O som amplificado é transmitido através do campo eletromagnético induzido pela bobina instalada ao redor da sala e é captado diretamente pelo telecoil ou pela bobina presente no módulo receptor (utilizado por indivíduos que utilizam aparelhos auditivos sem telecoil). Para receber o sinal sonoro, o usuário deve estar dentro, ou próximo do local de instalação da antena. Como o sinal é disponibilizado diretamente ao aparelho auditivo, o som recebido pelo usuário é muito mais limpo e livre do ruído de fundo presente em muitos ambientes [28].

Os sistemas Bluetooth utilizam ondas de rádio frequência para transmitir o sinal sonoro amplificado. É comumente utilizado em salas de aula, onde um professor utiliza um pequeno microfone conectado a um módulo transmissor e um eventual estudante com perda auditiva utiliza um receptor, ambos sintonizados na mesma frequência ou canal. Em muitos casos, é possível estabelecer a comunicação diretamente entre o módulo receptor e o telecoil. Nessas condições, o ouvinte deve utilizar uma espécie de colar indutivo ao redor do pescoço. Ele vai conectado ao módulo receptor e funciona como uma bobina, transmitindo o áudio através do campo eletromagnético para o telecoil. Sistemas Bluetooth podem ter dezenas de metros de alcance e podem ser utilizados em muitos ambientes abertos. Entretanto, isso pode ser um problema, considerando que as ondas de RF atravessam paredes, e podem gerar interferência em usuários de salas diferentes.

### **2.3.1 Sistemas de auxílio auditivo disponíveis no mercado**

Atualmente, diversos dispositivos disponíveis no mercado realizam a transmissão de áudio para deficientes auditivos. Diferentes tecnologias são utilizadas para a transmissão. Alguns dos fabricantes desses dispositivos são: Amplicomms, Humantechnik, Phonak, Hearing Prod e Sarabec. A Figura 2.4 introduz seus principais produtos nessa área e suas principais características e modo de operação são apresentados a seguir.

O dispositivo da Amplicomms é o TV 2410NL, composto por uma base transmissora conectada à televisão e um receptor em formato de colar que permite que o áudio recebido seja transmitido para o telecoil do aparelho auditivo. A comunicação entre base e receptor é feita

em UHF digital na frequência de 2.4GHz, com codificação GFSK, e o tempo de autonomia do receptor de até 5 horas [4].

O *Swing Digital LR* da Hummantechnik, similar ao da Amplicomms, transmite o sinal de áudio da televisão através de uma base e a recepção é feita em um colar utilizado pelo usuário. A comunicação de dados é feita através de rádio digital na frequência de 2.4GHz e a comunicação com o aparelho auditivo é feita através do telecoil [14].

A Phonak oferece dois produtos: o ComPilot e o Phonak TV link. O primeiro utiliza a tecnologia Bluetooth para se conectar com outros dispositivos, permitindo que o usuário atenda ligações ou ouça música. A conexão com o telecoil do aparelho auditivo é estabelecida através do colar indutivo do ComPilot. O TV Link é utilizado em conjunto com o ComPilot. Ele transmite o sinal de áudio da televisão e o ComPilot funciona como receptor [30] [31].

O Echo<sup>®</sup> MegaLoop DAC<sup>™</sup>, é composto por um transmissor conectado a um laço de indução que é instalado ao redor da sala onde a comunicação será realizada. A transmissão ocorre através de indução magnética e os usuários recebem o áudio diretamente em seu aparelhos auditivos, sem o uso de colares ou receptores [33].

De forma similar, o LA215, da Sarabec, é composto apenas por um transmissor, que deve ser acompanhado da instalação de um laço de indução na sala onde o dispositivo irá operar [35].

A Tabela 2.2 apresenta resumidamente as principais características de cada um destes produtos.

## 2.4 Sincronia de áudio e leitura labial

Em aplicações que envolvem áudio e vídeo, por exemplo, a sincronização entre estes dois sinais pode ser muito importante. Se a defasagem entre os sinais ultrapassar um limiar, o usuário terá a sensação de falta de sincronia entre as informações. Para minimizar esse efeito, padrões de processamento de áudio, como o *Dolby*<sup>®</sup>, definem que o áudio pode estar, no máximo, adiantado de 5 e atrasado de 15 *ms*.

Essa questão é ainda mais severa em situações envolvendo deficientes auditivos que necessitam realizar a leitura labial para atingir graus satisfatórios em termos de inteligibilidade. Nesses casos, é fundamental que o som reproduzido pelos seus aparelhos auditivos es-

Tabela 2.2: Tabela de análise de mercado.

Fabricante Produto	Amplicomms TV 2410NL	Humantechnik Swing Digital LR	Phonak TV LinkS/ComPilot	HearingProd Megalooop DAC	Sarabec LA215
Fontes sonoras suportadas	Microfone	Microfone	Microfone + TV	TV	TV
Microfone interno (som ambiente)	Sim	Não	Sim	Sim	Não
Saída compatível com fones de ouvido	Sim	Sim	Sim	1	1
Funcionalidade Hands-Free	Não	Não	Sim	Não	Não
Ajustes de volume, tom e balanço	Sim	Sim	Apenas volume	Apenas volume	Sim
Mono / Estéreo	Ambos	Ambos	Ambos	Estéreo	Estéreo
Alcance	30 m	10 m	30 m	1	1
Número máximo de ouvintes	1	1	1	Ilimitado	Ilimitado
Alimentação do transmissor	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC
Alimentação do receptor	Bateria	Bateria	Bateria	1	1
Autonomia da bateria do receptor	5h	6h	8h	1	1

<sup>1</sup> Não possui receptor. Uma bobina indutiva é instalado ao redor da sala de transmissão.



(a) TV 2410NL.



(b) Swing Digital LR.



(c) ComPilot.



(d) Phonak TV link.

(e) Echo MegaLoop  
DAC.

(f) LA 215.

Figura 2.4: Dispositivos atualmente no mercado

teja em extrema sincronia com o que esses indivíduos enxergam. Uma latência maior que  $10\text{ ms}$  no sinal sonoro pode provocar uma perda significativa na inteligibilidade do discurso em indivíduos realizando leitura labial.

## 2.5 Dimensões de salas de aula catarinenses

De acordo com a lei complementar nº 170, de 07 de agosto de 1998, no estado de Santa Catarina, o número de alunos por sala de aula em turmas do ensino médio é limitado a 40. Quanto a turmas dos ensinos fundamental e infantil a série dos alunos é levada em consideração, mas em todos os casos este número é menor [9].

Outro artigo da mesma lei estipula restrições em relação às características físicas das instalações escolares do estado. Um dos tópicos aborda a dimensão mínima das salas de aula em função do número de alunos. A área da sala deve prever um mínimo de  $2,5\text{ m}^2$  para professores e  $1,3\text{ m}^2$  para cada estudante, excluindo as áreas de circulação interna e as ocupadas por equipamentos didáticos.

Baseando-se nesta lei, pode-se estimar o tamanho mínimo ade-

quado para uma sala de aula que comporte uma turma com a quantidade máxima de alunos permitida pela lei (40) como aproximadamente  $60 m^2$ .

## 2.6 Contexto brasileiro de televisores

De acordo com dados da Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), entre os anos de 2008 e 2014 houve uma transição no mercado brasileiro de televisores. Ele deixou de ser predominantemente composto por aparelhos analógicos e foi substituído por televisores digitais com telas de LCD [46].

A Tabela 2.3 apresenta o histórico de vendas de televisores e compara o número vendas de três tipos de televisores: analógicos, com tela de plasma e com tela de LCD entre os anos de 2008 e 2014.

Tabela 2.3: Quantidade anual de televisores analógicos, com tela de plasma e com tela de LCD vendidos no período entre 2008 e 2014.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
TV em cores - Analógico	8.152.662	5.296.789	3.600.167	2.732.542	1.215.561	1.050.902	151.900
TV com Tela de Plasma	292.401	332.571	433.241	403.181	426.873	1.020.007	1.859.817
TV com Tela de LCD	2.435.237	3.977.612	8.033.514	10.950.610	12.721.929	12.745.659	12.981.394

Os dados revelam que, nesse período, as vendas de televisores analógicos caíram mais de 50 vezes e as vendas de televisores com tela de LCD aumentaram mais de 5 vezes.

A mesma pesquisa revela que mais de 90% dos televisores com tela de LCD, que dominam o mercado desde 2010, possuem a interface RCA (sigla do nome da empresa *Radio Corporation of America* que desenvolveu a interface). Ela permite a transmissão de áudio e vídeo entre aparelhos eletrodomésticos. Em relação ao som, é possível utilizá-la para conectar o televisor a outros dispositivos de saída sem cortar o áudio reproduzido pela televisão [46].

## 2.7 Métodos para transmissão de áudio sem fio

Atualmente, existem diversos protocolos de comunicação sem fio. No contexto deste trabalho, Bluetooth, Wi-Fi e FM foram analisados para verificar qual deles se adequa melhor as exigências do projeto.

### 2.7.1 Bluetooth

O protocolo Bluetooth foi criado em 1994 como uma alternativa as conexões a cabo, permitindo a transferência de dados através da transmissão de rádio. O nome Bluetooth vem de um rei dinamarquês do século X, Harald Blåtand ou, em inglês, Harold Bluetooth. O rei Bluetooth ajudou a unificar as facções em guerra na região da atual Noruega, Suíça e Dinamarca. Similarmente, o protocolo Bluetooth foi criado como um protocolo aberto que permitisse a conectividade e colaboração entre diferentes produtos e fabricantes [38].

As aplicações mais populares do Bluetooth são as de áudio sem fio (*headsets* e conectividade *hands-free* em carros. A versão o Bluetooth utilizada para essas aplicações é a BR/EDR (*bit rate/enhanced data rate*), que é otimizada para o envio estável de áudio de alta qualidade, de forma energeticamente eficiente [38].

Outra versão do Bluetooth, especialmente popular na atualidade, é a BLE (*Bluetooth Low Energy*), que permite aos desenvolvedores criarem pequenos sensores que funcionam com baterias do tamanho de moedas. Essa tecnologia tem se popularizado principalmente pela internet das coisas (*Internet of Things*, IoT). É focada na transmissão de dados, não dando suporte a transmissão de áudio [38].

O protocolo Bluetooth é construídos em camadas sobre uma especificação núcleo com diferentes serviços. O grupo Bluetooth *Special Interest Group* (SIG) é responsável pela criação e manutenção da especificação.

A comunicação entre dispositivos Bluetooth ocorre através de redes de curto alcance, *ad hoc*, chamadas de *Piconet*, ou seja, uma *Piconet* é uma rede de dispositivos conectados através da tecnologia Bluetooth. Essa rede pode ser composta por dois até oito dispositivos, sendo que um atuará como mestre da rede e os demais como escravos. O alcance varia de acordo com a classe dos dispositivos. A Tabela 2.4 mostra a potência de transmissão e o alcance típico de cada classe [38].

### 2.7.2 Wi-Fi

O padrão de comunicação Wi-Fi® foi lançado no ano de 1999, juntamente com a criação da *Wi-Fi Alliance*®, organização que desenvolveu e mantém o padrão. Desenvolvido para permitir interoperabilidade,

Tabela 2.4: Classes do Bluetooth

Classe	Max. Potência de Trânsmissão		Alcance Típico (m)
	(mW)	(dBm)	
1	100	20	100
2	2.5	4	10
3	1	0	1

fácil utilização e inovação, a comunicação Wi-Fi ganhou grande popularidade com o mercado de dispositivos móveis, possibilitando o acesso a internet sem a utilização de cabos [3].

O protocolo Wi-Fi é baseado no padrão IEEE 802.11 e, atualmente, opera nas faixa de frequência de 2,4GHz e 5GHz, com diversas taxas de transferência de dados, dependendo do padrão. Os principais padrões utilizados são o IEEE 802.11b, 802.11g e 802.11n. A Tabela 2.5 apresenta as principais características desses padrões [32].

Tabela 2.5: Características dos padrões Wi-Fi

	802.11B	802.11G	802.11N
<b>Data de aprovação do padrão</b>	jul/99	jun/03	out/09
<b>Máxima velocidade de transferência(Mbps)</b>	11	54	≈600
<b>Modulação</b>	CCK ou DSSS	CCK, DSSS, ou OFDM	CCK, DSSS, ou OFDM
<b>Banda RF (GHz)</b>	2.4	2.4	2.4 ou 5
<b>Tamanho do Canal (MHz)</b>	20	20	20, ou 40

Devido às aplicações de tempo real, principalmente áudio e vídeo, o protocolo WMM (*Wireless Multimedia Extension*) foi integrado ao padrão Wi-Fi em 2004, permitindo que as aplicações de *streaming* tenham maior prioridade sobre as demais aplicações, através do QoS (*Quality of Service*). A prioridade é implementada nos *access points*, assegurando que a banda necessária seja reservada para a aplicação e tempo real [32].

### 2.7.3 FM

Em 1920, a radiodifusão estava em sua infância. Entretanto, nessa época já existiam pesquisas que procuravam reduzir o ruído da comunicação através da modulação, sabendo que o ruído é proporcional a banda de transmissão. A ideia da modulação FM propunha alterar a frequência da portadora de forma que ela fosse proporcional a mensagem a ser transmitida. Apesar de a intenção ser diminuir a banda de frequência, os primeiros testes mostraram que a modulação FM ocupa mais banda do que a AM [20].

A modulação FM é menos suscetível a ruído, embora ocupe uma banda maior. Isto ocorre pois a informação está contida na frequência e, portanto, as não linearidades acabam se distanciando da frequência de interesse (múltiplos inteiros da frequência portadora) e podem ser facilmente eliminadas por um filtro passa banda. Além disso, a interferência entre sinais é inversamente proporcional a amplitude da portadora, aumentando a robustez da FM [20].

Uma das desvantagens da modulação FM é a dependência linear da interferência de transmissão (ruído) com a frequência da portadora. Para solucionar este problema, os sistemas transmissores aplicam uma pré-ênfase no sinal antes da modulação e o receptor faz uma de-ênfase do sinal demodulado [20].

A modulação FM é baseada na equação (2.1):

$$x(t) = A \cos \left[ \omega_c t + \int_{-\infty}^t m(\alpha) k_f u(\alpha) d\alpha \right] \quad (2.1)$$

Onde:  $m(t)$  é a mensagem a ser transmitida;  $\omega_c$  é frequência da portadora; e  $x(t)$  é a mensagem modulada.

A Figura 2.5 apresenta o diagrama de blocos típico de um sistema FM completo, envolvendo transmissor e receptor.

No Brasil, o FM destinado à radiodifusão de áudio está licenciado para operar na faixa de frequências de 88MHz a 108MHz [6].

## 2.8 Sistemas embarcados

Define-se sistema embarcado como um dispositivo usado para controlar, monitorar ou auxiliar um equipamento, uma máquina ou uma

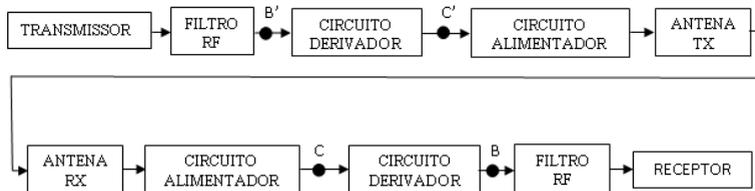


Figura 2.5: Esquema típico de um sistema FM completo (receptor e transmissor). Adaptado de [20]

instalação. A palavra “embarcado” reflete o fato de estarem integrados ao sistema e, em muitos casos sua presença não está explícita para o usuário [29].

Atualmente, o uso de sistemas computacionais já é bastante comum no cotidiano das pessoas. Milhões são produzidos todo ano, destinados aos processadores de computadores pessoais e notebooks. Além destes, uma parcela significativa tem o objetivo de ser integrada em sistemas eletrônicos maiores [40].

Sistemas embarcados estão presentes em uma variedade de dispositivos, como eletrônicos de consumo (celulares, câmeras digitais, videogames, calculadoras, etc.), eletrodomésticos (forno de micro-ondas, máquina de lavar, sistema de iluminação, etc.), automação de escritório (fax, impressoras, *scanners*, etc.), automóveis (injeção de combustível, freios ABS, suspensão ativa, etc.), entre outros. São características comuns dos sistemas embarcados [40]:

- Função única: Em sua maioria, não são sistemas para uso geral.
- Fortemente confinado: Geralmente devem atender a restrições exigentes, serem pequenos, relativamente rápidos e com o menor consumo de energia possível.
- Reativo e tempo real: Devem apresentar seu resultado e mudanças em tempo real.

Em muitas aplicações que utilizam bateria, o tempo de vida é uma característica importantíssima. Nesses casos, o consumo dos componentes que compõem o produto deve ser avaliado criteriosamente e reduzido ao máximo. O microcontrolador integrado (MCU) destes

dispositivos tem acompanhado essa tendência e hoje muitos fabricantes oferecem MCUs de baixa e ultra-baixa potência.

A escolha do microcontrolador para cada aplicação deve levar em conta características como: consumo de energia, incluindo modos de baixo consumo (*low power mode*); tipos de *clock*; periféricos embarcados no chip; circuitos de proteção; e eficiência de processamento [25].

A escolha da MCU desse projeto, visou atender os quesitos necessários, ser baixíssima potência e ter um preço competitivo.

## 2.9 Interfaces de comunicação de sistemas embarcados

Esta seção descreve sucintamente o funcionamento de três interfaces de comunicação utilizadas no contexto de sistemas embarcados: os protocolos I2C, UART e I2S.

### 2.9.1 I2C

O protocolo de comunicação I2C foi desenvolvido pela *Philips Semiconductors* (agora *NXP Semiconductors*) na década de 80. O objetivo do projeto era a criação de um barramento bidirecional, rápido, confiável e que utilizasse apenas duas trilhas para realizar a transmissão dos dados. Atualmente, mais de cinquenta empresas diferentes incorporam o protocolo nos periféricos de seus componentes [36].

A proposta inicial era criar uma metodologia para estabelecer a conexão e transmissão de mensagens entre uma unidade de processamento central (mestre) e seus periféricos (escravos), através de duas portas de entrada/saída digitais (*I/O*) do processador. O barramento deveria possibilitar o acoplamento de diversos dispositivos a um mestre. Cada periférico possuiria um endereço e essa informação seria utilizada para diferenciá-los. Os endereços I2C possuem 7 bits. Por isso, teoricamente, é possível conectar-se a até 128 dispositivos (se todos possuírem endereços diferentes) no mesmo barramento. O microcontrolador - mestre - comanda a comunicação, gerenciando quem pode utilizar o barramento (através do envio do endereço) e transmitindo o sinal de *clock* [36]. Entretanto, apenas um mestre pode utilizar o barramento por vez [21].

A construção das mensagens é feita da seguinte forma: para transmitir um bit "0", o mestre ou o escravo forçam o barramento para nível lógico baixo; para transmitir um bit "1" o mestre ou o escravo liberam o barramento, configurando-o como alta impedância. Por esse motivo, a comunicação exige a inclusão de resistores de *pull-up* nas trilhas de dados (chamada SDA) e de *clock* (SCL). Os resistores são os responsáveis por levar o barramento para nível lógico alto na transmissão de um bit "1". Não é possível configurar SDA e SCL como nível lógico alto, para evitar curto-circuitos caso haja algum comportamento inesperado e mais de um mestre tente se comunicar simultaneamente através do mesmo barramento [36].

O mestre inicia a comunicação ao sinalizar a condição de *START* (configura SDA como nível lógico baixo enquanto SCL está em nível lógico alto) e a finaliza enviando a condição de *STOP*. Após a condição de *START*, o mestre envia um byte formado pelo endereço do escravo com o qual ele deseja se comunicar e um bit que indica se a operação é de *read* ou *write* (níveis lógicos baixo e alto, respectivamente). O mestre espera um bit de confirmação (*ACK*) enviado pelo escravo em questão e realiza a escrita ou leitura da informação. A Figura 2.6 apresenta um diagrama do fluxo da comunicação de acordo com o protocolo I2C [23].

Inicialmente, a taxa de transmissão de dados máxima do protocolo era de 100 kbps. Atualmente, é possível utilizá-lo em canais que exijam bandas de transmissão muito maiores. Existem dispositivos que se comunicam por I2C em velocidades de 100k, 400k, 1M e até 3,4Mbps [21].

### 2.9.2 UART

UART (do inglês *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) é um protocolo de comunicação serial bidirecional amplamente utilizado. Apresenta desempenho confiável, é fácil de operar e de relizar. Atualmente, muitos chips com funções de controle já possuem o barramento implementado em um periférico integrado [12].

A transmissão UART utiliza um registrador de deslocamento e a sua velocidades de transmissão pode variar entre 9600bps e 921600bps. Comparando a UART com protocolos seriais síncronos, nota-se duas vantagens principais: necessidade de apenas duas linhas de trans-

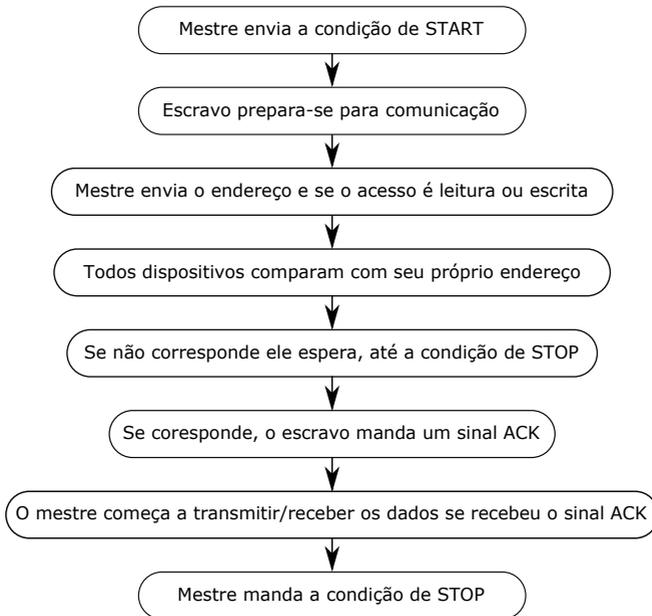


Figura 2.6: Fluxo I2C. Adaptado de [23]

missão (não existe o sinal de relógio) e possibilidade de transmissões acima de vinte metros [17].

O protocolo UART utiliza *buffers* na forma de filas FIFO (*First In First Out*) para acumular a mensagem, um gerador de *baud* (para selecionar o a frequência adequada) e uma lógica para adequar os dados no protocolo, como mostra a Figura 2.7 [12].

O barramento é mantido em nível lógico alto por resistores de *pull-up* e a comunicação começa com um START bit, forçando a linha de dados para nível lógico baixo. Em seguida é enviado um byte de mensagem, um bit de paridade, par ou ímpar, e um STOP bit que libera o barramento retornando-o ao nível lógico alto. Isto é exemplificado na Figura 2.8 [17].

### 2.9.3 I2S

O I2S (*Inter-IC Sound*) é um protocolo de comunicação serial de áudio digital desenvolvido pela *Philips Semiconductors*. O seu objetivo é

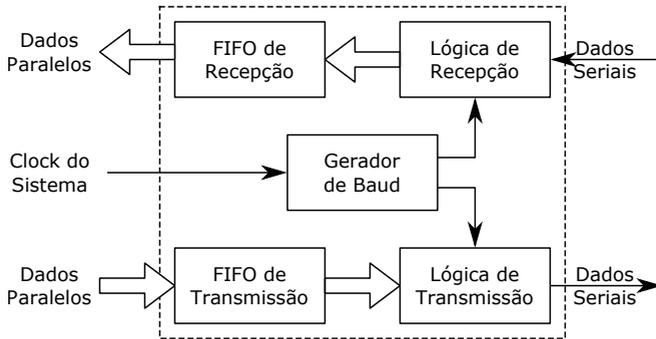


Figura 2.7: Diagrama UART. Adaptado de [12]

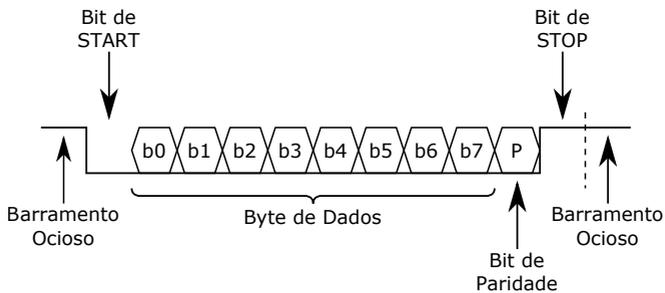


Figura 2.8: Formato do pacote de dados UART. Adaptado de [17]

permitir a comunicação entre os diversos circuitos integrados de processamento de áudio (A/D, D/A, filtro, DSP) [37]

A comunicação é baseada em três fios: sinal de relógio (SCK), seleção de palavra (WS) e dados (SD). Em geral, a comunicação envolve apenas um mestre e um escravo. Os sinais de relógio da comunicação são gerados pelo mestre e os sinais de dados são gerados pelo dispositivo que transmite o áudio, podendo ser o mestre ou o escravo [37].

A Figura 2.9 ilustra o funcionamento básico da comunicação.

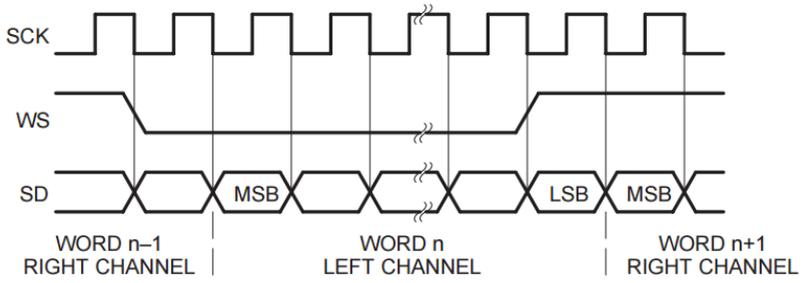


Figura 2.9: Diagrama de tempo do protocolo de comunicação I2S. Adaptado de [37]

---

## Análise do Problema e Identificação dos Requisitos Funcionais

---

Antes da fase de projeto propriamente dita, as expectativas das empresas parceiras — WaveTech e Amplivox — em relação ao produto proposto foram estudadas e discutidas. Essa etapa foi marcada por diversas reuniões com os diretores de ambas as empresas, fonoaudiólogos e pessoas com perda auditiva. Essas discussões foram extremamente importantes, pois possibilitaram a elaboração de um conjunto de diagramas e documentos com especificações que facilitaram imensamente a tomada de decisões ao longo do projeto. Este capítulo apresenta tais documentos, descreve seu conteúdo em maiores detalhes — incluindo uma visão geral do cenário de aplicação do produto, a identificação e o estudo de viabilidade dos requisitos — e, finalmente, decompõe o sistema em módulos funcionais.

### **3.1 Cenários de aplicação do produto**

Um dos principais estudos realizados durante a etapa de Análise do Problema envolveu a determinação e descrição das situações em que o produto proposto se encaixaria, qual problema ele iria resolver e de

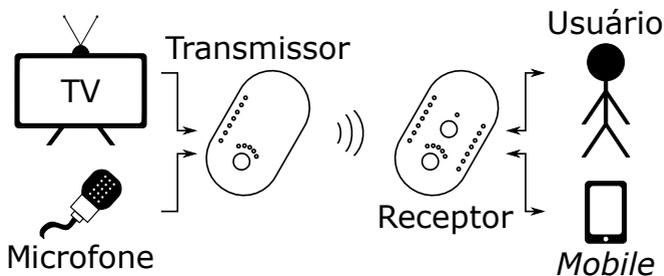


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema.

qual forma. O levantamento foi feito no contexto do objetivo geral do trabalho, que é desenvolver um sistema de transmissão e recepção sem fio de áudio que auxilie deficientes auditivos de qualquer idade nas suas funções diárias. Durante essa sondagem, percebeu-se a necessidade de que o sistema fosse composto por dois módulos: um transmissor, chamado de **Tau**; e um receptor, chamado de **Ro**. A Figura 3.1 apresenta um diagrama de blocos simplificado do arranjo proposto. Como a imagem indica, o **Tau** é conectado à fonte sonora e transmite o áudio para o módulo receptor. O **Ro**, por sua vez, capta e processa o sinal sonoro e transmite um som limpo, amplificado e livre de ruído para o usuário com perda auditiva. Adicionalmente, identificou-se dois grandes grupos de aplicações, descritos a seguir.

O conjunto de aplicações 1 utiliza um aparelho eletrônico - televisores ou *smartphones* - como fonte sonora e o conjunto 2, um microfone. Exemplos de aplicações que o conjunto 1 abrange assistir televisão em grupo e ir ao cinema, e exemplos de aplicações do conjunto 2 incluem salas de aula, reuniões e visitas guiadas. Os dois grupos consideram atividades sociais em que as pessoas com perda auditiva, protetizadas ou não, apresentam dificuldade, seja pela má interação entre a mídia eletrônica e o aparelho auditivo, ou pela concorrência entre áudio de interesse com o ruído de fundo presente no ambiente. Comumente, diversos ouvintes estão presentes, portanto numa solução adequada o **Tau** deve realizar a transmissão na forma de um *broadcast* de áudio, e diversas unidades do **Ro** devem ser capaz de recebê-lo e disponibilizá-lo para o usuário de forma eficiente e flexível. Novamente, este trabalho pretende apresentar uma solução adequada para usuários com e sem prótese auditiva. Portanto, o **Ro** deve se comunicar diretamente

com os aparelhos auditivos através de interfaces apropriadas e oferecer a opção do usuário escutar o som através de fones de ouvido.

A Figura 3.2 é uma ilustração esquemática da situação que representa uma das principais aplicações do sistema. Ela mostra um usuário que tem sua experiência de assistir à televisão aprimorada através da utilização do produto descrito neste trabalho. O módulo transmissor está conectado à fonte sonora, nesse caso um televisor, e o áudio reproduzido pelo aparelho é transmitido para o **Ro** livre da influência do ruído de fundo. O módulo receptor envia o áudio diretamente para o aparelho auditivo através de uma tecnologia *wireless*, compatível com os aparelhos auditivos produzidos pela Amplivox. A Figura 3.2 também introduz outra funcionalidade prevista para o sistema, que é oferecer uma opção de atender ligações telefônicas através do **Ro** de forma semelhante à dispositivos *hands-free*.

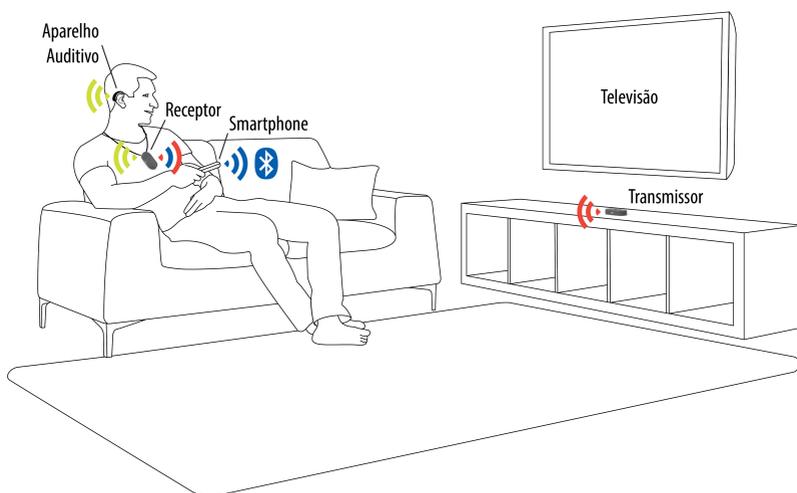


Figura 3.2: Ilustração esquemática de uma das aplicações do sistema proposto. Um usuário com perda auditiva tem a experiência de assistir televisão aprimorada.

## 3.2 Requisitos

Com base no problema exposto, as descrições e exigências em alto-nível feitas pela Amplivox e pela WaveTech foram compiladas em um conjunto de requisitos funcionais e não funcionais supostamente livres de ambiguidade.

Esse conjunto especifica que módulo transmissor deve ser capaz de:

- RF1: Capturar o som de um microfone ou de um aparelho televisor que possua uma saída de áudio no formato RCA.
- (a) A interface utilizada para os dois aparelhos deve ser a mesma.
  - (b) A interface utilizada para televisores não pode cortar a saída de áudio destes aparelhos.
- RF2: Transmitir o áudio capturado para todos os dispositivos receptores próximos ao transmissor.
- (a) A transmissão deve ser realizada através de uma interface sem fio.
  - (b) A fim de minimizar efeitos de interferência, devem haver 5 canais disponíveis para a transmissão.
  - (c) A fim de ser compatível com as dimensões apropriadas para salas de aula no estado de Santa Catarina, a transmissão deve atingir um alcance de no mínimo 10 metros.
  - (d) A fim de permitir execução de leitura labial livre de atraso por parte dos ouvintes, a latência da transmissão não deve exceder 5 ms.
- RF3: Ser portátil.
- (a) Oferecer opção de ser *wearable*.
- RF4: Para de ser portátil e *wearable* o sistema deve ser capaz de operar com bateria.
- (a) A fim de permitir o uso durante um dia inteiro de trabalho / aulas, o tempo de autonomia do sistema deve exceder 8 horas.

- (b) O sistema deve impedir o seu desligamento forçado, executando as rotinas de desligamento antes do final da carga da bateria.
- (c) A interface para carregamento da bateria deve ser amplamente difundida, atual e de fácil acesso.

RF5: O sistema deve monitorar seu nível de bateria.

RF6: Oferecer uma interface simples, moderna e intuitiva indicada para todas as idades.

- (a) A interface deve indicar o nível de bateria e o canal de transmissão.
- (b) A interface deve permitir ao usuário executar ações de liga/desliga e troca de canal.

O mesmo conjunto especifica que o módulo receptor deve ser capaz de:

RF1: Capturar o sinal transmitido pelo **Tau**.

- (a) A recepção deve ser compatível com os 5 canais de transmissão.

RF2: Implementar a função *hands-free* que permite ao usuário atender ligações telefônicas sem manusear seu *smartphone*.

- (a) Durante as chamadas telefônicas, o sistema não deve reproduzir o som transmitido pelo **Tau**.

RF3: Realizar a amplificação do sinal e a atenuação do ruído antes de disponibilizar o som ao usuário através de interfaces apropriadas.

- (a) O som deve poder ser reproduzido em 7 níveis de volume diferentes.
- (b) A fim de permitir a execução de leitura labial livre de atraso por parte dos ouvintes, a latência na reprodução não deve exceder 5 ms.

RF4: Ser portátil.

(a) Oferecer opção de ser *wearable*.

RF5: A fim de ser portátil e *wearable* o sistema deve ser capaz de operar com bateria.

(a) A fim de permitir o uso durante um dia inteiro de trabalho / aulas, o tempo de autonomia deve exceder 8 horas.

(b) O sistema deve impedir o seu desligamento forçado, executando as rotinas de desligamento antes do final da carga da bateria.

(c) A interface para carregamento da bateria deve ser amplamente difundida, atual e de fácil acesso.

RF6: Monitorar seu nível de bateria.

RF7: Oferecer uma interface simples, moderna e intuitiva indicada para todas as idades.

(a) A interface deve indicar os níveis de volume e de bateria; o canal de transmissão e o estado de conexão com dispositivos *mobile*.

(b) A interface deve permitir ao usuário executar ações de liga/desliga, troca de canal, controle de volume e conexão com o dispositivo *mobile*.

### 3.3 Análise de Viabilidade

A viabilidade dos requisitos propostos pelas empresas foi analisada a partir de estudos e comparações com funcionalidades já implementadas em sistemas similares disponíveis no mercado. A análise considerou os produtos apresentados na Seção 2.3.1. O critério utilizado para aceitação de um requisito foi a existência de no mínimo um produto oferecendo a funcionalidade ou atendendo o requisito específico, sob condições similares às especificadas pela Amplivox e pela Wave-Tech. Todos os requisitos listados anteriormente foram considerados viáveis.

Nessa etapa, percebeu-se que o produto proposto oferece um conjunto de funcionalidades único e completo, agregando diferentes características presentes em produtos disponíveis no mercado. Sua ope-

ração é independente de uma infraestrutura instalada no local de utilização; a transmissão do áudio acontece na forma de *broadcast*; o produto é portátil e *wearable*; e oferece compatibilidade com microfones e televisores. Nenhum dos dispositivos listados na Seção 2.3.1 oferece todas essas funcionalidades.

### 3.4 Decomposição em Módulos

A partir dos cenários de uso e dos requisitos apresentados nas seções anteriores, as unidades transmissora e receptora do sistema foram decompostas em módulos funcionais, de acordo com os diagramas das Figuras 3.3 e 3.4. A cada um desses módulos foram atribuídas responsabilidades específicas e complementares entre si, de forma a compor o produto proposto pelas empresas parceiras. Além disso, a decomposição foi feita de forma que cada módulo pudesse ser projetado, construído e testado de forma independente, visando a organizar e tornar mais fáceis as etapas futuras do trabalho.

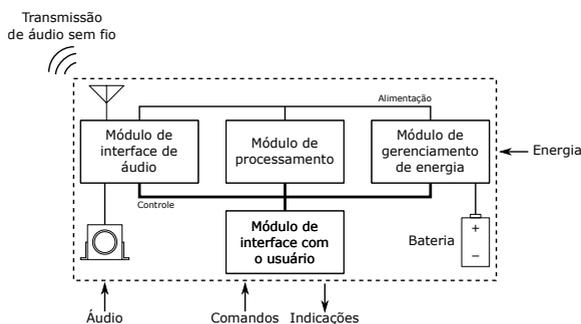


Figura 3.3: Diagrama de blocos do transmissor

Os módulos que compõem o **Tau** e suas atribuições são:

- **Módulo de gerenciamento de energia:** Responsável por controlar os ciclos de carga e descarga da bateria e por fornecer energia para os demais módulos, desempenhando funções de filtragem e regulação de tensão de acordo com as necessidades destes.
- **Módulo de processamento:** Responsável por orquestrar o funcionamento dos demais módulos, reagindo e tomando decisões

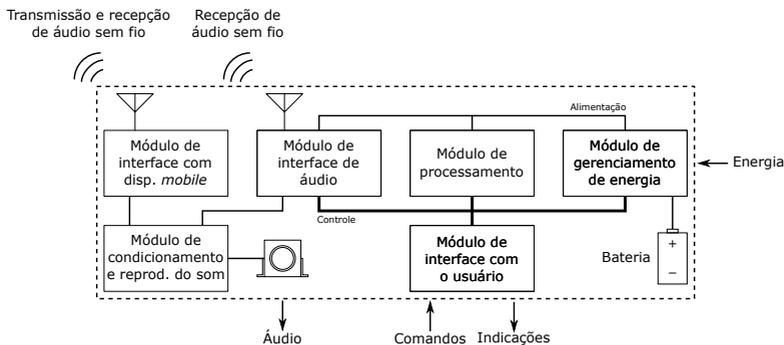


Figura 3.4: Diagrama de blocos de receptor.

com base em informações fornecidas por eles.

- **Módulo de interface sonora:** Responsável por captar o som proveniente das fontes sonoras e transmiti-lo para o **Ro**.
- **Módulo de interface com o usuário:** Responsável por receber os comandos do usuário e disponibilizá-los em forma de sinais elétricos para o módulo de processamento. Além disso, é responsável por indicar o estado do sistema na forma de uma *display* luminoso.

E os módulos que compõem o **Ro** e suas atribuições são:

- **Módulo de gerenciamento de energia:** Responsável por controlar os ciclos de carga e descarga da bateria e por fornecer energia para os demais módulos, desempenhando funções de filtragem e regulação de tensão de acordo com as necessidades destes.
- **Módulo de processamento:** Responsável por orquestrar o funcionamento dos demais módulos, reagindo e tomando decisões com base em informações fornecidas por eles.
- **Módulo de interface com dispositivos *mobile*:** Responsável por captar e transmitir o som de chamadas telefônicas realizadas por um dispositivo *mobile*. O som captado deve ser disponibilizado para o Módulo de condicionamento e reprodução do som.

- **Módulo de interface com o Tau:** Responsável por captar o sinal transmitido **Tau** e disponibilizá-lo para o módulo de condicionamento e reprodução do som.
- **Módulo de condicionamento e reprodução do som:** Responsável por processar o sinal sonoro recebido, realizando funções de filtragem e amplificação caso necessário, e disponibilizá-lo para o usuário.
- **Módulo de interface com o usuário:** Responsável por receber os comandos do usuário e disponibilizá-los em forma de sinais elétricos para o módulo de processamento. Além disso, deve indicar o estado do sistema na forma de uma *display* luminoso.



# CAPÍTULO 4

---

## Projeto do Sistema

---

Ao final da etapa de análise de problema, o sistema de auxílio auditivo em desenvolvimento foi dividido nos módulos funcionais apresentados no Capítulo 3. A fase de projeto propriamente dita, tema deste capítulo, especificou mais detalhadamente as características necessárias a cada bloco do sistema para que, combinados, fossem capazes de atender aos requisitos propostos. A seguir, são apresentadas as decisões de projeto referentes aos módulos transmissor e receptor. A discussão é dividida em duas seções para cada módulo: a primeira associada ao desenvolvimento do hardware, e a segunda ao desenvolvimento do firmware de controle da unidade. Em ambos os casos, procura-se descrever e justificar as principais decisões tomadas durante o projeto do sistema e que definiram a forma como se deu a implementação.

Uma vez que o desenvolvimento do software embarcado é extremamente dependente das especificações do hardware utilizado, apresentam-se inicialmente as questões relacionadas ao projeto de hardware. Adicionalmente, pela sua simplicidade em relação ao Ro, o módulo transmissor é o primeiro a ser detalhado.

## 4.1 Hardware

A partir da definição das especificações técnicas para os componentes de hardware de cada um dos módulos apresentados no Capítulo, 3 foram propostas formas de implementá-los com base em soluções disponíveis no mercado ou desenvolvidas internamente na própria empresa.

### 4.1.1 Tau

#### 4.1.1.1 Especificações

Baseado nos requisitos do produto, foram especificadas as seguintes características para os componentes de hardware do Tau:

- **Módulo de processamento:** Plataforma computacional de ultra-baixo consumo capaz de controlar o comportamento dos demais módulos. Buscando oferecer flexibilidade para conexão de diversos componentes eletrônicos, especificou-se que o processador deveria possuir, em hardware, blocos dedicados para implementação dos principais protocolos de comunicação serial, I2C, SPI e UART. Adicionalmente, a unidade computacional deveria oferecer portas de entrada e saída de propósito geral (GPIO) suficientes para identificar os eventos e controlar os módulos não conectados ao barramento digital. A escolha também deveria levar em consideração a *know-how* da empresa em relação à programação de sistemas embarcados a fim de acelerar as etapas de desenvolvimento, integração, depuração e testes dos protótipos.
- **Módulo de gerenciamento de energia:** Para atender aos requisitos apresentados no Capítulo 3, definiu-se que o módulo de gerenciamento de energia deveria ser capaz de: fornecer energia suficiente para a correta operação dos demais módulos; gerenciar ciclos de carga e descarga eficientes e seguros para uma bateria que ofereça ao menos 8 horas de autonomia; e monitorar o nível de carga da bateria em todos os momentos. Especificou-se que, enquanto a bateria é carregada, o módulo deve ser capaz de evitar que sua carga seja consumida e evitar expô-la à situações de sobretensão e/ou sobrecorrente. O módulo deve conectar-se à fonte de alimentação através de cabos USB oferecendo um

conector micro USB para a conexão. Quaisquer circuitos integrados que o componham devem oferecer a opção de ser controlados por algum dos protocolos digitais citados nas especificações do Módulo de processamento.

- **Módulo de interface de áudio:** Deve operar em baixo consumo; ser capaz de capturar o som reproduzido pela fonte sonora; e transmiti-lo na forma de um broadcast com cinco alternativas de canal. Quaisquer circuitos integrados que o componham devem oferecer a opção de ser controlados por algum dos protocolos digitais citados nas especificações do módulo de processamento.
- **Módulo de interface com o usuário:** Especificou-se que o display luminoso indicador do nível de bateria deve ser composto por sete LEDs alinhados. A representação do nível da bateria deve ser feita de forma incremental, ou seja, se a bateria estiver completamente carregada, os sete LEDs devem estar acessos, e se estiver com a carga mínima permitida para operação normal, apenas um deles. Em relação ao display luminoso que indica o canal de transmissão, definiu-se que cinco LEDs devem ser utilizados, um associado a cada canal. A interface com o usuário também deve conter dois botões: um para a função de liga e desliga e outro para a troca de canal. A função de liga e desliga só deve ser executada se o respectivo botão for pressionado por mais de dois segundos e a função de troca de canal deve ser executada cada vez que o botão for pressionado. Devido a decisões relacionadas a ergonomia, optou-se por posicionar os botões em faces diferentes do produto: o botão com função de liga e desliga deveria estar localizado na face lateral esquerda e o botão de troca de canal na sua face frontal.

#### 4.1.1.2 Soluções propostas

Considerando as características especificadas, soluções de hardware foram propostas para cada um dos módulos. Não haviam dispositivos disponíveis no mercado que oferecessem uma solução completa e que atendessem a todas as especificações exigidas para nenhum dos módulos descritos. Portanto, todas soluções foram desenvolvidas no escopo deste trabalho e construídas especialmente para este produto.

**4.1.1.2.1 Módulo de interface com o usuário** Os comandos de liga e desliga e troca de canal são informados ao sistema através de dois botões, um para cada função. Graças ao seu baixo custo, botões tácteis demonstraram ser a melhor opção. Devido ao posicionamento dos botões, dois componentes diferentes foram escolhidos. Para o botão referente à troca de canal, optou-se por um dispositivo montado paralelamente à placa eletrônica. E para o botão que desempenha as funções de liga e desliga, optou-se por um dispositivo montado ortogonalmente à placa de circuito impresso.

O circuito apresentado na Figura 4.1 foi utilizado para minimizar o ruído de trepidação, e evitar que o mesmo evento seja registrado diversas vezes de forma indesejada. Ele também protege o botão e a porta de entrada do microcontrolador das altas correntes que fluem durante a carga e descarga do capacitor desacelerando as transições.

Seu funcionamento se assemelha ao de um filtro passa-baixas e pode ser entendido através da análise do comportamento do circuito durante o acionamento e liberação do botão. Considera-se inicialmente o botão pressionado e o capacitor descarregado. Ao liberá-lo, de acordo com a Figura 4.1, o capacitor será carregado até sua tensão atingir o valor de  $V_{cc}$ . A corrente de carga será limitada pelos resistores R1 e R2. Ao apertar-se o botão novamente, o capacitor será descarregado pela corrente que flui através do capacitor e do resistor R1. Os componentes foram dimensionados para evitar o fluxo de correntes instantâneas maiores do que os valores máximos nominais dos dispositivos e para garantir tempos de carga e descarga de aproximadamente 25 ms e 5 ms, respectivamente.

No desenvolvimento do display luminoso responsável por indicar o nível da bateria e o canal de transmissão utilizou-se uma técnica chamada Charlieplexing. Ela foi desenvolvida por Christopher W. Malinowski, Heinz Rinderle, e Martin Siegle e patenteada em 1979 pela AEG-Telefunken, localizada em Heilbronn na Alemanha [22]. Foi popularizada em 1995 por Charlie Allen durante seu trabalho na Maxim Integrated e, por esse motivo, atualmente a técnica recebe seu nome [1].

A estratégia prevê a conexão dos LEDs em antiparalelo e aproveita os três estados de uma porta digital do microcontrolador - alto, baixo e alta impedância - para definir qual LED será aceso. Ela possibilita a

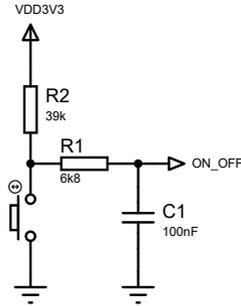


Figura 4.1: Circuito utilizado para a filtragem do ruído de trepidação dos botões.

otimização do número de GPIOs necessários para controlar os LEDs e a redução do consumo total do display. O número de LEDs que podem ser controlados utilizando essa técnica em função do número de portas digitais do microcontrolador é dado pela Equação 4.1:

$$N_{LEDs} = n^2 - n \quad (4.1)$$

Onde:  $N_{LEDs}$  é o número total de LEDs que podem ser acionados; e  $n$  é o número de portas digitais de entrada e saída de propósito geral do MCU utilizadas no acionamento. Apenas um LED é acionado por vez, entretanto, devido à persistência da visão, é possível acendê-los rapidamente de forma sequencial (numa taxa mínima de trinta ciclos por segundo) dando a impressão de que todos os LEDs estão acesos simultaneamente. Em relação a redução de consumo, a corrente instantânea que flui através do display é aproximadamente a de apenas um LED, sendo portanto independente do número de LEDs acesos.

O display é formado por dois conjuntos de LEDs, um com cinco e outro com sete diodos, totalizando doze LEDs. Para controlá-los é preciso utilizar quatro portais digitais. Obtém-se esse número aplicando o valor doze à  $\#LEDs$  na Equação (4.1). O esquemático de um circuito que implementa um Charlieplexing de quatro pinos é apresentado na Figura 4.2. De acordo com a Figura, para acionar o LED1, por exemplo, deve-se configurar o pino  $Pin1$  com nível lógico baixo (0 V); o pino  $Pin2$  com nível lógico alto (3,3 V); e os pinos  $Pin3$  e  $Pin4$  como alta impedância. Considerando que a tensão nominal de opera-

ção dos LEDs utilizados é de 2,2 V, e que dois resistores de  $33 \Omega$  (R1 e R2) estão em série com o LED1, o consumo instantâneo do display é de aproximadamente 16 mA.

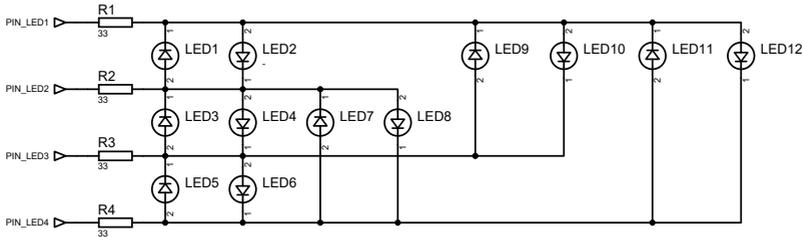


Figura 4.2: Circuito Charlieplexing usando 4 pinos.

Ao total, seis portas digitais do microcontrolador são ocupadas pelo módulo de interface com o usuário: quatro na implementação do Charlieplexing e duas para os botões.

**4.1.1.2.2 Módulo de interface de áudio** Para realizar as funções de captura e transmissão sem fio do sinal sonoro, inicialmente realizou-se um levantamento de diversos dispositivos abrangendo três tecnologias diferentes: Bluetooth, Wi-Fi e FM. Como discutido na seção 2.8, cada um desses protocolos apresenta suas vantagens e desvantagens. A seguir, o resultado deste levantamento que serviu de embasamento para a tomada de decisão em relação a qual tecnologia utilizar é apresentado resumidamente.

O Bluetooth é uma tecnologia voltada para a conexão de baixo consumo e curto alcance, normalmente entre um e dez metros. Nem todas as versões do Bluetooth suportam a transmissão de áudio, ainda assim, as que suportam têm sua utilização em aplicações relacionadas extremamente consolidada no mercado. Contudo, o protocolo é utilizado em redes pequenas, com até oito dispositivos, e inviabiliza o *broadcast* de áudio, um dos principais requisitos do dispositivo proposto neste trabalho [38].

O Wi-Fi permite a conexão do sistema a uma rede com diversos dispositivos. Em contrapartida, a tecnologia consome tipicamente em torno de dez vezes mais energia que o Bluetooth ou o FM, e não foi otimizada para aplicações em tempo real. Apesar dos padrões atuais permitirem o *streaming* de áudio, essa comunicação muitas vezes

apresenta um atraso superior a 100 ms e a eventual perda de dados na comunicação.

O FM, por sua vez, se apresenta como a melhor opção para o enlace de áudio, unindo as características positivas dos demais protocolos. Primeiramente, o FM possui *broadcast* de áudio inerente à tecnologia, sem limitação no número de usuários. Quanto à energia, o consumo se compara ao do Bluetooth. Entretanto, o FM possui duas desvantagens principais: existem estações de rádio que podem provocar interferência no sinal de interesse caso estejam na mesma frequência e, de acordo com a legislação brasileira, os aparelhos de emissão de radiação restrita trabalhando na frequência de 88MHz a 108MHz não devem exceder a intensidade de campo de  $150\mu V/m$ , medido a uma distância de três metros do emissor [5]. Contudo, nenhuma das desvantagens inviabiliza a utilização do FM, pois é possível utilizar uma faixa de frequências disponível e a limitação de potência não impossibilita atingir o alcance especificado.

Uma vez decidida a utilização do FM, procuraram-se soluções integradas com as características citadas a seguir. Para facilitar e acelerar o desenvolvimento, o chip deve ser membro de uma família que ofereça um transmissor e um receptor que possam ser incorporados no Tau e no Ro, respectivamente. Deve haver suporte para utilização de antena curta (comprimento inferior a 20 cm) de fio ou impressa, dispensando a necessidade de uma antena externa e dando mais flexibilidade para a construção da carcaça. A comunicação com o chip deve poder ser estabelecida através de algum dos protocolos de comunicação digital citados nas Especificações para minimizar o número de portas digitais em uso. O alcance não deve ultrapassar a especificação de dez metros por uma margem elevada para evitar possíveis interferências entre diferentes unidades do sistema (alocadas em salas de aula adjacentes, por exemplo). O consumo deve ser competitivo com o do Bluetooth (em torno de 20 mA) para justificar a escolha do protocolo FM. A faixa recomendada para a tensão de operação deve ser compatível com a do microcontrolador utilizado (entre 1,8 e 3,6 V), dispensando a necessidade de diversas trilhas de alimentação e os componentes necessários para gerá-las.

Aplicando essas restrições e procurando um baixo custo para o enlace de transmissão e recepção, o resultado da busca foi a família

Si47xx, da Silicon Labs, cujos elementos exigem poucos componentes externos para seu funcionamento. Através de sua interface de comunicação digital, todos os dispositivos dessa família podem ser sintonizados em até 640 frequências diferentes dentro da faixa do espectro de frequências localizada entre 76 e 108 MHz. Além disso, é possível configurar o ganho aplicado ao sinal sonoro e a intensidade de transmissão do sinal RF da mesma forma. A documentação do fabricante indica o opção do uso de um fio metálico como antena, respeitando-se algumas recomendações em relação à espessura do fio, geometria, comprimento e distância da antena em relação ao plano de terra.

Dentre eles, os produtos Si4712 e Si4713 oferecem, pelo mesmo preço, a funcionalidade *Receive Power Scan*, que permite a realização em hardware de uma varredura do espectro de frequência entre 76 e 108 MHz, procurando as faixas com menor intensidade de campo RF sendo transmitido. O Si4713 também possui um codificador RDS/RBDS, que possibilita a transmissão de caracteres de texto modulados em acompanhamento com o áudio. Apesar deste codificador não estar em utilização na versão final do dispositivo desenvolvido ao longo deste trabalho, optou-se pelo Si4713 nas etapas iniciais de projeto, nas quais se considerava utilizá-lo para implementar uma forma de sincronia automática do canal de transmissão entre o Tau e o Ro. O receptor correspondente é o circuito integrado Si4705, que foi incorporado à unidade receptora.

O Si4713 oferece entrada de áudio estéreo digital e analógico, a comunicação com o chip pode ser realizada através de suas interfaces I2C e SPI, e o consumo do chip em operação é de aproximadamente 20 mA. Para minimizar o número de portas digitais em uso, optou-se pelo I2C, que é a configuração padrão do chip. O ajuste do protocolo de comunicação é feito através dos pinos GPO1 e GPO2 - que possuem resistores internos de *pull-up* e *pull-down*, respectivamente - e por isso foram deixados em aberto. Quando o chip está na configuração I2C, o pino SENn, funciona como seletor de seu *slave address*. Como todos os dispositivos conectados no barramento possuem endereços diferentes, não foi necessário alterar seu valor. Por isso, um resistor de pull-up foi inserido apenas para garantir a manutenção do valor da tensão no pino SENn coerente com sua configuração padrão. O pino RSTn do Si4713 implementa a função de reinicialização do transmissor FM e é

controlado pelo MCU. Portanto, este chip ocupa três portas digitais do microcontrolador ao total: duas com o barramento I2C e uma com o pino de reset. Uma funcionalidade adicional do Si4713 se chama RPS (*Receive Power Scan*), que permite ao transmissor medir a potência recebida na frequência em que está sintonizado. Essa funcionalidade foi extremamente útil na determinação dos cinco canais de transmissão entre as unidades. As demais conexões do circuito integrado com os componentes externos necessários para seu correto funcionamento, como por exemplo capacitores de filtro e cristal, são apresentado na Figura 4.3. Na mesma figura, é possível observar o conector do tipo Jack de áudio P2, especificado como interface do sistema com a fonte sonora.

## Transmissor FM

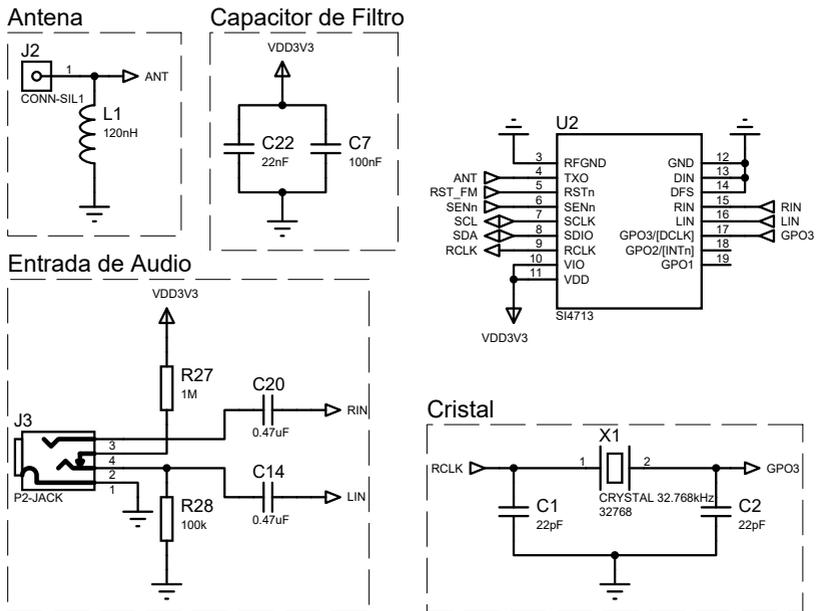


Figura 4.3: Esquemático utilizado com o transmissor FM Si4713.

**4.1.1.2.3 Módulo de gerenciamento de energia** Diversas opções foram analisadas para compor o módulo de gerenciamento de energia.

Um estudo prévio foi realizado para avaliar quais características seriam necessárias para o módulo e, inicialmente, buscou-se uma solução única que implementasse todas as funcionalidades previstas inicialmente. Entretanto, durante a modelagem de hardware do Ro, o módulo Bluetooth BM23 da *Microchip Technology* que incorpora um carregador de bateria embarcado foi escolhido. O BM23 não possui um circuito apropriado de monitoramento de bateria e, por esse motivo, foi necessário especificar um chip dedicado para essa função. A fim de garantir compatibilidade e acelerar o desenvolvimento da unidade transmissora, optou-se por utilizar o mesmo monitor de bateria já utilizado no Ro. Dessa forma, foi necessário utilizar um carregador de bateria dedicado no Tau.

Ao longo da realização do estudo sobre carregadores de bateria, identificou-se algumas características que deveriam fazer parte da solução adotada. Em primeiro lugar, ela deve suportar uma fonte USB como entrada de alimentação para o sistema e ser compatível com uma única célula de bateria de íon de Lítio com tensão nominal de 4,2 V - padrão bem estabelecidos em produtos eletrônicos comerciais da atualidade e conveniente para o usuário. Além disso, o circuito integrado deve possuir a topologia *Power Path*, que isola a corrente destinada à carga da bateria da corrente utilizada na alimentação do sistema [24]. Circuitos integrados com essa tecnologia, usualmente possuem duas saídas: uma conectada à bateria e outra conectada ao sistema. Eles otimizam a corrente de entrada, diminuindo assim a fadiga dos conversores presentes no carregador e aumentando seu tempo de vida [47]. Além disso, a solução deve implementar a rotina de gerenciamento de corrente chamada *Dynamic Power-Path Management*. Em um sistema com essa rotina, se o valor da tensão do sistema cair para um valor pré determinado, seja por uma queda na potência disponível ou pela excedência do limite de corrente fluindo através da bateria, o carregador reage diminuindo a corrente de carga de forma a evitar quaisquer futuras quedas na tensão de alimentação do sistema e evitar expor a bateria a situações potencialmente danosas para a sua química interna [34]. O carregador também deve possuir uma forma de proteger a bateria de situações de sobretensão. Quando o nível de tensão da bateria ultrapassar um valor pré estabelecido, o circuito de proteção desativa os conversores do carregador e aciona um transistor

para descarregar a bateria até um nível de tensão seguro. Por fim, a comunicação com o chip deve minimizar o número de portas digitais ocupadas.

O resultado da busca por circuitos integrados de baixo custo com todas as características especificadas foi o chip BQ24266 da Texas Instruments. Esse dispositivo possui os oito modos de operação, configurados por três entradas digitais do chip. A Tabela 4.1 apresenta os modos de operação em função dessas três entradas. As colunas *Corrente Max* e *VINDPM*, são referentes às configurações de corrente máxima de entrada do carregador e o limite de tensão pré estabelecido utilizado na rotina *Dynamic Power-Path Management*. Especificou-se um tempo de carga de no máximo 90 minutos. De acordo com a curva de carga da bateria escolhida, definiu-se a utilização de dois modos de operação para o BQ24266. O primeiro é o modo Carregador, com corrente máxima de 900 mA e VINDPM de 4,44. Esse modo é utilizado quando o chip está em operação normal. O segundo é o modo Alta Impedância, utilizado caso seja necessário desativá-lo. As palavras digitais de configuração dos dois modos são 101 para o modo Carregador, e 111 para o modo Alta Impedância. Optou-se, então, por fixar em hardware a conexão de I3 e I1 em nível lógico alto, e controlar a entrada I2 com uma porta digital do microcontrolador. Essa é a única porta do MCU ocupada pelo carregador de bateria.

Sua saída dedicada para a alimentação dos demais componentes do Tau, o pino SYS, possui nível de tensão de 4,2 V. Entretanto, a tensão máxima nominal para correta operação de alguns destes circuitos integrados é de 3,6 V. Nesse contexto, um diodo com queda de tensão de 0,7 V foi inserido em série com o pino SYS para abaixar a tensão para um nível adequado e proporcionar mais um nível de proteção contra corrente reversa fluindo no sentido da bateria.

As demais conexões do BQ24266 com os componentes externos necessários para seu correto funcionamento, como capacitores de filtro e o diodo, são apresentadas na Figura 4.4. Nela também é possível observar o conector do USB, especificado como interface do sistema com a fonte de alimentação.

Em relação ao monitor de bateria, o conjunto de especificações foi mais simplificado. O circuito integrado escolhido deve: ser compatível com uma única célula de bateria de íon de Lítio com tensão nomi-

Tabela 4.1: Modos de operação do carregador de bateria BQ24266 da Texas Instruments

I3	I2	I1	Modo de Operação	Corrente Max	VINDPM
0	0	0	Carregador	100 mA	4,28 V
0	0	1	Carregador	500 mA	4,44 V
0	1	0	Carregador	1500 mA	Externo
0	1	1	Boost	—	—
1	0	0	Carregador	150 mA	4,28 V
1	0	1	Carregador	900 mA	4,44
1	1	0	Carregador	2500 mA	Externo
1	1	1	Alta Impedância	—	—

### Carregador de Bateria

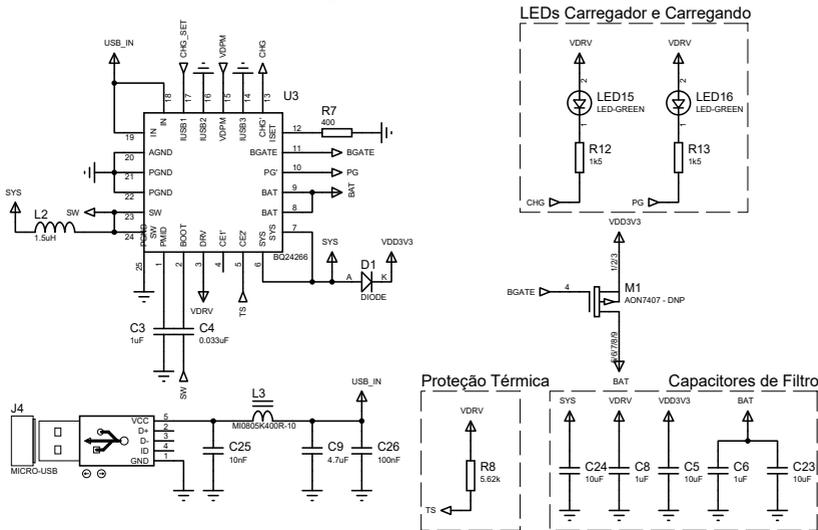


Figura 4.4: Esquemático utilizado com o carregador de bateria BQ24266.

nal de 4,2 V; monitorar com precisão o nível de carga da bateria e o consumo instantâneo de corrente nos ciclos de carga e descarga; monitorar a temperatura da bateria, caso seja necessário forçar uma diminuição no consumo do sistema a fim de protegê-la; e disponibilizar

as informações através de um dos protocolos de comunicação digital (I2C, SPI ou UART).

Optou-se pelo circuito integrado BQ27411 fabricado pela Texas Instruments por ser uma solução simples e de baixo custo que pôde ser incorporada rapidamente no sistema devido à compatibilidade com o carregador. O chip pode ser configurado e consultado através de sua interface I2C. Esse chip possui um modo de operação em que ele determina automaticamente diversos parâmetros relacionados à bateria e os salva em sua memória interna. Para isso, é necessário conectá-lo a bateria enquanto ela executa um ciclo de carga e descarga. Essas informações podem ser lidas e utilizadas em outras montagens com o BQ27411 e a mesma bateria.

As conexões do BQ27411 com o circuito de proteção ESD do barramento I2C, os capacitores de filtro e o resistor de medição de corrente são apresentados na Figura 4.5. Nela também está presente um modelo da bateria.

Ao total, o módulo de gerenciamento de energia ocupa três portas digitais do microcontrolador, duas utilizadas na interface I2C do monitor de bateria, e uma utilizada na configuração do modo de operação do carregador.

**4.1.1.2.4 Módulo de processamento** Os microcontroladores da linha MSP430 da Texas Instruments são conhecidos pelas suas características de extremo baixo consumo de energia [2], mesmo quando comparadas com outras famílias de microprocessadores de ultra-baixo consumo [39]. Apesar da discussão sobre qual seria o MCU com o menor consumo de todos ainda persistir, o MSP430 figura entre os líderes em todos os estudos [39] e, além disso, a TI oferece vantagens importantes sobre outras companhias no contexto de redução do período de desenvolvimento. Por exemplo, o fornecimento de amostras para a utilização em trabalhos acadêmicos, um extenso catálogo de produtos abrangendo módulos de diversas funcionalidades compatíveis entre si, excelente documentação e existência de uma ampla comunidade ativa.

A Texas comercializa kits de desenvolvimento com microcontroladores de suas famílias mais importantes, o que acelera as etapas iniciais de desenvolvimento de hardware, firmware, e facilita os primeiros

# Monitor de Bateria

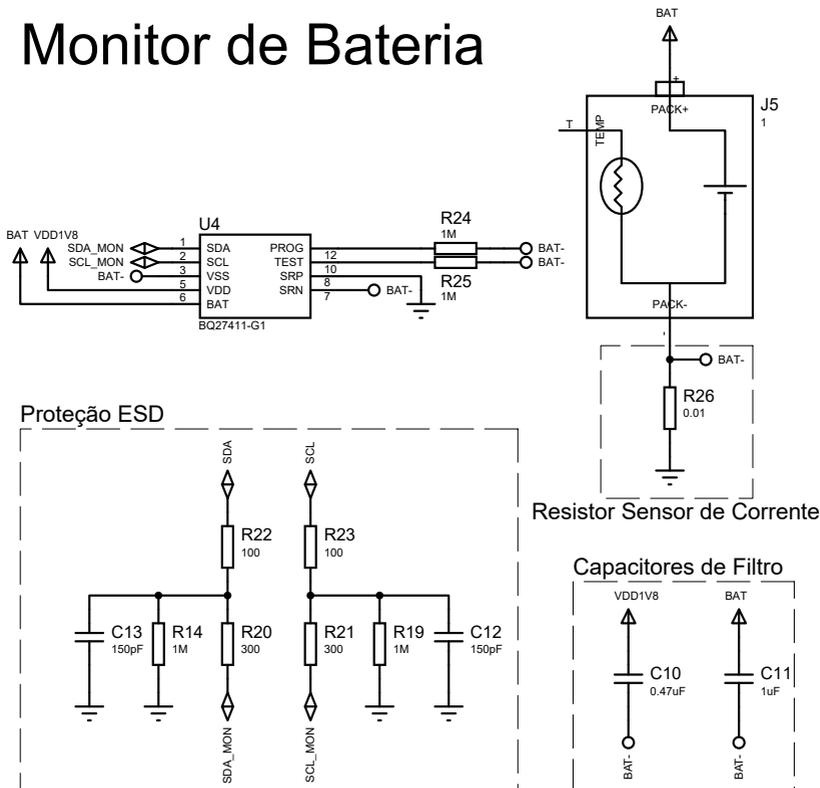


Figura 4.5: Esquemático utilizado com o monitor de bateria BQ27411.

testes modulares. Adicionalmente, a TI disponibiliza uma ferramenta gráfica de geração automática de código (GRACE) para configuração dos periféricos de seus microcontroladores da família MSP430. Com ela, é possível acelerar ainda mais a construção das rotinas de controle do projeto.

A TI oferece diversos MCUs com diferentes preços e capacidades de processamento. A família MSP430G2 se destaca por ser a de mais baixo custo e de menor consumo. Ela é composta por microcontroladores sem aceleração em hardware para operações aritméticas, com poucos periféricos, e apenas algumas poucas portas de entrada e saída de propósito geral (GPIO).

Os primeiros rascunhos criados para modelar o comportamento

das rotinas de controle do sistema, elaborados nas etapas iniciais de projeto, indicavam uma tendência de baixa complexidade computacional e ausência de processamento de sinais como características do código a ser executado pelo microcontrolador. Posteriormente, verificou-se a necessidade de apenas quatro registradores temporizadores, um barramento de comunicação digital para implementar o protocolo I2C e oito portas de entrada e saída. Além disso, possivelmente alguns eventos do firmware precisariam acontecer precisamente em intervalos de tempo pré-determinados e, por isso, o MCU deve conter um gerador de sinal de relógio preciso e confiável, ou oferecer suporte para conexão de um cristal externo para exercer tal função.

O MCU de modelo MSP430G2553, membro da família MSP430G2, atende a todos os requisitos e oferece todas as facilidades citadas anteriormente. Esse modelo é composto por dois dispositivos, um com número de série igual a MSP430G2553IPW20 e um com número de série igual a MSP430G2553IPW28, com 16 e 24 portas digitais de propósito geral, respectivamente. Além disso, dois outros motivos foram importantes para a escolha desse microcontrolador: *know-how* interno na empresa devido à sua utilização em outros projetos, e familiaridade e experiência do autor com esse modelo específico de MCU.

A decisão do modelo do microcontrolador que compõe o módulo de processamento levou em consideração a necessidade de portas digitais dos demais módulos do sistema. No caso do Tau, dez portas são necessárias para dar suporte a todos os módulos. A Tabela 4.2 apresenta a lista detalhada com as portas digitais do microcontrolador ocupadas por cada módulo e as suas funções.

A Figura 4.6 apresenta as conexões com do microcontrolador apontando todos os pinos utilizados. Na figura, observa-se os resistores de pull-up necessários para a o correto funcionamento da interface I2C e para a configuração do pino de SEN<sub>n</sub> do Si4713, bem como os capacitores de filtro sugeridos para o MCU. É possível notar a presença do conector para programação do microcontrolador e os componentes passivos necessários para a gravação apropriada do firmware. Note que um cristal está presente no esquemático para realizar *overclock* do MCU ou para estabelecer uma base de tempo constante. Apesar disso, em nenhum momento do desenvolvimento do produto, identificou-se a necessidade do cristal para nenhuma dessas funções.

Tabela 4.2: Descrição dos pinos necessários na interface com os demais módulos do Tau

Módulo	Função	Número de Portas
Interface com o usuário	Botões de entrada	2
	Display luminoso	4
Interface com de áudio	Habilitar módulo	1
	Interface I2C*	2
Gerenciamento de energia	Habilitar módulo	1
	Interface I2C*	2
	<b>Total</b>	10

\* Pinos da interface I2C são compartilhados pelos escravos conectados ao barramento.

O MSP430G2553 oferece seis modos de operação, sendo eles o modo ativo (AM) e cinco modos de baixo consumo de potência (LPM). A Tabela 4.3 apresenta uma compilação das descrições de cada um desses modos [16]. O consumo do MSP em modo ativo é de aproximadamente 2,5 mA e no modo de mais baixo consumo é de aproximadamente 100 nA. Nos demais modos, o consumo assume valores intermediários entre esses dois limites.

Tabela 4.3: Lista de modos de operação do MSP430G2553

Modo de Operação	Descrição
AM	- Todos os relógios habilitados
LPM0	- CPU desabilitado - ACLK e SMCLK ativos, MCLK desabilitados
LPM1	- CPU desabilitados - ACLK e SMCLK ativos, MCLK desabilitados - Gerador dc do DCO desabilitado se o DCO não é utilizado em AM
LPM2	- CPU desabilitada - SMCLK e MCLK desabilitados - ACLK ativo - Gerador dc do DCO continua habilitado
LPM3	- CPU desabilitada - SMCLK e MCLK desabilitados - ACLK ativo - Gerador dc do DCO desabilitado
LPM4	- CPU desabilitada - SMCLK e MCLK desabilitados - ACLK desativo - Gerador dc do DCO desabilitado - Oscilador de cristal é parado

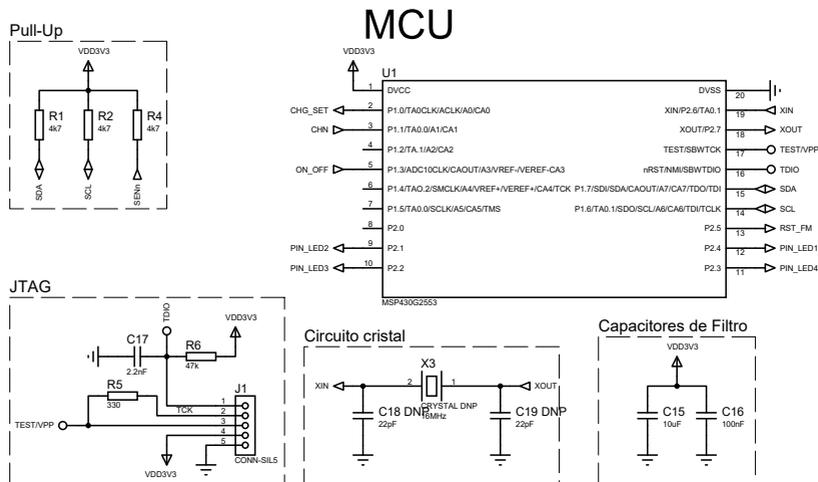


Figura 4.6: Conexões do microcontrolador MSP430G2553IPW20.

**4.1.1.2.5 Consumo e bateria** O último elemento de hardware especificado foi a bateria. Para atender as especificações relacionadas às dimensões da carcaça do dispositivo, e pelo fato de a empresa já ter utilizado baterias semelhantes e do mesmo fabricante, optou-se por uma bateria de íon de Lítio prismática fabricada pela Rontek. Inicialmente, a capacidade de carga da bateria seria determinada com base na especificação de tempo de autonomia de pelo menos oito horas, e levaria em consideração o consumo estimado para cada módulo em modo ativo oferecendo uma boa margem para comportar eventuais imprevistos durante o desenvolvimento. A Tabela 4.4 descreve detalhadamente o consumo estimado de cada um dos módulos e indica um consumo total estimado em 42,5 mA.

A Equação 4.2 descreve a mínima capacidade de carga da bateria para garantir o tempo de autonomia de oito horas. Nessas condições, uma bateria com capacidade de aproximadamente 500 mAh ofereceria a margem de segurança desejada. Entretanto, em etapas mais avançadas do projeto, optou-se por utilizar a mesma bateria no Tau e no Ro pela pequena diferença de preço entre os diversos modelos com diferentes capacidades de carga. O Ro consome significativamente mais potência do que o Tau, e por esse motivo seu consumo foi utilizado para especificar a carga da bateria.

Tabela 4.4: Descrição do consumo dos módulos que compõe o Tau.

<b>Módulo</b>	<b>Consumo</b>
<b>Interface com o usuário</b>	20 mA
<b>Interface com a fonte sonora</b>	20 mA
<b>Gerenciamento de energia</b>	0*
<b>Processamento</b>	2,5 mA
<b>Total</b>	42,5 mA

\* Considerou-se o consumo do carregador e monitor de bateria insignificantes.

$$E = I \times t = 42,5mA \times 8h \Rightarrow E = 340mAh \quad (4.2)$$

#### 4.1.1.3 Estimativa de custo

O preço de unitário de todos os componentes presentes na unidade foi pesquisado em três fornecedores e a cotação de menor custo foi considerada. A Tabela 4.5 apresenta a estimativa de custo com componentes eletrônicos necessário para montar uma, cem e mil unidades do Tau. Os valores apresentados não representam de forma rigorosa o custo total para produção do dispositivo, pois ignoram questões importantes como a fabricação da placa de circuito impresso, a carcaça e mão-de-obra. Entretanto, essas informações foram exigidas pela Acústica Amplivox a fim de auxiliar a determinação do preço aproximado de venda do Tau e a Tabela 4.5 pode ser utilizada como base para uma avaliação simplificada de desempenho em função do custo do protótipo. Por esse motivo, a tabela foi incluída neste trabalho.

### 4.1.2 Ro

#### 4.1.2.1 Especificações

Baseado nos requisitos do produto, foram especificadas as seguintes características para os componentes de hardware do Ro:

- **Módulo de processamento:** Plataforma computacional de ultra-baixo consumo capaz de controlar o comportamento dos demais

Tabela 4.5: Descrição dos pinos necessários na interface com os demais módulos do Tau.

Categoria	Quantidade	Custo unitário		
		1 un.	100 un.	1000 un.
Resistores	28	\$ 3,93	\$ 0,85	\$ 0,44
Capacitores	27	\$ 2,62	\$ 0,46	\$ 0,26
Indutores	3	\$ 0,77	\$ 0,49	\$ 0,34
Diodos	15	\$ 3,68	\$ 2,73	\$ 2,21
Cristais	2	\$ 0,17	\$ 0,12	\$ 0,09
Circuitos integrados	4	\$ 23,19	\$ 19,54	\$ 8,65
Outros	7	\$ 5,69	\$ 5,29	\$ 5,13
<b>Total</b>	87	\$ 40,05	\$ 29,48	\$ 17,12

módulos. Buscando oferecer flexibilidade para conexão de diversos componentes eletrônicos, especificou-se que o processador deveria possuir, em hardware, blocos dedicados para implementação dos principais protocolos de comunicação serial, I2C, SPI e UART. Adicionalmente, a unidade computacional deveria oferecer uma quantidade suficiente de portas de entrada e saída de propósito geral (GPIO) para identificar os eventos e controlar os módulos não conectados ao barramento digital. A escolha também deveria levar em consideração o *know-how* da empresa em relação à programação de sistemas embarcados a fim de acelerar as etapas de desenvolvimento, integração, depuração e testes dos protótipos.

- Módulo de gerenciamento de energia:** Para atender aos requisitos apresentados no Capítulo 3, definiu-se que o módulo de gerenciamento de energia deveria ser capaz de fornecer energia suficiente para a correta operação dos demais módulos e gerenciar ciclos de carga e descarga eficientes e seguros para uma bateria que ofereça ao menos 8 horas de autonomia monitorando o nível de carga da bateria em todos os momentos. Especificou-se que enquanto a bateria é recarregada, o módulo deve ser capaz de

evitar que sua carga seja consumida e evitar expô-la à situações de sobretensão e/ou sobrecorrente. O módulo deve permitir a utilização de cabos USB na conexão com a fonte de alimentação oferecendo um conector micro USB para conexão. Quaisquer circuitos integrados que o componham devem oferecer a opção de ser controlados por algum dos protocolos digitais citados nas especificações do módulo de processamento.

- **Módulo de interface com o Tau:** Deve operar em baixo consumo e ser capaz de capturar o sinal transmitido pelo Tau independente do canal de transmissão, recuperar o sinal sonoro e disponibilizá-lo para o módulo de condicionamento e reprodução do som. Quaisquer circuitos integrados que o componham devem oferecer a opção de ser controlados por algum dos protocolos digitais citados nas especificações do módulo de processamento.
- **Módulo de interface com dispositivos *mobile*:** Unidade de baixo consumo que ofereça ao usuário a possibilidade de atender ligações telefônicas originadas ou recebidas em um dispositivo *mobile* sem a necessidade de manuseá-lo. Este módulo deve capturar a voz do usuário em um microfone interno e enviá-la sem fio para o dispositivo *mobile*, receber o sinal de voz do interlocutor e reproduzi-lo em sua saída de som. Durante as chamadas o som proveniente do Tau deve ser cortado. Quaisquer circuitos integrados que o componham devem oferecer a opção de ser controlados por algum dos protocolos digitais citados nas especificações do módulo de processamento.
- **Módulo de condicionamento e reprodução do som:** O bloco deve ser compatível com os padrões de áudio dos módulos de interface com o Tau e de interface com dispositivos e ser capaz de receber suas saídas, condicioná-las conforme necessário e controlar qual dos dois sinais sonoros será disponibilizado em sua saída. O condicionamento deve incluir a amplificação suficiente do som a ponto de possibilitar o aumento da inteligibilidade do discurso a do uma pessoa com perda auditiva.
- **Módulo de interface com o usuário:** Especificou-se que o display luminoso indicador do nível de bateria deveria ser com-

posto por 7 LEDs alinhados. A representação do nível da bateria seria feita de forma incremental, ou seja, quando a bateria estiver completamente carregada, os 7 LEDs devem estar acesos, e quando estiver com a carga mínima permitida para operação normal, apenas 1. O display luminoso indicador do nível de volume também deveria ser composto por 7 LEDs alinhados. A representação do nível de volume seria feita de forma incremental, ou seja, quando o volume estiver em sua configuração máxima, os 7 LEDs devem estar acessos, e quando estiver sua configuração mínima, apenas 1. Em relação ao display luminoso que indica o canal de transmissão, definiu-se que 5 LEDs seriam utilizados, um associado a cada canal. Além disso, um LED adicional deveria piscar com período de 1 segundo para caso o sistema esteja em modo de pareamento, permanecer aceso quando uma conexão Bluetooth estiver estabelecida com o dispositivo e permanecer apagado nas demais situações. A interface com o usuário também deveria conter cinco botões: um para a função de liga desliga, um para a troca de canal, um para aumentar e um para diminuir o volume e, por fim, um para colocar o dispositivo no modo de pareamento. A função de liga e desliga só deve ser executada se o respectivo botão for pressionado por mais de dois segundos e as demais funções devem ser executadas cada vez que o respectivo botão for pressionado. Devido a decisões relacionadas a ergonomia produto, optou-se por posicionar os botões em faces diferentes do produto: os botões com função de liga e desliga e ajusta de volume devem estar localizados nas faces laterais do dispositivo e os botões de troca de canal e pareamento na sua face frontal.

#### 4.1.2.2 Soluções propostas

Considerando as características especificadas para cada módulo, soluções de hardware foram propostas. Muitas soluções utilizadas no Tau foram reaproveitadas, entretanto, para as demais, não havia disponível no mercado dispositivos que oferecessem uma solução completa e que atendesse a todas as especificações exigidas para nenhum dos módulos descritos. Portanto, assim como no caso do Tau, todas as soluções foram desenvolvidas durante o andamento deste trabalho como

partes do projeto e construídas especialmente para este produto.

**4.1.2.2.1 Módulo de interface com o usuário** Os comandos de liga e desliga, troca de canal, ajuste e volume e conexão com dispositivos *mobile* são inseridos no sistema através de cinco botões tácteis. Devido ao posicionamento dos botões, dois componentes diferentes também foram utilizados no Ro. Os botões referentes à troca de canal e conexão com o dispositivo *mobile*, são montado paralelamente à placa eletrônica. E os botões que desempenham as funções de liga e desliga e ajuste de volume, são montados ortogonalmente à placa de circuito impresso. A fim de minimizar o ruído de trepidação, o mesmo circuito utilizado no Tau (apresentado na Figura 4.1) foi incorporado aos botões do Ro.

No desenvolvimento do display luminoso do Ro, composto por 20 LEDs, também utilizou-se a técnica Charlieplexing. De acordo com a Equação 4.1, seria necessário utilizar seis portas digitais para controlar todos estes LEDs em uma única estrutura de Charlieplexing. Essa quantidade de GPIO permite o acionamento de até 30 LEDs. Entretanto, essa configuração tornaria o circuito muito mais complexo e dificultaria as tarefas de desenhar as trilhas de conexão da placa eletrônica e a ajustar as questões de temporização a fim de explorar a persistência da visão.

Por esses motivos, optou-se por separar o display do Ro em três grupos. O primeiro é composto apenas pelo LED indicador de conectividade com dispositivos *mobile*. Foi possível controlá-lo diretamente pelo Módulo de interface com dispositivos *mobile*. O segundo grupo contém os LEDs indicadores de canal de transmissão e de nível de bateria. Estes LEDs foram montados em uma estrutura idêntica à utilizada na unidade transmissora e foram controlados exatamente da mesma forma. Por fim, há os sete LEDs indicadores do nível de volume. Para eles, utilizou-se o mesmo circuito de Charlieplexing de quatro pinos, que oferece a possibilidade de expandir este grupo do display em até cinco LEDs. Em etapas intermediárias do projeto avaliou-se a possibilidade de aumentar o número de diodos utilizados para indicar o nível de volume. Contudo, optou-se por manter sete LEDs (mesmo número utilizados para indicar o nível de bateria), com o intuito de garantir a simetria entre as colunas do display pre-

sentes na carcaça do produto.

Ao total, treze portas digitais do microcontrolador são ocupadas pelo módulo de interface com o usuário: oito na implementação do display luminoso e cinco com os botões.

**4.1.2.2.2 Módulo de interface com o Tau** O chip Si4713 é responsável pela transmissão do som efetuada pelo Tau. A recepção do sinal é realizada no Ro através do circuito integrado Si4705, da mesma família. A interface de saída de áudio estéreo do chip pode ser configurada para ser analógica ou digital. Inicialmente, optou-se pela interface digital. Entretanto, durante o projeto dos demais módulos do sistema, identificou-se a possibilidade de diminuir o custo total de hardware do dispositivo utilizando-se a saída analógica.

A comunicação e configuração do Si4705 pode ser realizada através dos protocolos I2C e SPI. A fim de minimizar o número necessário de portas digitais para controlá-lo, optou-se por utilizar a interface I2C, que é a configuração padrão do chip. O ajuste do protocolo de comunicação é feito de forma semelhante à realizada no Si4713, e por esse motivo, os pinos GPO1 e GPO2 foram deixados em aberto. Assim como na utilização do Si4713, no modo I2C, o pino SENn do chip funciona como um seletor de seu *slave address*. Novamente, todos os dispositivos conectados ao barramento possuem endereços diferentes e não foi necessário alterar seu valor. Nesse contexto, um resistor de pull-up foi conectado ao pino SENn para mantê-lo em sua configuração padrão. O pino RSTn, controlado pelo MCU, reinicializa o receptor FM.

Ao total, três pinos do microcontrolador são utilizados para controlar o Si4705: dois para a interface I2C e um para reinicialização do dispositivo. As demais conexões do circuito integrado com os componentes externos necessários para seu correto funcionamento, como por exemplo, capacitores de filtro e cristal, são apresentados na Figura 4.7.

**4.1.2.2.3 Módulo de interface com dispositivos *mobile*** Graças ao baixo consumo e as facilidades na utilização das interfaces de áudio da tecnologia, optou-se por utilizar o Bluetooth na realização da função de conectividade com dispositivos *mobile*. Mais especificamente,

# Receptor FM

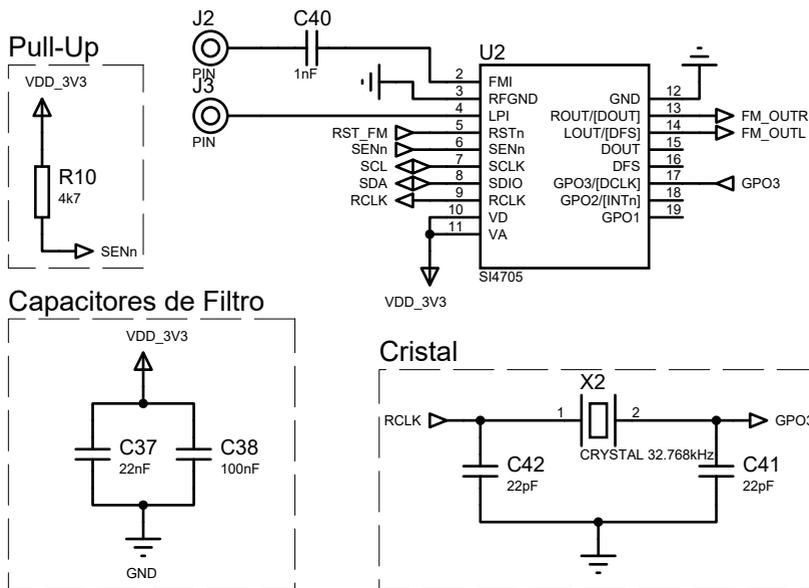


Figura 4.7: Esquemático utilizado com o receptor FM Si4705.

pelelo perfil HFP (*Hands-Free Profile*). Tipicamente, utiliza-se este perfil quando deseja-se configurar um dispositivo externo como entrada e saída de áudio de um *smartphone* através de uma conexão sem fio que mantenha as funções padrões de telefonia sem o manuseio direto do *mobile* [10]. Vale destacar que este perfil é próprio para transmissão de fala e por isso a frequência de amostragem associada a este perfil é de 8 kHz e portanto, as componentes acima de 4 kHz do sinal de áudio são eliminadas ao utilizá-lo.

Após a definição do perfil, realizou-se uma busca por soluções que pudessem ser incorporadas no sistema. Pelo seu baixíssimo custo e disponibilidade durante o período de desenvolvimento, a utilização do módulo MODN2564, da Texas Instruments, foi inicialmente proposta. Entretanto, durante a análise de viabilidade de seu uso, verificou-se que o dispositivo não oferece a pilha de Bluetooth e seria necessário implementá-la e executá-la no Módulo de processamento.

Assim, pelo fato da implementação fugir do escopo deste trabalho e pelo alto grau de complexidade computacional que a pilha exigiria, sua utilização foi descartada. Amenizou-se, então, a importância alocada para o critério baixo custo e a pesquisa resultou no módulo BM23, comercializado pela Microchip Technology. Por um preço extremamente competitivo, o BM23 oferece todas as funcionalidades especificadas, implementa a pilha Bluetooth, o perfil HFP, e possui um carregador de bateria compatível embarcado, dispensando a utilização de uma solução dedicada. O módulo pode ser configurado através de sua interface UART e o fabricante oferece uma interface gráfica para Windows que permite a seleção dos modos de operação, perfis utilizados, características do carregador de bateria e outras configurações. O BM23 possui uma interface digital como saída de áudio e utiliza o protocolo I2S. Seu consumo típico é de 11,7 mA em operação normal e 2  $\mu$ A no modo *power down*.

A comunicação entre o BM23 e o dispositivo mobile, após uma configuração inicial, acontece automaticamente quando o módulo identifica uma chamada telefônica. Primeiramente, é necessário colocar o BM23 em modo de pareamento de forma que o *mobile* em questão possa identificá-lo e se conectar a ele. A partir desse momento, sempre que os dois dispositivos estiverem dentro do alcance do enlace, eles realizam a conexão automaticamente. A identificação de chamadas e a transmissão de áudio propriamente dita é realizada internamente pelo BM23, em um nível de abstração mais baixo, através do perfil HFP. O transdutor utilizado na captação do sinal sonoro utilizado nas chamadas telefônicas é realizado através de um microfone de eletreto.

Além da interface UART, duas portas digitais são necessárias para controlar o BM23, totalizando quatro GPIO do MCU dedicadas ao Módulo de interface com dispositivos *mobile*: a primeira é referente ao pino RST utilizado para reinicializar o módulo, a segunda é utilizada para controlar o pino MFB. Ele é uma entrada de multi-função e o efeito de alterá-la depende do estado do dispositivo. É necessário utilizá-lo para configurar o módulo Bluetooth no modo de pareamento, por exemplo. A Figura 4.8 apresenta as demais conexões do BM23, incluindo os componentes externos necessários para seu correto funcionamento, como capacitores de filtro e o circuito de polarização do microfone. O diodo D1 e o conector USB fazem parte do

circuito associado ao carregador de bateria presente no BM23. Essa funcionalidade faz parte do Módulo de gerenciamento de energia, e seus detalhes são discutidas na sua respectiva seção.

## Módulo Bluetooth

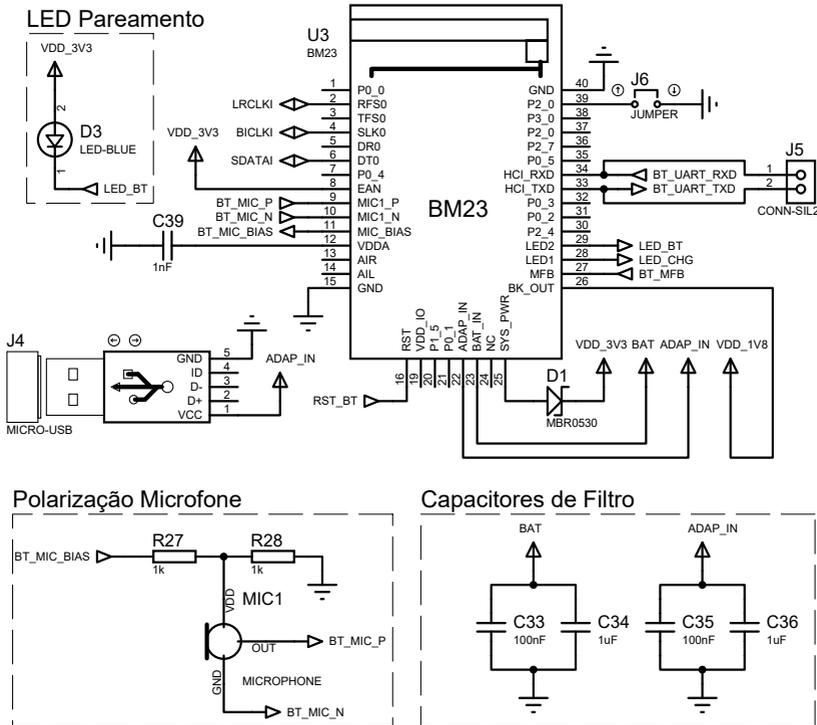


Figura 4.8: Esquemático utilizado com o módulo Bluetooth BM23.

**4.1.2.2.4 Módulo de condicionamento e reprodução do som** A definição precisa das especificações impostas ao Módulo de condicionamento e reprodução do som foi uma das últimas etapas do projeto de hardware do Ro. Isso se deu pois era necessário saber em detalhes as características das interfaces de áudio dos demais módulos a fim de escolher soluções consistentes com o sistema como um todo.

Em primeiro lugar, este Módulo deve operar em baixo consumo e ser compatível com as interfaces de saída do Si4705 e do BM23. Ou

seja, deve suportar o protocolo I2S e um sinal de áudio estéreo analógico como entradas. Além disso, a solução proposta deve ser capaz de determinar qual sinal será disponibilizado em sua saída. Esse ajuste deve ser realizado através de um sinal de controle enviado pelo Módulo de processamento. O Módulo deve filtrar o áudio reproduzido a fim de eliminar componentes externas à faixa de frequências audível e amplificá-lo ao ponto de permitir que uma pessoa com perda auditiva o escute normalmente. Deve ser possível configurar seu nível de volume em no mínimo sete níveis diferentes. A faixa recomendada para a tensão de operação deve ser compatível com os demais módulos (entre 1,8 e 3,6 V), dispensando a necessidade de diversas trilhas de alimentação e os componentes necessários para gerá-las. Por fim, a configuração de qualquer circuito integrado presente na solução deve poder ser realizada através de uma das interfaces digitais listadas nas especificações do Módulo de processamento.

Aplicando estas restrições à pesquisa por componentes, encontrou-se poucas soluções de baixo custo e complexidade condizentes com o restante do produto. Optou-se pelo amplificador e multiplexador de áudio STA529, da Texas Instruments. Ele opera com tensões entre 1,80 V e 3,60 V; e seu consumo típico é de 15,5 mA em operação e 2  $\mu$ A em *stand-by*. O chip pode ser configurado através de sua interface I2C, oferece compatibilidade com todos os circuitos integrados presentes no dispositivo e oferece uma saída diferencial de áudio analógico estéreo, que pode ser conectada diretamente aos fones de ouvido. As possíveis configurações incluem as características da amostragem, o ganho e opções de efeito aplicadas ao sinal.

Além da interface de comunicação digital, seu pino RESET (que reinicializa o dispositivo) é controlado pelo MCU para garantir o correto funcionamento do STA529 durante suas operações de *power-up* e *power-down*. Ao total, três portas digitais do microcontrolador são necessárias para orquestrar o comportamento deste circuito integrado.

Ele foi configurado para operar com 32 kHz de frequência de amostragem e realizar a conversão analógico-digital com 24 bits de resolução. Sua faixa de valores possíveis para o ganho foram divididos em sete intervalos que foram associados a cada um dos níveis de volume. Quanto ao efeito de áudio, optou-se por utilizar uma configuração que dá ênfase na faixa de frequências em que se encontram as principais

componentes da fala. Optou-se por utilizar-se um efeito fixo e sem a possibilidade de alterar-se suas características através de um equalizador. Isso ocorre pois em situações como esta, ajustes desse tipo devem ser realizado apenas por profissionais autorizados a fim de minimizar a possibilidade de que o mau uso prejudique ainda mais a audição do usuário.

Com o intuito de filtrar eventuais ruídos induzidos nas trilhas que carregam o sinal de áudio, um filtro passivo passa-baixas LC foi incluído entre o STA529 e o conector de fones de ouvido. Optou-se por essa topologia para minimizar o consumo DC e a atenuação do sinal sem a adição de componentes ativos. O circuito utilizado é apresentado na Figura 4.9. Os sinais OUT1A a OUT2B são as saídas do STA529 e é possível observar na figura o conector do tipo P2 para fones de ouvido.

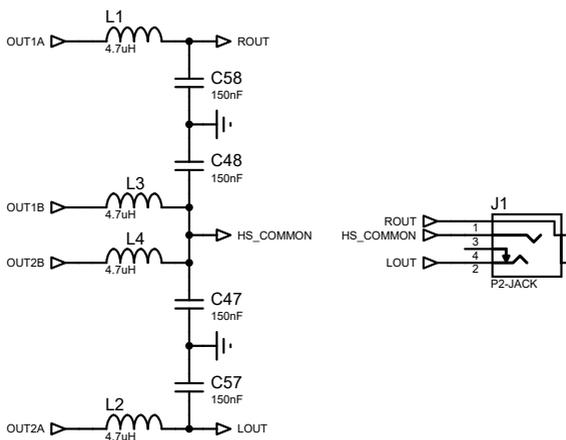


Figura 4.9: Filtro passa-baixas LC utilizado.

O STA529 exige o uso de dezenas de capacitores externos, seu esquemático utilizado é simples, extenso e não adiciona nenhuma informação que não tenha sido descrita previamente. Por isso, ele não aparece neste documento.

**4.1.2.2.5 Módulo de gerenciamento de energia** Como citado anteriormente, utilizou-se o carregador de bateria embarcado ao BM23 para gerir os ciclos de carga e descarga da bateria da unidade recep-

tora. Esse carregador é muito semelhante ao BQ24266 em termos de topologia (*Power-Path*) e funcionalidades (rotina DPM). A principal diferença reside na corrente máxima de carga, que neste caso é de 600 mA. A configuração dos ciclos pode ser realizada através da mesma interface gráfica para Windows utilizada na definição das questões relacionadas ao protocolo Bluetooth do BM23 ou através da interface UART presente no módulo. Optou-se por utilizar um conector USB como interface do sistema com a fonte de alimentação. Novamente, o nível de tensão da saída disponibilizada para alimentar o sistema (SYS\_PWR) é 4,2 V e um diodo com 0,7 V de queda foi adicionado em série com o pino SYS\_PWR.

A funcionalidade de monitorar o nível da bateria foi realizada pelo mesmo circuito integrado utilizado no Tau, o BQ27411 da Texas Instruments. A implementação em hardware do chip foi exatamente igual à utilizada na unidade receptora. Por esse motivo o esquemático não é apresentado repetidamente neste documento. Ao total, três portas digitais são utilizadas para controlar o BQ27411: duas com a sua interface I2C e uma para reinicializá-lo.

**4.1.2.2.6 Módulo de processamento** Pelos mesmos motivos e facilidades descritos na Seção 4.1.1.2.4 utilizou-se o MSP430G2553 na implementação do Módulo de processamento. É necessário, por fim, definir qual modelo específico deve ser incorporado ao sistema. Esta decisão levou em consideração a necessidade de portas digitais de entrada e saída dos demais módulos do sistema. Em relação ao Ro, 21 portas são necessárias para controlar os demais Módulos. A Tabela 4.6 apresenta a lista detalhada com as GPIO do microcontrolador ocupadas por cada módulo e suas respectivas funções. E nesse contexto, é necessário utilizar o MSP430G2553IPW28, que oferece 24 portas digitais.

A Figura 4.10 apresenta as conexões do microcontrolador apontando todos os pinos utilizados. Na figura, observa-se os resistores de *pull-up* necessários para o correto funcionamento de sua interface I2C, bem como os capacitores de filtro sugeridos para o MCU. Nota-se também a presença do conector para gravação do microcontrolador e os componentes passivos necessários para a gravação apropriada do firmware. Um cristal está presente no esquemático para permitir o

Tabela 4.6: Descrição dos pinos necessários na interface com os demais módulos do Ro.

Módulo	Função	Número de portas
Interface com o usuário	Charlieplexing	8
	Botões	5
Interface com o Tau	Habilitar módulo	1
	Interface I2C*	2
Interface com dispositivos mobile	Configurar módulo	2
	Interface UART	2
Condicionamento e reprodução do som	Habilitar módulo	1
	Interface I2C*	2
Gerenciamento de energia	Interface I2C*	2
	<b>Total</b>	<b>21</b>

\* Pinos da interface I2C são compartilhados pelos escravos conectados ao barramento.

overclock do MCU ou para estabelecer uma base de tempo constante. Apesar disso, em nenhum momento do desenvolvimento do produto identificou-se a necessidade do cristal para nenhuma dessas funções.

**4.1.2.2.7 Consumo e bateria** A explicação detalhada do processo de escolha do tipo de bateria e de seu fabricante foi apresentada na Seção 4.1.1.2.5. Para determinar a capacidade de carga da bateria, realizou-se um levantamento do consumo típico de cada módulo em operação normal. A bateria escolhida deve ser capaz de garantir um tempo de autonomia superior à oito horas nessas mesmas condições. A Tabela 4.7 descreve detalhadamente o consumo estimado de cada um dos módulos e indica um consumo total estimado em 86,2 mA.

A Equação 4.3 descreve a mínima capacidade de carga da bateria para garantir o tempo de autonomia de oito horas. Nessas condições, uma bateria com capacidade de aproximadamente 1000 mAh ofereceria a margem de segurança desejada. Entre as baterias disponíveis no catálogo da Rontek que atendiam a esse requisito e possuíam as mesmas características descritas anteriormente, a de menor custo possuía capacidade de carga de 1100 mAh. Por isso, optou-se por utilizá-la.

$$E = I \times t = 88,7mA \times 8h \Rightarrow E = 709,6mAh \quad (4.3)$$

# Microcontrolador

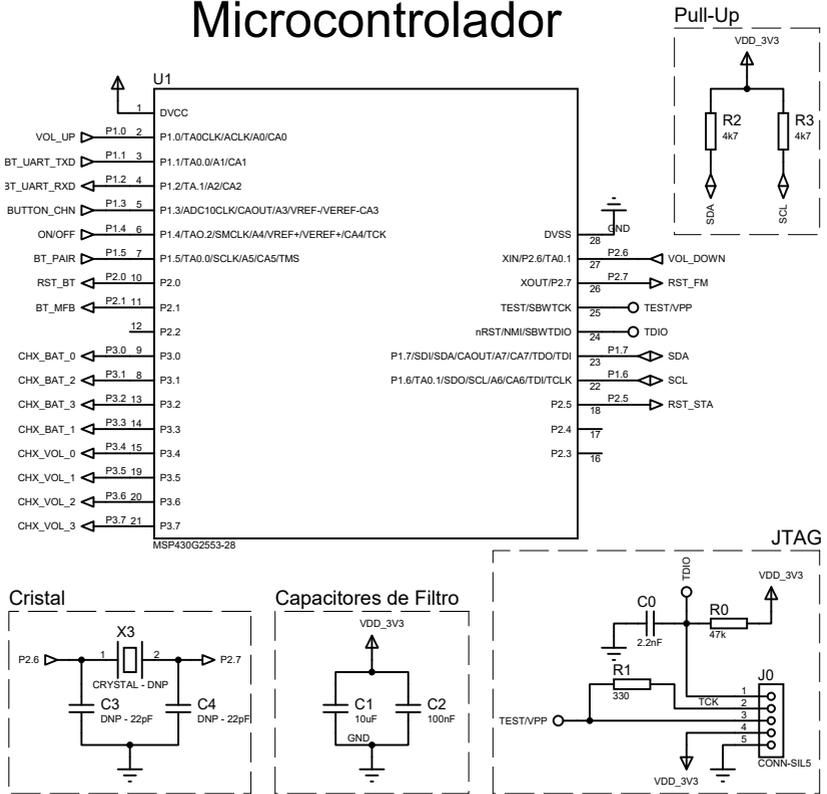


Figura 4.10: Conexões do microcontrolador MSP430G2553IPW28.

## 4.1.2.3 Estimativa de custo

O preço unitário de todos os componentes presentes na unidade foi pesquisado em três fornecedores e a cotação de menor custo foi considerada. A Tabela 4.8 apresenta a estimativa de custo com componentes eletrônicos necessário para montar uma, cem e mil unidades do Ro. Novamente os valores apresentados não representam de forma rigorosa o custo total para produção do dispositivo. Entretanto, essas informações foram exigidas pela Acústica Amplivox a fim de auxiliar a determinação do preço aproximado de venda do Ro e a Tabela 4.8 pode ser utilizada como base para uma avaliação simplificada de desempenho em função do custo do protótipo. Por esse motivo, a tabela

Tabela 4.7: Descrição do consumo dos módulos que compõem o Ro.

<b>Módulo</b>	<b>Consumo</b>
<b>Interface com o usuário</b>	40 mA
<b>Interface com o Tau</b>	19 mA
<b>Interface com dispositivos mobile</b>	11,7 mA
<b>Condicionamento e reprodução do som</b>	15,5 mA
<b>Gerenciamento de energia</b>	0*
<b>Processamento</b>	2,5 mA
<b>Total</b>	88,7 mA

\* Considerou-se o consumo do carregador e monitor de bateria insignificantes.

foi incluída neste trabalho.

## 4.2 Firmware

O produto desenvolvido neste trabalho pode ser decomposto em duas unidades distintas. Uma delas realiza a transmissão e a outra a recepção e reprodução do áudio, conforme já descrito nos capítulos anteriores. Apesar de possuírem funcionalidades em comum, essas unidades são diferentes em relação a sua estrutura e complexidade. Por esse motivo, foi necessário desenvolver dois firmwares específicos, considerando as particularidades de cada unidade.

O projeto do software embarcado foi realizado a partir das informações fornecidas pelas empresas parceiras e resumidas no Capítulo 3, e contou com forte interação das mesmas, principalmente no que se refere a avaliação da ergonomia, facilidade e simplicidade no uso do produto. O fluxo de projeto foi dividido nas quatro nas quatro etapas descritas a seguir.

Primeiramente, os casos de uso previstos para o Tau e o Ro foram identificados. Casos de uso de alto nível correspondem a processos de interação com o sistema que ocorrem em um intervalo de tempo contíguo e bem definido, e que buscam atingir um objetivo específico. Além do tipo de interação, os casos de uso indicam também quem é o ator (indivíduo ou sistema) envolvido na operação.

Tabela 4.8: Estimativa de custo com componentes eletrônicos para a montagem do Ro.

Categoria	Quantidade	Custo Unitário		
		1 un.	100 un.	1000 un.
Resistores	31	\$ 3,21	\$ 0,31	\$ 0,15
Capacitores	53	\$ 5,89	\$ 1,16	\$ 0,70
Indutores	4	\$ 0,40	\$ 0,24	\$ 0,18
Diodo	25	\$ 6,08	\$ 4,57	\$ 3,72
Cristais	3	\$ 0,83	\$ 0,60	\$ 0,47
Circuitos integrados	5	\$ 30,46	\$ 26,94	\$ 16,52
Outros	14	\$ 5,99	\$ 5,52	\$ 5,29
<b>Total</b>	135	\$ 52,86	\$ 39,34	\$ 27,04

A partir dos casos de uso identificados, uma arquitetura básica de software foi proposta para as duas unidades na forma de uma lista de módulos, ou componentes, que compõem o firmware, evidenciando interações entre eles.

A seguir, com base na arquitetura básica proposta, desenvolveu-se um diagrama de classes específico para cada unidade. O diagrama de classes é uma das partes mais importantes de qualquer modelagem de software, sendo capaz de representar as informações disponíveis e as relações existentes entre as estruturas que compõem um sistema, além das operações que podem ser realizadas sobre elas. É comum que a etapa de modelagem comece com um diagrama de classes de alto nível e que este seja refinado até o ponto de poder ser utilizado para orientar a implementação do sistema.

O funcionamento das duas unidades como um todo foi então modelado através de diagramas de eventos. Este diagrama fragmenta o comportamento do software em estados, e descreve a função de cada um deles. As transições entre os estados são controladas por eventos - que podem ser gerados periodicamente de forma automática ou forçados pelo usuário, por exemplo - que também são descritos neste modelo.

Finalmente, o comportamento esperado do sistema ao longo do

tempo foi modelado através de diversos diagramas de sequência, um para cada caso de uso. Esse tipo de modelagem é muito útil para descrever interação entre os módulos de hardware e/ou software a partir dos eventos gerados pelo usuário. Além disso, do ponto de vista de testes funcionais, esse diagrama auxilia a identificação do número de sequências existentes e permite a realização consciente de testes dedicados à todas elas.

Os modelos desenvolvidos ao longo da fase de projeto das unidades são apresentados a seguir.

## 4.2.1 Tau

### 4.2.1.1 Casos de uso

As possíveis interações do usuário com a unidade transmissora foram descritos através dos três casos de uso listados a seguir. Uma representação gráfica destas interações é apresentada na Figura 4.11.

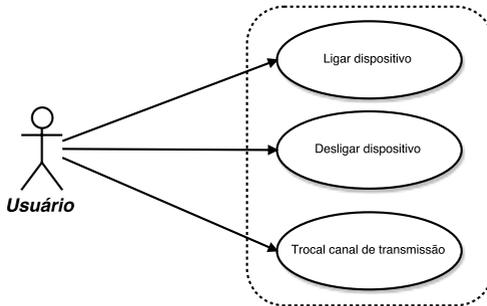


Figura 4.11: Principais casos de uso modelados para o software embarcado.

- **Ligar o dispositivo:** O usuário executa a ação de pressionar o botão de liga e desliga por mais de dois segundos com o sistema desligado. O sistema responde indicando o nível de bateria e o canal de transmissão através do display luminoso, iniciando a transmissão de áudio por FM através do canal um, e se tornando suscetível às demais interações previstas.
- **Desligar o dispositivo:** O usuário executa a ação de pressionar o botão de liga e desliga por mais de dois segundos com o sistema

ligado. O sistema responde desligando completamente o display luminoso, interrompendo a transmissão de áudio por FM independente do canal de transmissão, e se tornando suscetível apenas à interações do tipo **Ligar o dispositivo**.

- **Trocar o canal de transmissão:** O usuário executa a função de pressionar o botão de troca de canal. O sistema responde alterando o canal de transmissão de forma circular entre os cinco canais possíveis.

#### 4.2.1.2 Arquitetura

Com base nos casos de uso descritos anteriormente, optou-se por modelar o firmware através de uma arquitetura simplificada e organizada em camadas hierárquicas, compatível com os recursos limitados oferecidos por um sistema embarcado. Procurou-se modelar o software de forma a explorar ao máximo tais recursos.

Nesse contexto, a arquitetura de software, exposta de forma gráfica na Figura 4.12, pode ser descrita através das quatro entidades a seguir.



Figura 4.12: Arquitetura proposta para o software embarcado do Tau.

- *Drivers* de baixo nível (*d*) que abstraem os detalhes de hardware das portas digitais do microcontrolador. Quando relacionados aos botões, detectam eventos de hardware e os cadastram em uma fila para posterior processamento sob demanda pela camada de aplicação. Quando associados ao display de LEDs controlam as portas MCU para acendê-los.
- Entidades auxiliares de baixo nível (*Aux*) que abstraem questões de hardware de interfaces de comunicação digital, tais como I2C e UART.

- *Drivers* de alto nível ( $D_n$ ) que controlam os dispositivos específicos dos demais módulos do sistema através das entidades auxiliares. Diferem dos *drivers* de baixo nível pois não se interagem diretamente com o hardware.
- Entidade de alto nível que executa as lógicas de aplicação e orquestra a interação entre todas as entidades (Aplicação), fazendo com que o sistema opere conforme o esperado.

Interrupções de hardware, disponíveis através de temporizadores e de portas digitais de entrada e saída do microcontrolador, foram propostas para compensar a incapacidade do sistema em executar diferentes processos. Nessa aplicação específica, o MCU implementa em hardware o protocolo I2C. Dessa forma, a responsabilidade da entidade correspondente a essa interface pôde ser reduzido ao gerenciamento da troca de mensagens.

Uma vez definida a arquitetura básica, o próximo passo para foi uma descrição mais detalhada do software sob a forma de diagramas de classes.

#### 4.2.1.3 Diagrama de classes

A partir da arquitetura básica descrita na seção anterior, o sistema foi modelado na forma do diagrama de classes apresentado na Figura 4.13. As classes presentes no diagrama podem ser divididas em três grupos principais: *drivers* de baixo nível, auxiliares e *drivers* de alto nível. O primeiro grupo é representado pelas classes *BtnCtrl*, que é uma abstração da interface de entrada correspondentes aos botões presentes no dispositivo, e pela classe *CHX*, que é uma abstração do controle do display luminoso do Módulo de interface de usuário. O único membro do grupo das classes auxiliares é a classe *I2C* que abstrai dos *drivers* os detalhes da comunicação digital e permite que os módulos que utilizam a protocolo I2C compartilhem a interface do microcontrolador. Por fim, as classes *FMTX* e *EMgt* são *drivers* de alto nível que abstraem detalhes de hardware dos módulos de Interface de áudio, Gerenciamento de energia, respectivamente. Através dos *drivers*, é possível configurá-los e controlar seu funcionamento diretamente do Módulo de processamento.

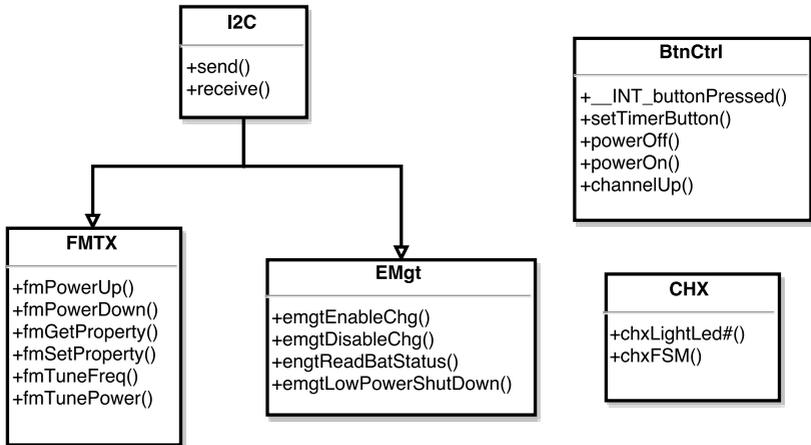


Figura 4.13: Diagrama de classes simplificado do firmware proposto para o Tau.

A seguir, as classes pertencentes ao Tau são descritas e apresentadas detalhadamente.

**4.2.1.3.1 BtnCtrl** A classe *BtnCtrl* está associada ao funcionamento do botões que compõem o Módulo de interface com o usuário do Tau e é composta pelos cinco métodos descritos a seguir.

- **\_\_INT\_buttonPressed:** Esse método executa o tratamento das interrupções de hardware geradas quando um botão é pressionado. Ela é responsável por identificar qual dos botões foi acionado e chamar uma das funções demais funções da classe de acordo com a necessidade.
- **setTimerButton:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de liga e desliga for pressionado. Sua função é determinar se o botão foi pressionado por mais de dois segundos.
- **powerOff:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se for botão de liga e desliga for pressionado por mais de dois segundos enquanto o sistema estiver ligado. Sua função é gerar um evento de desligamento.

- **powerOn:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se for botão de liga e desliga for pressionado por mais de dois segundos enquanto o sistema estiver desligado. Sua função é gerar um evento para ligar a unidade.
- **channelUp:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de troca de canal de transmissão for pressionado. Sua função é gerar um evento de troca de canal.

**4.2.1.3.2 I2C** A classe *I2C* está associada ao funcionamento da interface de comunicação digital I2C do microcontrolador e é formada pelos dois métodos descritos a seguir.

- **i2cWrite:** Esse método funciona em duas etapas. Em primeiro lugar, ele configura a interface de comunicação digital do microcontrolador no modo de transmissão via I2C e cadastra o endereço do dispositivo com o qual se deseja comunicar. Em seguida transmite a mensagem de acordo com o protocolo.
- **i2cRead:** Esse método funciona em duas etapas. Em primeiro lugar, ele configura a interface de comunicação digital do microcontrolador no modo de recepção de mensagens via I2C e cadastra o endereço do dispositivo com o qual se deseja comunicar. Em seguida, ele lê a mensagens transmitida.

**4.2.1.3.3 FMTX** A classe *FMTX* está associada ao funcionamento do transmissor FM Si4713 que compõe o Módulo de interface de áudio do Tau e é formada pelos seis métodos descritos a seguir.

- **fmPowerUp:** Esse método realiza as rotinas de acionamento do circuito integrado Si4713.
- **fmPowerDown:** Esse método realiza as rotinas de desligamento do circuito integrado Si4713.
- **fmGetProperty:** Esse método realiza a leitura do conjunto atual de propriedades escrito nos registradores do circuito integrado Si4713.
- **fmSetProperty:** Esse método altera as configurações do circuito integrado Si4713 através da escrita de seus registradores.

- **fmTuneFreq:** Esse método configura a frequência de transmissão FM do circuito integrado Si4713.
- **fmTunePower:** Esse método configura potência de transmissão FM do circuito integrado Si4713

**4.2.1.3.4 EMgt** A classe *EMgt* está associada ao funcionamento dos circuitos integrados BQ24266 e BQ27411 que compõem o Módulo de gerenciamento de energia do Tau e é formada pelos três métodos descritos a seguir.

- **emgtEnableChg:** Esse método configura o BQ24266 no modo de operação carregador, conforme descrito na Seção 4.1.1.2.3.
- **emgtDisableChg:** Esse método configura o BQ24266 no modo de operação alta impedância, conforme descrito na Seção 4.1.1.2.3.
- **emgtReadBatStatus:** Esse método se comunica com o BQ27411 e realiza a leitura do estado atual da bateria, incluindo temperatura e nível de carga. Se esse nível estiver criticamente baixo, a função gera um evento de desligamento por baixa capacidade de potência por parte bateria.
- **emgtLowPowerShutDown:** Esse método executa as rotinas de desligamento de todos os módulos.

**4.2.1.3.5 CHX** A classe *CHX* está associada ao controle do display luminoso que utiliza a técnica Charlieplexing. Essa classe é formada por treze métodos. Doze destes configuram as portas digitais do microcontrolador para acender apenas o seu respectivo LED. O outro, desempenha uma função semelhante a de uma máquina de estados. Ele altera de forma incremental qual dos LEDs está acesso ao chamar a função dedicada ao seu acionamento.

Por se tratar de uma estratégia não convencional o algoritmo utilizado nas funções da classe é apresentado a seguir. Como todas as funções que acionam os LEDs são extremamente semelhantes, apenas a função *chxLightLed1* (Algoritmo 1) e a rotina de transição são descritos (Algoritmo 2).

Para que se possa explorar a persistência da visão, um ciclo completo com acionamento de todos os LEDs deve ser realizado numa

frequência maior que 30 Hz. Ou seja, o algoritmo de controle do Charlieplexing deve ser executado numa taxa superior a 360 Hz.

---

**Algoritmo 1** Algoritmo de acionamento do Charlieplexing

---

```

acende_LED_1 ()
{
  pin1 = saída alto
  pin2 = saída baixo
  pin3 = alta impedância
  pin4 = alta impedância
}

```

---



---

**Algoritmo 2** Algoritmo de controle do Charlieplexing

---

```

# O bloco recebe o número de LEDs a ser aceso na variável num-
LEDs
# O LED a ser acionado é armazenado na variável ledOn
if ledOn igual a 1 then
  acende_LED_1
else if ledOn igual a 2 then
  acende_LED_2
...
end if
if ledOn igual a numLEDs then
  ledOn = 0
else
  ledOn = ledOn + 1;
end if

```

---

#### 4.2.1.4 Diagrama de eventos

O modelo comportamental do software embarcado proposto foi desenvolvido na forma do diagrama de eventos apresentado na Figura 4.14. Em operação normal, o software inicia sua execução pelo estado *IDLE* em que todos os módulos são apropriadamente desativados. O sistema permanece em espera pela ocorrência de um evento *E2*, que ocorre quando o botão de liga e desliga é pressionado. Caso o botão seja pressionado por mais de dois segundos, o sistema se encami-

nha para os estados *TURN\_ON* e *TUNE\_FM*. Neles, ocorre, respectivamente, a configuração dos demais módulos e a sintonização do transmissor FM na frequência definida para o canal 1. Respeitadas todas as questões de temporização, se dá a transição para o estado *ON*. Nele o algoritmo de controle do display Charlieplexing é executado. Caso não haja nenhuma requisição de troca de canal ou de desligamento do dispositivo dentro de um intervalo de 1 ms, o próximo estado é o *ON* novamente.

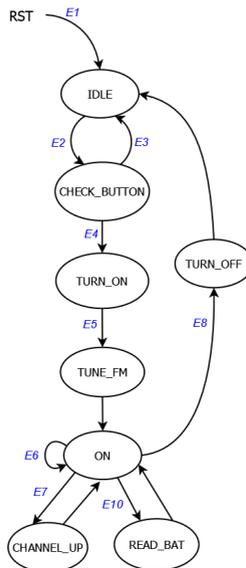


Figura 4.14: Diagrama de eventos do firmware proposto para o Tau.

Uma descrição detalhada dos estados que fazem parte do modelo é apresentada na Tabela 4.9, e uma descrição detalhada dos eventos que determinam as transições entre estes eventos é apresentada na Tabela 4.10.

Durante o estado *ON*, no instante de determinação de próximo estado, é possível que os eventos *E6*, *E7* e a *E10* tenham ocorrido. A fim de evitar a interpretação de que a ocorrência foi simultânea, os eventos são cadastrados em uma memória FIFO e apenas um deles é tratado por vez. O evento *E8*, por se tratar do desligamento do sistema, possui maior prioridade e, portanto, sempre cadastrado é na primeira posi-

Tabela 4.9: Descrição dos estados da máquina de estados (FSM) do Tau.

Estado	Descrição
IDLE	Dispositivo está desligado. O microcontrolador está em LPM4 e os periféricos estão desligados.
CHECK_BUTTON	Aciona o temporizador a fim de verificar por quanto tempo o botão de liga/desliga foi pressionado.
TURN_ON	Inicializa os periféricos da unidade.
TUNE_FM	Sintoniza o Si4713 na frequência do último canal utilizado.
ON	Dispositivo está ligado e em operação normal. Realiza a multiplexação dos LEDs.
CHANNEL_UP	Incrementa o canal no qual o dispositivo está sintonizado. Caso atinja o valor máximo (5), retorna ao valor inicial (1). Sintoniza o transmissor FM na frequência correspondente.
READ_BATTERY	Realiza uma leitura do nível atual da bateria.
TURN_OFF	Realiza a rotina de desligamento da unidade. Envia comandos de desligamento para os periféricos.

Tabela 4.10: Descrição dos eventos de transição do diagrama

Transição	Descrição
E1	Reset do sistema.
E2	Botão liga/desliga pressionado.
E3	Botão liga/desliga pressionado por menos de dois segundos.
E4	Botão liga/desliga pressionado por mais de dois segundos.
E5	Estouro de contagem do temporizador responsável pelo tempo de acomodação do Si4713.
E6	Estouro de contagem do temporizador responsável pela multiplexação dos LEDs.
E7	Botão de mudança de canal pressionado.
E8	Botão liga/desliga pressionado por mais de dois segundos ou bateria em nível crítico.
E10	Estouro de contagem do temporizador responsável requisição de leitura do nível de bateria.

ção da FIFO.

#### 4.2.1.5 Diagrama de sequência

A última etapa de modelagem do software embarcado do Tau se deu através do desenvolvimento de um diagrama de sequência para cada caso de uso. A fim de simplificar os modelos, a classe *I2C*, que gerencia

a comunicação digital entre os chips, não foi incluída nos diagramas.

A Figura 4.15 apresenta o diagrama referente à situação em que o usuário liga o dispositivo, e representa o comportamento em operação normal do sistema. A ação de pressionar o botão de liga e desliga é identificada pela entidade *BtnCtrl*, que executa o método *powerOn()*. A seguir, a rotina de acionamento do transmissor FM é executada pela aplicação, e a entidade *FMTX* retorna o canal de transmissão em que o Si4713 está sintonizado. Na sequência, a aplicação realiza uma requisição de status ao Módulo de gerenciamento de energia, que responde com o nível de carga da bateria e indica se uma fonte externa está conectada ou não. Se o nível de tensão da bateria estiver em muito baixo, a aplicação executa a rotina de desligamento do Si4713 e do display de LEDs. Nas demais situações, os displays indicadores do nível da bateria e do canal de transmissão são atualizados e o circuito integrado BQ24266 é habilitado ou desabilitado, dependendo da presença de uma fonte externa. A requisição do status do Módulo de gerenciamento de energia e o seu tratamento são executados em um *loop*.

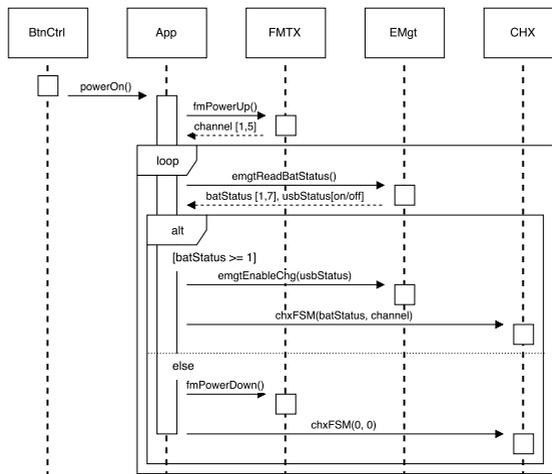


Figura 4.15: Diagrama de seqüência de operação normal do sistema.

O diagrama de seqüência apresentado na Figura 4.16 corresponde à situação de troca de canal. Considera-se uma situação específica em que o usuário pressiona o botão de troca de canal no intervalo entre a execução da rotina de acionamento do Si4713 e a requisição de sta-

tus do Módulo de gerenciamento de energia. Nesse contexto, após o término da primeira rotina, a entidade *BtnCtrl* identifica a ação do usuário e executa o método *channelUp*. A aplicação reage enviando o comando *fmTuneFreq* - que efetivamente altera o canal de transmissão, à entidade *FMTX* que retorna o canal de transmissão atual. A seguir, o *loop* responsável pela requisição do status do Módulo de gerenciamento de energia, o seu tratamento e a atualização do display luminoso é executado repetidamente.

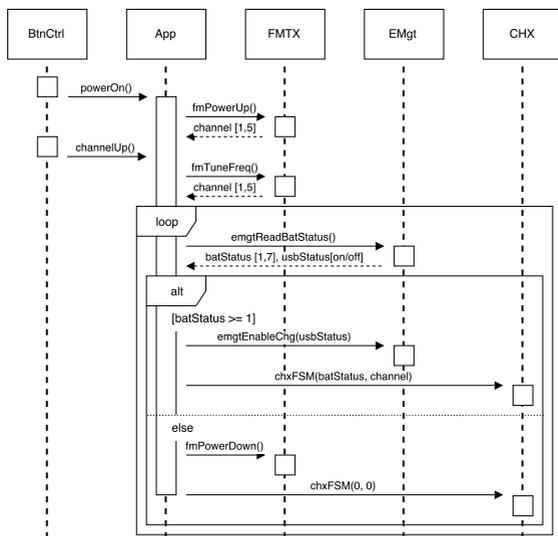


Figura 4.16: Diagrama de sequência considerando uma troca de canal.

Por fim, a Figura 4.17 apresenta o diagrama de sequência referente à situação em que o usuário desliga o sistema. Considera-se a operação normal do sistema com apenas uma execução do *loop*. A ação de pressionar o botão de liga e desliga é identificada pela entidade *BtnCtrl*, que executa o método *powerOff*. A seguir, a aplicação executa a rotina de desligamento do Si4713 e do display de LEDs.

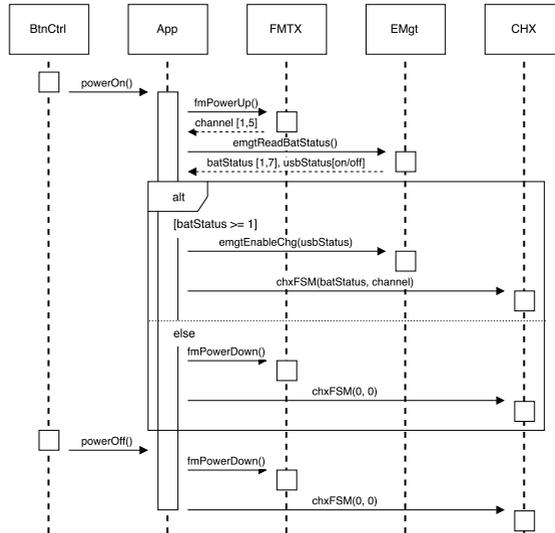


Figura 4.17: Diagrama de sequência considerando o desligamento do sistema após um ciclo de operação normal.

## 4.2.2 Ro

### 4.2.2.1 Casos de uso

As possíveis interações do usuário com a unidade receptora foram descritos através dos seis casos de uso listados a seguir. Uma representação gráfica destas interações é apresentada na Figura 4.18.

- Ligar o dispositivo:** O usuário executa a ação de pressionar o botão de liga e desliga por mais de dois segundos com o sistema desligado. O sistema responde indicando o nível de bateria, de volume e o canal de transmissão através do display luminoso, iniciando a transmissão de áudio por FM através do canal um, e se tornando suscetível às demais interações previstas.
- Desligar o dispositivo:** O usuário executa a ação de pressionar o botão de liga e desliga por mais de dois segundos com o sistema ligado. O sistema responde desligando completamente o display luminoso, interrompendo a transmissão de áudio por FM independente do canal de transmissão, e se tornando suscetível

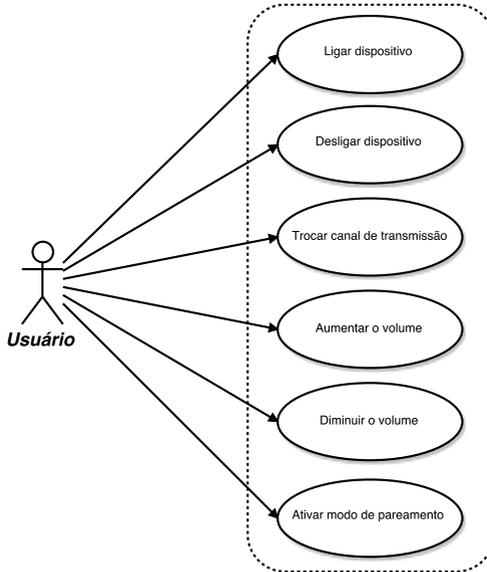


Figura 4.18: Principais casos de uso modelados para o software embarcado.

apenas à interações do tipo **Ligar o dispositivo**.

- **Trocar o canal de transmissão:** O usuário executa a função de pressionar o botão de troca de canal. O sistema responde alterando o canal de transmissão de forma circular entre os cinco canais possíveis.
- **Aumentar o volume:** O usuário executa a ação de acionar o botão com função de aumentar o volume com o sistema ligado. O sistema responde aumentando o nível de pressão sonora em sua interface de saída.
- **Diminuir o volume:** O usuário executa a ação de acionar o botão com função de diminuir o volume com o sistema ligado. O sistema responde diminuindo o nível de pressão sonora em sua interface de saída.
- **Ativar o modo de pareamento:** O usuário executa a ação de acionar o botão com função de pareamento com o sistema ligado.

O sistema responde configurando o modo Bluetooth para operar no modo de pareamento com dispositivos *mobile*.

#### 4.2.2.2 Arquitetura

Com base nos casos de uso descritos anteriormente, optou-se por modelar o firmware do Ro através de uma arquitetura idêntica à utilizada no Tau. Por esse motivo, a Figura 4.12 também descreve de forma simplificada como o software embarcado está organizado.

O microcontrolador presente no Ro possui os mesmos recursos computacionais do MCU presente no Tau, e implementa, em hardware, o protocolo UART utilizado na comunicação entre o Módulo de processamento e o Módulo de interface com dispositivos *mobile*. Por esses motivos, a responsabilidade da entidade correspondente a essas interfaces pôde ser reduzida ao gerenciamento da troca de mensagens.

Uma vez definida a arquitetura básica, o próximo passo foi uma descrição mais detalhada do software sob a forma de um diagrama de classes.

#### 4.2.2.3 Diagrama de classes

A partir da arquitetura básica descrita na seção anterior, o sistema foi modelado na forma do diagrama de classes apresentado na Figura 4.19. Assim como no Tau, as classes presentes no diagrama podem ser divididas em três grupos principais: geradores de eventos, auxiliares e *drivers*. O primeiro grupo é representado pelas classes *BtnCtrl*, que é uma abstração da interface de entrada correspondentes aos botões presentes no dispositivo, e pela classe *CHX*, que é uma abstração do controle do display luminoso do Módulo de interface de usuário. Por fim, as classes *FMRX*, *BT*, *AMux* e *EMgt* são *drivers* que abstraem os detalhes de hardware dos módulos de interface com o Tau, interface com dispositivos *mobile*, condicionamento e reprodução do som e gerenciamento de energia, respectivamente. Através dos *drivers* é possível configurá-lo e controlar seu funcionamento diretamente do Módulo de processamento.

A seguir, as classes pertencentes ao Ro são descritas e apresentadas detalhadamente.

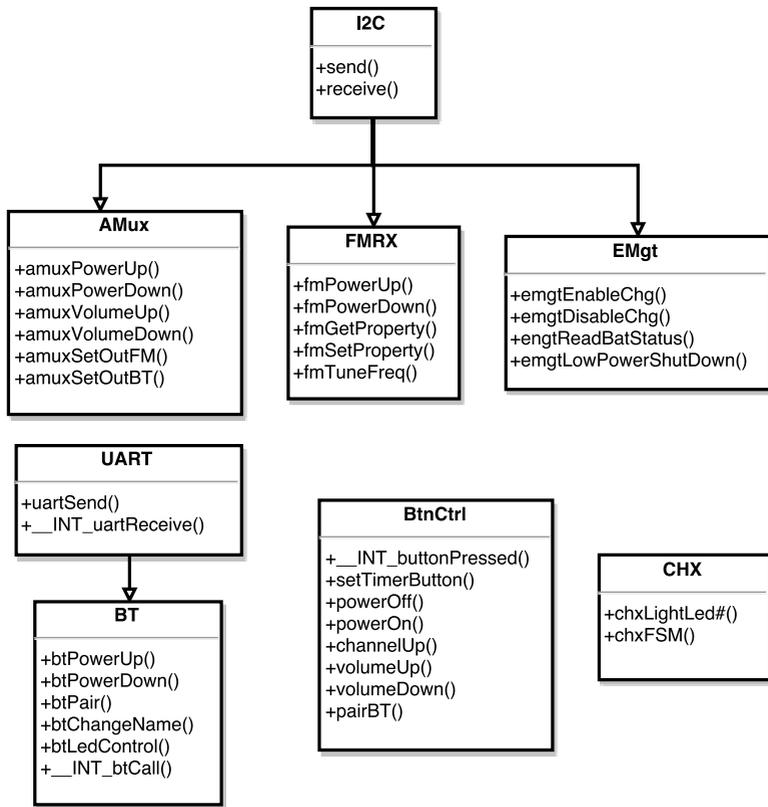


Figura 4.19: Diagrama de classes do *firmware*.

**4.2.2.3.1 BtnCtrl** A classe *BtnCtrl* está associada ao funcionamento dos botões que compõem o Módulo de interface com o usuário do Ro e é composta pelos cinco métodos descritos a seguir.

- **\_\_INT\_buttonPressed:** Esse método executa o tratamento das interrupções de hardware geradas quando um botão é pressionado. Ela é responsável por identificar qual dos botões foi acionado e chamar uma das funções demais funções da classe de acordo com a necessidade.
- **setTimerButton:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de liga e desliga for pressionado. Sua função é determinar se o botão foi pressionado por mais de dois segundos.

- **powerOff:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se for botão de liga e desliga for pressionado por mais de dois segundos enquanto o sistema estiver ligado. Sua função é gerar um evento de desligamento.
- **powerOn:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se for botão de liga e desliga for pressionado por mais de dois segundos enquanto o sistema estiver desligado. Sua função é gerar um evento para ligar a unidade.
- **channelUp:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de troca de canal de transmissão for pressionado. Sua função é gerar um evento de troca de canal.
- **volumeUp:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de aumentar volume for pressionado, sua função é gerar um evento de aumentar o volume.
- **volumeDown:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de diminuir volume for pressionado, sua função é gerar um evento de diminuir o volume.
- **pairBT:** Esse método é chamado por `__INT_buttonPressed` se o botão de pareamento for pressionado, sua função é gerar um evento de pareamento.

**4.2.2.3.2 I2C** A classe *I2C* está associada ao funcionamento da interface de comunicação digital I2C do microcontrolador e é formada pelos dois métodos descritos a seguir.

- **i2cWrite:** Esse método funciona em duas etapas. Em primeiro lugar, ele configura a interface de comunicação digital do microcontrolador no modo de transmissão via I2C e cadastra o endereço do dispositivo com o qual se deseja comunicar. Em seguida e transmite a mensagem de acordo com o protocolo.
- **i2cRead:** Esse método funciona em duas etapas. Em primeiro lugar, ele configura a interface de comunicação digital do microcontrolador no modo de recepção de mensagens via I2C e cadastra o endereço do dispositivo com o qual se deseja comunicar. Em seguida, ele lê a mensagens transmitida.

**4.2.2.3.3 UART** A classe *UART* está associada ao funcionamento da interface de comunicação digital UART do microcontrolador e é formada pelos dois métodos descritos a seguir.

- **uartSend:** Esse método transmite a mensagem de acordo com o protocolo.
- **\_\_INT\_uartReceive:** Esse método executa o tratamento de uma interrupção de hardware gerada quando o microcontrolador identifica o recebimento de uma mensagem via UART. Ele é responsável por realizar a leitura da mensagem recebida.

**4.2.2.3.4 FMRX** A classe *FMRX* está associada ao funcionamento do receptor FM Si4705 que compõe o Módulo de interface com o Tau do Ro e é formada pelos cinco métodos descritos a seguir.

- **fmPowerUp:** Esse método realiza as rotinas de acionamento do circuito integrado Si4705.
- **fmPowerDown:** Esse método realiza as rotinas de desligamento do circuito integrado Si4705.
- **fmGetProperty:** Esse método realiza a leitura do conjunto atual de propriedades escrito nos registradores do circuito integrado Si4705.
- **fmSetProperty:** Esse método altera as configurações do circuito integrado Si4705 através da escrita de seus registradores.
- **fmTuneFreq:** Esse método configura a frequência de recepção FM do circuito integrado Si4705.

**4.2.2.3.5 BT** A classe *FMRX* está associada ao funcionamento do módulo Bluetooth BM23 que compõe o Módulo de interface com dispositivos *mobile* e é formada pelos seis métodos descritos a seguir.

- **btPowerUp:** Esse método realiza as rotinas de acionamento do módulo Bluetooth BM23.
- **btPowerDown:** Esse método realiza as rotinas de desligamento do módulo Bluetooth BM23.

- **btPair:** Esse método envia um comando de pareamento para o módulo Bluetooth BM23.
- **btChangeName:** Esse método altera o nome cujo módulo Bluetooth BM23 exibe quando visível para outros dispositivos.
- **btLedControl:** Esse método controla o LED destinado à conectividade Bluetooth. Quando o módulo BM23 está em pareamento o LED pisca com frequência de 1 Hz e quando o link Bluetooth está estabelecido ele permanece aceso. Nas demais situações ele permanece apagado.
- **\_\_INT\_btCall:** Esse método executa o tratamento de uma interrupção de hardware gerada quando o módulo Bluetooth BM23 identifica a ocorrência de uma chamada telefônica por parte do dispositivo *mobile*. Essa informação é disponibilizada para o sistema.

**4.2.2.3.6 AMux** A classe *AMux* está associada ao funcionamento do multiplexado de áudio STA529 que compõe o Módulo de condicionamento e reprodução do som e é formada pelos métodos descritos a seguir.

- **amuxPowerUp:** Esse método realiza as rotinas de acionamento e configuração do circuito integrado STA529.
- **amuxPowerDown:** Esse método realiza as rotinas de desligamento do circuito integrado STA529.
- **amuxSetVolumeUp:** Esse método envia um comando de aumentar o volume para o circuito integrado STA529.
- **amuxSetVolumeDown:** Esse método envia um comando de reduzir o volume para o circuito integrado STA529.
- **amuxSetOutFM:** Esse método disponibiliza o sinal de áudio proveniente do Módulo de interface com o Tau na saída do Módulo de condicionamento e reprodução do som.
- **amuxSetOutBT:** Esse método disponibiliza o sinal de áudio proveniente do Módulo de interface dispositivos Mobile na saída do Módulo de condicionamento e reprodução do som.

**4.2.2.3.7 EMgt** A classe *EMgt* está associada ao funcionamento dos circuitos integrados BQ24266 e BQ27411 que compõem o Módulo de gerenciamento de energia do Tau e é formada pelos três métodos descritos a seguir.

- **emgtEnableChg:** Esse método configura o carregador de bateria embarcado ao BM23 no modo de operação carregador.
- **emgtDisableChg:** Esse método configura o o carregador de bateria embarcado ao BM23 no modo de operação alta impedância.
- **emgtReadBatStatus:** Esse método se comunica com o BQ27411 e realiza a leitura do estado atual da bateria, incluindo temperatura e nível de carga. Se esse nível estiver criticamente baixo, a função gera um evento de desligamento por baixa capacidade de potência por parte bateria.
- **emgtLowPowerShutDown:** Esse método executa as rotinas de desligamento de todos os módulos.

**4.2.2.3.8 CHX** A classe *CHX* está associada ao controle do display luminoso que utiliza a técnica Charlieplexing. Essa classe é formada por vinte e seis métodos. Vinte e quatro destes configuram as portas digitais do microcontrolador para acender apenas o seu respectivo LED, como descrito na Seção 4.1.2.2.1. Os outros dois, desempenham funções semelhantes a de uma máquina de estados. Ele altera de forma incremental qual dos LEDs está acesso em cada um dos dois circuitos de Charlieplexing ao chamar a função dedicada ao seu acionamento.

Os algoritmos são idênticos aos utilizados no Tau e por esse motivo não são apresentados novamente. Em relação à possibilidade de explorar a persistência da visão, como são dois circuitos de Charlieplexing independentes e controlados separadamente, as questões de temporização não se alteram em relação ao Tau.

#### 4.2.2.4 Diagrama de eventos

O modelo comportamental do software embarcado proposto foi desenvolvido na forma do diagrama de eventos apresentado na Figura 4.20.

Em operação normal, o software inicia sua execução pelo estado *IDLE* em que todos os módulos são apropriadamente desativados. O sistema permanece em espera pela ocorrência de um evento *E2*, que ocorre quando o botão de liga e desliga é pressionado. Caso o botão seja pressionado por mais de dois segundos, o sistema se encaminha para os estados *TURN\_ON* e *TUNE\_FM*. Neles, ocorre, respectivamente, a configuração dos demais módulos e a sintonização do receptor FM na frequência definida para o canal 1. A seguir, o sistema se encaminha para o estado *WAIT\_ON* e espera a ocorrência do evento *E5*, o que significa que o tempo de acomodação do BM23 foi devidamente respeitado. No estado *SETUP*, o módulo Bluetooth é configurado e na sequência, se dá a transição para o estado *ON*. Nele o algoritmo de controle do display Charlieplexing é executado. Caso não haja nenhuma requisição de troca de canal ou de volume, de desligamento, de pareamento, ou o recebimento de uma mensagem via Bluetooth, dentro de um intervalo de 1 ms, o próximo estado é o *ON* novamente.

Uma descrição detalhada dos estados que fazem parte do modelo é apresentada na Tabela 4.11, e uma descrição detalhada dos eventos que determinam as transições entre estes eventos é apresentada na Tabela 4.12.

Durante o estado *ON*, no instante de determinação de próximo estado, é possível que os eventos *E6* a *E11* tenham ocorrido. A fim de evitar a interpretação de que a ocorrência foi simultânea, os eventos são cadastrados em uma memória FIFO e apenas um deles é tratado por vez. O evento *E11*, por se tratar do desligamento do sistema, possui maior prioridade e, portanto, sempre cadastrado é na primeira posição da FIFO. Adicionalmente, ao final do estado *WAIT\_BT* apenas um dos estados *E12* e *E13* podem estar ativos. Isso ocorre pois eles estão associados ao botão, que pode estar apenas pressionado ou não.

#### 4.2.2.5 Diagrama de sequência

A última etapa de modelagem do software embarcado do Ro se deu através do desenvolvimento de um diagrama de sequência para cada caso de uso. A fim de simplificar os modelos, as classes *I2C* e *UART*, que gerenciam a comunicação digital entre os módulos, não foram incluída nos diagramas.

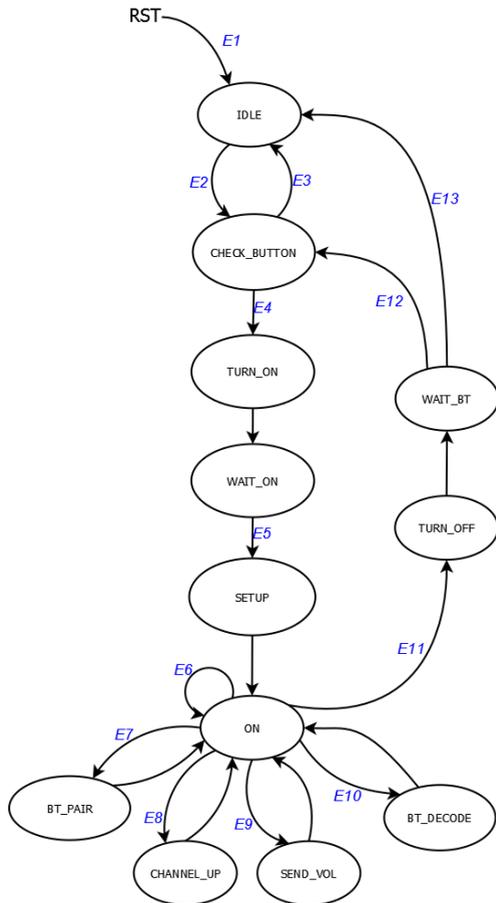


Figura 4.20: Diagrama de eventos do firmware proposto para o Ro.

A Figura 4.21 apresenta o diagrama referente à situação em que o usuário liga o dispositivo, e representa o comportamento em operação normal do sistema. A ação de pressionar o botão de liga e desliga é identificada pela classe *BtnCtrl*, que executa o método *powerOn*. A seguir, as rotinas de acionamento do transmissor FM e do multiplexador de áudio são executadas pela aplicação, e as entidades *FMRX* e *AMux* retornam o canal em que o Si4705 está sintonizado e o nível de volume, respectivamente. Em sequência, a rotina de inicialização do BM23 é executada e a entidade *BT* retorna se há uma conexão Bluetooth ou

Tabela 4.11: Descrição dos estados da máquina de estados (FSM) do Ro.

Estado	Descrição
<b>IDLE</b>	Dispositivo está desligado. O microcontrolador está em LPM4 e os periféricos estão desligados.
<b>CHECK_BUTTON</b>	Ativa o temporizador a fim de verificar por quanto tempo o botão liga/desliga foi pressionado.
<b>TURN_ON</b>	Inicializa os periféricos da unidade.
<b>WAIT_ON</b>	Aciona o temporizador a fim de esperar o período de acomodação dos periféricos.
<b>SETUP</b>	Realiza a rotina de configuração do BM23 e sintoniza Si4705 na frequência do último canal utilizado.
<b>ON</b>	Dispositivo está ligado e em operação normal. Realiza a multiplexação dos LEDs e o monitoramento do nível da bateria.
<b>BT_PAIR</b>	Envia o BM23 para o modo de pareamento.
<b>BT_DECODE</b>	Decodifica os dados recebidos do BM23 e atua de acordo com eles. Realiza a seleção da saída de áudio do STA529 entre o Si4705 e o BM23.
<b>CHANNEL_UP</b>	Incrementa o canal no qual o dispositivo está sintonizado. Caso atinja o valor máximo (5), retorna ao valor inicial (1). Sintoniza o receptor FM para a frequência desejada.
<b>SEND_VOL</b>	Envia o valor do volume para o processador de áudio. É executado sempre que o volume é alterado.
<b>TURN_OFF</b>	Realiza a rotina de desligamento da unidade. Envia comandos de desligamento para os periféricos.
<b>WAIT_BT</b>	Aciona o temporizador a fim de esperar o período de desligamento BM23.

não. Baseando-se nessa informação, a aplicação determina qual fonte sonora será reproduzida através dos métodos *amuxSetOutFM* e *amuxSetOutBT*, e controla o LED que indica conexões Bluetooth de acordo com a situação. Na sequência, a aplicação realiza uma requisição de status ao Módulo de gerenciamento de energia, que responde com o nível de carga da bateria e indica se uma fonte externa está conectada ou não. Se o nível de tensão da bateria estiver muito baixo, a aplicação executa a rotina de desligamento do Si4705, do BM23, do STA529 e do display de LEDs. Nas demais situações, os displays indicadores do nível da bateria, de volume e do canal de transmissão são atualizados e o carregador de bateria do BM23 é habilitado ou desabilitado, depen-

Tabela 4.12: Descrição dos eventos de transição do diagrama.

Evento	Descrição
E1	Reset do sistema.
E2	Botão liga/desliga pressionado.
E3	Botão liga/desliga pressionado por menos de dois segundos.
E4	Botão liga/desliga pressionado por mais de dois segundos.
E5	Estouro de contagem do temporizador responsável pelo tempo de acomodação do Si4705.
E6	Estouro de contagem do temporizador responsável pela multiplexação dos LEDs.
E7	Botão de pareamento foi pressionado.
E8	Botão de mudança de canal pressionado.
E9	Valor do volume alterado.
E10	Recepção de um pacote Bluetooth do BM23.
E11	Botão liga/desliga pressionado por mais de dois segundos.
E12	Tempo de desligamento do BM23 respeitado e botão liga/desliga foi pressionado.
E13	Tempo de desligamento do BM23 respeitado e botão liga/desliga não foi pressionado.

dendo da presença de uma fonte externa. A determinação do sinal de saída, a requisição do status do Módulo de gerenciamento de energia e o seu tratamento são executados em um *loop*.

O diagrama de sequência apresentado na Figura 4.22 corresponde à situação de troca de canal. Considera-se uma situação específica em que o usuário pressiona o botão de troca de canal no intervalo entre a execução da rotina de acionamento do BM23 e a determinação do sinal de saída. Nesse contexto, após o término da primeira rotina, a entidade *BtnCtrl* identifica a ação do usuário e executa o método *channelUp*. A aplicação reage enviando o comando *fmTuneFreq* - que efetivamente altera o canal de transmissão, à entidade *FMRX* que retorna o canal de transmissão atual. A seguir, o *loop* responsável pela determinação do sinal de saída, requisição do status do Módulo de gerenciamento de energia, o seu tratamento e a atualização do display luminoso é executado repetidamente.

O diagrama de sequência apresentado na Figura 4.23 corresponde à situação do envio do comando de pareamento. Considera-se uma situação específica em que o usuário pressiona o botão de pareamento

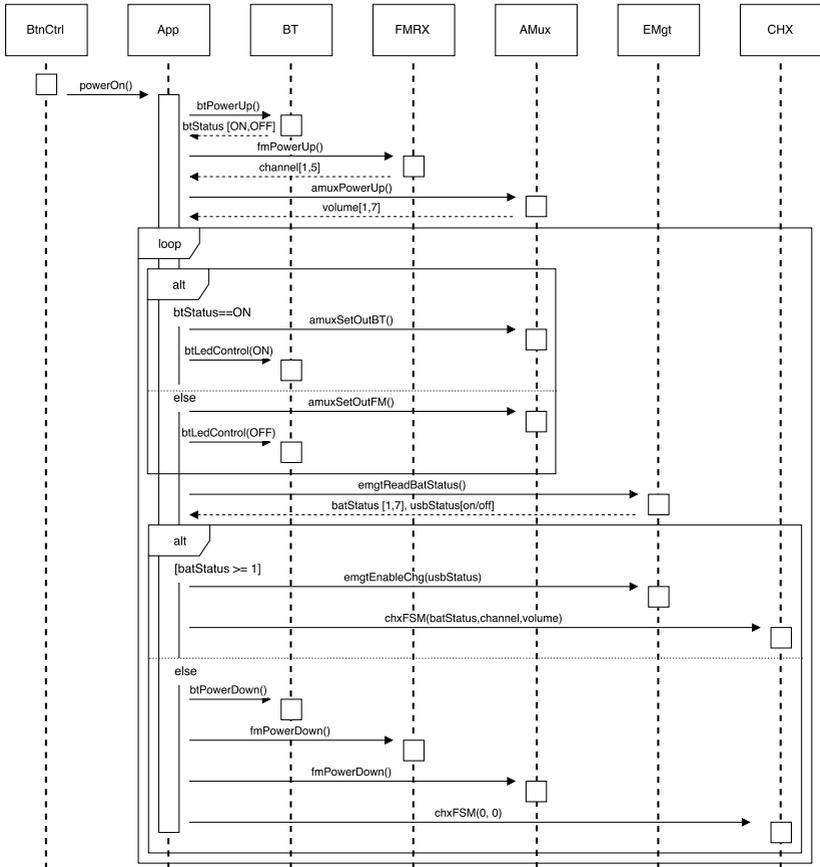


Figura 4.21: Diagrama de seqüência de operação normal do sistema.

no intervalo entre a execução da rotina de acionamento do BM23 e a determinação do sinal de saída. Nesse contexto, após o término da primeira rotina, a entidade *BtnCtrl* identifica a ação do usuário e executa o método *pairBT*. A aplicação reage enviando os comandos *btPair* e *btLedCtrl* - que efetivamente envia o BM23 para o modo de pareamento e controla o LED indicador de conectividade Bluetooth para piscar com período de um segundo. A seguir, o *loop* é executado repetidamente.

O diagrama de seqüência apresentado na Figura 4.23 corresponde à situação de troca de volume. Com o objetivo de evitar redundância,

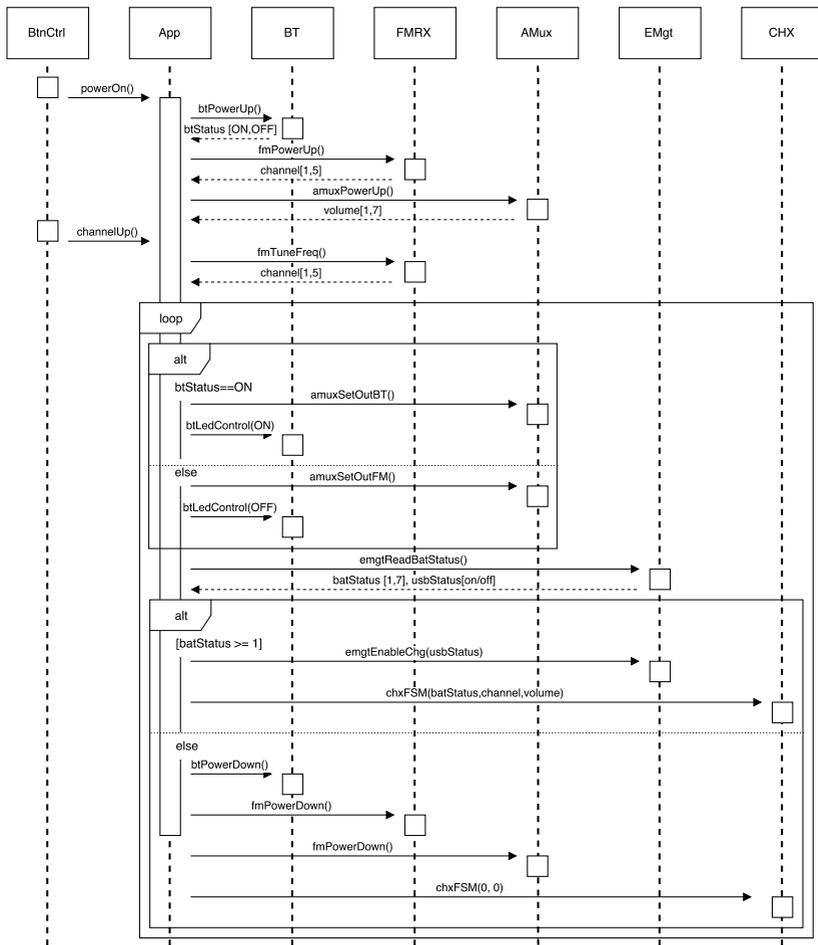


Figura 4.22: Diagrama de sequência considerando uma troca de canal.

apenas comando de aumentar o volume é abordado neste documento. Considera-se uma situação específica em que o usuário pressiona o botão de aumentar volume no intervalo entre a execução da rotina de acionamento do BM23 e a determinação do sinal de saída. Nesse contexto, após o término da primeira rotina, a entidade *BtnCtrl* identifica a ação do usuário e executa o método *volumeUp*. A aplicação reage enviando os comandos *amuxSetVolumeUp* e a entidade *AMux* retorna o nível atual de volume. A seguir, o *loop* é executado repetidamente.

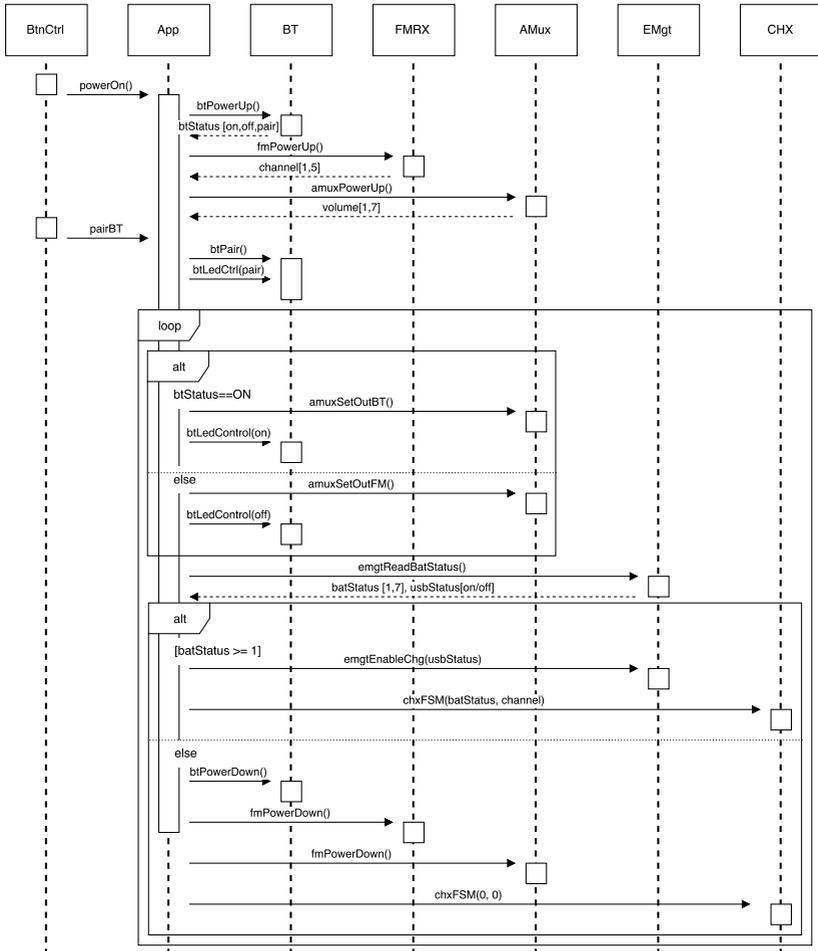


Figura 4.23: Diagrama de sequência considerando o envio de um comando de pareamento.

Por fim, a Figura 4.25 apresenta o diagrama de sequência referente à situação em que o usuário desliga o sistema. Considera-se a operação normal do sistema com apenas uma execução do *loop*. A ação de pressionar o botão de liga e desliga é identificada pela entidade *BtnCtrl*, que executa o método *powerOff*. A seguir, a aplicação executa a rotina de desligamento do Si4705, do BM23, do STA529 e do display

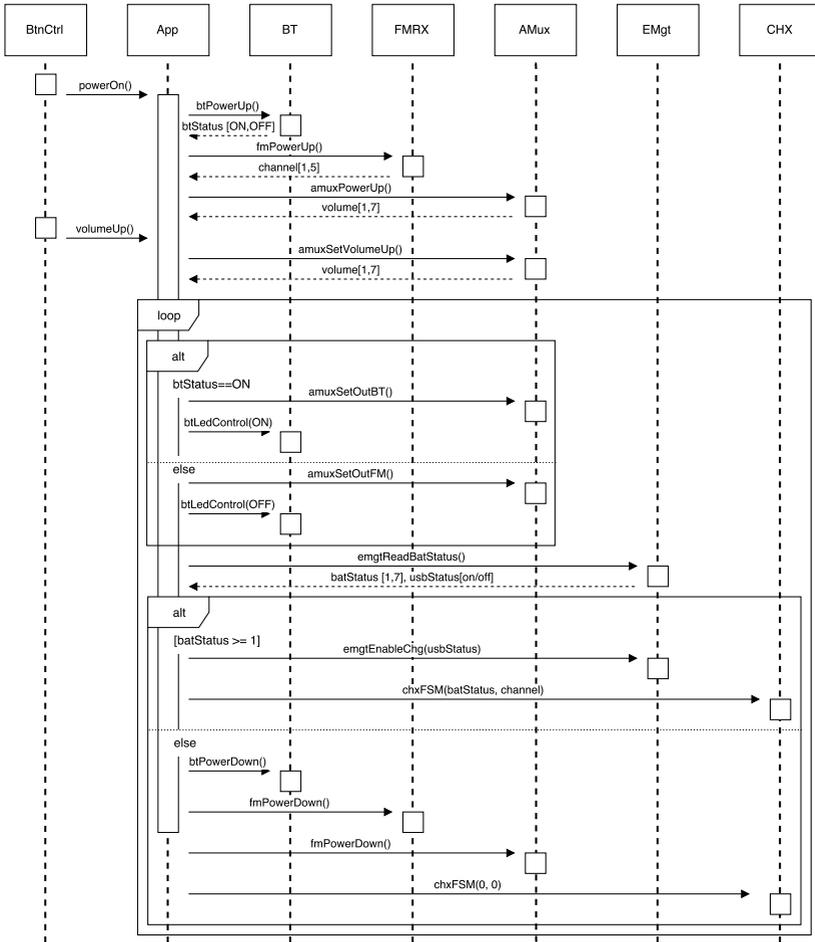


Figura 4.24: Diagrama de sequência considerando o envio de um comando para aumentar o volume.

de LEDs.

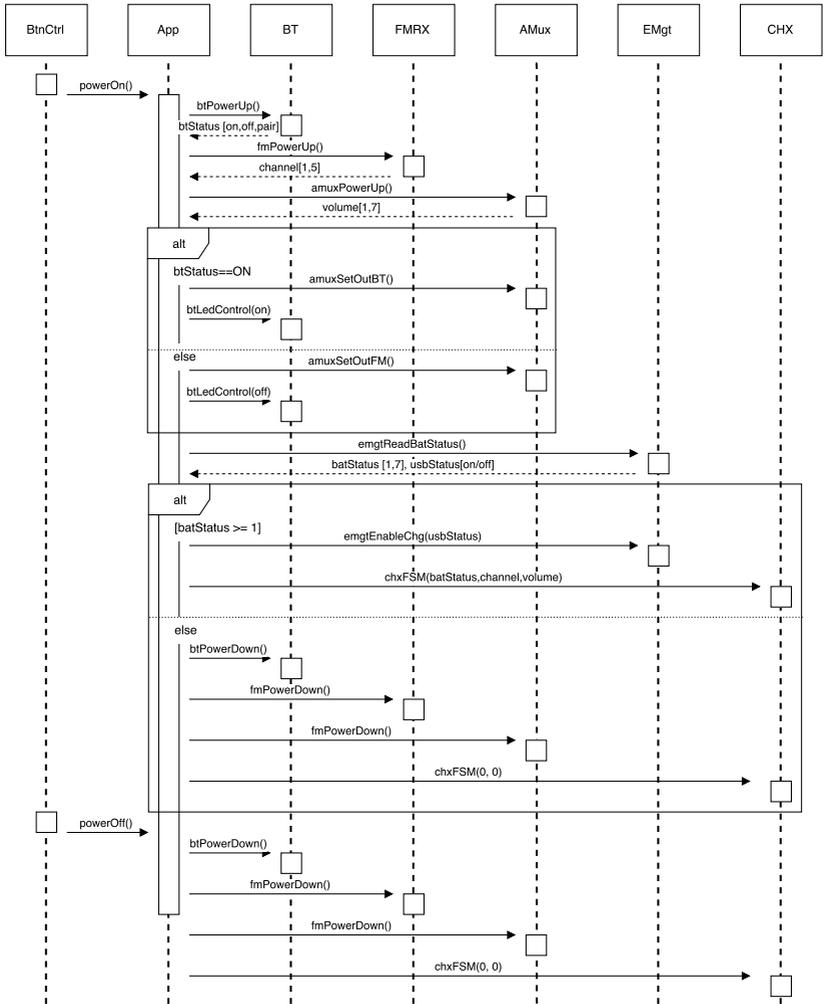


Figura 4.25: Diagrama de sequência considerando o desligamento do sistema após uma ciclo de operação normal.



# CAPÍTULO 5

---

## Implementação

---

Este Capítulo apresenta os detalhes da implementação de hardware e firmware utilizados nas unidades transmissora e receptora. Uma vez que o hardware e o firmware estão fortemente acoplados, sua implementação ocorreu de forma paralela. De modo semelhante, o Tau e o Ro possuem blocos em comum e a implementação das duas unidades ocorreu de forma simultânea em muitos momentos.

As seções seguintes descrevem, respectivamente, os avanços cronológicos das versões do protótipo e as características do software do ponto de vista da programação.

### 5.1 Hardware

A fim de facilitar as etapas de teste e validação, a implementação de hardware das duas unidades foi feita de forma modular e gradativa. Primeiramente, os módulos resultantes de uma fragmentação inicial foram testados em protoboard. Após a consolidação de suas funcionalidades, as montagens foram transferidas para diversas placas de circuito impresso (PCIs) que podem ser acopladas, formando a primeira versão dos protótipos. As PCIs modulares do Tau e do Ro foram

combinadas em uma placa para cada unidade, com blocos acopláveis através de *shunts*. Essas foram as versões utilizadas para a maior parte dos testes, pois todos os nós de interesse estavam disponíveis através de um ponto de prova facilmente acessível. Por fim, uma nova PCI com layout compatível com a carcaça do produto foi confeccionada para cada unidade. Todas as etapas do projeto das PCIs foram desenvolvidas com auxílio de uma ferramenta profissional de CAD (*Computer-Aided Design*).

A implementação de hardware do Tau e do Ro é descrita detalhadamente a seguir.

### 5.1.1 Tau

#### 5.1.1.1 Montagens em protoboard

O objetivo das montagens em protoboard foi avaliar se a arquitetura de hardware proposta seria capaz de desempenhar todas as funcionalidades previstas. Para isso, desenvolveu-se uma versão preliminar do firmware de controle na plataforma *Launchpad* MSP430G2, apresentada na Figura 5.1. Esse kit de desenvolvimento é fabricado e distribuído pela Texas Instruments e é compatível com todos os microcontroladores da família MSP430G2, inclusive o modelo específico utilizado neste trabalho. Como indicado na figura, o *Launchpad* disponibiliza todos pinos do microcontrolador através de conectores de fácil acesso, oferece LEDs e botões úteis para depuração, e incorpora os conversores necessários para possibilitar a programação do chip através de um cabo USB. Um dos botões foi utilizado para implementar a funcionalidade de liga e desliga prevista para o Tau.

Em relação ao transmissor FM, que compõe o Módulo de interface de áudio, utilizou-se a placa de desenvolvimento apresentada na Figura 5.2. O kit, fabricado e distribuído pela Adafruit, disponibiliza os principais pinos do Si4713 através de conectores de fácil acesso, contém os componentes passivos necessários para o seu funcionamento - incluindo o cristal - e conector de áudio do tipo Jack P2. Para utilizá-lo foi necessário apenas soldar uma antena no local especificado e configurar o transmissor através de sua interface I2C. Utilizou-se um fio como antena. Como a transmissão FM do Si4713 é compatível com os receptores presentes em muitos *smartphones*, os testes que avalia-

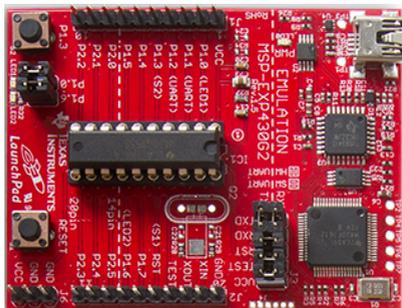


Figura 5.1: Placa de desenvolvimento *Launchpad* MSP430G2 da Texas Instruments.

ram a qualidade do som transmitido também foram realizados esses dispositivos.



Figura 5.2: Placa de desenvolvimento do Si4713 fabricada pela Adafruit.

Os circuitos integrados BQ27411 e BQ24266, especificados para implementar o Módulo de gerenciamento de energia, são comercializados pelas Texas Instruments apenas em encapsulamentos para montagem em superfície. Por esse motivo, as placas de circuito impresso auxiliares apresentadas na Figura 5.3 foram desenvolvidas. Sua função é compatibilizar os chips com a montagem em protoboard disponibilizando os seus pinos através de conectores de fácil acesso. Para testá-los foi necessário adicionar diversos componentes passivos ao circuito, estabelecendo as conexões entre componentes e módulos através de fios. A fabricação foi realizada pela empresa Curta Circuitos, uma empresa florianopolitana especializada na comercialização de placas

eletrônicas de qualidade industrial em pequenas quantidades.

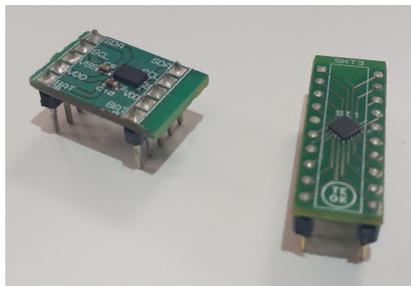


Figura 5.3: Placas auxiliares criadas para os circuitos integrados do Módulo de gerenciamento de energia. À esquerda, está a placa dedicada para o BQ27411 e, à direita, a placa dedicada para o BQ24266.

Num primeiro momento, os diodos, botões e os componentes passivos utilizados na implementação do Módulo de interface com o usuário eram compatíveis com a montagem em protoboard. Entretanto, para facilitar a repetibilidade da montagem do Tau, a PCI apresentada na Figura 5.4 incorporou o circuito Charlieplexing de quatro pinos introduzido no Capítulo 4. Graças a sua simplicidade e dimensões compatíveis com o processo fabricação de PCIs disponível internamente na WaveTech, essa placa foi usinada dentro da própria empresa.



Figura 5.4: Placa auxiliar criada para o Charlieplexing de quatro pinos utilizado no display luminoso do Módulo de interface com o usuário.

A seguir os kits de desenvolvimento e as PCIs auxiliares construídas foram conectadas através de fios e de uma protoboard. O esquemático do circuito resultante é idêntico àquele apresentado nas Seções 4.1.1.2.1 a 4.1.1.2.4.

Utilizando esse arranjo, foi possível testar as funcionalidades de liga e delisca, troca de canal e avaliar a influência da integração do hardware na transmissão FM. Foi possível também medir pela primeira vez quanto os módulos consomem individualmente e qual o consumo total quanto integrado.

Testes demonstraram a presença de componentes de ruídos no áudio transmitido. Durante a investigação das possíveis causas deste problema, percebeu-se que mover os dispositivos ou tocar os fios alterava as características do ruído. Atribuiu-se então, a presença de ruído ao arranjo da montagem em protoboard.

### 5.1.1.2 Protótipo modular

Uma vez validada a arquitetura de hardware, a próxima etapa da implementação consistiu no desenvolvimento de uma PCI na qual os demais módulos pudessem ser acoplados. O objetivo era minimizar a susceptibilidade do Tau à ruídos e interferências captados pelos arranjo e evitar eventuais problemas relacionados ao mal contato nas conexões.

O esquemático desta placa realiza as mesmas conexões estabelecidas por fio na montagem em protobard. Alguns componentes passivos que estavam disponíveis apenas com encapsulamentos para montagem em superfície também foram incluídos. E um botão para ser utilizado na implementação da funcionalidade foi adicionado ao esquemático. Essa PCI foi usinada internamente na WaveTech, e por isso, a distância entre algumas trilhas foram aumentadas para garantir compatibilidade com o processo de fabricação utilizado pela empresa. A Figura 5.5 apresenta o layout dessa placa eletrônica.

Devido a modularidade dessa versão do protótipo, cada modulo foi inserido gradativamente no circuito e testado. Dessa forma, se algum componente apresentasse problema, a causa poderia ser rapidamente identificada e o problema solucionado. Essa metodologia permitiu que o consumo dos blocos individuais fosse medido, possibilitando a análise sobre eventuais discrepâncias a implementação de melhorias.

Os testes realizados com essa versão confirmaram a hipótese de que as principais componentes de ruído e interferência eram devidos ao arranjo anterior. A Figura 5.6 apresenta uma foto do protótipo mo-

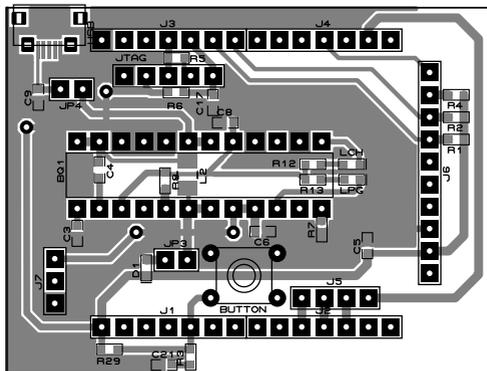


Figura 5.5: Layout da placa base em que os demais módulos do Tau são acoplados.

dular montado na PCI desenvolvida. Na figura é possível ver observar que bateria Nokia BL-5C, especificada no Capítulo 4, foi utilizada para alimentar o circuito.

### 5.1.1.3 Protótipo unificado

O próximo passo na implementação de hardware do Tau foi desenvolver uma placa de circuito impresso que comportasse todos os dispositivos eletrônicos presentes no esquemático da unidade. Como era esperado, verificou-se que a confecção de uma PCI com o todos os componentes montados apresenta, de fato, uma economia de espaço, porém dificulta a identificação de problemas no circuito e na integração dos blocos. Para minimizar esse efeito, as conexões entre os módulos foram realizadas de forma a possibilitar sua interrupção ao remover-se *shunts* que estabelecem esses contatos. Essas placas também foram fabricadas pela Curta Circuitos. A Figura 5.7 apresenta as vistas de *top* e *bottom* do layout da PCI e a Figura 5.8 é uma foto do protótipo.

A maioria dos resultados descritos no próximo capítulo foram obtidos através de testes realizados com esse protótipo, pois ele possuía pontos de prova de fácil acesso em todas as trilhas de interesse.

Nesse momento, foi possível testar todas as funcionalidades previstas e validar e forma completa as arquiteturas de hardware e software embarcado propostas para o Tau. Percebeu-se, entretanto, a exis-

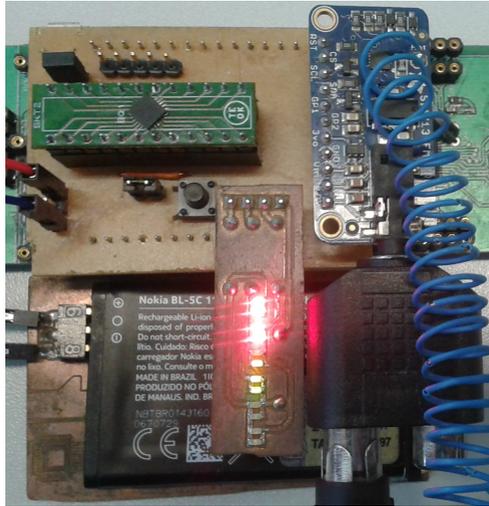
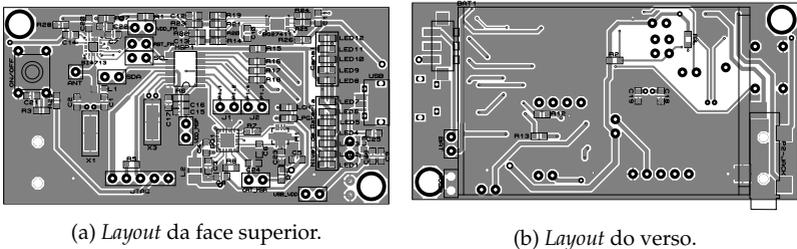


Figura 5.6: Protótipo modular do Tau montado.



(a) *Layout* da face superior.

(b) *Layout* do verso.

Figura 5.7: *Layout* da placa do protótipo unificado do Tau.

tência de um acoplamento entre as trilhas do circuito do display luminoso aquelas trilhas que transmitem o sinal de áudio, que inseria um tom dentro da frequência audível no som transmitido.

#### 5.1.1.4 Protótipo final

Por fim, uma nova PCI foi confeccionada. Dessa vez, os conectores associados aos *shunts* foram removidos e o layout da placa foi compatibilizado com a carcaça do produto. Nesse contexto, os capacitores eletrolíticos utilizados até então foram substituídos por capacitores de tântalo e a geometria adotada para a antea teve de ser modificada para

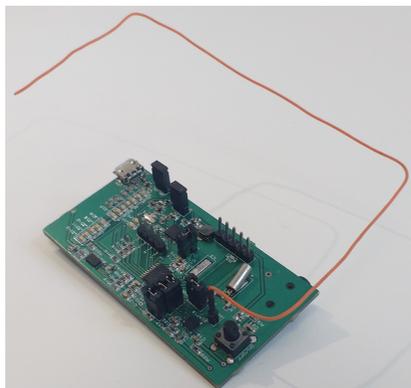


Figura 5.8: Protótipo unificado do Tau.

ser possível acomodá-los dentro do invólucro.

Duas técnicas foram utilizadas para minimizar os efeitos de acoplamento entre as trilhas do display luminoso e aquelas que transmitem o sinal de áudio. Em primeiro lugar, os módulos foram afastados, um em relação ao outro. E além disso, o layout da placa foi segmentado em regiões que contém sinais analógicos e regiões que contém sinais digitais. A comunicação entre as duas regiões acontece apenas em um ponto e os planos de terra estão conectados somente em suas extremidades. Foi possível notar uma melhor significativa na qualidade do sinal transmitido.

A Figura 5.9 apresenta as vistas *top* e *bottom* do layout da placa eletrônica desenvolvida. A Figura 5.10 é uma foto do protótipo final montado. E a Figura 5.11 é uma foto deste protótipo dentro da carcaça fabricada em impressora 3D.

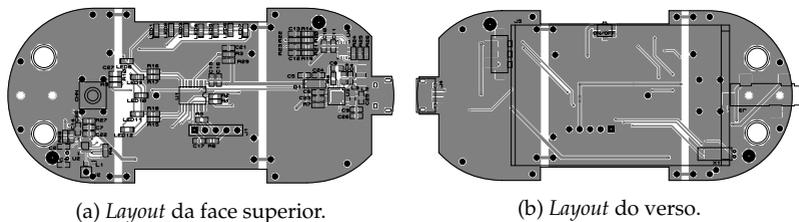


Figura 5.9: *Layout* da placa do protótipo final do Tau.

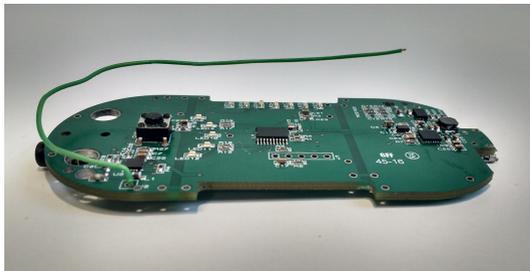


Figura 5.10: Protótipo final do Tau.



Figura 5.11: Protótipo final do Tau dentro da carcaça fabricada em impressora 3D.

## 5.1.2 Ro

### 5.1.2.1 Montagens em protoboard

Com o mesmo objetivo das montagens em protoboard do Tau, repetiu-se essa etapa com os módulos do Ro. Novamente, uma versão preliminar do firmware de controle foi desenvolvida no *Launchpad* para dar suporte aos testes modulares. As placas de circuito impresso utilizadas na implementação do BQ27411 (monitor de bateria) e do Charlieplexing de quatro pinos, confeccionadas anteriormente, foram reutilizadas.

Em relação ao receptor FM, que compõe Módulo de interface com o Tau, utilizou-se a placa de desenvolvimento apresentado na Figura 5.12.

O kit, fabricado e distribuído pela SpartFun, disponibiliza os principais pinos do Si4705 através de conectores de fácil acesso, contém os componentes passivos necessários para o seu funcionamento - incluindo o cristal - e o conector de áudio do tipo Jack P2. Para utilizá-la foi necessário apenas soldar uma antena no local especificado e configurar o receptor através de sua interface I2C. Utilizou-se um fio como antena. Como nesse momento da implementação o protótipo modular do Tau já se encontrava funcional, muitos testes foram realizados com ele.

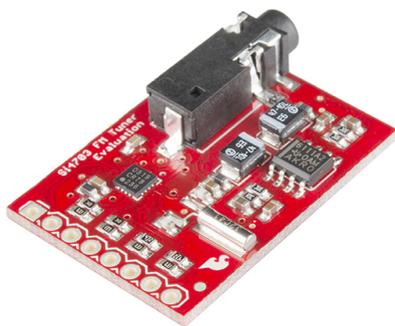


Figura 5.12: Placa de desenvolvimento do Si4705 fabricado pela SparkFun.

O módulo Bluetooth BM23, especificado para implementar o Módulo de interface com dispositivos *mobile*, são comercializados pela Microchip Technology apenas em um encapsulamento para montagem em superfície. Por esse motivo, a placa de circuito impresso apresentada na Figura 5.13 foi desenvolvida. Sua função é compatibilizar o BM23 com a montagem em protoboard disponibilizando seus principais pinos através de conectores de fácil acesso. Para testá-lo foi necessário adicionar componentes passivos ao circuito, estabelecendo as conexões entre componentes e o módulo através de fios. Graças a sua simplicidade e dimensões compatíveis com o processo de fabricação de PCIs disponível internamente na WaveTech, essa placa foi usinada dentro da própria empresa.

Houve um problema com a compra do circuito integrado STA529 que atrasou a sua entrega e ele não foi integrado na montagem em

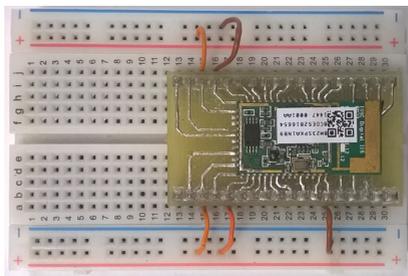


Figura 5.13: Placa auxiliar criada para o módulo Bluetooth BM23 utilizado no Módulo de interface com dispositivos *mobile*.

protoboard do Ro. Por esse motivo, as funções de multiplexação do áudio não pode ser realizada e a saída de áudio do BM23 (interface digital I2S) não pôde ser reproduzido por sua incompatibilidade com fones de ouvido. Conseqüentemente, a função *hands-free* foi validade apenas no caminho de áudio do Ro para o dispositivo *mobile*.

A seguir, os kits de desenvolvimento e as PCIs auxiliares confeccionadas foram conectados através de fios em uma protoboard. O esquemático do circuito resultando é idêntico àquele apresentado na Seção Capítulo 4.1.2. A Figura 5.14 apresenta uma foto dessa montagem.

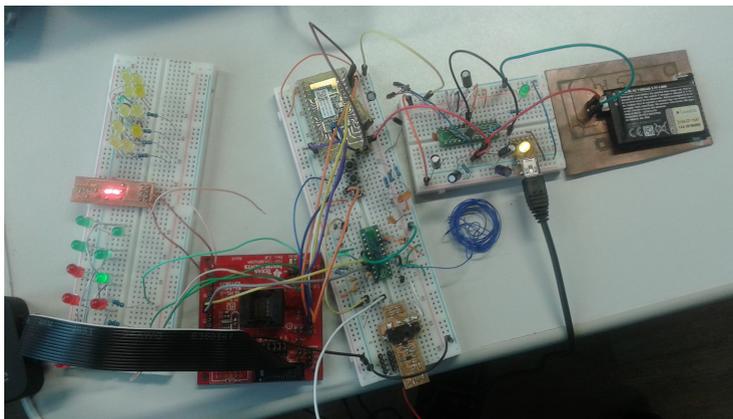


Figura 5.14: Montagem em *protoboard* para teste do circuito e do *software*.

Utilizando esse arranjo, foi possível testar as funcionalidades de liga e desliga, troca de canal e avaliar a influência da integração do

hardware na recepção FM. Foi possível, também, medir o consumo de corrente individual de cada módulo.

Novamente, identificou-se a presença de componentes de ruídos devido à captação de ruído por parte dos fios presentes na montagem.

### 5.1.2.2 Protótipo modular

Uma vez validada a arquitetura de hardware do Ro, a próxima etapa da implementação da unidade consistiu no desenvolvimento de um protótipo modular na qual os módulos pudessem ser testado isoladamente e facilmente integrados. Assim como no caso do Tau, o objetivo era minimizar a susceptibilidade do circuito a ruídos.

Afim de melhorar as conexões entre os módulos e eliminar a utilização de kits de desenvolvimento, placas auxiliares foram confeccionadas para todos os circuitos integrados presentes no Ro. Essas PCIs disponibilizam os pinos dos chips através de conectores de fácil acesso e incluem elementos importantes para seu correto funcionamento, como cristais e componentes passivos disponíveis apenas em encapsulamentos para montagem em superfície. Para baratear os custos de fabricação, as diversas placas foram alocadas uma ao lado da outra, como apresenta a Figura 5.15, e apenas uma unidade foi fabricada. A confecção foi realizada pela Curta Circuitos.

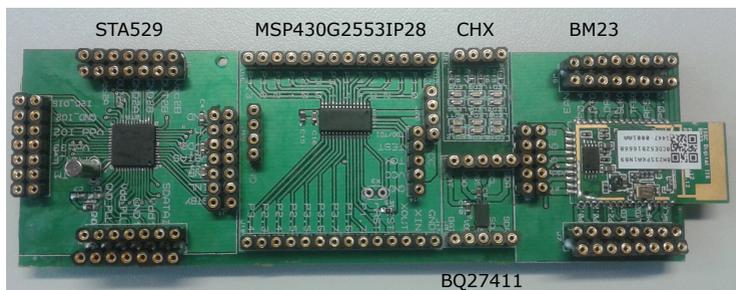
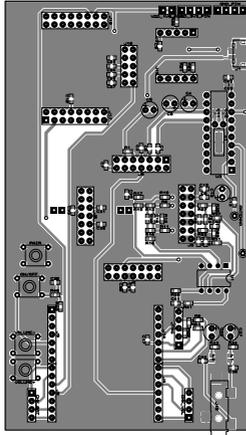


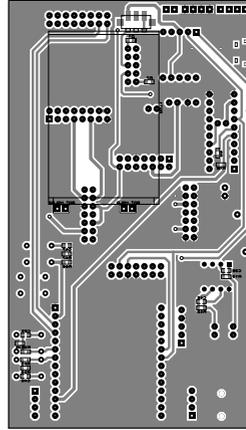
Figura 5.15: Placas auxiliares com os circuitos integrados utilizados na unidade receptora.

Desenvolveu-se, também, uma PCI em que as placas auxiliares pudessem ser acopladas, formando uma versão modular do protótipo. Juntas, essas placas eletrônicas possuem um esquemático resultante igual ao utilizado na montagem em protoboard, mas oferecem muito

mais robustez. O projeto dessa placa base foi compatibilizado com o processo de fabricação de PCIs disponível internamente na WaveTech, e ela foi usinada dentro da própria empresa. A Figura 5.16 apresenta as vistas de *top* e *bottom* do layout dessa placa e a Figura 5.17 apresenta uma foto do protótipo modular com todos os módulos acoplados.



(a) *Layout da face superior.*



(b) *Layout do verso.*

Figura 5.16: *Layout da placa eletrônica em que as PCIs auxiliares são acopladas.*

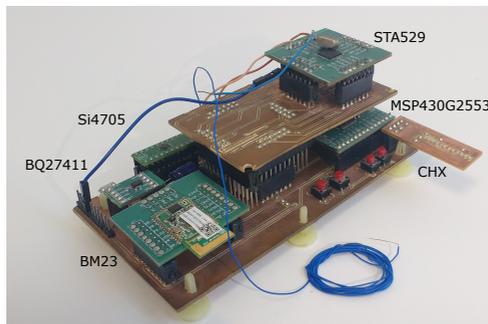


Figura 5.17: Protótipo com todos os módulos conectados.

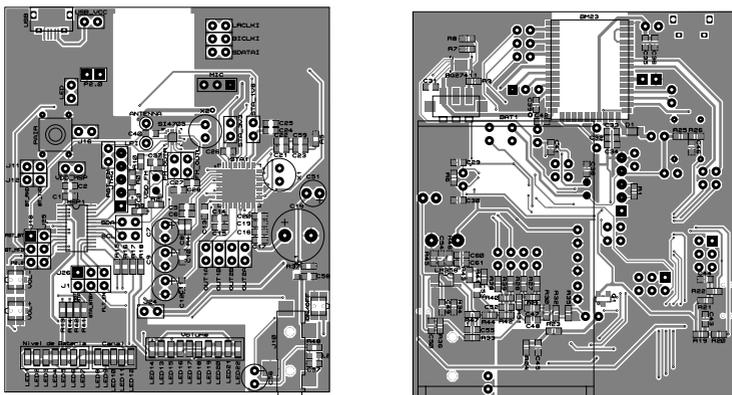
Devido a modularidade dessa versão do protótipo, cada módulo foi inserido gradativamente no circuito e testado. Dessa forma, se algum componente apresentasse problema, a causa poderia ser rapida-

mente identificada e o problema solucionado. Essa metodologia permitiu que o consumo dos blocos individuais fosse medido, possibilitando a análise sobre eventuais discrepâncias a implementação de melhorias.

Os testes realizados com essa versão demonstraram a maior robustez desse protótipo em relação à montagem em protoboard. Além disso, foi possível verificar o correto funcionamento de todos os módulos e de todas as suas funcionalidades, dos pontos de vista de hardware de firmware.

### 5.1.2.3 Protótipo unificado

O próximo passo na implementação de hardware do Ro foi desenvolver uma placa de circuito impresso que comportasse todos os dispositivos eletrônicos presentes no esquemático da unidade. Novamente, as conexões entre os módulos foram realizadas de forma a possibilitar sua interrupção ao remover-se shunts que estabelecem esses contatos. Essa placa foi fabricada pela Curta Circuitos. A Figura 5.18 apresenta as vistas de *top* e *bottom* do layout da PCI e a Figura 5.19 é uma foto do protótipo.



(a) *Layout* da face superior.

(b) *Layout* do verso.

Figura 5.18: *Layout* da placa do protótipo unificado do Ro.

Assim como no caso do Tau, a maioria dos resultados descritos no próximo Capítulo foram obtidos através de testes com esse protótipo

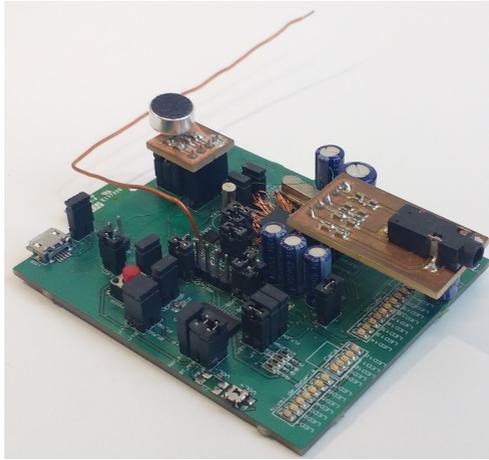


Figura 5.19: Protótipo unificado do Ro.

específico, pois ele possui pontos de prova de fácil acesso em todas as trilhas de interesse.

Nesse momento da implementação, foi possível testar todas as funcionalidades previstas e avaliar de forma completa as arquiteturas de hardware e software embarcado propostas para o Ro. Entretanto, percebeu-se novamente a existência de um acoplamento entre as trilhas do circuito Charlieplexing indicador de volume e as trilhas que transmitem o sinal de áudio. Este acoplamento insere um tom dentro da frequência audível no áudio reproduzido.

#### 5.1.2.4 Protótipo final

Por fim, uma nova PCI foi confeccionada. Dessa vez, os conectores associados ao *shunts* foram removidos e o layout da placa foi compatibilizado com a carcaça do produto. Assim como no Tau, muitos componentes tiveram de ser substituídos por dispositivos semelhantes comercializados em encapsulamentos menores, afim de ser possível acomodar o protótipo dentro do invólucro. Adicionalmente, as mesmas técnicas para minimizar os efeitos de acoplamento entre as trilhas do display luminoso e as que transmitem o sinal utilizadas no protótipo final do Tau foram reproduzidas no protótipo final do Ro.

A Figura 5.20 apresenta as vistas de top e bottom do layout da

placa eletrônica desenvolvida e a Figura 5.21 é uma foto do protótipo montado. Dentro da carcaça as duas unidades são extremamente semelhantes, e por isso a Figura 5.11 também representa o Ro dentro do *case*.

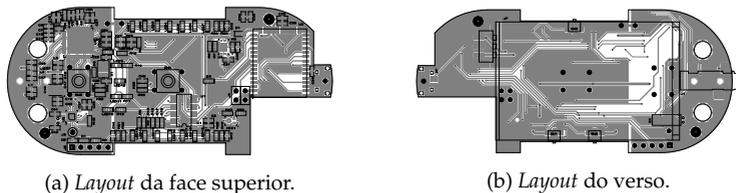


Figura 5.20: *Layout da placa do protótipo final do Ro.*



Figura 5.21: Protótipo final do Ro.

## 5.2 Firmware

O firmware do sistema foi desenvolvido com o suporte do Code Composer Studio (CCS) - o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) fornecido pela Texas Instruments. Essa IDE oferece compiladores otimizados para todas famílias de microcontroladores da TI e diversas funcionalidades que auxiliaram e aceleraram a implementação do código. Utilizando o emulador de flash (FET) da Texas, apresentado na Figura 5.22, é possível acessar modos de depuração que permitem leitura e escrita dos registradores e posições de memória dos MCUs. Essa ferramenta possui os conversores necessários para possibilitar a gravação do arquivo compilado nos microcontroladores através do protocolo *Spy-Bi-Wire* (SBW) - que utiliza apenas dois fios. O uso do FET também oferece opções de segurança, como por exemplo, a possibilidade de queimar o fusível da interface de gravação SBW, impossi-

ibilitando a leitura do conteúdo da memória do MCU através desse protocolo. Por fim, o emulador pode ser configurado num modo em que ele alimenta o circuito alvo. Nessa configuração, é possível medir o consumo de corrente do dispositivo em desenvolvimento. Ao longo das etapas de implementação todas essas funcionalidades foram utilizadas.



Figura 5.22: Emulador de flash da Texas Instruments.

Utilizou-se também outro recurso oferecido pela Texas Instruments chamada GRACE. Ele é uma interface gráfica que possibilita a geração automática de trechos de código utilizados na configuração de microcontroladores da família MSP430. A Figura 5.23 é um exemplo de captura de tela da janela principal do GRACE em um projeto desenvolvido para o MSP430G2553. Nela estão presentes todos os blocos de hardware que compõem o MCU em questão e em azul estão destacados os que são configuráveis. Ao acessá-los, menus individuais com opções específicas para cada bloco são exibidos. Uma vez definida a configuração desejada, o GRACE gera trechos de código escritos em C, organizados em uma estrutura pré-estabelecida e com uma sintaxe compatível com o microcontrolador; e os inclui automaticamente no projeto. Nesse contexto, o GRACE acelera e facilita a configuração do microcontrolador, tornando-a uma atividade mais amigável ao programador.

A estrutura do código desenvolvido foi baseada nos diagramas apresentados nas Figuras 4.13 e 4.19, e utilizou-se linguagem de programação C, apesar dela não oferecer suporte para a criação de classes. Do ponto de vista comportamental, a rotina principal dos softwares embarcados criados para cada unidade implementam FSMs (*Finite State Machine*) com estados e eventos idênticos aos modelados nos di-

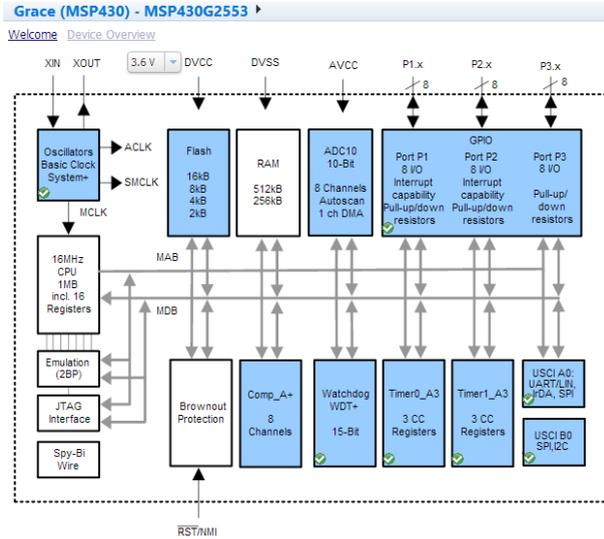


Figura 5.23: Captura de tela da janela principal do GRACE em um projeto que utiliza o MSP430G2553.

agramas das Figuras 4.14 e 4.20.

Diversos arquivos foram criados para implementar as entidades de softwares utilizadas pelas duas unidades, diversas técnicas foram utilizadas para diminuir o consumo total do Tau e do Ro em operação normal e algumas dificuldades foram encontradas. Esses detalhes da implementação do firmware são apresentados a seguir.

### 5.2.1 Tau

Os arquivos criados na implementação do firmware do Tau e suas respectivas entidades de software são apresentados na Tabela 5.1. Estes arquivos estão organizados conforme o estrutura apresentado a seguir.

```

Tau
├── src
│   └── MSP430
│       └── src
│           ├── Grace
│           └── __Grace.h

```

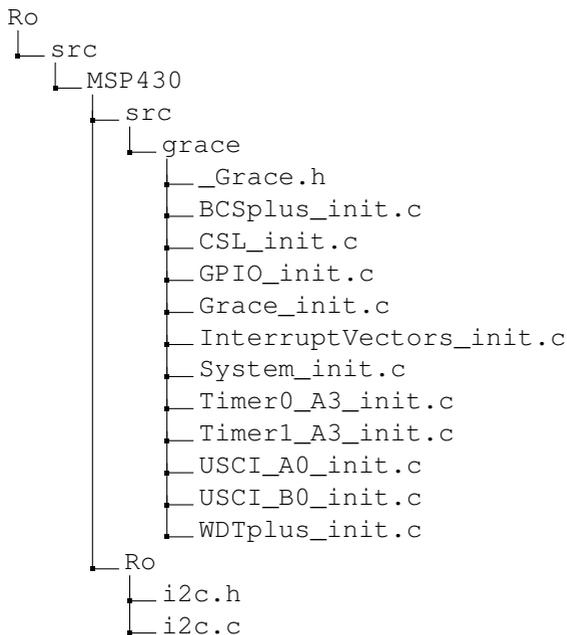


## 5.2.2 Ro

Em relação ao Ro, os arquivos criados na implementação do firmware e suas respectivas entidades de software são apresentados na Tabela 5.2. Estes arquivos estão organizados conforme a estrutura apresentado a seguir.

Tabela 5.2: Arquivos que compõem o firmware do Tau.

Entidade	Arquivos
BtnCtrl	eventfifo.h, eventfifo.c
I2C	i2c.h, i2c.c
UART	uart.h, uart.c
FMRX	si4705.h, si4705.c
BT	bm23.h, bm23.c
STA529	sta529.h, sta529.c
EMgt	bq27411.h, bq24266.h, bq27411.c, bq24266.c
CHX	chx4pins.h, chx4pins_volume.h



```
|_ uart.h
|_ uart.c
|_ BM23.h
|_ BM23.c
|_ bq27411.h
|_ bq27411.c
|_ bq24266.h
|_ bq24266.c
|_ charlieplexing_4pins.h
|_ charlieplexing_volume.h
|_ fifo.h
|_ global.h
|_ main.c
|_ Si4705.h
|_ Si4705.c
|_ sta529.h
|_ sta529.c
|_ timerTA0.h
|_ timerTA0.c
|_ timerTA1.h
|_ timerTA1.c
|_ eventfifo.h
|_ eventfifo.c
|_ main.cfg
```

### 5.2.3 Técnicas Utilizadas

A família de microcontroladores escolhida (MSP430G2) se destaca por suas configurações de ultrabaixo consumo. Em seu modo de operação mais energeticamente econômico, o LPM4, a corrente de polarização do MCU é inferior a 1 uA. Este consumo é desprezível frente à carga da bateria utilizada. Portanto, manteve-se o microcontrolador alimentado durante todo o tempo de operação do protótipo sem interferir no tempo de vida do dispositivo.

O firmware foi desenvolvido de forma que o MCU passe a maior parte do tempo em um modo *low power*. Vetores de interrupção - desvios de código acionados por hardware - foram criados para gerenciar as interações do microcontrolador com seus periféricos, como transmissão e recepção por I2C, decodificação de mensagens UART, etc. Nenhuma dessas funções atrasa a operação do MCU ao esperar por

algum evento (técnica conhecida como *polling*). Ao invés disso, as interrupções cadastram eventos em uma fila FIFO. Os eventos controlam as máquinas de estados da rotina principal do código, onde as requisições são devidamente tratadas.

Os eventos de comunicação são tratados dentro das rotinas de interrupção do MSP. Por esse motivo, é possível processar as mensagens eficientemente, mesmo durante a comunicação.

Os registradores temporizadores do MCU foram amplamente utilizados como alternativas à implementação de atrasos por software. Estes registradores também foram utilizados para acompanhar a comunicação com os periféricos, identificando quando os tempos de *timeout* expiravam. Enquanto o registrador conta o tempo, o MSP é enviado para um dos modos *low power*. Nessas configurações, o modo de mais baixo consumo utilizado é o LPM3. Essa técnica economiza energia e permite aos demais componentes do sistema cadastrar eventos na FIFO enquanto o limiar de contagem não é alcançado. O microcontrolador possui um temporizador de *watchdog*, comumente utilizado para evitar o travamento do sistema. Entretanto, testes revelaram que o único acontecimento que poderia parar o funcionamento do MCU era algum evento inesperado no barramento de comunicação I2C. A reinicialização e configuração do barramento e dos dispositivos conectados a ele é disparada pelo registrador temporizador que acompanha o *timeout* dessa comunicação e, por esse motivo, o registrador de *watchdog* foi utilizado para realizar outra função: filtrar o ruído de trepidação, complementando o circuito mostrado na Figura 4.1. A fim de evitar que a interrupção de um botão fosse registrada mais de uma vez, quando o botão é pressionado, sua interrupção é desabilitada e o *timer* habilitado. Quando ocorre o estouro da contagem do *timer*, as interrupções são habilitadas novamente.

A necessidade de medição de tempo se demonstrou recorrente e exigiu o uso de bases de tempo com ordens de grandezas diferentes. Para gerá-los, os dois registradores temporizadores da MCU foram configurados com sinais de relógio de frequências diferentes. Os eventos mais lentos foram gerados com o sinal de relógio analógico do MCU, de 12 kHz; e os eventos de alta frequência utilizaram o sinal de relógio do processador de 8 MHz. As diversas bases de tempo foram criadas através de funções que definem o intervalo de comparação dos

temporizadores. Três registradores de comparação estão disponíveis para cada temporizador e todos foram utilizados.

#### 5.2.4 Dificuldades Encontradas

Inicialmente, utilizou-se a frequência mínima de operação do MCU,  $1\text{ MHz}$ , a fim de minimizar o consumo de energia. Entretanto, durante a integração do software, verificou-se que  $1\text{ MHz}$  não seria suficiente para processar a comunicação UART e I2C simultaneamente. Portanto, aumentou-se a frequência de operação para  $8\text{ MHz}$ .

Essa transição apresentou uma particularidade não documentada dos circuitos integrados Si4713 e Si4705: na frequência de  $8\text{ MHz}$ , a transmissão de dois bytes consecutivos via I2C era muito veloz e os chips não tinham capacidade de responder tão rapidamente. Foi necessário, então, a adição de um pequeno intervalo entre os bytes enviados. Como essa característica não é documentada pelo fabricante, o processo de determinação do valor do intervalo foi iterativo, e resultou em cerca de  $25\ \mu\text{s}$ .

Quanto aos mesmos chips, além da questão relacionada à interface I2C a inicialização do Si4713 e do Si4705 não é bem documentada. Durante os testes, verificou-se a necessidade de esperar aproximadamente  $400\text{ ms}$  após o comando de *powerOn*, para que o oscilador interno dos chips estabilizasse e fosse possível sintonizá-los a uma frequência específica.



# CAPÍTULO 6

---

## Testes e resultados

---

Este Capítulo sumariza os testes executados e os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho. Para fins didáticos o texto está estruturado em três seções: testes elétricos, testes funcionais e testes de qualidade do som. Os testes elétricos compreendem as medições de consumo e do desempenho do circuito que filtra o ruído de trepidação. Testes funcionais foram realizados para avaliar o comportamento do sistema do ponto de vista de suas principais características, como alcance, e o tempo de carga e descarga da bateria. Por fim, os testes de qualidade do som avaliam o atraso e a linearidade do sistema.

### **6.1 Testes elétricos**

Testes elétricos foram realizados com as duas unidades a fim de avaliar o funcionamento do circuito que minimiza o ruído de trepidação dos botões e, principalmente, o consumo do Tau e do Ro em diferentes situações.

### 6.1.1 Ruído de trepidação

Os botões utilizados nos protótipos apresentam ruído de trepidação. Ou seja, quando pressionados, pulsos espúrios são gerados devido à trepidação do movimento que estabelece o contato mecânico entre seus terminais. Para comprovar a presença deste efeito, utilizou-se uma montagem sem o filtro proposto na Seção 4.1.1.2.1. O sinal elétrico do terminal do botão que vai conectado ao microcontrolador foi monitorado através de um osciloscópio digital e botão foi pressionado. A Figura 6.1 apresenta este sinal. Como pode-se observar, os resultados vão ao encontro da situação descrita.

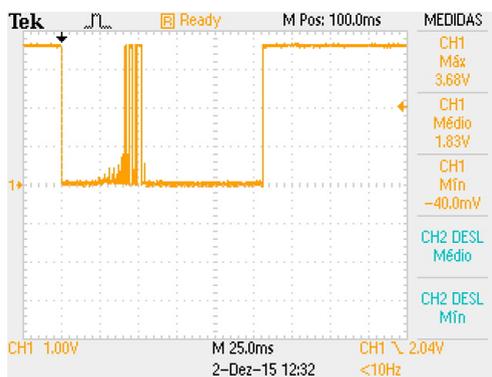


Figura 6.1: Ruído de trepidação sem o filtro.

Para minimizar esse efeito, utilizou-se o circuito apresentado na Figura 4.1. A fim de avaliar sua eficiência, o teste aplicado à montagem sem o filtro foi realizado novamente. A forma de onda do sinal conectado à porta digital do microcontrolador nessas condições é apresentada na Figura 6.2. Como indicado na figura, os intervalos de carga e descarga do capacitor aconteceram em aproximadamente 7 e 26 ms, respectivamente.

### 6.1.2 Consumo

Utilizando as placas desenvolvidas durante a implementação de hardware do sistema, foi possível aferir o consumo de corrente das unidades. O protótipo unificado foi utilizado em medições de consumo dos blocos individuais e do sistema completo.

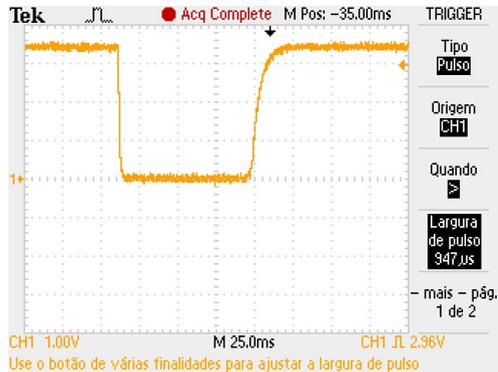


Figura 6.2: Sinal do botão após a aplicação do filtro.

O consumo do Tau foi medido em duas situações diferentes: em *standby* e em operação normal. E o consumo do Ro foi medido num total de cinco situações: em *standby*; em operação com o volume no mínimo; em operação com o volume no máximo; conectado ao BM23; e desligando (no estado *WAIT\_BT*).

O instrumento utilizado nas medições foi multímetro de bancada MDM-8156B, fabricado pela Minipa. O mesmo arranjo foi utilizado para medir o consumo das duas unidades. A Figura 6.3 é uma foto deste arranjo durante a realização de medidas de consumo do Tau.



Figura 6.3: Gráfico do consumo do prototipo.

O resultado detalhado das medições de consumo do Tau são apresentados na Tabela 6.1. A coluna *ON* é referente ao consumo em operação normal e a coluna *SB*, ao consumo em *standby*.

Tabela 6.1: Descrição do consumo dos módulos que compõe o Tau.

Módulo	ON	SB
Interface com o usuário	19,6 mA	8 $\mu$ A
Interface com a fonte sonora	19,7 mA	30 $\mu$ A
Gerenciamento de energia	0,8 mA	15 $\mu$ A
Processamento	3 mA	80 $\mu$ A
Unidade completa	43,3 mA	146 $\mu$ A

E o resultado detalhado das medições de consumo do Ro são apresentados na Tabela 6.2. As colunas *ON* e *SB* tem o mesmo significado descrito anteriormente na tabela de consumo do Tau. E as colunas  $Vol_{max}$ ,  $Vol_{min}$  e *BT* estão associadas, respectivamente, ao consumo em operação normal com o volume no máximo; em operação normal com o volume no mínimo; e em operação conectado com o módulo Bluetooth conectado à um dispositivo *mobile*.

Tabela 6.2: Descrição do consumo dos módulos que compõe o Ro.

Módulo	ON	$Vol_{max}$	$Vol_{min}$	BT	SB
Interface com o usuário	39,3 mA	39,3 mA	39,3 mA	39,3 mA	16 $\mu$ A
Interface com o Tau	19 mA	19 mA	19 mA	19 mA	26 $\mu$ A
Interface com disp. mobile	11,7 mA	11,7 mA	11,7 mA	12,1 mA	121 $\mu$ A
Cond. e reprod. do som	15,5 mA	20,3 mA	13,7 mA	15,8 mA	370 $\mu$ A
Gerenciamento de energia	0,8 mA	0,8 mA	0,8 mA	0,8 mA	15 $\mu$ A
Processamento	2,5 mA	2,5 mA	2,5 mA	2,5 mA	80 $\mu$ A
Unidade completa	88,4 mA	93,8 mA	87,1 mA	89,7 mA	633 $\mu$ A

## 6.2 Testes funcionais

Uma série de testes qualitativos e quantitativos foi realizada a fim de avaliar o comportamento do sistema do ponto de vista de suas funcionalidades. Esta seção descreve resumidamente testes e resultados

obtidos para as seguintes características do sistema: exploração da persistência da visão na multiplexação dos LEDs; determinação dos canais de transmissão; alcance do sistema; e a duração dos ciclos de carga e descarga da bateria.

Durante a execução dessas medições, o comportamento do sistema foi monitorado e comparado com os diagramas de sequência apresentados no Capítulo 4. Como os testes envolvem a execução de todos os casos de uso identificados para as duas unidades, todas as sequências modeladas foram avaliadas.

### 6.2.1 Carga e descarga da bateria

A fim de determinar a duração dos ciclos de carga e descarga da bateria das duas unidades, testes foram realizados. Nesse contexto, o funcionamento dos Módulos de gerenciamento de energia foram modificados para gerar um evento quando condições de carga completa ou nível criticamente baixo da bateria são atendidas. O evento é identificado por um computador que salva o horário de sua ocorrência.

Durante todo o teste, o Tau e o Ro estavam configuradas em seus modos de operação de maior consumo: ON e  $Vol_{Max}$ , respectivamente. Inicialmente, as unidades foram desconectadas de fontes externas de energia e esperou-se que as baterias descarregassem completamente. A seguir, o Tau e o Ro foram conectados novamente às fontes externas e esperou-se até que o evento de carga completa fosse gerado. Este intervalo foi utilizado como período de carga da bateria. Por fim, desconectou-se mais uma vez as fontes de energia esperou-se até que o evento de carga criticamente baixa fosse gerado. Este intervalo foi definido como o período de descarga da bateria.

O teste foi repetido cinco vezes para cada unidade. Os resultados são apresentado na Tabela 6.3, composta pela duração média aproximada dos cinco intervalos.

Tabela 6.3: Tabela de duração da bateria

Ciclo	Tau (ON)	Ro ( $Vol_{max}$ )
Carga	1h05min	2h05min
Descarga	21h15min	10h40min

## 6.2.2 Persistência da visão

Para que seja possível explorar a persistência da visão, um ciclo completo de acionamento dos LEDs deve acontecer numa taxa mínima de 30 Hz. Durante a realização dos testes, observou-se que configurando a taxa de atualização do display para 60 Hz, melhora-se a percepção de que todos os LEDs estão acesos.

Por facilidade de configuração, optou-se por executar a máquina de estados que controla o acionamento dos LEDs a cada 1 ms. Nessas condições, cada display (formado por doze LEDs) é atualizado numa taxa de aproximadamente 83 Hz e tem-se a percepção de que todos os LEDs estão acionados simultaneamente, como indicado na Figura 6.4. Entretanto, sem a utilização de um cristal, sabe-se que a frequência gerada pelos osciladores internos de microcontroladores de baixo custo como o MSP430G2553 flutua ligeiramente em torno de seu valor nominal.



Figura 6.4: Display Charlieplexing com todos os LEDs aparentemente acesos.

A fim de investigar a real taxa de atualização do display, os sinais de controle dos circuitos de Charlieplexing foram monitorados. A Figura 6.5 apresenta um desses sinais de controle em uma situação em que os doze LEDs estão aparentemente acesos. Os momentos em que o pino é configurado como saída em nível lógico baixo, alto e como entrada - alta impedância - estão destacados na figura.

Pode-se observar que nesse caso o período de um ciclo de acionamento do Charlieplexing é de  $13,75ms$ , correspondendo a uma frequência de atualização do display de  $72,73Hz$ .

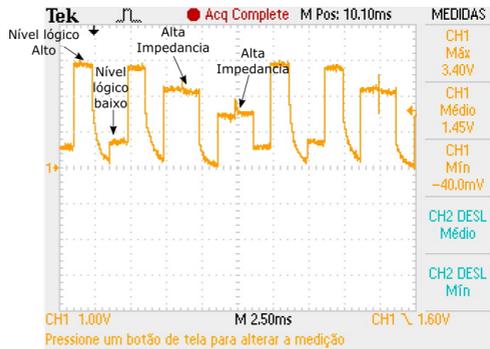


Figura 6.5: Sinais de controle de um pino do Charlieplexing.

### 6.2.3 Canais de transmissão

Apesar de ser uma decisão de projeto, a determinação da frequência dos cinco canais de transmissão é fortemente baseada em testes e medições e por isso é descrita neste capítulo.

O processo utilizado para especificação dos cinco canais é baseado na funcionalidade RCP (*Receive Power Scan*) do transmissor FM Si4713. Realizou-se uma varredura do espectro de frequências entre 76 e 108 MHz e a potência total recebida foi salva em uma lista. A seguir, a lista foi examinada procurando-se regiões do espectro com largura de banda igual à 50 kHz (largura do sinal transmitido pelo Tau) com as menores densidades espectrais de potência. A frequência central de cada uma das cinco regiões com as menores densidades espectrais foi definida como um canal de transmissão.

O arranjo de testes utilizado, apresentado na Figura 6.6, é composto pelos kits de desenvolvimento do MSP430 e do Si4713 conectados a um computador. O microcontrolador realizou a configuração do transmissor; as funções de leitura, armazenamento e processamento das informações de potência; e o envio das frequências dos canais de transmissão para o computador. Para isso, uma rotina simplificada foi desenvolvida especificamente para este teste. As medições foram efetuadas na sede da WaveTech.

A Figura 6.7 apresenta uma captura de tela do terminal de comunicação serial estabelecido entre o computador e o microcontrolador durante o teste. O software PuTTY foi utilizado para abrir a porta de

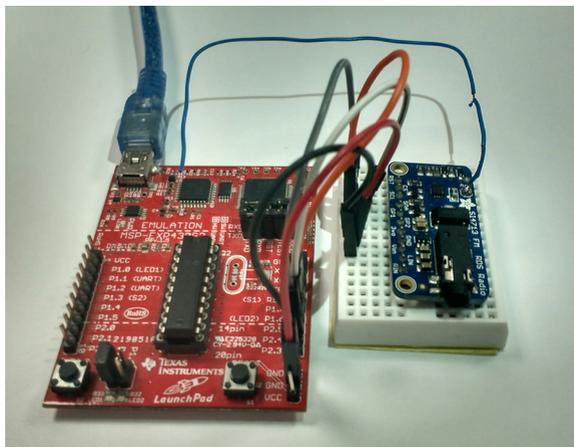


Figura 6.6: Arranjo de testes utilizado na determinação dos canais de transmissão.

comunicação digital. Na imagem é possível observar as frequências centrais dos cinco canais de transmissão utilizados.

#### 6.2.4 Alcance

Os testes relacionados ao alcance do sistema foram realizados em campo aberto com os protótipos finais das unidades dentro e fora do case. Para realizar a medição, o Tau foi fixado em um local definido enquanto realizava o *broadcast* de um sinal sonoro em um canal específico. Nesse teste, a função do botão de troca de canal do Ro foi modificado para implementar a funcionalidade *seek*, muito comum em aparelhos de rádio. Essa função faz com que quando o botão de troca de canal é pressionado, o receptor FM varie a frequência em que está sintonizado até encontrar uma estação operacional. Durante o teste, um usuário utilizando o Ro, inicialmente próximo à outra unidade, se afastou até que a função *seek* não encontrasse mais o sinal transmitido pelo Tau. A distância até o transmissor, nesse momento, foi considerada o alcance. A medição da distância foi realizada por uma trena digital da BOSCH. O teste foi repetido diversas vezes a fim de garantir a coerência do resultado obtido. A Tabela 6.4 apresenta o resultado das medições de alcance.

```

COM5 - PuTTY
Escaneando a potencia
entre 87.5 to 108.0 MHz

87.50 MHz - RPS: 30;
87.60 MHz - RPS: 33;
87.70 MHz - RPS: 64;
87.80 MHz - RPS: 63;
87.90 MHz - RPS: 56;
88.00 MHz - RPS: 28;
...
...
...
107.50 MHz - RPS: 24;
107.60 MHz - RPS: 24;
107.70 MHz - RPS: 28;
107.80 MHz - RPS: 28;
107.90 MHz - RPS: 32;
108.00 MHz - RPS: 34;
...
...
...
Canais de Transmissao:
Canal 1:
  90.10 MHz - RPS: 27;
Canal 2:
  93.10 MHz - RPS: 33;
Canal 3:
  105.60 MHz - RPS: 22;
Canal 4:
  106.10 MHz - RPS: 21;
Canal 5:
  107.70 MHz - RPS: 23;

```

Figura 6.7: Determinação dos canais de transmissão.

Tabela 6.4: Alcance do sistema.

Alcance	Ro dentro do case	Ro fora do case
Tau dentro do case	9,6 m	9,7 m
Tau fora do case	10,1 m	10,2 m

### 6.3 Testes de qualidade do som

Os testes relacionados a qualidade do som do sistema não foram avaliados do ponto de vista da psicoacústica. Além disso, este trabalho não compreende os aspectos da geração de um sinal sonoro, apenas a transmissão e reprodução de um sinal existente. Avaliou-se portanto, a capacidade do sistema em transmitir informação e a distorção causada por ele. Os aspectos considerados nesse contexto foram o atraso inserido pelo sistema e a modificação da resposta em frequência do som. Considerou-se a influência do enlace completo de transmissão e recepção envolvendo o Tau e o Ro.

O mesmo arranjo de testes, apresentado na Figura 6.8, foi utilizado para as duas medições. O sistema descrito neste trabalho foi conectado

na placa de aquisição de dados NI USB-4431 da National Instruments de acordo com o esquemático exibido na Figura 6.9. Durante o teste, a placa de aquisição de dados emite um sinal em sua saída *Out* e adquire o sinal de saída da unidade receptora através de sua entrada *In2*. Para facilitar a determinação da resposta em frequência, o sinal emitido também é adquirido. A emissão e a aquisição de todos os sinais acontece de maneira síncrona.

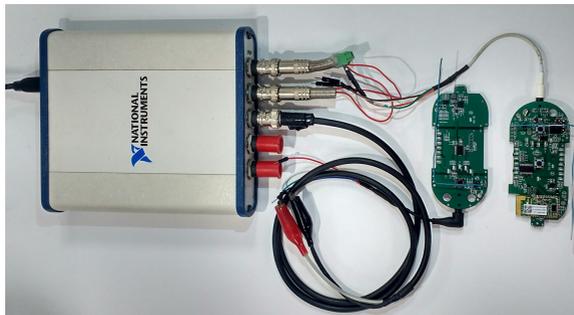


Figura 6.8: Arranjo de testes utilizado na medição da influência do sistema na qualidade do som reproduzido.

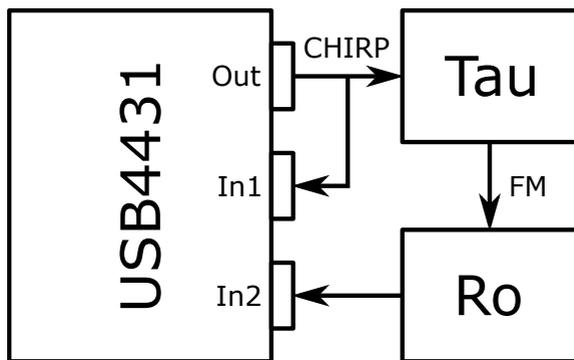


Figura 6.9: Esquemático de conexões entre a placa de aquisição de dados e o sistema desenvolvido.

O sinal é amostrado pelo Tau, através de seu Módulo de interface de áudio, com 16 bits a uma taxa de 32 kHz. Por consequência, todos os resultados apresentados a seguir estão limitados por essas características.

### 6.3.1 Atraso

O sinal emitido pela placa de aquisição durante a avaliação do atraso do sistema foi um CHIRP. Este é um sinal modulado na frequência originalmente utilizado em radares e tem como principal características possuir uma frequência que varia ao longo do tempo. Combinando o uso desse sinal de excitação com a operação de correlação cruzada pode-se determinar facilmente o atraso entre os sinais emitido e adquirido. Isso se dá pois esta operação busca ocorrências do sinal de excitação ao longo do sinal medido e, com o CHIRP, a localização do pulso é extremamente facilitada.

Os resultados são apresentados de forma gráfica na Figuras 6.10. A imagem à esquerda apresenta o gráfico completo e a figura à direita apenas a região próxima ao pico de correlação cruzada dos os sinais. O gráfico aponta que o atraso medido foi de 5 ms. Entretanto, a latência aferida entre o sinal de saída e o sinal captado pela entrada *In1*, foi de aproximadamente 1.6 ms. Isso indica que o atraso real inserido pelo sistema foi de aproximadamente 3.4 ms.

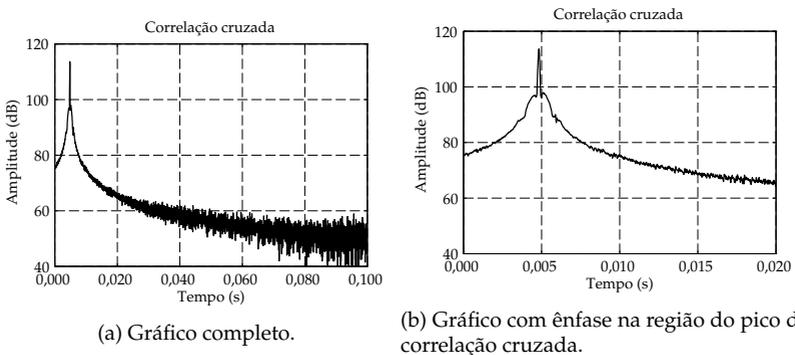
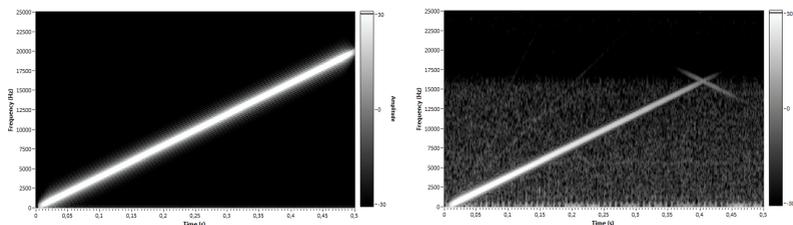


Figura 6.10: Correlação cruzada entre o sinal emitido e adquirido.

Antes de prosseguir para a medição seguinte, envolvendo a resposta em frequência, este arranjo de testes foi aproveitado para a obtenção do espectrograma dos sinais envolvidos. Espectrogramas são gráficos que analisam dinamicamente a densidade espectral de energia e seus valores associam tempo *vs.* frequência. Os gráficos são apresentados na Figura 6.11. Através da figura, pode-se observar que todas as frequências estão sendo excitadas; que não há problemas com

harmônicas; e relação sinal-ruído de aproximadamente 30 dB. Pode-se notar também a ocorrência de sobreposição e a incapacidade do sistema em acompanhar o sinal emitido para frequências superiores a 16 kHz devido aos efeitos de *aliasing*.



(a) Espectrograma do sinal emitido.

(b) Espectrograma do sinal medido.

Figura 6.11: Espectrograma dos sinais emitido e medido.

### 6.3.2 Resposta em frequência

Por fim, realizou-se testes a fim de determinar a resposta em frequência do sinal adquirido em relação ao sinal de excitação. Durante a realização deste teste, um sinal de ruído branco foi emitido pela placa de aquisição de dados enquanto a saída do sistema era monitorada. Nesse teste, um ruído branco foi emitido pois idealmente esse tipo de sinal excita todas as frequências de forma igualitária e simultânea. A resposta em frequência foi determinada através do cálculo da Função Resposta em Frequência (FRF) entre estes dois sinais.

O resultado é apresentado graficamente na Figura 6.12. A Figura 6.12(a) mostra a resposta em frequência de magnitude do sinal (as alterações em amplitude causadas para cada frequência pelo sistema no sinal de entrada) e a Figura 6.12(b) apresenta a coerência entre os sinais. A coerência espectral é um dado estatístico utilizado para examinar a semelhança entre dois sinais ou conjunto de dados. Quando os sinais são iguais, a coerência entre eles é um [7]. Optou-se por não exibir a resposta em fase (relacionada ao atraso do sinal) pois a análise de distorção de fase não faz parte do escopo de análise proposto para este trabalho. Observando a figura, é possível notar que a resposta em frequência é plana e a coerência assume valor unitário em toda a faixa entre 250 Hz e 16 kHz.

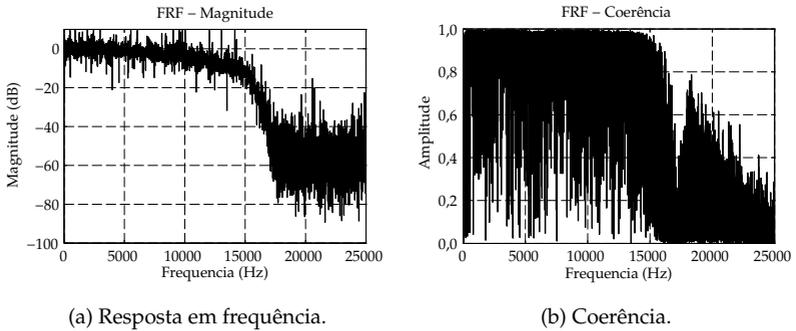


Figura 6.12: Resposta em frequência entre os sinais de excitação e medido.

Há picos espúrios em algumas frequências na Figura 6.12, pois utilizou-se uma representação em banda estreita e o ruído branco gerado não excitou essas frequências específicas. A Figura 6.13 é um gráfico com os mesmos dados apresentados na Figura 6.12(a) utilizando uma representação bandas de 1/6 de oitava. Com ela, o comportamento da resposta em frequência é mais facilmente observado.

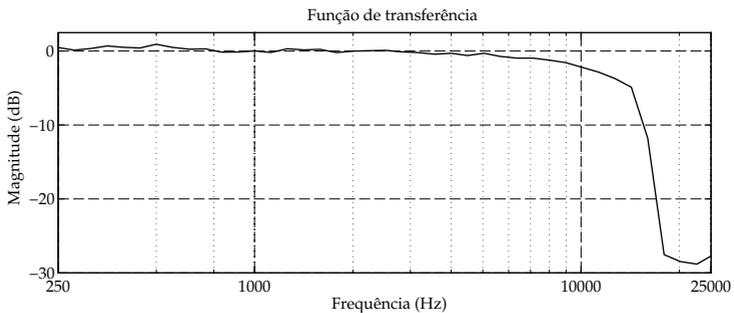


Figura 6.13: Resposta em frequência entre os sinais de excitação e medido com representação em bandas de 1/6 de oitava.

Foi necessário ajustar o volume para garantir uma magnitude próxima a 0 dB nessa faixa. Entretanto, há ainda três níveis de volume superiores ao utilizado durante o teste, a fim de facilitar a compreensão de pessoas com perda auditiva.



# CAPÍTULO 7

---

## Discussão dos Resultados

---

Este capítulo apresenta uma breve discussão sobre os testes e resultados descritos no capítulo anterior. As metodologias adotadas são avaliadas; as medidas são examinadas, comparadas com os valores esperados e confrontadas com os requisitos; e procura-se determinar a causa de eventuais discrepâncias entre esses números. Em algumas situações, opções trabalhos futuros são propostas.

### 7.1 Testes elétricos

#### 7.1.1 Ruído de trepidação

Esta seção trata dos testes realizados com o circuito proposto para filtragem do ruído de trepidação apresentado na operação dos botões utilizados no projeto. Através de sua execução, foi possível verificar que a estratégia utilizada funcionou corretamente. A Figura 6.2 demonstra a eliminação dos picos espúrios no acionamento dos botões. Em relação à duração das bordas de subida e descida do sinal, os valores medidos de 26 e 7 ms, respectivamente, são muito condizentes com os valores esperados: 25 e 5 ms. E o erro percebido é devido a precisão de 5% oferecida pelos resistores e capacitores utilizados no

circuito.

O circuito também oferece um nível de robustez frente à ocorrência em alta taxa de diversos eventos de acionamento dos botões. O atraso inserido nas transições de seus sinais de saída proporciona ao sistema tempo suficiente para executar suas funções e tratar todas as eventuais interrupções. Nesse contexto, é possível ao usuário pressionar repetidamente todos os botões sem que o funcionamento de nenhuma das unidades seja prejudicado.

### 7.1.2 Consumo

A fim de simplificar a avaliação dos resultados de consumo obtidos, a comparação entre medições e valores calculados é apresentada apenas para o modo de operação normal (ON). Essa decisão também se justifica pelo fato de que o consumo do Ro variou menos de 8% entre todos os seus modos de operação. À vista disso, o consumo medido do Tau - 43,3 mA - foi em torno de 2% superior ao consumo teórico, estimado em 42,5 mA: e, em relação ao Ro, o dado medido foi ligeiramente inferior ao consumo calculado.

É possível fundamentar esses resultados através da análise das Tabelas 6.1 e 6.2 que descreve detalhadamente o consumo de todos os módulos que compõem o Tau e o Ro. Pode-se perceber que o consumo do Módulo de interface com o usuário das duas unidades foi inferior ao valor previsto, enquanto os demais módulos foram extramente coerentes com os valores esperados. Outro detalhe interessante destas tabelas que merece destaque é o fato de que o somatório dos consumos modulares difere minimamente do consumo da unidade completa. Uma investigação foi realizada a fim de examinar a causa desse efeito, e percebeu-se a presença de alguns resistores de *pull-up* externos ao circuito isolado de todos os módulos. Portanto, sua influência é percebida apenas quando se avalia o consumo das unidades completas.

Por fim, vale a pena destacar que, mesmo com todas as técnicas utilizadas, o consumo de corrente do display representa metade do consumo total das duas unidades. Nesse contexto, a utilização de um modelo de LED mais economicamente custoso, mas que ofereça alto brilho e uma corrente direta inferior a 15 mA pode ser uma alternativa viável para o projeto de hardware.

## 7.2 Testes funcionais

### 7.2.1 Carga e descarga da bateria

O tempo de autonomia do sistema atingiu com boa margem aos requisitos identificados. Entretanto, o excesso de aproximadamente treze horas nesse quesito, em relação Tau, não justifica a alteração do modelo de bateria utilizado nessa unidade. A inclusão da funcionalidade de geração de ventos nas situações de carga completa e nível crítico da bateria, proporcionou confiabilidade para o teste. Como o tempo de autonomia do sistema superou um período de expediente, os testes de descarga foram realizados durante a noite.

### 7.2.2 Persistência da visão

A utilização do Charlieplexing foi uma decisão de projeto que se demonstrou fundamental no contexto de requisitos. Essa técnica, que utiliza diversos recursos do microcontrolador e ocupa praticamente todo tempo de processamento a fim de garantir que seus LEDs estejam aparentemente acesos simultaneamente, permitiu a redução do consumo total do dispositivo. Mesmo com uma diferença de aproximadamente 15% entre a duração do ciclo de multiplexação projetado e medido, a máquina de estados implementada e a temporização utilizada para o controle do display garantiu a possibilidade de se explorar a persistência da visão. Numa situação hipotética em que todos os LEDs são efetivamente acionados simultaneamente, o consumo dos dispositivos seria aumentado em aproximadamente dez vezes.

### 7.2.3 Canais de transmissão

Os resultados obtidos com os testes que avaliaram a influência do sistema na qualidade do som reproduzido, comprovaram a eficácia da metodologia de testes utilizada na determinação dos canais de transmissão. Entretanto, durante o desenvolvimento da rotina utilizada, percebeu-se que a fim de garantir criteriosamente que os canais definidos apresentam de fato a menor densidade de potência espectral na faixa de frequências 76 e 108 MHz, o teste deveria ser realizado toda vez que a rotina de *powerUp* do transmissor FM for executada. Uma forma de possibilitar a implementação dessa melhoria, seria modificar

o firmware do Tau e do To para adicionar uma funcionalidade de determinação dinâmica dos canais de transmissão. É possível utilizar a funcionalidade de transmissão de dados seriais através da codificação RDBS que os circuitos integrados Si4713 e Si4705 oferecem e adicionar um estado de sincronização dos canais de transmissão entre as unidades.

#### 7.2.4 Alcance

Os testes associados à determinação do alcance do enlace de transmissão e recepção entre o Tau e o Ro demonstraram que o sistema atende aos requisitos especificados. Analisando os dados apresentados na Tabela 6.4 é possível perceber a influência da carcaça na diminuição do alcance, principalmente em relação à unidade transmissora. Comparando o alcance medido com as duas unidades dentro e fora do case, percebe-se uma redução de aproximadamente 6% na distância de funcionamento no pior caso.

Mesmo assim, a obtenção precisa de informações relacionada ao alcance precisa ser feita de forma mais refinada. Idealmente, através da medição da intensidade e demais características do campo eletromagnético induzido pelo Si4713 e da capacidade do Si4705 em uma câmara anecoica.

Em diversos momentos durante a execução dos testes de alcance, a distância entre as unidades fez com que o áudio transmitido pelo Tau não fosse captado pelo Ro. Nessas condições, o Ro prosseguia em operação normal, mas reproduzia apenas um ruído característico de situações de interferência. O mesmo acontece quando o transmissor FM Si4713 está sintonizado na mesma frequência de uma estação de radiodifusão. A fim de minimizar esse efeito, verificou-se que o banco de registradores do STA529 pode ser preenchido com algumas informações que permitem ao chip identificar situações em que o sinal em processamento é composto apenas por componentes de ruído e interromper a reprodução do som. Vale ressaltar que quando o Ro retorna para o raio de alcance, ele volta à reproduzir o som transmitido pelo Tau normalmente.

## 7.3 Testes de qualidade do som

Os testes que avaliaram a influência das unidades na qualidade do som reproduzido foram importantíssimos para validar o funcionamento da solução desenvolvida. Através de um arranjo simples a metodologia utilizada possibilitou a estimação de várias grandezas relacionadas a capacidade do sistema em transmitir informação.

### 7.3.1 Atraso

Em relação ao atraso estimado através da utilização da operação de convolução cruzada, o valor de 3.4 ms atende às especificações e está de dentro da faixa em que o atraso é percebido pelo cérebro como uma reverberação e não causa sensação de desconforto à audição humana [19]. Quanto às informações obtidas através do espectrograma, percebe-se a baixa influência do sistema na qualidade do áudio. No que diz respeito à presença de sobreposição, os efeitos observados a partir de 16 kHz podem ser removidos através da adição de um filtro anti *aliasing* no Módulo de interface de áudio do Tau. Entretanto, os que sinais sonoros que se encontram nessa faixa são bastante atenuados pelo sistema auditivo humano [19].

### 7.3.2 Função de transferência

A FRF medida entre os sinais emitido e adquirido demonstra que os efeitos do sistema no áudio reproduzido são mínimos, visto que a resposta em frequência apresenta comportamento plano entre 250 Hz e 16 kHz. Os dados obtidos a partir da Figura 6.13, em conjunto com o valor unitário da coerência, demonstra que há pouca inserção de efeitos de distorção e/ou interferência por parte do sistema desenvolvido em toda faixa de frequências compreendida pela audição humana.

## 7.4 Comparação com dispositivos comerciais

A Tabela apresenta uma comparação de funcionalidades entre o sistema desenvolvido e os concorrentes diretos. Os dados demonstram que Tau e o Ro formam uma solução completa que une as vantagens

dos dois principais grupos de concorrentes: os que utilizam Bluetooth e os que requerem uma bobina indutiva instalada.

O sistema apresentado neste trabalho realiza o broadcast de áudio para diversos receptores, é independente da instalação de uma infraestrutura, permite ao usuário atender ligações telefônicas sem manusear seus *smartphones* e é compatível com televisores e microfones como fontes de entrada. Apesar de possuir um alcance menor do que o de alguns concorrentes, o tempo de autonomia do sistema desenvolvido é muito superior ao de todos os produtos pesquisados.

Finalmente, em relação ao custo de venda, após diversas reuniões com a equipa de vendas da Acústica Amplivox, concluiu-se que seria possível comercializar o produto a um preço muito inferior ao dos concorrentes. Essa característica permite ao sistema contemplar a parcela da população de mais baixa renda, oferecendo uma solução acessível e de qualidade à um problema tão severo como é a perda auditiva.

Tabela 7.1: Tabela de análise de mercado.

Fabricante Produto	Amplicomms TV 2410NL	Humantechnik Swing Digital LR	Phonak TV LinkS/CompPilot	HearingProd Megalooop DAC	Sarabec LA215	Wavetech Tau e Ro
Fontes sonoras suportadas	Microfone	Microfone	Microfone + TV	TV	TV	Microfone + TV
Microfone interno (som ambiente)	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Saída compatível com fones de ouvido	Sim	Sim	Sim	1	1	Sim
Funcionalidade Hands-Free	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Ajustes de volume, tom e balanço	Sim	Sim	Apenas volume	Apenas volume	Sim	Apenas volume
Mono / Estéreo	Ambos	Ambos	Ambos	Estéreo	Estéreo	Estéreo
Alcance	30 m	10 m	30 m	1	1	10 m
Número máximo de ouvintes	1	1	1	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Alimentação do transmissor	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC	Fonte DC e bateria
Alimentação do receptor	Bateria	Bateria	Bateria	1	1	Fonte DC e bateria
Autonomia da bateria do receptor	5h	6h	8h	1	1	10h40min
Autonomia da bateria do transmissor	2	2	2	2	2	21h15min

<sup>1</sup> Não possui receptor. Uma bobina indutiva é instalado ao redor da sala de transmissão.

<sup>2</sup> Transmissor não possui bateria. É alimentado apenas por uma fonte DC.



# CAPÍTULO 8

---

## Considerações Finais

---

Este capítulo relata, de forma sucinta, as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, descreve as tarefas não documentadas que já estão em andamento, e sugere possibilidades de trabalhos futuros a fim de dar continuidade ao que foi apresentado, e aprimorar o sistema desenvolvido.

### **8.1 Conclusão**

Este documento apresentou um fluxo de projeto completo de hardware e firmware de dois sistemas embarcados complementares - inseridos no contexto de auxílio a usuários com perda auditiva - que realizam transmissão, recepção e reprodução de um sinal fidedigno e praticamente livre de ruído.

O desenvolvimento inicia com a identificação da situação atual de isolamento social e da baixa da qualidade de vida que fazem parte do cotidiano de pessoas com algum grau de surdez. Foi possível perceber que mesmo usuários protetizados necessitam de equipamentos auxiliares para suprir a degradação da inteligibilidade do discurso provocada pela doença.

A seguir, realizou-se uma investigação criteriosa da literatura relacionada a esse assunto em busca de detalhes importantes associados às circunstâncias de vida dessas pessoas, e às soluções atualmente disponíveis no mercado que procuram minimizar os efeitos desta deficiência. A pesquisa revelou que os problemas de audição são surpreendentemente maximizados em ambientes ruidosos e que os produtos comercializados exigem a instalação de uma infraestrutura nos locais de utilização ou não são compatíveis com atividades sociais envolvendo mais de um deficiente auditivo.

O documento inclui, adicionalmente, uma breve revisão do estado da arte sobre sistemas embarcados, alguns de seus protocolos de comunicação, e formas de transmissão de áudio sem fio. O fato deste trabalho estar situado no campo de atuação das empresas envolvidas possibilitou a construção rápida de uma fundamentação teórica completa e pautada pelo problema que se desejava resolver. Esse estudo foi muito útil durante a elaboração do sistema como um todo, permitiu a identificação prévia de eventuais problemas logo no início do desenvolvimento e guiou muitas das decisões tomadas. Além disso, a pesquisa realizada proporcionou a ampliação dos conhecimentos da WaveTech - Soluções Tecnológicas quanto ao projeto de sistemas embarcados e, atualmente, a compilação construída durante este trabalho é utilizada em diversos projetos da empresa.

A partir desse conjunto de informações, uma solução formada por duas unidades é proposta, seus requisitos são identificados e suas especificações são apresentadas. Nesse momento, a proximidade da Acústica Amplivox com fonoaudiólogas, pacientes afetados por algum grau de surdez e redes de distribuição de aparelhos auditivos se demonstrou extremamente valiosa. Foi possível ter acesso a um banco de dados com informações sobre queixas e sugestão destes pacientes em relação aos problemas da perda de audição, aos produtos similares e a sua má interação com aparelhos auditivos.

As etapas seguintes foram as fases de projeto e implementação propriamente ditas, que descrevem detalhadamente o passo-a-passo na escolha do protocolo de comunicação FM e de todos os elementos que compõem o sistema, os avanços realizados, as ferramentas e técnicas utilizadas, e as dificuldades encontradas. Nesse estágio do desenvolvimento, o *know-how* da WaveTech no projeto de sistemas embarcados

e a infraestrutura disponibilizada pela empresa para a realização deste trabalho foram primordiais para a finalização e qualidade dos protótipos construídos. O uso do FM possibilitou ao sistema atingir os requisitos de consumo e alcance, e estabelecer um enlace de transmissão e recepção que realiza o *broadcast* do sinal de áudio. A utilização de microcontroladores da Texas Instruments teve por consequência o desenvolvimento ágil e bem estruturado de um sistema complexo. O efeito combinado do modelo do MCU com os demais componentes foi a obtenção de protótipos energeticamente eficientes e que atendem às especificações relacionadas ao tempo de vida da bateria. Em relação ao firmware, as ferramentas e técnicas utilizadas, em conjunto com a modelagem prévia, aceleraram a implementação do código. A redução do tempo de desenvolvimento possibilitou a finalização do projeto dentro do prazo estabelecido, sem a necessidade de prorrogação. A arquitetura de software proposta se enquadrou no contexto de sistemas embarcados, visto que virtualmente todos os recursos oferecidos pela plataforma computacional utilizada foram necessários. Estes modelos foram refinados durante o período de realização do mestrado graças a conceitos abordados por disciplinas oferecidas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da (PGEEL) e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PGEAS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Por fim, apresenta-se a metodologia proposta para os testes de avaliação de desempenho e performance; as medições são realizadas e os excelentes resultados são individualmente discutidos. O Laboratório de Vibrações e Acústicas (LVA) do departamento de Engenharia Mecânica da UFSC - parceiro da WaveTech - teve grande participação durante a fase de testes. Principalmente, com o empréstimo e auxílio com a utilização de equipamentos de medição e com discussões enriquecedoras sobre processamento de sinais e sobre como interpretar alguns dos resultados obtidos. Os testes elétricos e funcionais realizados revelaram que os protótipos desenvolvidos possuem comportamentos muito próximos ao esperado em termos de funcionalidades, consumo, por exemplo. Já os testes que avaliaram a influência do sistema na qualidade do som reproduzido, demonstraram a adição de pouquíssima interferência e distorção por parte da eletrônica no sinal de áudio em questão. O atraso inserido pelo sistema está na faixa que o cérebro

o identifica como reverberação e não causa desconforto ao usuário, e a função de transferência obtida possui resposta em frequência plana e coerência extremamente próxima à unidade em toda a faixa do espectro audível.

Um dos grandes benefícios da execução deste trabalho para o autor, foi a oportunidade de aprofundar e aplicar os conhecimentos adquiridos durante a pós-graduação, permitindo uma experiência completa de projeto de produto, desde o momento de sua concepção conceitual até o desenvolvimento da versão final do protótipo. Além disso, a experiência de desenvolver este trabalho dentro de um ambiente empresarial, menos burocrático, que envolve o trabalho em equipe num ritmo que difere da academia foi extremamente enriquecedor. Do ponto de vista de expectativas, espera-se que este trabalho continue em andamento até sua completude na forma de um produto comercial, espera-se que este documento seja proveitoso para alunos interessados na área de sistemas embarcados, principalmente no que diz respeito à reutilização do fluxo de projeto adotado.

## 8.2 Trabalhos Futuros

Algumas etapas de trabalhos não documentadas já estão em desenvolvimento. Esse é o caso da incorporação do circuito integrado AYRE SA3291 ao circuito da unidade receptora. Este chip estabelece a comunicação sem fio de áudio entre o Ro e os aparelhos auditivos de uma linha específica de produtos da Amplivox. Como esse componente não esteve disponível até o início da realização dos testes apresentados neste documento, ele não foi incluído em nenhuma etapa de modelagem, projeto e nem implementação. Para utilizá-lo, diversos testes funcionais deverão ser realizados para avaliar se ele realmente atende aos requisitos e especificações e a modelagem de software terá que ser ampliada a fim de comportá-lo.

Além da integração do AYRE, outra tarefa em andamento é a implementação do processo de varredura do espectro de frequências e determinação dos canais de transferência toda vez que o transmissor é acionado. Este processo prevê a modificação do software embarcado do Ro a fim de permitir a sincronização destas informações por meio da transmissão de texto via FM através da codificação RBDS.

Deve-se repetir os testes de qualidade do som considerando a comunicação com dispositivos *mobile* via Bluetooth. Espera-se que os testes com o sinal do tipo CHIRP tenham resultados de atraso e limitação superior de frequências excitadas diferentes; e os teste com ruído branco resultem em uma FRF limitada a 4 kHz. Outro teste associado a qualidade do som que deve ser realizado é a avaliação do desempenho do sistema utilizando um canal de transmissão ocupado por uma estação de rádio comercial e examinar sua influência no funcionamento das unidades. E, em relação aos testes funcionais, deve-se realizar testes de monitoramento do campo eletromagnético emitido pelo Tau em uma câmara anecoica a fim de determinar de maneira criteriosa o alcance do sistema.

Do ponto de vista de melhorias, um possível trabalho futuro seria a adição de um filtro anti *aliasing* no Módulo de interface de áudio no Tau e avaliar os efeitos dessa alteração no espectrograma do sistema.

Um trabalho futuro que precisa necessariamente ser executado é a realização de testes de campo analisando o funcionamento do dispositivo em situações reais e o levantamento estatístico, através de uma pesquisa, da aceitação dos usuários em relação ao sistema. Para isso, amostras do produto devem ser distribuídas à rede de fonoaudiólogas parceira da Amplivox. A distribuição de amostras, por sua vez, depende da adequação de alguns detalhes do projeto de hardware a um processo de fabricação de PCIs industrial e compatível com uma linha de montagem de componentes.

Tem-se também expectativa de publicação de um artigo científico em, ao menos, uma revista nacional. Propõe-se um trabalho composto pela descrição do funcionamento do sistema como um todo, os testes realizados e os resultados obtidos.



---

## Referências bibliográficas

---

- [1] “Charlieplexing - Reduced Pin-Count LED Display Multiplexing,” 2003.
- [2] Z. Albus, A. Valenzuela, and M. Buccin, “Ultra-Low Power Comparison: MSP430 vs. Microchip XLP Tech Brief,” Tech. Rep., 2009.
- [3] W.-F. Alliance, “15 years of Wi-Fi,” <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/15-years-of-wi-fi>.
- [4] Amplicomm, “TV 2410NL,” [http://amplicomms.com/index.php?en\\_tv-2410nl](http://amplicomms.com/index.php?en_tv-2410nl).
- [5] ANATEL, “Resolução nº 506, de 1º de julho de 2008,” <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2008/104-resolucao-506>.
- [6] ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações, “Plano de Destinação de Faixas de Frequência.” [Online]. Available: <http://sistemas.anatel.gov.br/pdf/Consulta/FreqConsulta.Asp?inpNumFaixa=360&intPagina={&}intLivro=>
- [7] J. S. Bendot and A. G. Pierso, *Random data: Analysis and Measurement Procedures*. Wiley Series in Probability and Statistics, 2010.

- [8] B. C. A. C. N. M. C. V.-C. R. de Souza Lima Figueiredo; Beatriz de Castro Andrade Mendes, "Determinants of communication skills development in children with hearing impairment," *Jornal da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia*, vol. 24, no. 4, pp. 201–213, 2012.
- [9] A. L. do Estado de Santa Catarina, "LEI COMPLEMENTAR n° 170," <http://server03.pge.sc.gov.br/LegislacaoEstadual/1998/000170-010-0-1998-000.htm>.
- [10] A. et al, "Hands-Free Profile," 2015.
- [11] J. A. Galster, "A new method for wireless connectivity in hearing aids," <http://www.hearingloss.ca/pdf/wireless%20hearing%20aid%20article.pdf>.
- [12] C. Z. He, Y. S. Xia, and L. Y. Wang, "A Universal Asynchronous Receiver Transmitter Design," in *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control, ICECC 2011 - Proceedings*, 2011.
- [13] K. S. Henry and M. G. Heinz, "Diminished temporal coding with sensorineural hearing loss emerges in background noise," *Nat Neurosci*, vol. 15, no. 10, pp. 1362–1364, 10 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1038/nn.3216>
- [14] Humantechnik, "Swing Digital LR with TOS-link." [Online]. Available: <http://www.humantechnik.com/main.php?datei=swingdigitalLR.php{\protect\T1\textbraceleft}{\T1\textbackslash}{&}{\protect\T1\textbraceright}ordner=produkte/gruppe3{&}language=uk{&}aktion=anzeigen{&}untermenu=ja>
- [15] IBGE, "Censo Demográfico 2010: Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência," 2010. [Online]. Available: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas{ }religiao{ }deficiencia/caracteristicas{ }religiao{ }deficiencia{ }tab{ }xls.shtm>
- [16] T. Instruments, "MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER," <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>.

- [17] A. Kaur and A. Kaur, "An Approach For Designing A Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 2, no. 3, 2012.
- [18] A. Knight, "The History and Development of Induction Loops," <http://www.ampetronic.com/Blog/history-of-induction-loops>.
- [19] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 5th ed., 2009.
- [20] B. P. Lathi and Z. Ding, *Modern Digital and Analog Communication Systems*.
- [21] F. Leens, "An introduction to I2C and SPI protocols," *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 8–13, 2009.
- [22] Malinowski et al., "THREE STATE SIGNALING SYSTEM," 1982.
- [23] J. Mankar, C. Darode, K. Trivedi, M. Kanoje, and P. Shahare, "Review of I2C Protocol," *International Journal of Research in Advent Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 2321–9637, 2014.
- [24] C. Mauney and P. Power, "Dynamic Power-Path Management and Dynamic Power Management," 2007.
- [25] M. Mitchell, "Choosing An Ultralow-Power MCU," 2004.
- [26] T. Most, "The effects of degree and type of hearing loss on children's performance in class," *Deafness & Education International*, pp. 154–166, 2004.
- [27] NIDCD, "Hearing Aids," <http://www.nidcd.nih.gov/health/hearing/> pag
- [28] —, "Assistive Devices for People with Hearing, Voice, Speech, or Language Disorders," 2011. [Online]. Available: <https://www.nidcd.nih.gov/health/assistive-devices-people-hearing-voice-speech-or-language-disorders>
- [29] S. Patwardhan, J. Nair, and N. Paranjape, "Embedded Systems: Scope in Engineering Education," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 2128–2277, 2014.

- [30] Phonak, “Phonak ComPilot.” [Online]. Available: <http://www.phonak.com/br/b2c/pt/products/accessories/compilot/hearing-aid-accessory.html>
- [31] —, “Phonak TVLink.” [Online]. Available: <http://www.phonak.com/com/b2c/en/products/wireless-accessories/products/tvlink-s/hearing-aid-accessory.html>
- [32] I. Poole, “IEEE 802.11 Wi-Fi Standards,” <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php>.
- [33] H. Products, “Echo ® MegaLoop DAC™,” <http://www.hear4you.com/product/megaloop-dac>.
- [34] A. Report, “Power-Path Li-Ion Charger Selection,” *Office*, 2008.
- [35] Sarabec, “LA215 Induction Room Loop System.” [Online]. Available: <http://www.assistireland.ie/eng/Products{ }Directory/Deaf{ }and{ }Hard{ }of{ }Hearing/Listening{ }Devices/Room{ }Loop{ }Amplifiers/Sarabec{ }Induction{ }Loop{ }Room{ }System{ }LA215.html>
- [36] N. X. P. Semiconductors, “UM10204 I2C-bus specification and user manual,” *Semiconductors*, vol. 3, no. June, pp. 1–50, 2014. [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{ }&{ }btnG=Search{ }&{ }q=intitle:I2C-bus+specification+and+user+manual{ }#0>
- [37] P. Semiconductors, “I2S bus specification.” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>
- [38] SIG, “What is Bluetooth Technology,” <http://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology>.
- [39] J. Tollefson, “POWER CONSUMPTION IN PIC ® MCUS WITH XLP TECHNOLOGY VS. TI’S MSP430.”
- [40] F. Vahid and T. Givargis, *Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Approach*, 1999.

- [41] W.H.O., "Grades of hearing impairment." [Online]. Available: <http://www.who.int/pbd/deafness/hearing{ }impairment{ }grades/en/>
- [42] —, "Millions of people in the world have hearing loss," <http://www.who.int/pbd/deafness/news/Millionslivewithhearingloss.p>
- [43] —, *The Global Burden of Diseases: 2004 Update*. The address: World Health Organization, 2008, vol. 1.
- [44] WIDEX, "What is Telecoil," <http://blog.widex.com/post/83699151141/tel>
- [45] B. Yueh and P. Shekelle, "Quality indicators for the care of hearing loss in vulnerable elders," *Journal of the American Geriatrics Society*, no. Wiley Online Library, v. 55, n. s2, pp. S335–S339, 2007.
- [46] ZFM - Zona Franca de Manaus, "Estatísticas de Rádio e TV." [Online]. Available: <http://www.teleco.com.br/nrtv1.asp>
- [47] L. Zhao, "Implementations of Battery Charger and Power-Path Management System Using bq2410x/11x/12x (bqSWITCHER™)," 2006.

