

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE PARA OBTENÇÃO
DE DOA POR MEIO DE ARRANJO DE SENSORES:
APLICAÇÃO EM PRÓTESE AUDITIVA**

**Ana Ravena Alcântara da Costa
Francisco Augusto da Costa Garcia**

Brasília, dezembro de 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE PARA OBTENÇÃO DE DOA POR MEIO DE ARRANJO DE SENSORES: APLICAÇÃO EM PRÓTESE AUDITIVA

Ana Ravena Alcântara da Costa
Francisco Augusto da Costa Garcia

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica
da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como
requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Banca Examinadora

Ricardo Zelenovsky, Doutor, PUC-RJ, UnB/ ENE (Orientador) _____

Leonardo R.A.X. de Menezes, Ph.D., Univ. of Victoria, CA, UnB/ ENE _____

Alexandre Zaghetto, Mestre, Universidade de Brasília, UnB/ENE _____

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, ANA RAVENA ALCÂNTARA DA
GARCIA, FRANCISCO AUGUSTO DA COSTA
Desenvolvimento do Hardware para Obtenção de DOA por Meio de Arranjo de Sensores:
Aplicação em Prótese Auditiva [Distrito Federal] 2006.
x, 88p. (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, 2006)
Monografia de Graduação - Universidade de Brasília.
Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Elétrica.
1. Arranjo de sensores 2. Direção de chegada
3. Sistemas embarcados 4. Processamento digital de sinais
I. ENE/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, ANA RAVENA ALCÂNTARA DA e GARCIA, FRANCISCO AUGUSTO DA COSTA (2006).
Desenvolvimento do Hardware para Obtenção de DOA por Meio de Arranjo de Sensores: Aplicação em
Prótese Auditiva. Monografia de Graduação, Publicação ENE 02/2006, Departamento de Engenharia Elé-
trica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ana Ravena Alcântara da Costa e Francisco Augusto da Costa Garcia.

TÍTULO: Desenvolvimento do Hardware para Obtenção de DOA por Meio de Arranjo de Sensores: Apli-
cação em Prótese Auditiva.

GRAU / ANO: Engenheiro Eletricista / 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação
e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva
outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a
autorização por escrito do autor.

Ana Ravena Alcântara da Costa
SQN 406 Bloco A Apto 306 - Asa Norte
CEP 70847-010 Brasília - DF - Brasil.

Francisco Augusto da Costa Garcia
SQN 310 Bloco M Apto 617 - Asa Norte
CEP 70756-130 - Brasília - DF - Brasil.

Dedicatórias

*Aí onde estão os nossos irmãos, os homens, aí onde estão as nossas aspirações, o nosso trabalho, os nossos amores, aí está o lugar do nosso encontro cotidiano com Cristo. Deus nos espera cada dia: no laboratório, na sala de operações de um hospital, no quartel, na cátedra universitária, na fábrica, na oficina, no campo, no seio do lar e em todo o imenso panorama do trabalho (Homilia Amar o mundo apaixonadamente).
- São Josemaria Escrivá*

Francisco Augusto da Costa Garcia

Dedico esta monografia a todas as pessoas que de uma forma ou outra me ajudaram a chegar até aqui, em especial a minha mãe, que sempre confiou integralmente em meu potencial..

Ana Ravena Alcântara da Costa

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus porque sem Ele eu não estaria aqui.

A minha mãe que sempre me apoiou e sempre me ensinou os valores de responsabilidade, honestidade e perseverança, os quais também levarei na minha profissão.

A meu pai que me deu suporte desde a infância até a minha formação na faculdade, nunca deixando que a educação fosse um fator limitador em minha vida.

A toda a minha família que nunca deixou de acreditar em meu potencial e força.

Aos amigos da Engenharia por me acolherem tão prontamente na vida dentro e fora da universidade. Às meninas, Clara, Luiza, Walkíria, Fernanda, Viviane e Izumi, sempre compartilhando as alguras de sermos uma minoria dentro da engenharia. Aos meninos que sempre souberam ser verdadeiros companheiros de estudos e leais amigos.

Aos amigos e colegas de projeto Francisco Augusto, Marcello Sasaki e Otávio Caixeta que dividiram as angústias e dificuldades dos últimos meses.

Às amigas Luiza Brasileiro e Savina Santos que viveram os últimos cinco anos de mudanças e crescimento em nossas vidas e com elas aprendi novos valores e consolidei outros. Ao Erick Elysio, que junamente com a Luiza e a Savina sempre deram o apoio necessário nos momento de angústia, desespero ou felicidade, .

Aos professores, que foram parte essencial no meu aprendizado e formação, ensinando, às vezes, além da própria engenharia. Em especial ao professor Zelenovsky, professor sempre pronto para nos ajudar a encontrar soluções. Ao professor João Paulo Lustosa, pois sem a sua contribuição não teríamos chegado até aqui.

Ao Carlos Vinícius e Raphael Hideki pela ajuda constante durante todo o projeto. Aos colaboradores do GPDS pela presteza em momentos necessários.

Ana Ravena Alcântara da Costa

À Deus, por tantas graças e tanto Amor.

À minha mãe, Albertina Paula R. Costa, ao meu irmão Fillipe Augusto, à minha Tia Gracimar Vieira, e à toda família. À minha mãe por tudo: os sacrifícios antes e durante o curso. As noites em que ficou acordada mesmo sem precisar, esperando-me da biblioteca, as provas em que ela se preocupava tanto quanto eu. E todo o carinho. Ao Fillipe, pelos esforços juntos e pela atenção em me ouvir falar sempre das coisas da engenharia. À Tia Gracimar, pela atenção e interesse às minhas coisas. Seus comentários e contribuições sempre foram levados muito em conta.

Aos amigos Alcides Goya, Guilherme Aminger, Gustavo Henrique e Renato Barreto. Ao Alcides, pela iniciação à carreira científica, ao Guilherme, o despertar da vocação de engenheiro eletricitista. Ao Gustavo e ao Renato, pelo bom exemplo como estudantes e profissionais. A todos, pelas lições que levarei para a vida.

Ao Professor Ricardo Zelenovsky, de quem eu aprendi o necessário e abundante para me tornar um bom profissional. À todos os professores da UnB, tenho todos como importantes amigos para a minha formação. Por último, Ao professor e amigo João Paulo Lustosa que começou o projeto com sua dissertação de mestrado.

Ao Grupo de Rádio Definido por Software da UnB, nas pessoas do Professor Leonardo R.A.X., André Gustavo Lima, Eduardo Wolski, Marcello Nogueira, Rafael Schena e todos que passaram pelo grupo desde a sua criação, pela oportunidade de pesquisar um tema tão promissor, desenvolver metodologia de pesquisa, e pelas oportunidades de publicações e participações em congressos importantes de Engenharia no Brasil e fora dele.

À Mariana Lucena pela paciência nas minhas ausências, compreensão nas minhas faltas e alegria sempre.

À Fernanda Brandi, pelas noites de estudo na biblioteca e no GPDS, sempre fazendo o difícil ficar um pouco mais fácil. Muito obrigado pela oportunidade de estágio no qual eu pude aprender tanto em tão pouco tempo. A sua amizade me é muito cara.

À Izumi Takada pelos desafios juntos desde a pré-escola, o ensino fundamental, médio, universidade, PIBIC. Estivemos sempre pertos e espero que continue assim.

Ao Luiz Alberto Bianchi Júnior pelas lutas com o Linux para fazer ele ficar sempre redondo e rodando. Os nossos estudos com a galera, nossos projetinhos de eletrônica e programação, e as oportunidades de levar sempre o nosso estudo a sério.

Ao Guilherme Solino, pelas conversas e conselhos. Pela seriedade nos momentos necessários e pelo clima fraterno todo o resto do tempo.

Ao Otávio Caixeta, Ana Ravena e Marcello Sasaki por todo o apoio e presteza dispensados no decorrer do curso e em especial nos momentos tão apertados e estressantes do projeto final.

Ao Andrei Salomão e Tiago Alves, inspiração como colegas de faculdade e motivação para a área de eletrônica digital, principalmente depois de ter visto os respectivos projetos finais de graduação. Ao Carlos Vinícius e Raphael Hideki pela colaboração no decorrer desse projeto e antes disso. Espero que possam continuar da onde paramos. Todos os colegas do GPDS, sempre tão solícitos em atender às nossas dúvidas e necessidades. Criaram um ambiente realmente familiar para o que foi por vezes a nossa casa.

Todos os amigos, que estiveram sempre comigo. Seria impossível citá-los nominalmente todos nessa folha, mas eles estão gravados em meu coração.

Francisco Augusto da Costa Garcia

RESUMO

O presente trabalho trata de um arranjo de microfones para estimação da direção de chegada, DOA, de sinais de voz em ambiente PC buscando uma aplicação em prótese auditiva. Um protótipo foi montado, testado e os resultados são apresentados. Além disso, uma aplicação em uma arquitetura RDS, Rádio Definido por *Software*, também é apresentada, utilizando a teoria de antenas inteligentes, de onde a aplicação em arranjo de sensores pode ser estendida. Um *software* em MATLAB foi feito para integrar outros resultados em uma interface amigável ao usuário.

A estimação da direção de chegada, DOA, num sistema de rádio é importante ao redesenhar o diagrama de radiação da antena e maximizar a relação sinal/ruído por meio de uma conformação de feixe adaptativa. Além do mais, podem ser minimizadas as perdas por desvanecimento e interferência co-canal. Em um arranjo de microfones, seu diagrama pode ser direcionado para o som desejado e minimizar o ruído.

Os sinais digitalizados pelos oito elementos de microfones são exportados para o MATLAB, utilizando uma interface USB. Então, os algoritmos podem estimar a direção de chegada, baseados no atraso de fase entre os sinais recebidos em cada sensor.

ABSTRACT

The present work deals with a linear array of microphones to estimate the Direction of Arrival (DOA) of a voice signal into a PC environment foreseeing a hearing aid. A prototype was assembled, tested and results are presented. Furthermore, an application in an SDR, Software Defined Radio, architecture is also presented, using the theory of smart antennas, in which the application in sensors arrays can be extended. Moreover, a MATLAB software was build to integrate some other group results into a unique user-friendly software.

The estimation of DOA in a radio system is important to redraw the antenna's radiation diagram in order to maximize the SNR, signal to noise ratio, with an adaptative beamforming. Furthermore, it can minimize fading and co-channel interference. In a microphone array, it can track some desired sound and fade the noise.

The digitized signals from eight microphone elements are exported to MATLAB with an USB interface, where a user selected algorithm can perform the DOA based in the phase delay between the signals received by sensor elements.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	ATUAL ESTADO DA ARTE E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	DEFICIÊNCIA AUDITIVA	3
1.2.1	O QUE CAUSA DEFICIÊNCIA AUDITIVA?	4
1.2.2	ANÁLISE DEMOGRÁFICA DOS PORTADORES DE PERDA AUDITIVA	4
1.2.3	CONSEQUÊNCIAS PARA O INDIVÍDUO COM PERDA.....	4
1.2.4	TRATAMENTO UTILIZADO NA ATUALIDADE	5
1.3	POR QUE UMA PRÓTESE AUDITIVA INTELIGENTE?	5
1.4	MODELO DE PROJETO PARA PRÓTESE AUDITIVA INTELIGENTE	6
2	DIREÇÃO DE CHEGADA EM ARRANJO DE SENSORES.....	9
2.1	ADEQUAÇÃO DO SISTEMA PARA ESTIMAÇÃO	9
2.2	VIABILIDADE DE ESTIMAÇÃO PARA SISTEMAS REAIS	10
2.2.1	SISTEMAS DE RÁDIO - ELETROMAGNÉTICO	10
2.2.2	SISTEMAS DE ÁUDIO - MECÂNICO	11
2.3	ARRANJOS DE SENSORES	11
2.3.1	ARRANJO LINEAR	11
2.3.2	ARRANJO PLANAR	15
2.4	MÉTODOS DE DIREÇÃO DE CHEGADA	17
2.4.1	DS - ATRASO E SOMA	17
2.4.2	CAPON	18
2.4.3	MUSIC	19
2.4.4	ESPRIT	21
3	O HARDWARE ENVOLVIDO PARA A PRÓTESE.....	23
3.1	O HARDWARE DO SISTEMA AURICULAR REAL	23
3.1.1	O OUVIDO EXTERNO.....	23
3.1.2	O OUVIDO MÉDIO	23
3.1.3	O OUVIDO INTERNO	24
3.2	DISCUSSÃO SOBRE O FRONT-END E ADEQUAÇÃO DE SINAIS.....	25
3.2.1	ADEQUAÇÃO DO SISTEMA PARA ESTIMAÇÃO	25
3.2.2	SENSORES - MICROFONES	27
3.2.3	PRÉ-AMPLIFICADORES	29
3.2.4	FILTROS	31
3.2.5	SAMPLE AND HOLD.....	32
3.2.6	CONVERSORES ANALÓGICO DIGITAL.....	33
3.2.7	LIMITAÇÕES DO HARDWARE - PARTE ANALÓGICA	35
4	ARQUITETURA ARM E O MICROCONTROLADOR AT91SAM7S256	37
4.1	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSADOR ARM	37
4.1.1	O MICROCONTROLADOR	38
4.2	ARM x FPGA	40
5	APLICAÇÃO EM UMA ARQUITETURA RDS.....	41
5.1	PROBLEMAS EM UM AMBIENTE COM ARRANJO DE SENSORES E POSSIBILIDADES DENTRO DO CONTEXTO RDS.....	41
5.2	ACESSO AO MEIO	43

5.2.1	SDMA	44
5.3	PROBLEMAS CRIADOS E SOLUÇÕES PARA OUTROS JÁ EXISTENTES	45
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
6.1	CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DAS PLACAS	47
6.2	RESULTADOS EM HARDWARE	48
6.2.1	PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	49
6.3	RESULTADOS EM SOFTWARE	49
6.4	PROBLEMAS ENFRENTADOS	52
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	ANEXOS	61
I	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS E LISTA DE MATERIAIS	63
I.1	LISTA DE MATERIAIS	63
I.1.1	PLACA MÃE	63
I.1.2	PLACA FILHA	64
I.2	ESQUEMÁTICOS	64
II	PCB E FOTOS	83
II.1	PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	83
III	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	87
III.1	MONOGRAFIA	87
III.2	ESQUEMÁTICOS E <i>Layout</i> DAS PLACAS	87
III.3	FOTOS DAS PLACAS	87
III.4	LISTAS DE MATERIAL	87
III.5	ARQUIVOS FONTE DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E IMPRESSÃO DE GRÁFICOS EM MATLAB	87
III.6	APRESENTAÇÃO DO PROJETO	88
III.7	DOCUMENTAÇÕES	88

LISTA DE FIGURAS

1.1	Diagrama de blocos da PAI	7
2.1	Sinal Incidente no ULA.....	12
2.2	Geometria para frentes planas	12
2.3	Geometria para frentes planas	15
2.4	Geometria para frentes planas	15
2.5	Resultado da estimação de direção de chegada para o DS - fonte a 30° com 20dB e 10dB de SNR.....	18
2.6	Resultado da estimação de direção de chegada para o CAPON - fonte a 30° com 20dB e 10dB de SNR.....	19
2.7	Resultado da estimação de direção de chegada para o MUSIC - fonte a 30° com 20dB e 10dB de SNR.....	21
2.8	Arranjo de Doublets	21
3.1	Constituição do sistema auditivo humano	23
3.2	Partes do ouvido médio	24
3.3	Resposta em frequência da cóclea para 5 posições ciliares. Modelo de múltiplos filtros	25
3.4	Diagrama de blocos do <i>hardware</i> proposto	26
3.5	Diagrama de blocos das saídas	27
3.6	Diagrama de realimentação	27
3.7	Montagem do diagrama de captação para a placa de microfone	28
3.8	Resposta do microfone	29
3.9	Diagrama do estágio pré-amplificador	30
3.10	Diagrama dos estágios de filtragem.....	31
3.11	Resposta Teórica em Amplitude dos Estágios dos Filtros	32
3.12	Resposta Teórica em Amplitude Filtro Passa-Faixa.....	33
3.13	Resposta Teórica em Fase dos Estágios dos Filtros	34
3.14	Resposta Teórica em Fase Filtro Passa-Faixa.....	35
3.15	Resposta do <i>Sample and Hold</i>	36
4.1	Diagrama de Blocos do núcleo ARM7	38
4.2	Diagrama de Blocos do microcontrolador.....	39
5.1	Diagrama de Recepção para um RDS	43
5.2	Conversão de Frequências numa arquitetura RDS	44
6.1	Resposta em frequência da placa sem qualquer filtro.....	48
6.2	Resposta em frequência com filtros	49
6.3	Programa de aquisição e tratamento desenvolvido em MATLAB	50
6.4	Resultado Aquisição de 2 canais.....	51
6.5	Placas de microfones	52
6.6	Página de internet criada para o grupo do projeto PAI	53
I.1	Diagramas da placa de microfone	65
I.2	Diagramas de blocos da placa filha	66
I.3	Placa Filha - filtros 0 e 1 - 2 passa-baixas e 2 passa-altas	67
I.4	Placa Filha - filtros 2 e 3 - 2 passa-baixas e 2 passa-altas	68
I.5	Placa Filha - Esquemático da alimentação para as placas pela placa filha.....	69
I.6	Placa Filha - <i>sample and hold</i> e conectores	70

I.7	Diagramas de blocos da placa mãe.....	71
I.8	Placa Mãe - filtros 4 e 5 - 2 passa-baixas e 2 passa-altas	72
I.9	Placa Mãe - filtros 6 e 7 - 2 passa-baixas e 2 passa-altas	73
I.10	Placa Mãe - <i>sample and hold</i> e conectores.....	74
I.11	Placa Mãe - conversor e amplificadores.....	75
I.12	Diagramas da placa neta - Conversor analógico-digital ADC128S	76
I.13	Diagrama esquemático do ARM7 64 pinos	77
I.14	Alimentação do kit AT91SAM7S256-EK	78
I.15	Diagrama de conexões externas dos pinos do ARM	79
I.16	Diagrama de interfaces USB e serial	80
I.17	Leds, botões e amplificadores das entradas analógicas.....	81
II.1	Placa de circuito impresso - placa Mic	83
II.2	Placa de circuito impresso - placa Neta	83
II.3	Placa de circuito impresso - placa Mãe	84
II.4	Placa de circuito impresso - placa Filha	84
II.5	Placas de microfones	85
II.6	Placa mãe - 4 filtros, 4 <i>sample and hold</i> , amplificadores e ADC	85
II.7	Placa Neta - ADC AD128S	86

LISTA DE TABELAS

1.1	Definição da deficiência auditiva e características para diagnóstico	3
3.1	Características da fonte usada para medir a diretividade do microfone	28
3.2	Resposta da diretividade do Microfone	29
4.1	Processadores ARM com tecnologia 0,18 μ m	37
4.2	Características do ARM7TDMI	38
I.1	Lista de Materiais Placa Mãe	63
I.2	Lista de Materiais Placa Filha	64

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos Gregos

θ	Ângulo de Incidência em azimute	[rad]
ϕ	Ângulo de Incidência em elevação	[rad]
φ	Defasagem angular	[rad]
λ	Comprimento de onda	[m]
Φ	Matriz diagonal de defasamentos no ESPRIT	
Ψ	Matriz de Transformação	

Outros Símbolos

d	Distância entre elementos	[m]
v	Velocidade de Propagação	[m/s]
f	Frequência da Onda	[Hz]
t	Tempo	[s]
w	Velocidade Angular	[m/s]
X	Eixo de plano cartesiano no modelo do URA	
Y	Eixo de plano cartesiano no modelo do URA	
Z	Eixo de plano cartesiano no modelo do URA	
\mathbf{u}	Vetor unitário na direção X	
\mathbf{v}	Vetor unitário na direção Y	
\mathbf{w}	Vetor unitário na direção Z	
$A(\theta), A$	Matriz Diretora	
$\underline{a}(\theta)$	Vetor volante, ou vetor diretor, ou <i>steering vector</i>	
S, s	Vetor ou matriz de sinais incidentes no arranjo de sensores	
N, n	Vetor ou matriz de ruído branco aditivo (AWGN)	
DOA	Vetor tridimensional representando a direção de chegada	
i	Linha do plano de sensores no URA	
j	Coluna do plano de sensores no URA	
M	Quantidade de sensores do ULA ou quantidade de sensores em uma linha do URA	
DP	Distância percorrida pelo sinal até o sensor (i,j)	
D	Distância entre dois elementos no URA	
θ_k	Direção de chegada da fonte de sinais para o sensor k	
K	Quantidade de fontes de sinais	
\underline{En}	Vetor ou Matriz de autovetores de ruído	
σ_n^2	Variância do ruído	
R_{XX}	Matriz de correlação da saída dos sensores	
R_{SS}	Matriz de correlação da saída dos sinais	
I	Matriz identidade	
$E \{ \}$	Valor Esperado	
P_{DS}	Potência no algoritmo de estimação DS	
P_{CA}	Potência no algoritmo de estimação CAPON	
P_{MUS}	Potência no algoritmo de estimação MUSIC	

Sobrescritos

·	Variação temporal
—	Valor médio
†	Operador Hermitiano (conjugado do transposto)

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analogic to Digital Converter</i>
ARM	<i>Advanced Risc Machines Ltd</i>
CAPON	algoritmo de estimação de direção de chegada
DAC	<i>Digital to Analogic Converter</i>
DOA	<i>Direction Of Arrival</i> - Direção de chegada
DS	<i>Delay and Sum</i> - Atraso e soma
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EM	<i>Expectation Maximization</i> - Máxima Verosimilhança
ESPRIT	<i>Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique</i> - Estimação de parâmetros do sinal por meio de técnicas de rotação invariantes
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GPDS	Grupo de Processamento Digital de Sinais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	<i>Intellectual Property</i> - Propriedade Intelectual
MATLAB	MATLAB é marca registrada da MathWorks, Inc.
MUSIC	<i>Multiple Signal Classification</i> - Classificação de múltiplos sinais
PAI	Prótese Auditiva Inteligente
PTH	<i>Plated Thru Hole</i>
RDS	Rádio Definido por Software
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RNID	<i>Royal National Institute for Deaf People</i>
SDMA	<i>Spacial Division Multiple Access</i> - Múltiplo Acesso por Divisão no Tempo
SIR	<i>Signal Interference Ratio</i> - Realção sinal/interferência
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i> - Relação sinal/ruído
SoC	<i>System on Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> - Interface serial de periférico
SRAM	<i>Short for static random access memory</i>
ULA	<i>Uniform Linear Array</i> - Arranjo linear uniforme
URA	<i>Uniform Retangular Array</i> - Arranjo retangular uniforme
USB	<i>Universal Serial Bus</i> - Barramento serial universal
VLSI	<i>Very Large Scale Integration</i>

1 INTRODUÇÃO

*O pássaro fez de tolo o peixe que não sabia voar.
O peixe fez de tolo o pássaro que não sabia nadar. Até perceberem o quão tolos eram. (antigo poema)*

1.1 ATUAL ESTADO DA ARTE E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A presente monografia tem como objetivo principal concatenar o estudo de eletrônica analógica e digital, projeto de placas de circuitos impressos, tratamento de sinal e um fator social que valide o esforço necessário para construir um protótipo de uma prótese auditiva baseado em um arranjo de sensores. Esse trabalho contou com o apoio da Finatec - Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos.

A utilização de arranjo de sensores tem se mostrado eficiente no contexto da filtragem espacial de sinais, com aplicações nos sistemas de telecomunicações de terceira e quarta geração, sistemas de múltiplo acesso ao meio e compatibilidade de recursos para sistemas embarcados [1, 2, 3, 4]. Cada vez mais os sistemas de comunicação sem-fio, no intuito de atender às necessidades de aumento de largura de banda e de número de usuários, precisam maximizar a utilização do meio definido pela interface aérea. Dada a limitação de banda disponível para cada serviço, um sistema de filtragem espacial, aliado a um sistema de rastreamento (*tracking*), pode aumentar a capacidade do sistema. Arranjos de antenas podem estimar a direção da fonte do sinal, entre outras coisas, o que viabiliza um sistema que direcione o diagrama de radiação a fim de permitir uma maior eficiência para estações e terminais, diminuindo inclusive o consumo de energia.

Além da estimação da direção de chegada, pode-se obter a frequência de chegada para uma dada direção, o número de usuários do sistema, e ainda a modulação de chegada para uma dada frequência. Todos esses dados são requisitos de reconfigurabilidade essenciais para os novos sistemas a fim de promover interoperabilidade entre eles e entre os diversos ambientes sujeitos às mais diferentes condições das interfaces aéreas.

Existe também uma série de outras aplicações possíveis, a partir da alteração dos transdutores que farão a conversão de outras fontes de energia em sinais elétricos. Entre elas, estão sensores de radares de avião, sonares submarinos, sismógrafos, ultrassonografia, radares terrestres com antenas fixas e muito mais. A partir daí, verifica-se a importância e relevância do presente estudo aplicado a microfones inteligentes.

Mais especificamente, arranjos de microfones, um caso específico dos arranjos de sensores para banda

básica (ou banda base), os quais serão discutidos nesta monografia, possuem aplicações diretas na seletividade de sinais para ambientes ruidosos e ambientes grandes, ou ambientes onde se deseja grande atenuação nos sinais de voz que não sejam os de interesse para o ouvinte. Dessa forma, esses arranjos têm grande importância no contexto das próteses auditivas para deficientes auditivos, possibilitando a filtragem do sinal desejado, filtrando o ruído espacialmente. Para a conformação do diagrama de radiação do arranjo, técnicas de direção de chegada serão utilizadas de forma a privilegiar a direção de sinal desejada [5, 6].

O presente capítulo trata da motivação do projeto, dos conceitos iniciais e das formas de deficiências auditivas e tratamentos.

O capítulo 2 traz uma breve explicação de arranjo de sensores e algumas técnicas para determinação de DOA, do inglês *Direction Of Arrival*, ou Direção de Chegada.

O capítulo 3 explicita todas as peculiaridades na concepção e construção do *hardware* utilizado para esse *front-end*, as dificuldades encontradas em seu projeto e suas limitações.

O capítulo 4 faz uma rápida descrição da arquitetura ARM do microcontrolador da Atmel AT91SAM7S256-EK utilizado para fazer a interface entre o *front-end* e o programa que faz a estimação da DOA no computador. Essa interface foi feita utilizando transferência USB, necessária para atingir as taxas de velocidade de transferência dos dados adquiridos. O processamento dos dados adquiridos a partir dos conversores analógico-digital utilizados foi feito em ambiente MATLAB, utilizando como referência principal a dissertação de João Paulo Carvalho Lustosa da Costa [7].

O capítulo 5 apresenta uma aplicação de estimação de direção de chegada em uma arquitetura RDS, ou Rádio Definido por *Software*. Para tanto, é necessário uma introdução aos sistemas reconfiguráveis, às dificuldades da eletrônica analógica e do estudo de dispositivos banda larga, chegando inclusive às antenas, aos filtros e às taxas de operações para conversores analógico-digitais [8].

No capítulo 6, é possível vislumbrar os resultados obtidos com o projeto: o desenvolvimento de técnicas de prototipagem para placas de circuitos impressos, o estudo de esquemáticos, a montagem e depuração de erros nas placas confeccionadas, os algoritmos em MATLAB usados e por último o software com interface ao usuário para controlar as diversas funções e ferramentas de processamento de sinais. Parte dos resultados já são apresentados no texto e outros estarão em anexo.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e algumas considerações finais acerca do projeto, das pesquisas e dos experimentos dos quais tratam essa monografia. Também são colocadas propostas para trabalhos futuros em níveis mais avançados.

1.2 DEFICIÊNCIA AUDITIVA

A perda auditiva ocorre por um impedimento da capacidade de detectar a energia sonora. Este impedimento pode ser localizado: na orelha externa e/ou média, chamada de perda auditiva condutiva; na orelha interna e/ou no nervo vestibulo-coclear, chamada de perda auditiva neurosensorial; e no tronco cerebral e cérebro, chamada de perda auditiva central [9]. Essa perda é denominada congênita quando tem início na vida gestacional ou durante o nascimento. Quando ocorre após o nascimento, é denominada adquirida. A origem da perda adquirida pode ser hereditária como não. Existe ainda classificação relativa ao grau de perda de audição que pode ser: leve, moderada, severa e profunda.

Há formas de identificar as deficiências auditivas nominalmente, dependendo do seu nível e origem, mas as pessoas podem preferir uns nomes a outros para definir sua própria deficiência. Para alguns, certas definições podem não ser confortáveis. Os termos mais usados, em concordância com o *The Royal National Institute for Deaf People*, RNID [10] são: *surdez*, que pode ser usada para qualquer nível de deficiência auditiva; e *Pessoas com dificuldade auditiva*, que descreve pessoas com deficiências de leves a severas. Trata-se de expressão normalmente usada para pessoas que foram perdendo gradativamente sua audição.

A definição de surdez é feita de acordo com o som de menor intensidade capaz de ser reconhecido, em dB. A tabela 1.1 exemplifica o tipo de deficiência com o nível audível.

Tabela 1.1: Definição da deficiência auditiva e características para diagnóstico

tipo	características	menor intensidade audível
surdez leve	Pessoas com esse nível de deficiência podem encontrar certa dificuldade em acompanhar conversas, principalmente em ambientes ruidosos.	25 a 39 dB
surdez moderada	Pessoas com esse nível de deficiência encontrarão dificuldades de acompanhar conversas sem uma prótese auditiva.	40 to 69 dB
surdez severa	Pessoas com surdez severa normalmente fazem muito uso de leitura labial mesmo usando próteses auditivas. A linguagem de sinais é uma alternativa como linguagem natural.	70 to 94 dB
surdez profunda	A linguagem dos sinais é preferencialmente sua escolha como linguagem natural, mas alguns preferem leitura labial	≥ 95 dB

1.2.1 O que causa deficiência auditiva?

As principais causas de deficiências auditivas são: a idade (mais de 50% da população acima de 60 anos tem algum tipo de deficiência); exposição prolongada a ruído; problemas físicos de outra natureza, como inflamação no ouvido externo obstrução por cera ou danos no tímpano; ou conseqüências genéticas. Metade dos casos de deficiência auditiva são de origem genética [10].

1.2.2 Análise demográfica dos portadores de perda auditiva

Estudos sobre genética no Reino Unido afirmam, que de 1 a 2 nascimentos em cada 1000 têm uma significativa perda de audição por causas genéticas. Estatísticas sobre deficiências auditivas, também no Reino Unido mostram que: há vinte mil crianças de 0 a 15 anos que possuem uma deficiência de moderada a profunda. Dessas, doze mil nasceram com essa deficiência [10].

De modo geral, quase nove milhões de pessoas no Reino Unido têm algum tipo de deficiência auditiva. Dados do Censo 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística apontam que no Brasil existem 5,7 milhões de deficientes auditivos [11]. Desse total, mais de 406 mil estão em idade escolar. O último censo escolar, de 2004, mostra que pouco mais de 56 mil pessoas, entre adultos e crianças com deficiência, estavam matriculadas na educação básica em 2003. No ensino médio eram 2 mil estudantes e nas universidades apenas 300.

Constata-se que a maioria dos jovens brasileiros com perda auditiva não comparece às aulas. As principais causas para a evasão são: falta de apoio das famílias, baixo poder aquisitivo para adquirir próteses auditivas, principalmente de qualidade. A partir dessa conjuntura brasileira e das necessidades sociais, propõe-se nesta monografia beneficiar as pessoas com qualquer deficiência com próteses auditivas inteligentes.

1.2.3 Conseqüências para o indivíduo com perda

As conseqüências advindas da perda da capacidade auditiva no indivíduo são principalmente dependentes da época em que o problema ocorreu, o local da lesão, e grau da perda auditiva. Para um comprometimento da capacidade auditiva congênita, surgida durante a gestação ou no nascimento, a conseqüência é grave para o processo de desenvolvimento da fala e da linguagem, para a escolaridade e para a profissionalização do indivíduo. Quando ocorre durante a infância, onde o processo de maturação do sistema nervoso central não está completo, os efeitos da falta de audição ainda podem comprometer o desenvolvimento

escolar e social. O paciente adulto que é vitimado por uma deficiência, se não tratado, torna-se mais debilitado para se comunicar e trabalhar. É importante comentar que quanto maior for o tempo de existência da privação sensorial, maior será a possibilidade de ocorrência de modificações do sistema auditivo nervoso central. O que se percebe é que a perda da audição é um fator mais crítico que uma deficiência visual para o desenvolvimento do raciocínio e fala em todos os estágios do indivíduo. Pessoas que apresentam deficiências auditivas podem nunca conseguir concatenar frases longas e idéias complexas. O mesmo não acontece para deficiências visuais.

1.2.4 Tratamento utilizado na atualidade

Uma das formas primárias de tratamento da perda auditiva é a seleção e adaptação de uma prótese auditiva, que fornecerá justamente a possibilidade de o indivíduo receber estimulação auditiva por uma amplificação sonora. A rápida seleção e adaptação da prótese são, portanto, essenciais dentro do processo de habilitação e reabilitação do deficiente auditivo, já que diminuem a possibilidade de deterioração das estruturas auditivas centrais [12].

A prótese auditiva é um sistema eletrônico miniaturizado, que, por um lado capta os sinais do ambiente, e, por outro, amplifica todos esses sons do ambiente e os reproduz numa pequena caixa de som acoplada na prótese. Este sistema eletrônico é construído em condições acústicas ideais, respeitando normas e padrões internacionais. Embora a solução não seja permanente, já que não corrige internamente a deficiência, é um meio eficaz de reintegrar a pessoa às suas funções cotidianas normais. Uma outra forma de tratamento são as cirurgias, em casos específicos, ou por meio de medicamentos, quando a deficiência for causada por inflamação, obstrução, ou dano reversível. A prótese auditiva, quando selecionada e adaptada adequadamente a cada caso, proporciona ao usuário uma grande ajuda na audição, viabilizando uma melhor comunicação.

1.3 POR QUE UMA PRÓTESE AUDITIVA INTELIGENTE?

O intuito de uma prótese auditiva inteligente é melhorar a qualidade de vida dos deficientes auditivos na medida em que busca suprir uma limitação das próteses auditivas tradicionais. Próteses auditivas tradicionais amplificam todos os sinais sonoros ambientes, seja uma conversa, um carro passando na rua, um liquidificador em uma cozinha, sem privilegiar a fonte de acordo com sua importância. Dessa maneira, elas têm performance inferior em ambientes ruidosos. A inteligência da prótese está em possibilitar ao usuário

a escolha do foco principal, ou seja, fazer uma filtragem espacial dos sinais, selecionando a fonte sonora de interesse. Assim, será possível amplificar apenas a conversa de interesse, transformando as outras fontes sonoras em ruídos de baixa intensidade. O cérebro humano faz essa filtragem espacial naturalmente ao concentrarmos a atenção em determinado foco de conversa ou de outro tipo de áudio.

Os sensores empregados, ou mais especificamente, por serem ondas mecânicas se propagando no ar, microfones, podem adquirir, não por constituição física, mas por processamento do sinal incidente, uma certa inteligência. O projeto da prótese prevê inicialmente que o usuário tenha dois modos de funcionamento para a PAI, prótese auditiva inteligente: o modo automático e o modo manual. No primeiro modo, as direções de chegada são estimadas pelos algoritmos e esses sinais são amplificados de acordo com uma configuração pré-existente, como por exemplo, os maiores picos de amplitude ou a assinatura espectral. Logo, nesse modo o usuário não tem controle sobre a direção amplificada. Já no segundo modo será utilizado um potenciômetro para a escolha da direção desejada, variando-o até encontrar o sinal com melhor audibilidade para uma determinada fonte. Esse potenciômetro teria a função semelhante à sintonia de um rádio.

1.4 MODELO DE PROJETO PARA PRÓTESE AUDITIVA INTELIGENTE

Em vista da sua aplicação, a prótese auditiva inteligente requer características mecânicas de tamanho reduzido e fácil manuseio, tendo em vista que ela deverá ser discreta e não trazer para o usuário desconforto em sua utilização. Nesse caso, o *hardware* deve ser o mais compacto possível. A fig. 3.5 mostra o diagrama de blocos, que apresenta primeiramente os pré-amplificadores para cada um dos microfones, com seus respectivos filtros analógicos, e um DSP, do inglês *Digital Signal Processor*. Sua função é fazer a filtragem freqüencial dos sinais dos microfones eliminando ruídos localizados fora da região do espectro de interesse. Além disso, o DSP deve ser programado para realizar os algoritmos de direção de chegada e entregar na entrada do conversor DA os sinais de interesse amplificados. Por último, um filtro de reconstrução passa-baixas e um alto-falante possibilitarão ao usuário escutar o resultado. Esse modelo foi proposto e simulado pela referência [7].

Deve ser previsto também que, em caso de problemas ou de interferências não previstas, a inteligência da prótese possa ser desligada, funcionando como uma prótese comum, mas com um excelente ganho devido a quantidade de microfones empregados.

No entanto, o processo de concepção do protótipo foi feito em etapas, antes de obter o *hardware* tal qual

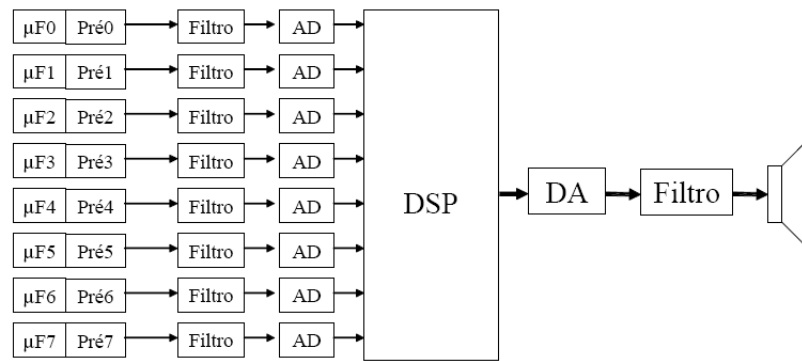


Figura 1.1: Diagrama de blocos da PAI

explicitado acima, principalmente com relação ao tamanho e inteligência. Dessa forma, o projeto inicial da PAI apresentado nessa monografia nos capítulos seguintes é ainda em tamanho diferente do ideal, e com processamento ainda por computador. A intenção é que no futuro a implementação seja totalmente embarcada e miniaturizado. Para os casos embarcados, pode-se até mesmo ter sistemas operacionais de tempo real em execução no mesmo.

2 DIREÇÃO DE CHEGADA EM ARRANJO DE SENSORES

Se não se sabe para que direção ir, não existe caminho certo.

2.1 ADEQUAÇÃO DO SISTEMA PARA ESTIMAÇÃO

O desenvolvimento das técnicas de direção de chegada aqui estudadas baseia-se em três conceitos fundamentais complementares em suas utilizações: antenas inteligentes, arranjo de sensores e diagramas adaptativos.

Primeiramente, os arranjos de sensores, que podem ser compostos por diversos tipos de transdutores, são utilizados para recepção ou transmissão de sinais a partir de um diagrama de radiação ou captação. Tais arranjos podem assumir diversas formas e se adaptar a diferentes aplicações.

As técnicas de DOA fornecem informações que permitirão a conformação desse diagrama, fazendo que o arranjo assuma as características de uma antena inteligente ou um arranjo de microfones inteligentes, por exemplo.

Antenas inteligentes são elementos de transdução de radiação eletromagnética que podem fornecer ou adquirir dados do ambiente para uma melhor qualidade do sistema. Por exemplo, poderiam ser capazes de apontar seu diagrama de radiação para uma direção específica, controlando seus lóbulos e filtrando o ruído que não vem da direção desejada. Dessa forma, uma melhor relação sinal/ruído (SNR) é atingida, aumentando a capacidade e melhorando a qualidade de qualquer sistema. Um outro caso seria a diminuição de interferência co-canal ou de multipercurso, ou ainda a obtenção de uma grande largura de banda, operando em várias bandas de serviços. Porém, num sentido estrito, antenas inteligentes dizem respeito à reconfigurabilidade e seletividade. Mais considerações acerca das antenas serão feitas no Cap 5.

Da mesma forma, arranjo de microfones utilizam elementos de transdução de ondas mecânicas sonoras. A partir deles melhora a qualidade e a performance de sistemas de áudio.

Para a modelagem dos arranjos de sensores que serão apresentados ao longo deste capítulo, é importante primeiro supor algumas simplificações que ajudarão na solução dos problemas. Supõe-se que o número de sinais incidentes é finito, o que fornecerá uma solução única na resolução das equações lineares nas quais o problema é definido. Dessa forma, o número de sensores é fator de influência no número má-

ximo de sinais cuja direção de chegada é passível de determinação, limitando o número de DOAs possíveis de serem determinadas.

Supôs-se também que os emissores estão afastados o suficiente para que as ondas incidentes sejam consideradas planas. Para sinais sonoros, a distância mínima a partir da qual podemos considerar as ondas como planas é $15d$, onde d é a distância entre os elementos do arranjo. Nesse caso, o erro devido a aproximação acrescido do desvio padrão é menor que dez graus [7]. Os sensores são idênticos e não existe acoplamento entre eles e, dessa forma, os sinais recebidos pelos sensores não representam diferenças significativas.

2.2 VIABILIDADE DE ESTIMAÇÃO PARA SISTEMAS REAIS

Diversos sistemas de telecomunicações podem utilizar técnicas de arranjos e direção de chegada. Trata-se de uma área bastante abrangente onde as aplicações podem envolver tanto ondas eletromagnéticas de alta frequência quanto ondas mecânicas de baixa frequência, como a voz. A aplicação da teoria de arranjos, na prática, deve levar em consideração limitações inerentes a tais sistemas, como as perdas por acoplamento, desvanecimento e interferências, cuja intensidade e relevância variam com a frequência de trabalho e tipo de onda. A seguir uma breve descrição dessas características em sistemas de rádio e de áudio.

2.2.1 Sistemas de rádio - eletromagnético

Em sistemas de rádio, a estimação da direção de chegada assume papel importante na busca por uma maior eficiência espectral e economia de potência, palavras-chaves em rádio-frequência. Além disso, um diagrama de radiação adaptativo maximiza a relação sinal/ruído e minimiza o desvanecimento e a interferência co-canal.

A eficiência espectral vem com o aumento do reuso da frequência uma vez que é possível direcionar os lóbulos das antenas de transmissão/recepção somente para o usuário desejado, viabilizando técnicas de múltiplo acesso por divisão do espaço, ou SDMA, *Spatial Division Multiple Access*. Da mesma forma, economiza-se potência já que as perdas por desvanecimento são diminuídas e os multipercursos minimizados pelo direcionamento.

São importantes ainda estudos sobre a permissividade do meio e a propagação das ondas eletromagnéticas nos diferentes ambientes que elas percorrem, o que configura os desafios nessa área. Nesse contexto,

os arranjos de antenas se mostram uma solução chave para a demanda crescente em rádio-frequência, as quais exigem robustez e rápida adaptação dos sistemas.

2.2.2 Sistemas de áudio - mecânico

Diversos sistemas de propagação de ondas mecânicas, como áudio, ultrassom e sismografia, também têm nas técnicas aqui apresentadas importante aplicação. Para tais sistemas, há também uma economia de potência e principalmente aumento da qualidade do sistema. A qualidade é aumentada devido à supressão de ruídos de direções indesejadas, aumentando a relação sinal/ruído.

Na presente monografia, as ondas mecânicas de principal interesse são as perturbações que resultam em ondas sonoras. Nesse caso, uma das principais dificuldades em sua modelagem são as perdas por reverberação no ambiente causadas pelas múltiplas reflexões. Tais limitações devem ser levadas em consideração e sua influência nos resultados mensurada por meio de testes em protótipos.

2.3 ARRANJOS DE SENSORES

Arranjos de sensores têm assumido grande importância no processamento de sinais, já que eles permitem que os sistemas façam uso adaptativo da diversidade espacial. Existem muitas geometrias passíveis de utilização para arranjo de sensores, entre as quais as principais são a linear uniforme, a retangular e a circular. Essa última é a melhor quando se deseja evitar a ambigüidade de sinais que são oriundos de ângulos maiores que 90° ou menores que -90° , pois a resolução para o arranjo linear é de apenas 180° . Comparativamente, o arranjo circular precisa de menos elementos mantendo a resolução de 360° . Nessa seção serão apresentadas duas geometrias: o arranjo linear e o retangular. Isso porque o arranjo linear foi o utilizado no projeto da PAI. O segundo é um caso estendido do primeiro.

2.3.1 Arranjo linear

A característica que define esse arranjo é que seus elementos estão igualmente espaçados a uma distância d entre eles, formando uma reta. Dessa maneira, há apenas um ângulo de direção de chegada a considerar: o azimuth. O ângulo de azimuth é formado pela interseção entre a reta perpendicular à linha do arranjo e a direção do sinal incidente considerado. A figura 2.1 traz a representação dessa geometria, apresentando o ângulo de azimuth θ , onde $s(t)$ é o sinal incidente e $x_i(t)$ é a saída do i -ésimo sensor.

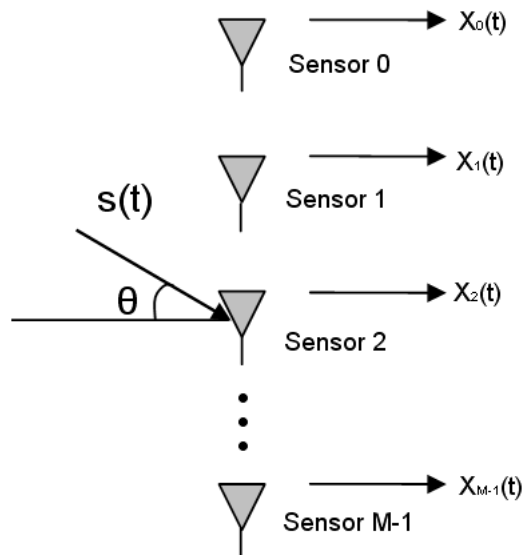


Figura 2.1: Sinal Incidente no ULA

Quando uma onda plana incide em uma determinada direção no arranjo, cada elemento experimenta versões defasadas dessa onda. A defasagem pode ser facilmente compreendida a partir da figura 2.2, onde s é a diferença no caminho das duas frentes de onda.

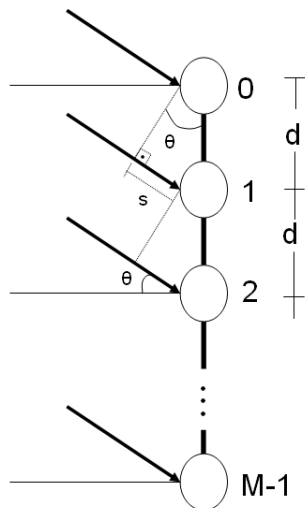


Figura 2.2: Geometria para frentes planas

O sinal incidirá primeiramente no sensor 0, que, por ser considerado a referência no problema, terá defasagem nula. Já no sensor 1, ele terá uma defasagem temporal em relação ao sensor 0, dependendo da velocidade de propagação da onda, como pode ser visto na equação 2.1, onde v é a velocidade, s é a

distância percorrida e t é a defasagem temporal.

$$t = \frac{s}{v} \quad (2.1)$$

A distância s pode ser calculada por geometria simples a partir da figura 2.2, resultando na equação 2.2, onde θ é a direção do sinal e d é a distância entre os sensores.

$$t = \frac{d \cdot \sin(\theta)}{v} \quad (2.2)$$

Essa defasagem no tempo pode ser convertida para ângulo de defasagem de um sinal a partir da velocidade angular ω na equação 2.3, onde f é a frequência da onda incidente.

$$\varphi = \omega \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{d \cdot \sin(\theta)}{v} \quad (2.3)$$

Finalmente, a defasagem pode então ser avaliada em termos do comprimento de onda λ como na equação 2.4.

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d \cdot \sin(\theta)}{\lambda} \quad (2.4)$$

A defasagem da equação 2.4 é a do sensor 1 em relação ao sensor 0 para um único sinal incidente $s(t)$. Como o sensor 2 também é espaçado de d do sensor 1, temos que a defasagem entre o sensor 0 e o sensor 2 é o dobro da primeira defasagem. Esse raciocínio pode ser estendido aos M sensores, resultando na equação de matrizes 2.5. Nessa equação, foram adicionados a contribuição de ruído $n(t)$ em cada elemento do arranjo.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\varphi} \\ e^{-2j\varphi} \\ \vdots \\ e^{-(M-1)j\varphi} \end{bmatrix} \cdot s(t) + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{M-1}(t) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Quando não há apenas um único sinal, mas vários sinais provenientes de várias direções, o vetor de defasagem se transforma numa matriz $M \times K$, onde K é o número de sinais presentes. A equação 2.6 explicita o equacionamento resultante para K sinais.

$$\begin{bmatrix} x_0(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{M-1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-j\varphi_0} & e^{-j\varphi_1} & \dots & e^{-j\varphi_{K-1}} \\ e^{-2j\varphi_0} & e^{-2j\varphi_1} & \dots & e^{-2j\varphi_{K-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-(M-1)j\varphi_0} & e^{-(M-1)j\varphi_1} & \dots & e^{-(M-1)j\varphi_{K-1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_{K-1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0(t) \\ n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_{M-1}(t) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Alternativamente a relação acima pode ser representada na forma da equação 2.7.

$$X(t) = A(\varphi(\underline{\theta})) \cdot S(t) + N(t) \quad (2.7)$$

A matriz $A(\underline{\theta}) = A(\varphi(\underline{\theta}))$ é formada pelos vetores coluna $a(\underline{\theta})$, os quais representam a resposta do arranjo em cada direção θ_i , onde i varia de 0 a $M-1$. Cada um desses vetores também é chamado de vetor volante ou vetor diretor e é apresentado na equação 2.8.

$$X(t) = \underline{a}(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j \cdot \varphi_i} \\ e^{-j \cdot 2 \cdot \varphi_i} \\ \vdots \\ e^{-j \cdot (M-1) \cdot \varphi_i} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A equação 2.6 representa os sinais em tempo contínuo. Quando esses sinais são amostrados, com o tempo discretizado, o vetor $X(t)$ se transforma numa matriz $M \times N$, onde N é o número de amostras do sistema. O resultado dessa discretização é mostrado na equação 2.9.

$$\underline{X}_{(M \times N)}(n) = A(\underline{\theta}) \cdot \underline{S}_{(M \times K)}(n) + \underline{N}_{(M \times N)}(n) \quad (2.9)$$

A partir da equação 2.9, é possível determinar a direção de chegada a partir de uma certa quantidade de amostras dos sinais incidentes. As amostras fornecem a matriz $\underline{X}(n)$ e o que se deseja encontrar é a matriz $\underline{A}(\theta)$.

2.3.1.1 Ambiguidade na estimação de DOA

Para evitar que a equação 2.4 tenha mais de uma solução, deve-se garantir que o módulo do ângulo de defasagem seja menor ou igual a 180 graus (π radianos). Aplicando essa condição à equação 2.4 obtém-se como resultado a equação 2.10. Como o módulo do *seno* é sempre menor que a unidade, obtém-se a equação 2.11, versão espacial do teorema da amostragem.

$$d \leq \frac{\lambda}{2 \cdot |\text{sen}(\theta)|} \quad (2.10)$$

$$d \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2.11)$$

Sendo assim, o ângulo da direção de chegada pode ser encontrado a partir do defasamento entre os sinais incidentes nos elementos do arranjo desde que o espaçamento entre os elementos seja menor que a metade do comprimento de onda dos sinais incidentes em estudo.

2.3.2 Arranjo planar

A segunda geometria a ser apresentada é o arranjo retangular uniforme (URA), *uniform rectangular array*. Esse arranjo pode ser entendido como um conjunto de arranjos lineares uniformes, formando uma área retangular no eixo x,y ou y,z . A figura 2.3 apresenta esse arranjo no plano y,z e as duas distâncias relevantes para o seu modelamento: a distância horizontal d_h e a distância vertical d_v .

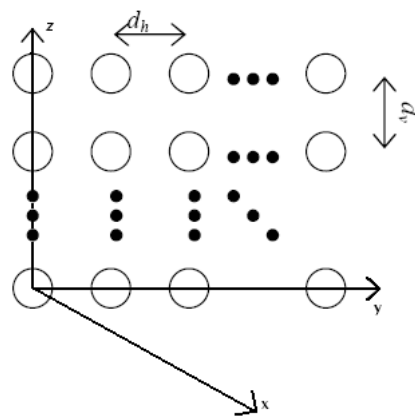


Figura 2.3: Geometria para frentes planas

No URA existem dois ângulos a serem considerados na direção de chegada: o ângulo de elevação ϕ e o ângulo de azimute θ . A elevação é medida a partir da projeção da direção do sinal sobre o plano x,y e o azimute é o ângulo formado entre essa projeção e o eixo x , como pode ser visto na figura 2.4.

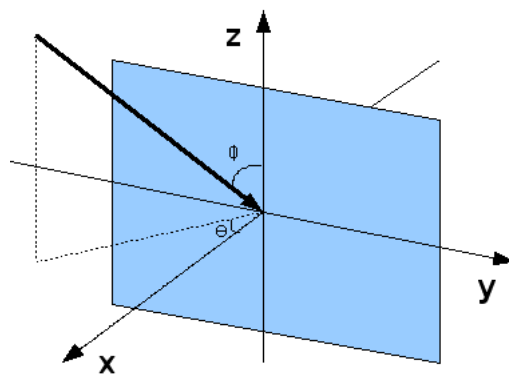


Figura 2.4: Geometria para frentes planas

Para o cálculo de distâncias no arranjo retangular, utilizar-se-ão os vetores unitários na direção x , na direção y e na direção z . Esses são os versores, \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} . Assim, a direção de chegada $DOA(\phi, \theta)$ e a distância D entre dois elementos do arranjo são representadas, respectivamente, pelas equações 2.12 e 2.13.

$$DOA(\phi, \theta) = -\cos(\phi) \cdot \cos(\theta) \cdot \mathbf{u} - \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \mathbf{v} + \sin(\theta) \cdot \mathbf{w} \quad (2.12)$$

$$D(i, j) = i \cdot d_h \cdot \mathbf{v} + j \cdot d_v \cdot \mathbf{w} \quad (2.13)$$

Na equação 2.13, i e j denotam a posição do elemento no arranjo, onde i varia entre 0 e o número de sensores H do arranjo na horizontal e j varia entre 0 e o número de sensores P na vertical.

O produto escalar das equações 2.12 e 2.13 fornece a distância percorrida DP por cada sinal até o elemento na posição (i, j) no arranjo. Fazendo essa operação, obtém-se como resultado a equação 2.14.

$$DP(i, j) = \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot i \cdot d_h + \sin(\theta) \cdot j \cdot d_v \quad (2.14)$$

De posse da distância percorrida por cada sinal até chegar em cada sensor e utilizando a equação 2.1, encontra-se de forma semelhante a equação 2.3, a defasagem angular do URA da equação 2.15.

$$\varphi(i, j) = \omega \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{DP(i, j)}{v} \quad (2.15)$$

Por fim, substituindo a equação 2.14 na equação 2.15, a defasagem em termos do comprimento de onda do sinal incidente no arranjo retangular é apresentada na equação 2.16.

$$\varphi(i, j) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot i \cdot d_h + \sin(\theta) \cdot j \cdot d_v) \quad (2.16)$$

Dado o exposto, fica provado que a defasagem depende tanto do ângulo de azimuth quanto do de elevação. Isso implica que o vetor diretor $\underline{a}(\underline{\theta})$ passa a ser a matriz diretora $\underline{A}(\theta, \phi)$ apresentada na equação 2.17.

$$\underline{A}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} e^{-j\varphi(0,0)} & e^{-j\varphi(1,0)} & \dots & e^{-j\varphi(M-1,0)} \\ e^{-j\varphi(0,1)} & e^{-j\varphi(1,1)} & \dots & e^{-j\varphi(M-1,1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\varphi(0,P-1)} & e^{-j\varphi(1,P-1)} & \dots & e^{-j\varphi(M-1,P-1)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Analogamente a equação 2.7, a matriz de saída $\mathbf{X}(t)$ é representada na equação 2.18.

$$\underline{X}(t) = \underline{A}(\theta, \phi) \cdot S(t) + n(t) \quad (2.18)$$

2.4 MÉTODOS DE DIREÇÃO DE CHEGADA

Na seção anterior, afirmou-se que arranjos de sensores podem ser utilizados para a determinação da direção de chegada de um ou mais sinais. Nesta seção, os métodos utilizados para a determinação das matrizes apresentadas naquela seção serão explicitados. Enfatizar-se-ão alguns métodos aplicados ao arranjo linear uniforme, ULA, pois foi esse o arranjo utilizado para o desenvolvimento do projeto do qual trata esta monografia.

Os métodos apresentados serão o DS [13], o CAPON [14], o MUSIC [15] e [16], e o ESPRIT [17]. Os dois primeiros são baseados na estimação espectral. Eles se caracterizam por calcular o espectro espacial dos sinais e estimar a direção a partir dos máximos encontrados. Os dois últimos são baseados na teoria de subespaços e utilizam as matrizes de correlação dos sensores e dos sinais para a estimação da direção de chegada.

Para entender os dois últimos, é importante a compreensão da matriz R_{SS} de correlação dos sinais apresentada na equação 2.19, onde o operador † , *dagger*, representa o conjugado do transposto da matriz. Essa matriz indica o valor esperado dos sinais incidentes.

$$R_{SS} = E \left\{ \underline{S} \cdot \underline{S}^\dagger \right\} \quad (2.19)$$

A estimação dessa matriz é feita utilizando outra matriz: a de correlação dos sensores apresentada na equação 2.20.

$$R_{XX} = E \left\{ \underline{X} \cdot \underline{X}^\dagger \right\} \quad (2.20)$$

Desenvolvendo essa equação e substituindo a primeira, chegamos às equações 2.21 e 2.22, onde σ^2 denota o desvio-padrão.

$$R_{XX} = E \left\{ (\underline{A} \cdot \underline{S} + \underline{N}) \cdot (\underline{A} \cdot \underline{S} + \underline{N})^\dagger \right\} = \underline{A} \cdot E \left\{ \underline{S} \cdot \underline{S}^\dagger \right\} \cdot \underline{A}^\dagger + \sigma^2 \cdot I \quad (2.21)$$

$$R_{XX} = \underline{A} \cdot R_{SS} \cdot \underline{A}^\dagger + \sigma^2 \cdot I \quad (2.22)$$

A seguir, uma rápida explicação de cada um dos métodos será apresentada.

2.4.1 DS - Atraso e soma

Nesse método, os sinais são atrasados de tal forma que sua soma seja construtiva em determinada direção [7]. Esse é o motivo da denominação DS, do inglês *Delay-and-Sum*. Como foi mencionado anteriormente, aqui a estimação é feita a partir da potência total da soma dos sinais dos sensores, representada

por $y(t)$. Essa soma é ponderada, onde o peso é o conjugado do transposto do vetor diretor, responsável pelo atraso que dá nome ao método. O resultado é o produto escalar apresentado na equação 2.23.

$$P_{DS} = E \{y(t)^2\} = E \left\{ \left(\underline{a}^\dagger(\theta) \cdot \underline{X} \right)^2 \right\} \quad (2.23)$$

Expandindo essa equação e substituindo a equação 2.19, obtemos a equação 2.24.

$$P_{DS} = \underline{a}^\dagger \cdot R_{XX} \cdot \underline{a} \quad (2.24)$$

Os picos de potência são os pontos onde θ for o próprio ângulo de direção de chegada resultante da equação 2.3. Dessa forma, o método consiste em variar θ entre $\frac{\pi}{2}$ e $-\frac{\pi}{2}$ até encontrar os máximos da equação 2.24.

O DS possui as vantagens de ser simples, exigindo um baixo custo computacional e permitindo estimar também o número de sinais presentes. No entanto, oferece vulnerabilidade à largura do feixe de máximos encontrados e aos lóbulos secundários, o que resulta numa baixa resolução. Os resultados da estimação para uma fonte a 30° para dois casos, 20dB e 10dB de SNR, são mostrados na figura 2.5.

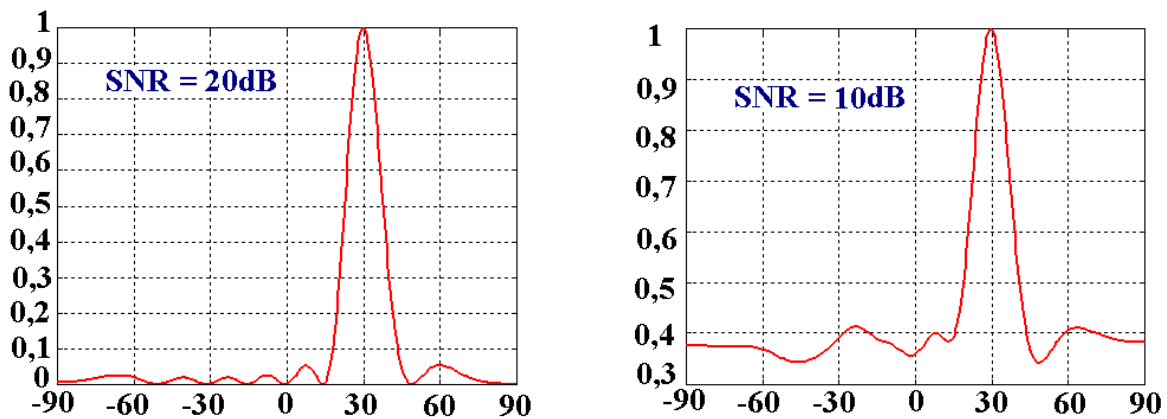


Figura 2.5: Resultado da estimação de direção de chegada para o DS - fonte a 30° com 20dB e 10dB de SNR

2.4.2 CAPON

Na estimativa da direção de chegada utilizando o CAPON, deseja-se anular ou minimizar a interferência nas outras direções. Para tanto, a densidade espacial de potência é dada pela equação 2.25, que é equivalente ao inverso da equação 2.24.

$$P_{CA} = \frac{1}{\underline{a}^\dagger \cdot R_{XX} \cdot \underline{a}} \quad (2.25)$$

Analogamente ao DS, a busca da direção de chegada é a busca do ângulo θ que maximiza essa expressão.

O CAPON também é bastante simples e oferece uma resolução melhor que o método anterior, mas possui um custo computacional adicional devido ao inverso da matriz. Esse método também tem uma limitação caso o sinal interferidor seja correlacionado com o sinal de interesse, devido a presença da matriz R_{XX} no denominador da equação 2.25. Os resultados da estimação para uma fonte a 30° para dois casos, 20dB e 10dB de SNR, são mostrados na figura 2.6.

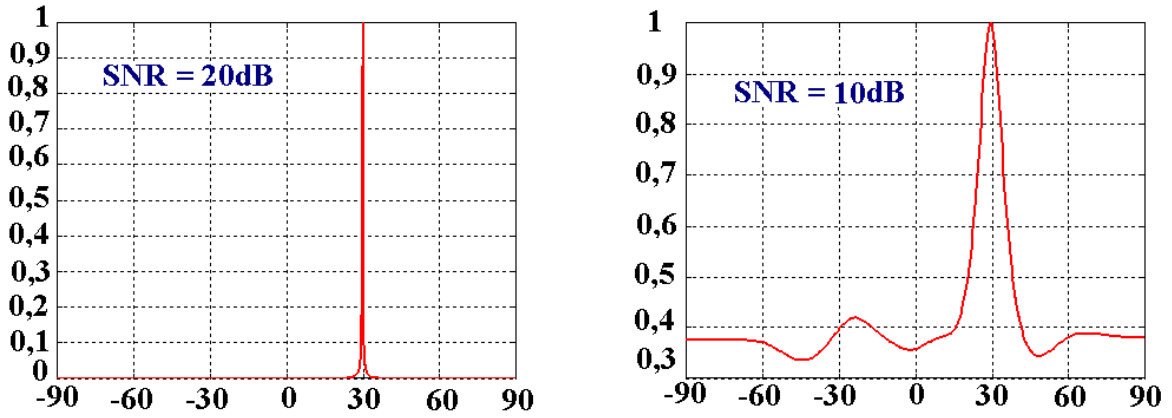


Figura 2.6: Resultado da estimação de direção de chegada para o CAPON - fonte a 30° com 20dB e 10dB de SNR

2.4.3 MUSIC

Esse é um dos estimadores mais utilizados e recebe esse nome do inglês *Multiple Signal Classification*.

Para entender o método que será apresentado adiante, é importante entender o *Array Manifold*, que do inglês significa variedade do arranjo ou multiplicidade do arranjo [7]. Trata-se de uma abstração matemática que define uma região onde cada ponto tem uma vizinhança que se assemelhe ao espaço Euclidiano.

Na teoria de estimação de DOA, esse *array* é determinado por todos os valores que o vetor diretor pode assumir para aquele arranjo. Logo, é a região no espaço criada variando o ângulo θ definido na equação 2.4 de $-\frac{\pi}{2}$ e $\frac{\pi}{2}$. Supondo as ondas incidentes planas e observando que todos os elementos do vetor dependem de uma única variável, então o vetor diretor é unidimensional. E assim o *Array Manifold* é uma corda no espaço \mathbb{R}^M .

Observa-se também que a variação da frequência do sinal altera o ângulo θ . Muda-se também o com-

primento de onda e uma outra corda é criada. Logo, sinais de mesma frequência, sinais correlacionados, pertencem a mesma corda e sinais de frequências diferentes estão em cordas diferentes.

Os sinais que chegam nos sensores de acordo com a equação 2.7 definem um subespaço vetorial Sx , cuja intersecção com a corda do *Array Manifold* permite a estimação da DOA.

Para K sinais descorrelacionados, os autovalores da matriz R_{XX} da equação 2.22 são compostos por K autovalores referente a cada sinal e $M-K$ autovalores referentes aos ruídos. Para o caso de K sinais correlacionados, os autovalores da matriz são compostos por 1 autovalor referente aos K usuários e $M-1$ autovalores referentes aos ruídos. Dessa forma, é necessário saber com antecedência quantos sinais correlacionados e descorrelacionados existem.

Como os autovalores de ruído são bem menores que os autovalores do sinal, os autovalores de maior valor serão os dos sinais. Separa-se então o espaço em dois: o subespaço do ruído, representado por \underline{En} , e o subespaço do sinal. O primeiro será composto pelos autovetores relacionados com os menores autovalores, representados por σ^2 . Enquanto que o subespaço do sinal será composto pelos autovetores relacionados com os maiores autovalores.

A matriz de correlação R_{XX} apresentada na equação 2.22 pode ser estimada pela equação 2.26.

$$\hat{R}_{XX} = \frac{1}{N} \sum X(n) \cdot X^\dagger(n) \quad (2.26)$$

Com essa estimativa e os autovetores, consegue-se a decomposição da matriz de correlação dos sinais e então a estimativa do subespaço do ruído. De posse da matriz \underline{En} de autovetores, a potência pode ser calculada pela equação 2.27.

$$P_{MUS} = \frac{1}{\underline{a}^\dagger(\theta) \cdot \underline{En} \cdot \underline{En}^\dagger \cdot \underline{a}(\theta)} \quad (2.27)$$

Assim, analogamente aos métodos anteriores, a estimação da DOA é obtida encontrando o ângulo θ que maximiza a equação anterior.

O algoritmo do MUSIC permite alta resolução na estimação da direção de chegada pois o pico resultante na estimação é mais estreito, possuindo uma forma menos plana que aquele obtido com o DS ou o CAPON. É também robusto frente ao ruído e possibilita ainda a estimação do número de sinais incidentes. No entanto, tem um custo computacional grande, apresenta problemas quando os sinais são correlatados e picos equivocados provocam grandes erros. Os resultados da estimação para uma fonte a 30° para dois casos, 20dB e 10dB de SNR, são mostrados na figura 2.7.

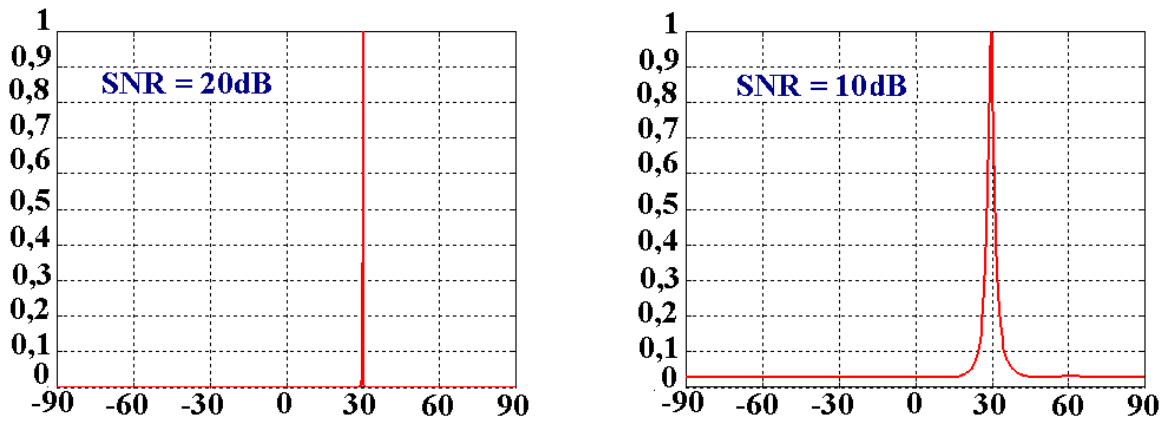


Figura 2.7: Resultado da estimação de direção de chegada para o MUSIC - fonte a 30° com 20dB e 10dB de SNR

2.4.4 ESPRIT

O ESPRIT, do inglês *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique* oferece robustez e eficiência espectral. Esse método traz uma aproximação aplicada ao problema da estimação dos parâmetros observados no ruído, representando que se reflete numa melhora significativa comparativamente ao MUSIC. Possui vantagens importantes sobre o anterior ao tratar dados uniformemente amostrados, explorando todos os atrasos obtidos das amostras.

Nesse caso, o arranjo linear de sensores que foi utilizado nos outros métodos sofre uma modificação. No ESPRIT os sensores são compostos por *doublers*. Trata-se de um par de sensores x_i e y_i separados por um vetor constante Δ e sempre com a mesma orientação. Esse vetor garante a invariância espacial entre os sinais dos diversos pares. A figura 2.8 apresenta como esse arranjo é entendido.

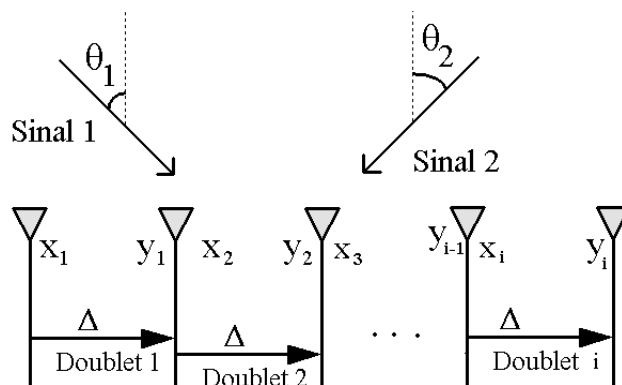


Figura 2.8: Arranjo de Doublets

O arranjo pode ser encarado como composto por dois sub-arranjos ZX e ZY , idênticos e separados

pelo vetor de deslocamento. Assim, as saídas $X(t)$ e $Y(t)$ dos dois arranjos são representadas pelas equações 2.28 e 2.29, onde Φ é a matriz diagonal que representa o defasamento entre os dois arranjos.

$$X(t) = A \cdot S(t) + Nx(t) \quad (2.28)$$

$$Y(t) = A \cdot \Phi \cdot S(t) + Ny(t) \quad (2.29)$$

Dessa forma, a saída completa é a matriz $Z(t)$ da equação 2.30, que pode ser representada pela equação 2.31.

$$Z(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A \cdot \Phi \end{bmatrix} \cdot S(t) + \begin{bmatrix} Nx \\ Ny \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$Z(t) = \tilde{A} \cdot S(t) + Nz(t) \quad (2.31)$$

O problema, então, consiste em estimar Φ . Esse modelo tem a vantagem de não precisar do conhecimento do *Array Manifold*. De forma semelhante ao MUSIC, calcula-se os autovalores das matrizes de correlação dos dois arranjos, encontrando as matrizes diagonais E_x e E_y dos autovalores. Elas estão relacionadas por uma única matriz de transformação Ψ não singular como apresentado na equação 2.32. São os autovalores dessa última matriz que permite estimar a DOA como apresentado na equação 2.33.

$$E_x \cdot \Psi = E_y \quad (2.32)$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot f \Delta} \arg \left(\tilde{\Phi}_i \right) \right) \quad (2.33)$$

Por último, para estimar Ψ , um dos métodos mais comuns é o TLS-ESPRIT, apresentado na equação 2.34.

$$\Psi = \left(\tilde{E}_x^\dagger \cdot \tilde{E}_x^\dagger \right)^{-1} \cdot \tilde{E}_x^\dagger \cdot \tilde{E}_y^\dagger \quad (2.34)$$

O ESPRIT é capaz de estimar a DOA com uma resolução muito boa, sendo também bastante robusto ao ruído e dispensando maximização, pois utiliza uma expressão analítica para estimar a direção. Suas desvantagens são sua complexidade, o esforço computacional devido à decomposição dos autovalores e problemas quando os sinais não são correlatados.

Dessa forma, esse é o método mais recomendado em termos de resolução e robustez, no entanto seu custo operacional dificulta o processamento em tempo real numa implementação futura. Assim, uma análise comparativa em testes reais é recomendada para a validação e verificação de qual dos métodos supracitados é o que fornece uma melhor solução de compromisso de performance relativamente a velocidade e qualidade.

3 O HARDWARE ENVOLVIDO PARA A PRÓTESE

Temos que ser foco e energia. Sem foco, a energia se dispersa, sem energia não se anda. Temos que ser um laser. Foco e Energia. Isso demanda Fé.

3.1 O HARDWARE DO SISTEMA AURICULAR REAL

Para melhor entender o sistema eletrônico proposto, deve-se observar as analogias aparentes entre o sistema biológico real e os componentes e funções desempenhadas pelos dispositivos de *hardware*. Para tanto, as partes e funções do sistema auditivo são apresentados.

O sistema auditivo possui três partes distintas: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno [18].

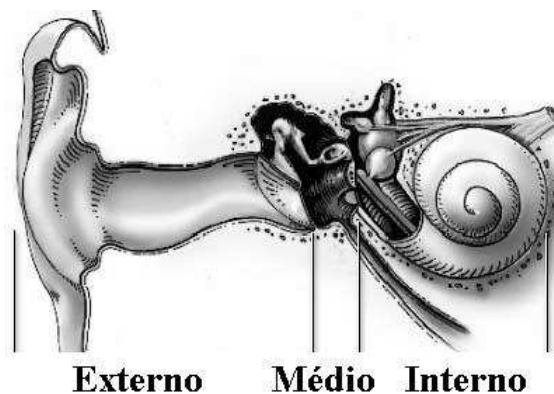


Figura 3.1: Constituição do sistema auditivo humano

3.1.1 O ouvido externo

A função do ouvido externo, além de ser a primeira comunicação com a interface aérea e barrar sujeira, pó e microorganismos, é de receber e encaminhar as ondas sonoras até o ouvido médio. É composto pelo pavilhão auricular e o canal auditivo.

3.1.2 O ouvido médio

O ouvido médio é uma cavidade oca de aproximadamente 1,3cm. Por um lado, essa cavidade é separada do ouvido externo pelo tímpano, e por outro, ela desemboca na janela oval, já na cóclea [19].

Um conjunto de três pequenos ossos, o martelo, a bigorna e o estribo, é responsável pela transmissão da energia sonora para o ouvido interno, pois esses ossos vibram solidários com o tímpano. Para manter a pressão do ouvido constante, o ouvido médio, ou a caixa timpânica, mantém ligação com a faringe e o nariz. Esse sistema mecânico de transmissão de energia do tímpano com os ossinhos possui capacidade de saturação a fim de não danificar o ouvido interno quando exposto a sons de altas intensidades. Isso é feito com um revestimento mucoso desses ossículos e músculos adjacentes.

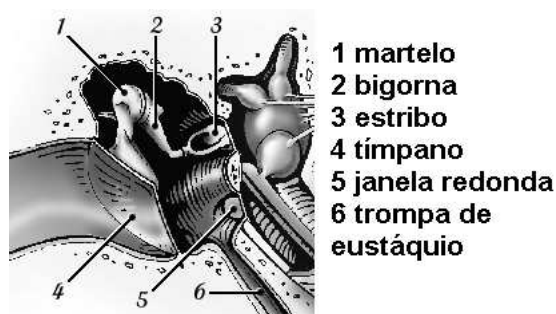


Figura 3.2: Partes do ouvido médio

3.1.3 O ouvido interno

O ouvido interno é a parte mais importante e sensível do sistema auricular. No ouvido interno, acontece a conversão de energia responsável para levar os sons para o cérebro. Ele é formado da cóclea e dos canais semicirculares. Os canais semicirculares não são usados para audição, tendo a função de indicar para o cérebro a direção de movimento da cabeça. É um sistema de equilíbrio.

Já a cóclea, uma formação espiral como a de um caracol de aproximadamente $3,5\text{cm}$, é a parte responsável pela capacidade de diferenciação e interpretação dos sons. De fato, é na cóclea que se desenrola uma complexa função de conversão de sinais, onde a energia mecânica propagada desde o pavilhão auricular, passando pelo tímpano, é transformada para energia elétrica nos cerca de 17.000 pequenos cílios, espalhados no contorno dela. Então, esse sinal elétrico é encaminhado ao cérebro pelo nervo ótico (ou nervo auditivo), onde é depois decodificado e interpretado.

Essa função não é a única da cóclea. Por causa da diferenciação celular dos cílios captadores do som, cada região é capaz de ser sensibilizada por uma faixa de frequências específica. Assim, as regiões da cóclea são como filtros. A referência [20] propõe um modelo para a cóclea humana a partir de um banco de filtros. A figura 3.3 mostra cinco curvas para 5 regiões da cóclea e a resposta em frequência para cada região [20].

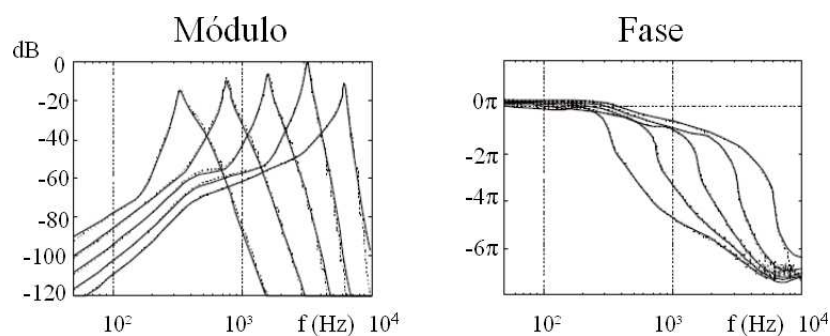


Figura 3.3: Resposta em frequência da cóclea para 5 posições ciliares. Modelo de múltiplos filtros

Para um sistema elétrico, a função de transdução e filtragem é feita por dispositivos diferentes, a saber, o microfone e os filtros propriamente ditos, que podem ser analógicos ou digitais. É sabido que o microfone também apresenta uma curva de resposta em frequência, e essa será apresentada na subseção 3.2.2.

3.2 DISCUSSÃO SOBRE O FRONT-END E ADEQUAÇÃO DE SINAIS

Como discutido anteriormente no capítulo 2, os métodos de estimação de direção de chegada podem ser usados tanto para sistemas eletromagnéticos, subseção 2.2.1, quanto para sistemas mecânicos, subseção 2.2.2. Mais genericamente, pode ser usado para qualquer fonte de energia. O que diferenciaria um de outro é o transdutor usado e a faixa de frequências. O transdutor, ou sensor, é o responsável por converter certo tipo de energia em energia elétrica, para poder ser processado eletricamente. Essa energia do sinal, que pode ser temperatura, pressão, campo elétrico, pode ser representada como uma variação de resistência, variação de capacitância, ou mesmo como uma fonte de tensão variável. Para cada aplicação pode-se usar um tipo de sensor. Para ondas eletromagnéticas, usam-se antenas, para sistemas de som, que são ondas mecânicas, usam-se microfones. Neste capítulo, explicar-se-á o *hardware* proposto para fazer a aquisição dos sinais. Assim sendo, toda a teoria já vista será aplicada para o caso do arranjo de microfones, denominado de prótese auditiva inteligente, PAI.

3.2.1 Adequação do sistema para estimação

Esse projeto se propôs a elaborar um protótipo para a validação das teorias e conceitos necessários para a construção de uma prótese auditiva inteligente. Por isso, os elementos do projeto não buscaram sua miniaturização, mas sim a validação de *hardware* e *software*. A teoria de uma prótese auditiva inteligente, como a que está em desenvolvimento, foi largamente estudada na referência [7].

O diagrama apresentado na figura 3.4 foi proposto tendo em vista que o sinal chega para ser processado num processador de propósito geral, como um PC, comunicando-se com um processador ARM via uma interface serial de alta velocidade, a USB (*Universal Serial Bus*), funcionando na versão 1.1. Alternativamente, a figura 3.5 representa possíveis saídas e realimentações do resultado do processamento.

Os sinais elétricos advindos dos sensores de 0 a 7, que são microfones, apresentam baixa intensidade. Por isso são necessários estágios amplificadores. Dos amplificadores, o sinal passa por estágios de filtragem analógica para acomodar o sinal dentro da faixa do conversor analógico-digital e evitar *aliasing*, além de restringir o sinal para a faixa de interesse.

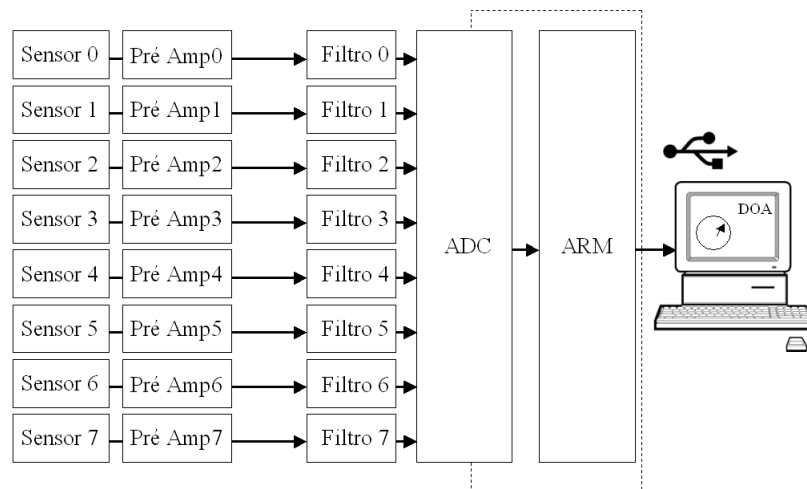


Figura 3.4: Diagrama de blocos do *hardware* proposto

Após um dado processamento do sinal, seja ele qual for, o computador pode fornecer uma saída de realimentação para outros sistemas ou para a própria entrada do sistema de processamento dos microfones. Assim, pode-se, por exemplo, mostrar: o resultado da estimação de direção de chegada em um *display*, a saída de áudio tratada em uma caixa de som, ou uma realimentação para os ganhos dos microfones. É a partir dessa realimentação adaptativa que é possível a conformação do diagrama de captação do arranjo de microfones, como apresentado na figura 3.6.

Para a estimação da direção de chegada, é importante que as amostras dos M sinais, 8 sinais para o caso da figura 3.4, tenham sido tomadas no mesmo instante, pois a base para a estimativa dos sinais é a diferença de fase entre os elementos do arranjo. É dessa teoria que advém a necessidade de coletar as amostras nos conversores no mesmo instante. Dessa forma, o projeto precisa não só de oito canais de conversão no ADC, mas também oito *sample and hold* para a entrega dos sinais aos conversores.

Segue abaixo uma explicação acerca de cada estágio de tratamento dos sinais na placa analógica, até a

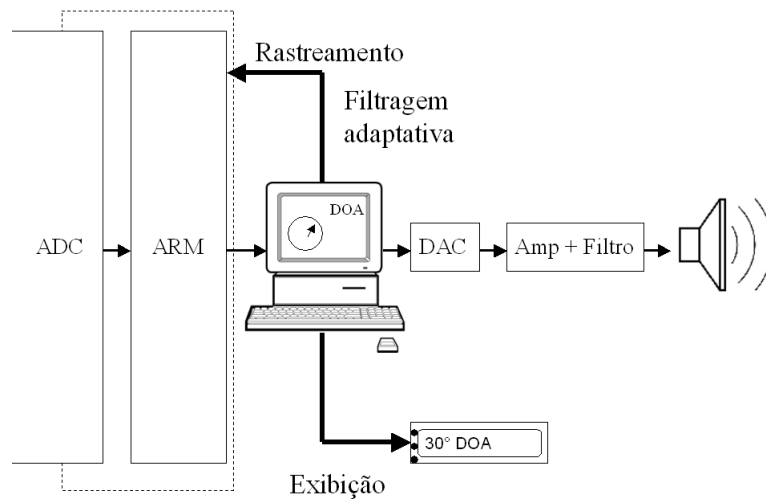


Figura 3.5: Diagrama de blocos das saídas

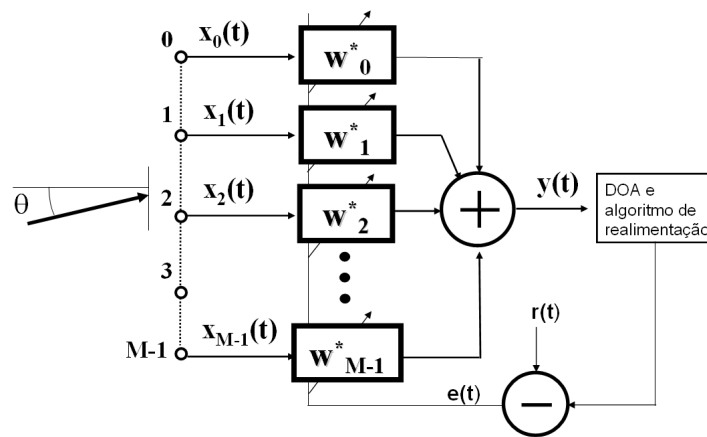


Figura 3.6: Diagrama de realimentação

conversão digital.

3.2.2 Sensores - Microfones

O projeto da prótese auditiva inteligente começa com a escolha dos sensores, ou seja, os microfones. É necessário que esses transdutores tenham uma resposta omnidirecional em amplitude e fase, de forma que não privilegiem uma direção para captação do som. Para algumas aplicações, é importante que o microfone tenha uma diretividade de captação determinada, porém a seletividade espacial é sempre baixa para os dois casos. Para checar a característica de captação do microfone, foram feitos dois testes direcionais em microfones de eletreto utilizando um gerador de funções senoidal.

O primeiro teste não foi conclusivo e por isso foi feito com uma metodologia mais refinada. O

segundo teste, com uma das placas de microfone do arranjo, foi feito com uma fonte com tensão pico a pico de $1V$, $\frac{0,5}{\sqrt{3}}V_{RMS}$ em um alto-falante polifônico como fonte sonora para o microfone, e então mediu-se a sua resposta. A fonte variou a sua posição de -90° a 90° , com intervalo de 15° entre cada amostra, mantendo uma distância do sensor de $16cm$.

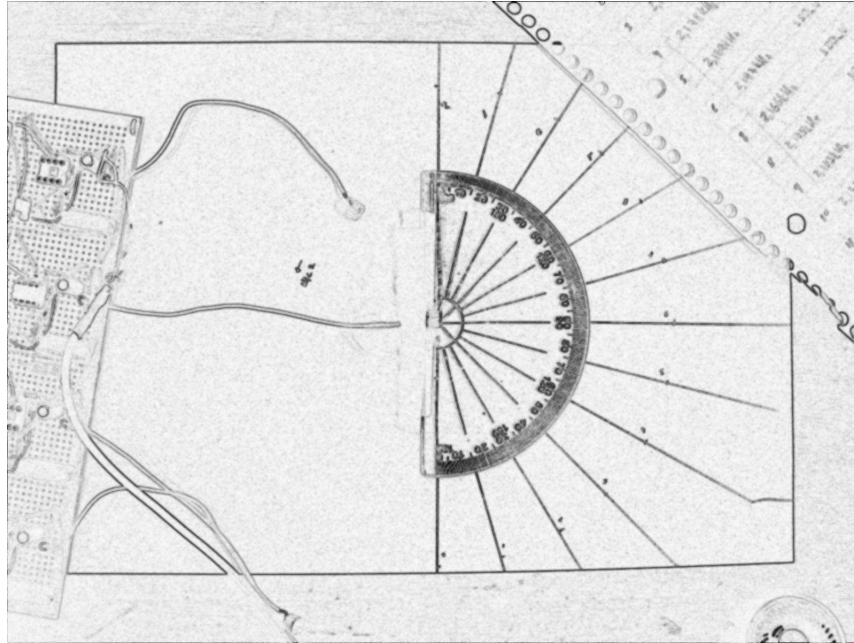


Figura 3.7: Montagem do diagrama de captação para a placa de microfone

Tabela 3.1: Características da fonte usada para medir a diretividade do microfone

Frequência (Hz)	$V_{RMS}(mV)$	$V_{PP}(V)$	Fase ($^\circ$)
1000	289	1	0

Os gráficos resultantes das análises da tabela 3.2 são apresentados na figura 3.8. O primeiro gráfico, à esquerda, apresenta o diagrama polar da tensão V_{RMS} , captada pelo microfone com a fonte senoidal supracitada. Sua análise corrobora com uma resposta aproximadamente omnidirecional para sinais que chegam pela frente do microfone, não tendo sido objeto de estudo a sua relação frente costa. O segundo gráfico da figura, à direita, é a resposta da fase. Observa-se que, para os ângulos entre -50° e 50° , a resposta do microfone para a configuração da tabela 3.2 apresenta uma defasagem menor que nos outros ângulos, o que poderia trazer alguns erros na estimação da direção de chegada. No entanto, como as ondas são consideradas planas nessa monografia, os sinais chegam aos microfones sob o mesmo ângulo, ou seja, a diferença na resposta em fase dos microfones não terá efeitos significativos nos resultados. Os resultados dos algoritmos de estimação poderão quantificar a importância de uma resposta em fase mais plana.

Tabela 3.2: Resposta da diretividade do Microfone

Ângulo (°)	Frequência (Hz)	VRMS (mV)	VPP (V)	Fase (μ s)	Fase (rad)	Fase (°)
-90	1000	285	0,84	230	1,445132621	82,8
-75	1000	266	0,768	220	1,382300768	79,2
-60	998	278	0,8	210	1,316829977	75,4488
-45	1000	315	0,952	170	1,068141502	61,2
-30	998	384	1,12	190	1,191417598	68,2632
-15	998	400	1,18	180	1,128711409	64,6704
0	1000	378	1,12	190	1,193805208	68,4
15	997	338	0,984	180	1,127580435	64,6056
30	998	386	1,12	190	1,191417598	68,2632
45	1000	348	1,02	210	1,319468915	75,6
60	1000	360	1,05	220	1,382300768	79,2
75	1000	442	1,26	230	1,445132621	82,8
90	1000	401	1,18	220	1,382300768	79,2

Revisando, para sinais sonoros a distâncias maiores que $15d$, onde d é a distância entre os elementos do arranjo, pode-se considerar frentes de onda plana. A partir dessa distância, as equações mostradas no capítulo 2 podem ser aplicadas e a direção de chegada calculada. Para o caso de frentes de ondas não planas, $d' < 15d$, segue outra abordagem matemática mais complexa e que não é objeto de estudo aqui.

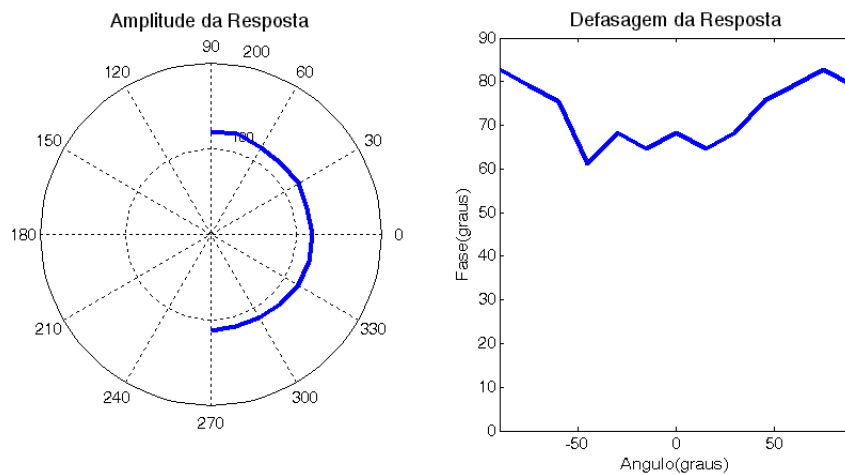


Figura 3.8: Resposta do microfone

3.2.3 Pré-amplificadores

Como foi dito anteriormente, os sinais coletados pelos microfones são de baixa intensidade, trazendo a necessidade de um tratamento inicial dos sinais para aumentar a tensão que chega ao resto do circuito. Para diminuir a interferência de ruído elétrico nos sinais de baixa intensidade, cada amplificador fica junto dos

microfones, sendo alimentado com as tensões de $+5V$ e $-5V$. Dessa forma, as placas de pré-amplificação são individuais. Para esse estágio foi utilizado o circuito integrado TL072 da *Texas Instruments* [21]. O ganho foi projetado para ser variável, de forma a propiciar os ajustes que fossem necessários. Para tanto, utilizou-se a configuração inversora em dois estágios. O ajuste fino é feito no segundo estágio. Os ganhos podem ser vistos nas equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4

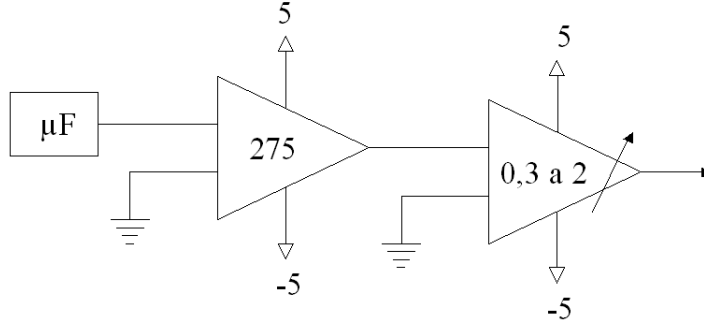


Figura 3.9: Diagrama do estágio pré-amplificador

$$G_1 = \frac{330k\Omega}{1,2k\Omega} = 275 \quad (3.1)$$

$$G_2 = \frac{33k\Omega + Xk\Omega}{120k\Omega} \quad (3.2)$$

$$G_{2min} = \frac{33k\Omega + 0k\Omega}{120k\Omega} = 0,275 \approx 0,3 \quad (3.3)$$

$$G_{2max} = \frac{33k\Omega + 200k\Omega}{120k\Omega} = 1,94 \approx 2 \quad (3.4)$$

O primeiro estágio possui ganho constante de $275V/V$ ou $48,79dB$. O segundo tem ganho variável de $0,3V/V$ ($-10,5dB$) a $2V/V$ ($6dB$), proporcionado por um potenciômetro de precisão multivoltas de $200k\Omega$. A excursão de saída projetada foi de $-1,5V$ a $1,5V$, ajustada dessa forma devido às limitações da tensão de entrada dos conversores. O anexo I apresenta, respectivamente, o esquemático e o circuito impresso das placas de pré-amplificação.

3.2.4 Filtros

Nesta etapa do projeto, foram empregados filtros de Bessel de terceira ordem com frequência de corte de 100Hz para os passa-altas e 5kHz para os passa-baixas. Essas frequências foram escolhidas de forma a: suprimir a interferência de baixa frequência, principalmente a de 60Hz da rede elétrica, no caso do passa-altas; e evitar o *aliasing* e reduzir ruído no caso do passa-baixa. A maior parte das características da voz estão presentes no intervalo de $100\text{Hz} - 5\text{kHz}$, sendo um intervalo confiável para filtragem sem perda de audibilidade.

Todos os filtros possuem *jumpers* que possibilitam o *bypass* de qualquer um dos quatro estágios. A mesma estrutura desses quatro filtros é repetida oito vezes referindo-se aos oito sensores. O anexo I traz os esquemáticos dos filtros e o resultado do projeto das placas. A alimentação dos amplificadores operacionais do *chip* TL064, responsável pelas filtrações, não é a mesma dos pré-amplificadores, que possuem alimentação própria para evitar ruído. A placa de filtros permite compatibilizar o sinal das etapas de filtragem e do tratamento até o conversor ADC.

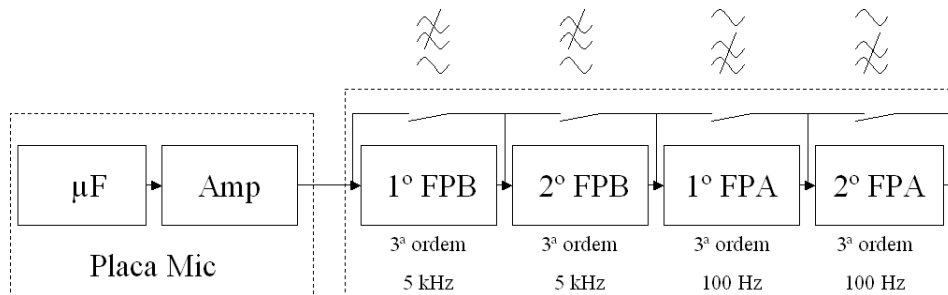


Figura 3.10: Diagrama dos estágios de filtragem

Cada sensor acústico possui quatro filtros em série em seu circuito: 2 passa-baixas e 2 passa-altas, nessa ordem. A figura 3.11 apresenta a resposta teórica em amplitude dos filtros. Os dois conjuntos de 2 filtros, com mesma frequência de corte, em série, resultam em filtros de sexta ordem, garantindo uma melhor qualidade no sinal entregue, como apresentado na figura 3.12 .

Quando os dois filtros de terceira ordem são colocados em série, formando um filtro de sexta ordem a sua frequência de corte não permanece a mesma. Isso acontece porque em decibéis a atenuação dos dois filtros é somada. Como resultado, a frequência onde a queda anterior era de 3dB passa a ser de 3dB a faixa de frequências comprimida, como apresentado na figura 3.12.

A seguir, na figura 3.13, a resposta esperada em fase dos filtros é apresentada. Buscou-se a resposta mais plana possível entre as opções desse elemento do projeto. No entanto, a diferença de fase ainda existe

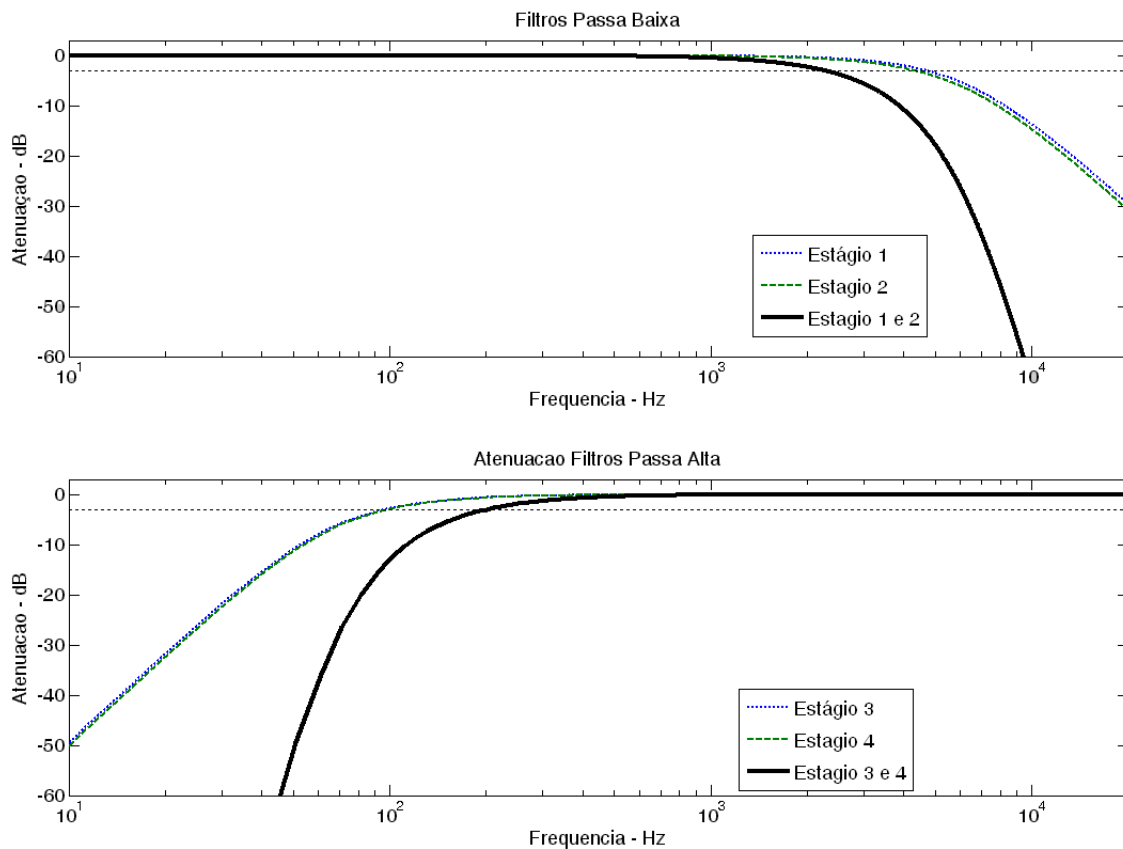


Figura 3.11: Resposta Teórica em Amplitude dos Estágios dos Filtros

e precisa ser corrigida posteriormente por *software*.

Com os quatro estágios de filtragem, a resposta fica como apresentado na figura 3.14. Nesse caso, percebe-se que a resposta é ainda menos linear, o que corrobora a necessidade de uma equalização posterior.

3.2.5 Sample and Hold

Esse elemento do projeto da placa é o que possibilita adquirir os sinais no mesmo instante de tempo. O *sample and hold* utilizado para o projeto possui um tempo médio de aquisição de $9\mu s$ e máximo de $11\mu s$. Após esse tempo, os conversores poderão amostrar os sinais com segurança.

O SMP04 é alimentado de forma bipolar e, nesse projeto, a tensão de alimentação foi de $-5V$ a $+5V$, em conformidade com a alimentação dos pré-amplificadores e filtros. No entanto, as especificações, incluindo o tempo de aquisição, *offset* e tensão de saída degradam a alimentação de $2V$. Daí a necessidade de excursão menor que $+3V$.

Uma última consideração acerca desse elemento de projeto é o atraso de fase que ele introduz. A figura 3.15 apresenta o gráfico da resposta em frequência da defasagem. Observa-se que ele não influenciará

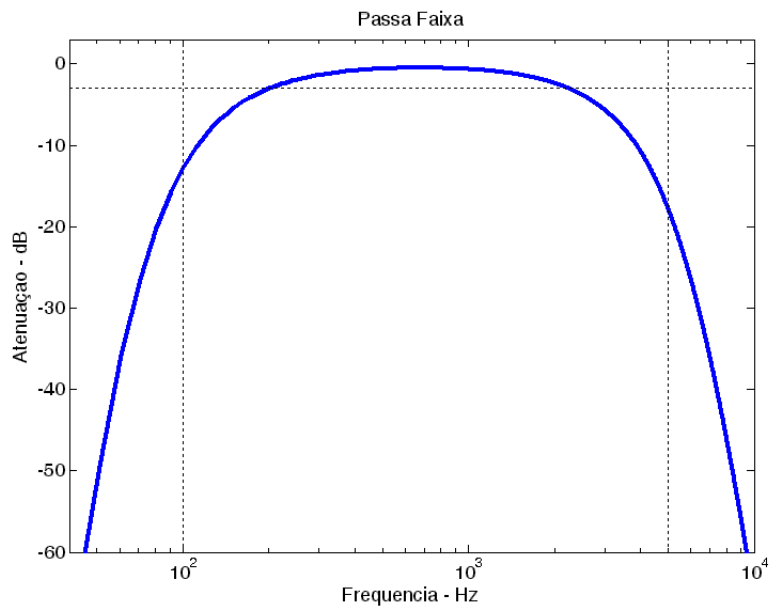


Figura 3.12: Resposta Teórica em Amplitude Filtro Passa-Faixa

consideravelmente já que sua resposta é plana.

3.2.6 Conversores Analógico Digital

O primeiro passo na escolha dos conversores é a taxa de amostragem que será utilizada. Considerando que se trabalhe na faixa de voz de 100 Hz a 5 kHz, com 8 canais multiplexados, obtém-se uma taxa de 40 kHz. Devido ao teorema da amostragem de *Nyquist*, a digitalização será realizada a 80 kHz, o que resulta num período de conversão de $12,5 \mu s$.

Para a conversão dos sinais, o projeto previu duas vias: utilizando o conversor do microprocessador ARM ou um circuito integrado. O primeiro tem resolução de 10 bits e o segundo, de 12 bits, é controlado via barramento SPI.

O módulo de conversão do ARM possui oito canais mas apenas um circuito conversor, ou seja, utiliza um multiplexador para proporcionar os 8 canais. Dessa forma, os sinais devem passar pelo SMP04 antes de chegar até ele. O conversor possui uma taxa de amostragem máxima de $533 kSps$ trabalhando com um clock de $8 MHz$, o que viabiliza as taxas de conversão desejadas. A outra opção é o ADC128S102 da *National* [22]. Esse ADC é controlado via barramento SPI e possui oito canais. Também utiliza um único conversor e um multiplexador interno, necessitando do SMP04 para a aquisição dos sinais no mesmo instante. Sua taxa máxima de amostragem varia de $500 kSps$ a $1 MSps$. Sua alimentação só pode ser feita de forma unipolar, trazendo a necessidade de um sinal com DC. Apesar do AD trabalhar em $10 bits$, cada

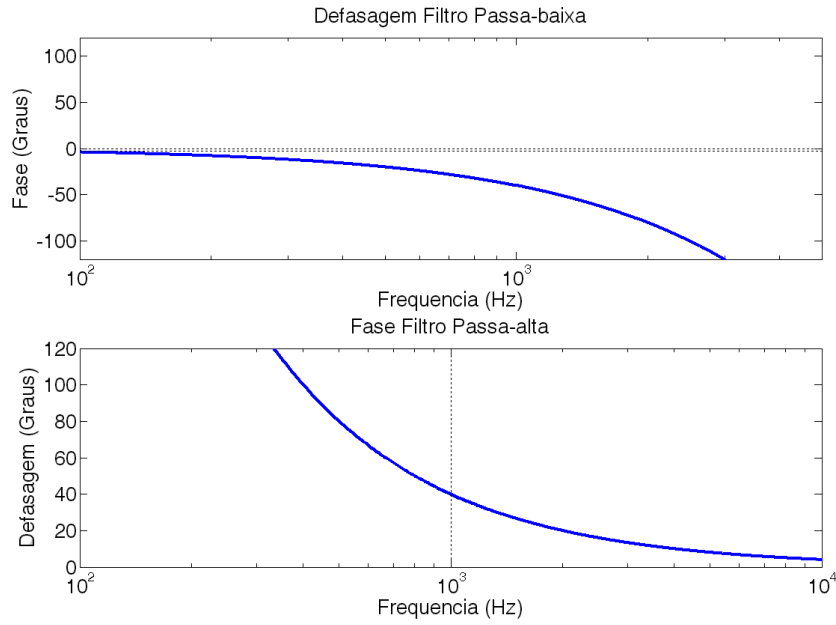


Figura 3.13: Resposta Teórica em Fase dos Estágios dos Filtros

transferência envolve 16 bits. Assim, a banda passante é de $12,5 kHz \times 2 bytes \times 8 canais = 200 K Bytes/s$.

Antes do sinal que sai do *sample and hold* chegar aos conversores, existe um outro amplificador, que tem basicamente duas funções: levantar o sinal, inserindo um valor DC nas oito saídas e fornecer uma amplificação adicional dos sinais, com ganho também variável. O DC que é inserido é em torno de $1,4V$ a partir de um diodo zener na placa. Como a alimentação do ARM é de $3,3V$, a excursão dos sinais deve ser entre $-1,5V$ e $+1,5V$. Também por causa dessa limitação na alimentação do ARM, o ADC128S deve ser alimentado por uma tensão de $3,3V$ para que a SPI trabalhe nos níveis de tensão do microprocessador.

De posse das resoluções em bits e das tensões de alimentação dos dois conversores, pode-se calcular a resolução em termos das tensões, como apresentado nas equações 3.5 e 3.6.

$$Res_{10b} = \frac{3,3V}{2^{10}} = 3,222mV \quad (3.5)$$

$$Res_{12b} = \frac{3,3V}{2^{12}} = 0,806mV \quad (3.6)$$

Finalmente, pode-se calcular o tempo gasto em cada um dos estágios. Os dois conversores convertem individualmente a uma taxa de $10kHz$, o que resulta em um período de $100\mu s$. A digitalização de cada canal dura aproximadamente $1\mu s$ no ADC128S e $2\mu s$ no ARM. O SMP04 consome no máximo $11\mu s$ para amostrar o sinal. Logo, sobram $100 - 12,25 = 87,75\mu s$ para transferir os dados. Ou seja, o microprocessador tem esse tempo para enviar, via conexão USB, os dados armazenados em seu *buffer* interno para o computador. A partir daí o processamento é feito em ambiente MATLAB.

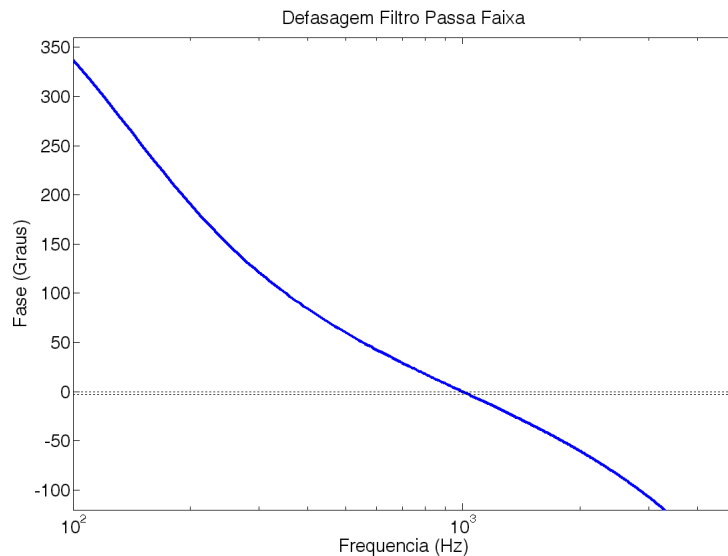


Figura 3.14: Resposta Teórica em Fase Filtro Passa-Faixa

3.2.7 Limitações do Hardware - parte analógica

Dado o exposto na seção anterior, é válida a discussão acerca das limitações de *hardware* nesse projeto. Em primeiro lugar, os diferentes estágios da placa introduzem atrasos de fase nos sinais, como pode ser observado nos gráficos apresentados anteriormente. As principais fontes de atraso são a resposta dos filtros e a resposta direcional do microfone. Esta última é a principal, já que é de natureza direcional. O *sample and hold* possui uma resposta plana e por isso não prejudica a estimação.

No caso dos filtros, a defasagem varia com a frequência e caso as fontes de sinal tenham a mesma frequência, a estimação não será prejudicada. Apesar de o filtro de Bessel ser o que menos introduz atraso, ele ainda defasa o sinal, como mostrado na figura 3.13. Já no caso do microfone, o atraso de fase varia com a direção de captação do sinal. No entanto, como as ondas são consideradas planas nesse projeto, cada microfone introduzirá o mesmo atraso nos sinais, o que pode não prejudicar a estimação.

Outro fator limitante no projeto são as amplitudes de tensões de trabalho. Como o núcleo ARM do microprocessador trabalha nas tensões entre 0V e 3,3V, as excursões devem estar sempre entre $-1,5V$ e $+1,5V$, seja devido à comunicação, como no caso do ADC128S, seja por causa do próprio conversor, no caso do conversor interno, seja devido à propagação dessas tensões como no caso do *sample and hold* e dos filtros. Tensões baixas podem prejudicar a estimação final por tornar a influência do ruído maior.

A frequência máxima do sinal que pode ser estimado também pode ser verificada a partir da distância mínima entre os elementos do arranjo de sensores. As placas de pré-amplificação foram projetadas com uma largura de $1,68cm$. Ou seja, essa é a distância d mínima entre os elementos do arranjo. De acordo

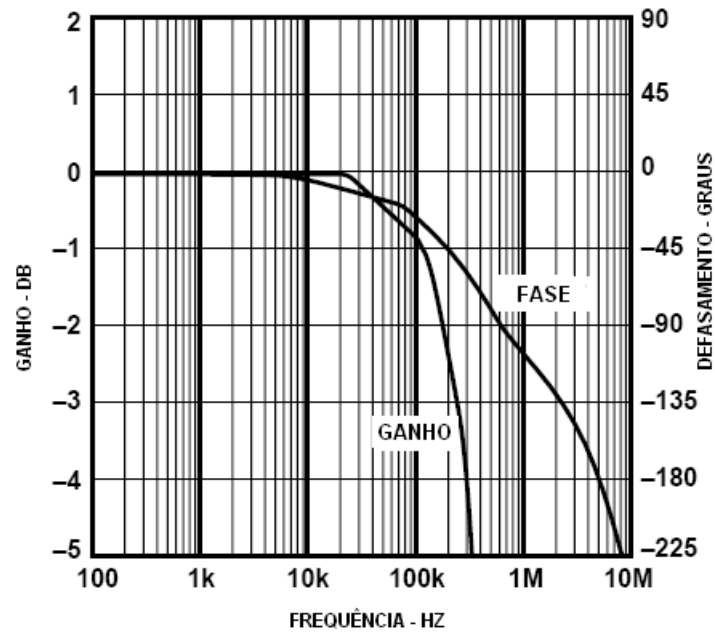


Figura 3.15: Resposta do *Sample and Hold*

com o teorema da amostragem espacial da equação 2.10, essa distância permite a estimação de sinais com o comprimento de onda mínimo de $2 * 1,68 = 3,36cm$. Como os sinais de interesse são sinais de voz, sua velocidade é $340m/s$. Ou seja, a frequência máxima de estimação é $f_{max} = 340/3,36 = 10110Hz$.

4 ARQUITETURA ARM E O MICROCONTROLADOR

AT91SAM7S256

A arquitetura trata da bondade, da verdade e da beleza em nossos edifícios e paisagens e a física trata da bondade, da verdade e da beleza na natureza. (C. West Churchman)

4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSADOR ARM

ARM é a abreviação de *Advanced Risc Machines Ltd*, uma empresa fundada em 1990 e que pertence a Acorn, Apple e VLSI. A arquitetura foi inicialmente desenvolvida para o uso da própria companhia (Acorn), mas hoje é um núcleo de processamento licenciado ou IP (*Intellectual Property*). A arquitetura é do tipo RISC de 32 bits, sendo utilizada em aplicações que requerem altos níveis de desempenho em sistemas embarcados.

Esses processadores têm grande popularidade devido à quantidade de periféricos disponibilizada, aliada a baixa dissipação de potência, flexibilidade, pequeno tamanho, baixo consumo de potência e alta performance. Tais características o tornam um processador interessante em uma vasta gama de aplicações, entre as quais, sistemas de armazenamento em tempo real, sistemas automotivos, industriais, aplicações de rede, plataformas de aplicação (Linux, Palm OS, Symbian OS,...), entre outros. Essa última o tornou uma importante parte dos modernos sistemas SoC, ou *System on Chip*.

O núcleo ARM é dividido em várias famílias, entre as quais a ARM7. Tais núcleos se diferenciam basicamente pela quantidade de estágios no seu *Pipeline*, como apresentado na tabela 4.1, onde são mostrados os *cores* fabricados com tecnologia 0,18 μ m.

Tabela 4.1: Processadores ARM com tecnologia 0,18 μ m

Processador	Area(mm ²)	Consumo de Potência (mW/MHz)	Frequência	Tamanho da cache
ARM7TDMI	0,5	0,25	84	-
ARM946E	5,8	1,69	163	8K/8K
ARM922T	8,1	0,9	194	8K/8K
ARM926EJ	8,98	1,82	200	16K/16K

O ARM7TDMI, base para o microcontrolador da Atmel utilizado nesse projeto, pertence à família ARM7, a qual se diferencia das outras pelos 3 estágios de *pipeline*. A tabela 4.2 apresenta as principais característi-

cas desse processador, como sua performance com elevada velocidade de processamento, fator importante para o projeto em questão.

Tabela 4.2: Características do ARM7TDMI

Arquitetura	RISC de 32 bits	
Instruções	ARM	32 bits (alta performance)
	Thumb	16 bits (alta densidade de código)
Pipeline	três estágios: <i>fetch, decode, execute</i>	
Velocidade de Processamento	2000 MIPS (<i>million of instructions per second</i>)	
Frequência	115MHz	
Área	0,59 mm ²	
Potência	0,21mW/MHz	
Registradores	31 de propósito geral e 6 registradores de <i>status</i>	
Outras Características	Interface coprocessador, barramento de memória unificado	

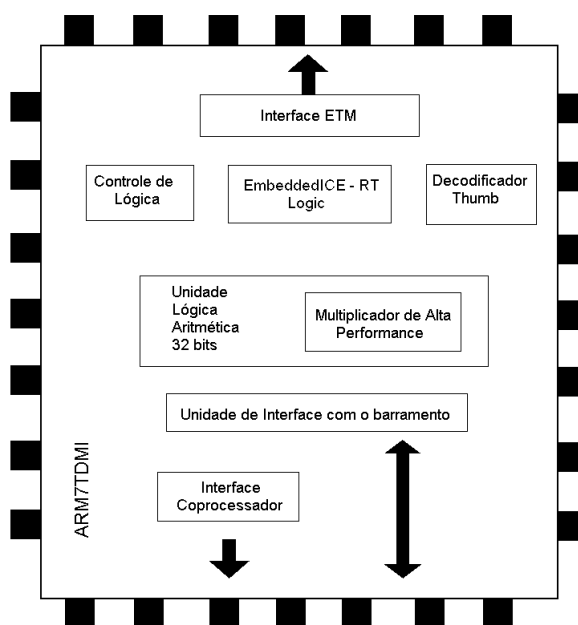


Figura 4.1: Diagrama de Blocos do núcleo ARM7

4.1.1 O microcontrolador

A programação dos registradores e o *firmware* do microcontrolador, com a implementação da conversão e comunicação, não é objeto de estudo direto desta monografia, já que um outro grupo de estudo trabalhou com essa parte do projeto. No entanto, é importante uma visão geral dessa interface que foi utilizada para a comunicação entre *hardware* e o PC.

Como foi mencionado anteriormente, a interface entre o *front-end* e o computador foi feita por inter-

face USB, utilizando um microcontrolador de alta performance e alta velocidade de processamento. O microcontrolador escolhido foi o AT91SAM7S256 da *Atmel Corporation*, o qual utiliza como núcleo de processamento um ARM7TDMI, cujas características principais já foram apresentadas.

O AT91SAM7S256 foi escolhido por apresentar uma interface USB 1.1 já embutida, além das características intrínsecas de um circuito integrado com processador ARM. Com uma memória *Flash* de 256KB de alta velocidade, SRAM de 64KB, uma grande quantidade de periféricos adicionais, entre os quais oito canais de conversão analógico digital, esse microcontrolador reúne todas as características importantes para a interface desejada. Possui *watchdog* com oscilador RC próprio e seu controlador interno inclui um controlador de *reset* capaz de gerenciar a sequência de alimentação de todo o sistema.

A figura 4.2 apresenta alguns dos módulos mais importantes do microcontrolador, em especial os que foram utilizados no projeto: Interface USB, ADC, SPI e Memória. Existe apenas uma porta paralela de entrada/saída de 32 bits que é compartilhada entre uma série de periféricos, entre os quais o barramento SPI, barramento serial e 4 canais do ADC.

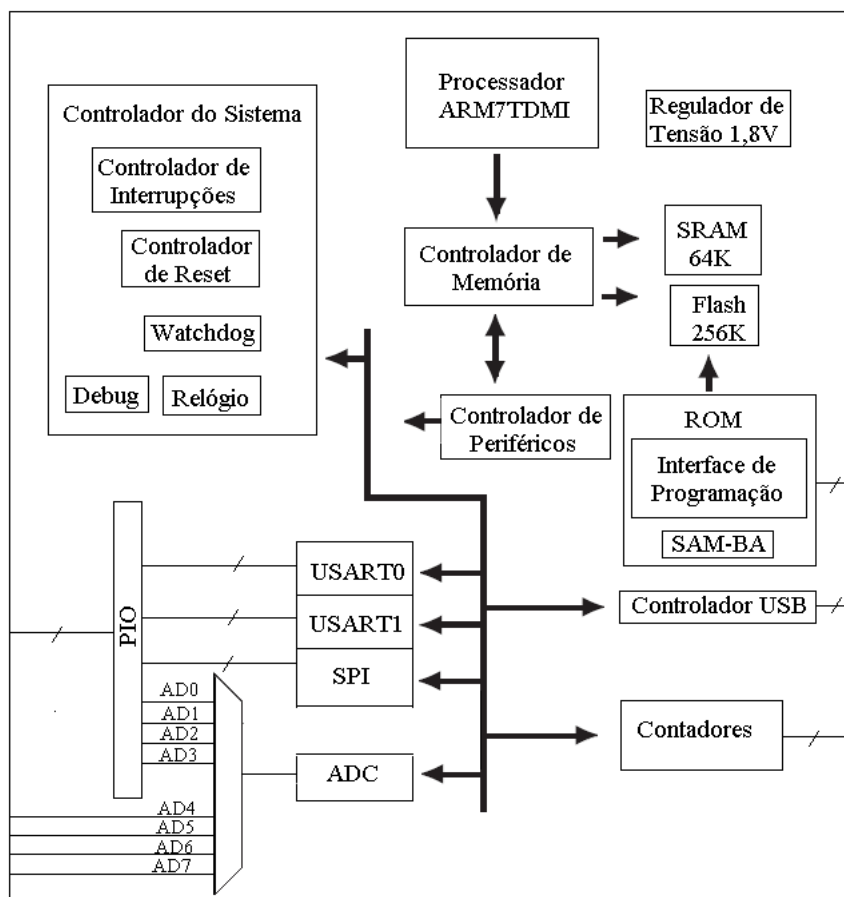


Figura 4.2: Diagrama de Blocos do microcontrolador

4.2 ARM X FPGA

Embora o título da seção indique uma contraposição entre os processadores ARM e a arquitetura FPGA, propõe-se muito mais um estudo de vantagens e complementaridade entre os sistemas. Os FPGAs, ou *Field Programmable Gate Array* são dispositivos lógicos reprogramáveis formados por uma matriz de portas lógicas básicas *não-e*. A partir desse conjunto de portas pode-se escrever quaisquer outras funções lógicas. Blocos de memória podem vir acoplados ao redor de blocos de portas.

A configuração dos blocos é feita por meio de uma linguagem de descrição de hardware. Uma grande vantagem da sua utilização é a velocidade comparativa de projetos de *hardware* e *software*. Para uma mesma função, um programa otimizado em execução em um processador é muito mais lento que um sistema implementado em hardware.

Por se tratar de um dispositivo configurável, é possível, inclusive uma descrição de um processador na pastilha. Ou seja, uma integração entre blocos de *software*, com sistemas de tempo real, e módulos de processamento em *hardware*, mais velozes. Para tanto, dois fabricantes de FPGAs, a Altera e a Xilinx, dispõe de núcleos de *Soft Processors*, a saber: o Nios e o MicroBaze.

5 APLICAÇÃO EM UMA ARQUITETURA RDS

Na Universidade de Brasília, um grande desafio foi levantado pelo Departamento de Engenharia Elétrica, no sentido de desenvolver Rádios Definidos por Software e sistemas auto-reconfiguráveis. (...) pretende-se chegar a uma plataforma de RDS ideal, composto de antenas inteligentes e considerando a adoção de sistemas MIMO. (André Gustavo Lima)

5.1 PROBLEMAS EM UM AMBIENTE COM ARRANJO DE SENSORES E POSSIBILIDADES DENTRO DO CONTEXTO RDS

A demanda crescente nas comunicações sem-fio tem se revertido numa necessidade cada vez maior de largura de banda, qualidade e diversidade dos serviços. Nos últimos 100 anos, grande parte do espectro de rádio foi ocupado, com muitos serviços disponibilizados, desde radiodifusão, serviços de comunicações críticas, rede celular, enlaces de microondas, comunicação satélite, entre outras [1]. As múltiplas opções de serviços, cada uma com suas peculiaridades de frequência, potência e aplicação, trazem também a necessidade de reconfigurabilidade e interoperabilidade. Nesse universo com tantas opções de intercomunicação, a interoperabilidade entre sistemas diferentes tem se tornado a busca constante, trazendo convergência e possibilitando ao usuário a fácil troca entre eles. A convergência dos sistemas móveis pessoais para um único dispositivo é uma diretiva que tem sido adotada desde a terceira geração de comunicações móveis e que, por isso, a quarta geração também prevê com ainda mais força.

Nessa busca, a idéia de reconfigurabilidade no nível de *hardware*, por um *software*, ganha força. O RDS, ou Rádio Definido por Software, tem como cerne a independência o máximo possível dos componentes eletrônicos discretos, reduzindo as diversas possibilidades de comunicação a um processamento feito pelo menor número de pastilhas de circuitos integrados executando todas as funções de filtragem, modulação e processamento de sinais digitalmente. Com isso, ganha-se em tamanho, robustez do sistema, praticidade e custo a longo prazo. A reconfiguração do rádio envolvido é feita a partir de atualizações de *software*. Nesse caso, o próprio rádio deve ser capaz de detectar os sistemas disponíveis no local e permitir a seleção por parte do usuário da interface aérea de interesse ou de melhor benefício para cada aplicação, que pode ser potência do sinal, segurança da comunicação, largura de banda. As possibilidades de aplicação são as mais diversas desde uma abordagem mais reduzida restringindo as frequências de interesse até a mais ampla permitindo a configuração do rádio para qualquer sistema em radiofrequência. É importante

frisar que aqui se entende como rádio qualquer transceptor de ondas eletromagnéticas de radiofrequência, almejando qualquer tipo de comunicação [23].

Entre os aspectos envolvidos no reconfigurador, estão filtros digitais, eletrônica embarcada, processamento digital de sinal, software de utilitários e de segurança e conformação de diagrama de radiação. O estudo das antenas inteligentes corrobora a necessidade de reconfigurabilidade no aspecto da frequência de operação do arranjo e promove uma melhor exploração da interface aérea. Nesse sentido, a faixa de operação pode ser reconfigurada no momento em que o usuário deseja utilizar determinado sistema, habilitando a recepção/transmissão para a frequência da aplicação em questão. Para tornar o diagrama de radiação adaptativo, a estimação da direção de chegada é um elemento importante para o *software* responsável, no RDS, de implementar a conformação de feixe adequada.

A teoria envolvida no modelamento de arranjos de antenas é semelhante à apresentada anteriormente para arranjo de sensores, com a alteração dos transdutores. Ou seja, uma onda plana em campo distante incidirá nos elementos com um ângulo tal que os valores de tensão em um dado instante de tempo serão uma matriz coluna, conhecida como o *snapshot* da antena, apresentada na equação 5.1, onde M é o número de elementos.

$$\begin{bmatrix} x_0(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{M-1}(t) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Da mesma forma que no caso dos microfones, as ondas incidentes são defasadas por um ângulo ϕ , dependente da distância entre os elementos de antena e do comprimento de onda. A partir desse defasamento, por meio de algoritmos, como o CAPON, MUSIC, DS, ESPRIT, EM e outros é possível estimar a direção de chegada do sinal.

O conceito de RDS propicia o desenvolvimento de antenas inteligentes de uma forma simples e eficiente. A estrutura reconfigurável permite a atualização e a otimização mesmo depois de o *hardware* estar pronto. Assim, é possível fazer uso de diversos algoritmos de acordo com o ambiente ao qual o RDS está submetido. A figura 5.1 apresenta um diagrama de blocos básico da arquitetura RDS, no qual se pode perceber a semelhança com o da figura 1.1. O conversor ADC recebe uma frequência intermediária analógica e o digitaliza. Em seguida, o sinal digital é processado pelo receptor de filtragem polifásica de canal (PPCR) e o formador de feixe múltiplo digital (DMBF) escolhe o canal correspondente, figura 5.2.

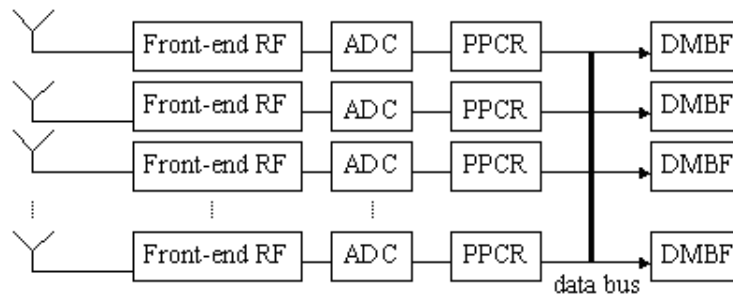


Figura 5.1: Diagrama de Recepção para um RDS

A partir dessa estrutura, é possível estimar a quantidade de sinais incidentes e então o número de usuários conectados naquele instante e a localização relativa dos emissores de sinais, funcionando como um rastreador. E então a conformação dos lóbulos das antenas é feita de forma a anular todos os sinais que não são de interesse para aquele usuário, tornando o arranjo sensível ao meio, e de certa forma adaptativo.

Alternativamente outros algoritmos e técnicas semelhantes podem ser utilizadas também para estimar a modulação de chegada e a frequência de chegada, o que tornará o RDS totalmente adaptativo ao meio, em relação as ondas eletromagnéticas incidentes. Tais esquemas permitem uma reconfigurabilidade dinâmica do RDS, determinando todas as características da onda incidente e adaptando-se a sua recepção. Daí a dimensão da importância da estimação da direção de chegada dentro desse contexto [24, 8].

Um possível algoritmo de reconfigurabilidade pode ser visto abaixo:

- Estimação da quantidade de sinais - número de usuários
- Estimação da direção de chegada - localização dos emissores de sinais
- Conformação dos diagramas de radiação - sensibilidade ao meio
- Rastreio dos emissores de sinais
- Estimação da frequência de chegada em uma certa direção
- Estimação da modulação de chegada para uma dada frequência

5.2 ACESSO AO MEIO

Como os serviços de rádio ocupam as frequências mais altas, da faixa de MHz até muitos GHz, esquemas com uso de transmissores superheteródinos com uma única frequência intermediária têm se tornado

insuficientes. Os sinais são, em sua maioria, banda estreita, e imprecisões dos componentes eletrônicos causam problemas de ruído e inoperância [1]. A demodulação do sinal exige um abaixamento de frequência, necessitando de osciladores de grande precisão e de alto valor. Tais soluções são economicamente e tecnicamente inviáveis e o uso de duas frequências intermediárias torna-se inevitável. Assim, aliado à necessidade de processar os sinais digitalmente, os sinais precisam estar com a segunda frequência intermediária baixa para que os conversores ADC possam tomar amostras de forma a recompor o sinal sem comprometimento de qualidade.

No entanto, tais alterações no *hardware* dos rádios os deixaram rígidos a reconfigurações. É nesse sentido que a proximidade do sinal da antena é importante, aumentando as dificuldades para o projeto do *hardware*, mas facilitando a reconfigurabilidade do *software*. As possibilidades dessa migração são mostradas na figura 5.2.

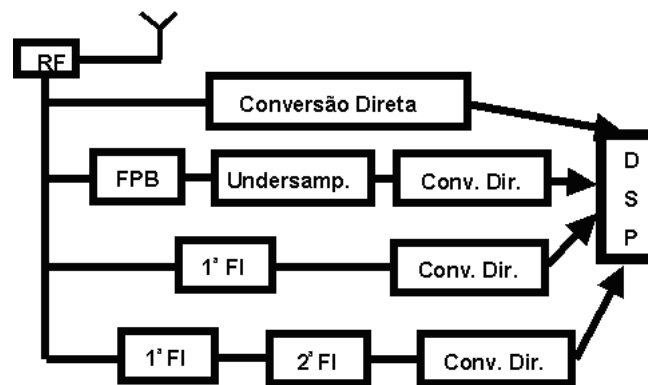


Figura 5.2: Conversão de Frequências numa arquitetura RDS

O sistema mostrado pode ser totalmente feito em software. Se as circunstâncias necessitarem de uma atualização (como o crescimento do número de usuários), isso pode ser feito facilmente, sem necessidade de alterar o hardware do dispositivo.

5.2.1 SDMA

Como já foi dito, um maior volume de enlaces de comunicação pode ser realizado simultaneamente se o sistema puder reconformar o lóbulo das antenas para a direção de interesse. A técnica de múltiplo acesso que utiliza essa vantagem espacial é conhecida como SDMA, ou *Spatial Division Multiple Access*. Tais características de reconfiguração podem ser obtidas com antenas fractais ou com arranjos de antenas. Assim, além da multiplexação dos sinais de diferentes usuários freqüencialmente, por código ou temporalmente como utilizado hoje, pode ser feita uma diferenciação dos usuários espacialmente, aumentando a

taxa de reuso da frequência e, conseqüentemente, a capacidade do sistema.

5.3 PROBLEMAS CRIADOS E SOLUÇÕES PARA OUTROS JÁ EXISTENTES

A tecnologia das antenas inteligentes é uma área desafiadora no contexto do RDS, dada a dificuldade de execução de um transceptor reconfigurável banda-larga e multi-banda. Os efeitos do acoplamento mútuo entre os elementos da antena mudam com a frequência e causam diferentes graus de interferência co-canal. Assim, o que se espera de antenas inteligentes é alta capacidade de reconfigurabilidade e seletividade. Face aos desafios do projeto de antenas inteligentes para RDS, é importante que os algoritmos de obtenção da DOA sejam validados de forma realista, considerando-se também outras dificuldades em transmissão/recepção de rádio como perdas por desvanecimento e a relação sinal/ruído. Essas últimas são minimizadas a partir da estimação da direção de chegada e adaptação do diagrama de radiação.

O acoplamento elétrico do arranjo, a similaridade e a idealização dos elementos da antena são parâmetros importantes a serem utilizados em simulações a fim de validar novos algoritmos de DOA. Essas assertivas garantem quase sempre bons resultados para as simulações, porém isso nem sempre poderia ser considerado. O acoplamento mútuo dos elementos freqüentemente corrompe o diagrama de radiação e correções são necessárias. É por isso que a construção de protótipos para analisar problemas não considerados em simulações como o acoplamento mútuo entre os elementos, reverberação no ambiente e a influência do multipercurso é importante. Problemas como esses se revertem em reflexão dos sinais no sistema para a fonte e deterioração nos padrões dos elementos [1].

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DAS PLACAS

Como pode ser verificado pela descrição dos elementos de *hardware* constituintes do projeto, a quantidade de componentes é grande, resultando em várias placas fabricadas. A primeira etapa fabricada foram as placas dos pré-amplificadores, que foram desenhadas e roteadas, e a sua fabricação iniciada logo nos primeiros meses. Depois de algumas revisões chegou-se a placa apresentada em anexo. Os diagramas se encontram no anexo I e as fotos no anexo II. Ela possui dimensões reduzidas devido a distância entre elementos que deve ser reconfigurável, atendendo a teoria da amostragem espacial.

Quanto às placas dos filtros e conversores passou-se a enfrentar o problema de tamanho das placas. Como os filtros foram projetados com componentes discretos, e do tipo PTH, *plated thru hole*, o tamanho do circuito de cada filtro passa-faixa de sexta ordem ficou da ordem de 3,5cm, o que, inicialmente, resultou numa placa de 30cm.

Dessa forma, optou-se por fazer duas placas, denominadas Placa Filha e Placa Mãe. Essas duas placas ficam montadas uma em cima das outra, reduzindo a largura do protótipo montado para 15cm.

Na primeira placa, foram colocados os filtros de 0 a 3, o SMP04, equivalente aos quatro canais dessa placa, o circuito da fonte de alimentação, e os conectores responsáveis pela interconexão com a Placa Mãe. Essa foi denominada Placa Filha por não conter as conexões diretamente com o ARM. Na segunda, foram posicionados os filtros de 4 a 7, o SMP04 equivalente, os amplificadores para ajuste de DC e conectores. Entre os conectores previstos estão: um conector com a saída dos filtros, caso seja utilizado outro *sample and hold*; um conector para a placa do microcontrolador ARM; os conectores para a Placa Filha e um conector de alimentação para as placas de pré-amplificação. No entanto, a previsão é que as placas de pré-amplificação dos microfones seja alimentado com uma bateria, para evitar ruído de alimentação.

Após a concepção e projeto das placas supracitadas, surgiu o problema de montagem do conversor ADC128S, o qual tem encapsulamento SMD, ou *surface mounting device*. O processo para fabricação utilizado não é capaz de fazer as ilhas de solda correspondentes. Logo, optou-se por fazer uma terceira placa, denominada Placa Neta. Para isso foi feito um conector adicional na Placa Mãe para conexão com a terceira placa.

O processo de confecção das placas foi principalmente o de fresagem. Uma máquina arranha a placa

criando caminhos para as trilhas, e deixando cobre em volta. É um processo relativamente barato, comparado com outros métodos, mas não garante muita resolução, além de não permitir, *a priori*, metalização de furos. As placas foram feitas com duas faces e as ligações entre uma e outra teve que ser feita de forma manual. Já a placa Neta, com o componente SMD AD128S, foi feita usando um processo de transferência, de plástico contendo as trilhas, de um papel para a placa de cobre. O resultado dessa transferência ainda passou por um processo de corrosão em ácido. A resolução obtida é muito maior que o primeiro processo, mas para placas maiores e, principalmente, com duas faces de cobre, esse processo pode ser mais trabalhoso.

6.2 RESULTADOS EM HARDWARE

Os testes em *Hardware* iniciaram com a validação dos filtros projetados. Para isso, foram feitos testes práticos da resposta dos filtros utilizados no projeto. A metodologia desenvolvida para a caracterização dos filtros foi a partir de um sinal de ruído branco gaussiano de $20dBm$ gerado sinteticamente em ambiente MATLAB. Com uma resolução de $8bits$, 1 canal a $44100Hz$ tem-se 441000 amostras. Esse sinal foi fonte para a placa de filtros em cinco fases: placa sem filtro, figura 6.1; um filtro passa-baixa, 2 filtros passa-baixas, figura; 2 filtros passa-baixas mais 1 filtro passa-alta, 2 filtros passa-baixas e 2 filtros passa-altas, figura 6.2.

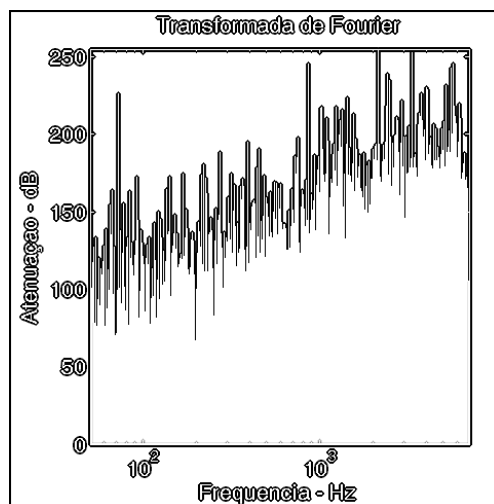


Figura 6.1: Resposta em frequência da placa sem qualquer filtro

A avaliação dos gráficos obtidos mostra que a resposta em amplitude dos filtro é bastante satisfatória atenuando $80dB/década$ as frequências fora da faixa de interesse. A porção essencial no espectro da voz humana é preservada e assim mantém uma boa qualidade sonora.

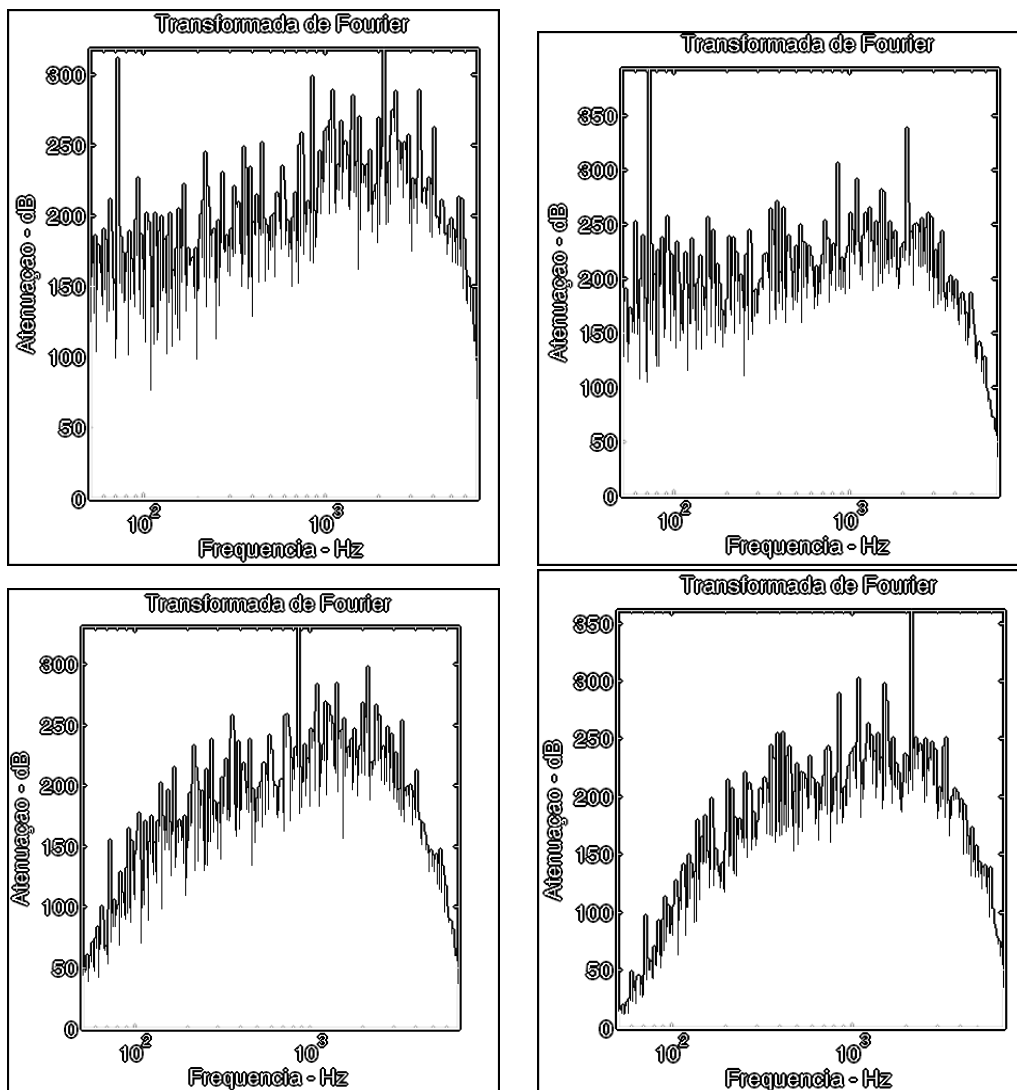


Figura 6.2: Resposta em frequência com filtros

6.2.1 Placas de circuito impresso

O *layout* das placas de circuito impresso, a saber: placa Mic, placa Mãe, placa Filha, placa Neta, se encontra no anexo II.

6.3 RESULTADOS EM SOFTWARE

O primeiro resultado obtido em *software* foi um programa de processamento de sinais em MATLAB 6.5 [25], cuja interface é apresentada na figura 6.3. Ele foi desenvolvido para auxiliar na análise dos sinais gravados e análise em frequência desses sinais. Com o auxílio desse programa, os testes de resposta em

frequência dos filtros foi realizado a partir da interface de áudio padrão do computador para a aquisição dos sinais.

A interface permite carregar arquivos de áudio no formato *wav*, calcular a FFT correspondente e mostrar o sinal em tempo e frequência. A partir do arquivo de som também são obtidos dados importantes como taxa de amostragem, duração do sinal, número de canais, número de amostras e resolução de amostragem.

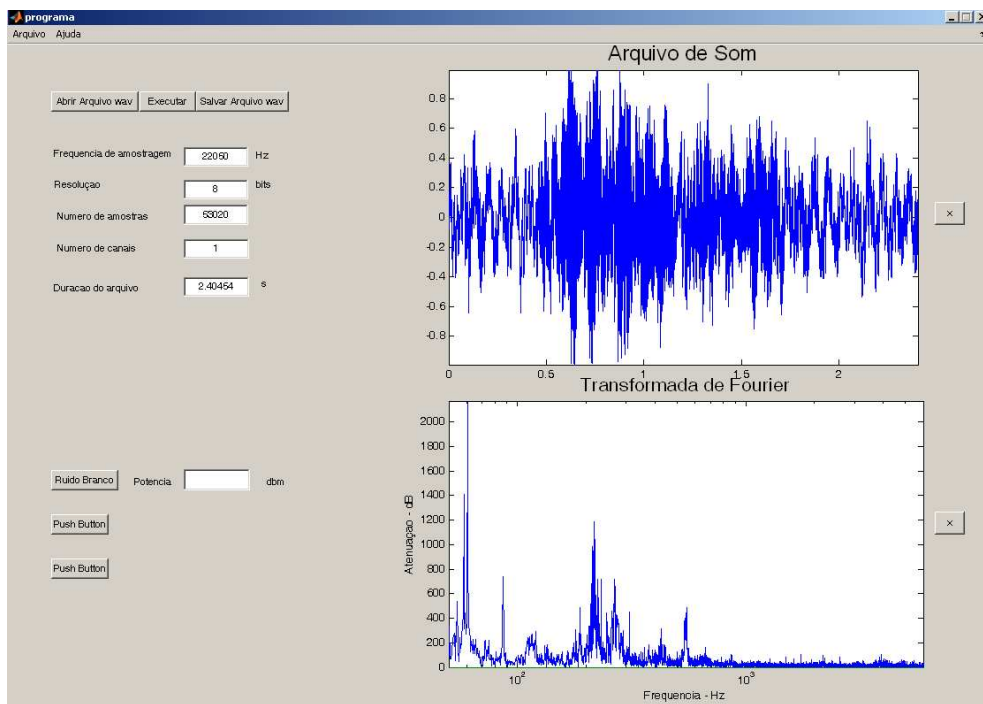


Figura 6.3: Programa de aquisição e tratamento desenvolvido em MATLAB

Esse programa tem integrado os códigos de aquisição tanto da placa de som primário do computador quanto da placa usb desenvolvida. Ele realiza a aquisição e demultiplexação dos 8 canais, desenha os sinais no tempo e frequência e pode-se ainda realizar filtragens digitais ou incluir ruídos em cada sinal.

Após a adequação do Hardware e do Software pra aquisição e transmissão via interface USB foi possível adquirir alguns sinais de microfones no computador. Esses resultados são mostrados na figura 6.4 onde os sinais de dois microfones, referentes aos microfones da Placa Filha foram coletados via Matlab.

O ambiente montado para os testes de aquisição são apresentados nas figuras II.5 e II.6. A partir dela pode-se verificar uma amostra do ambiente de testes e de funcionamento do protótipo.

O código em MATLAB desse programa foi aproveitado num segundo programa, capaz de mostrar na tela os sinais transmitidos a partir da captação de quatro microfones. O programa apresenta a resposta em

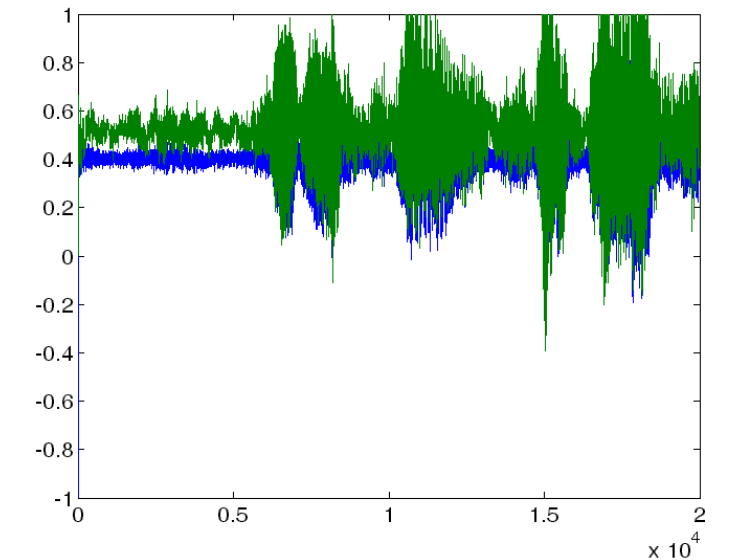


Figura 6.4: Resultado Aquisição de 2 canais

tempo e frequência. Além disso, é capaz de estimar a DOA resultante a partir dos algoritmos apresentados anteriormente aplicados a quatro canais. Todas essas ações são feitas quase em tempo real, a uma taxa de 1s.

Dessa forma, a cada 1s o ARM envia um *buffer* de amostras dos 4 canais. Essas amostras são demultiplexadas, depois é feita uma média do sinal para retirada de DC e por fim estima-se a DOA e apresenta-se os gráficos.

Como pode ser verificado, os resultados da figura 6.5 apresentam a estimação a partir de 4 canais em vez de 8 canais, como o projetado inicialmente. Essa mudança de projeto foi resultante de limitações no módulo USB do microcontrolador, o qual impôs uma limitação na taxa de transmissão das amostras. Fato esse que pode ser melhor explicado em [26].

Para manter o controle de versão do projeto, das placas de circuito impresso, manter um contato entre professor e aluno foi montado um servidor na internet. Ele tem serviço de ftp, http e ssh rodando em uma distribuição Linux. Com isso, foi possível acompanhar o desenvolvimento dos trabalhos da frente de *hardware* e da frente do *software*[26] por meio de atas das reuniões e distribuição de material bibliográfico. Concluído, esses serviços, juntamente com material explicativo do projeto serve de referência para outros grupos de pesquisa ao redor do mundo que também queiram trabalhar com arranjo de sensores. Uma fotografia da página é apresentada na figura 6.6

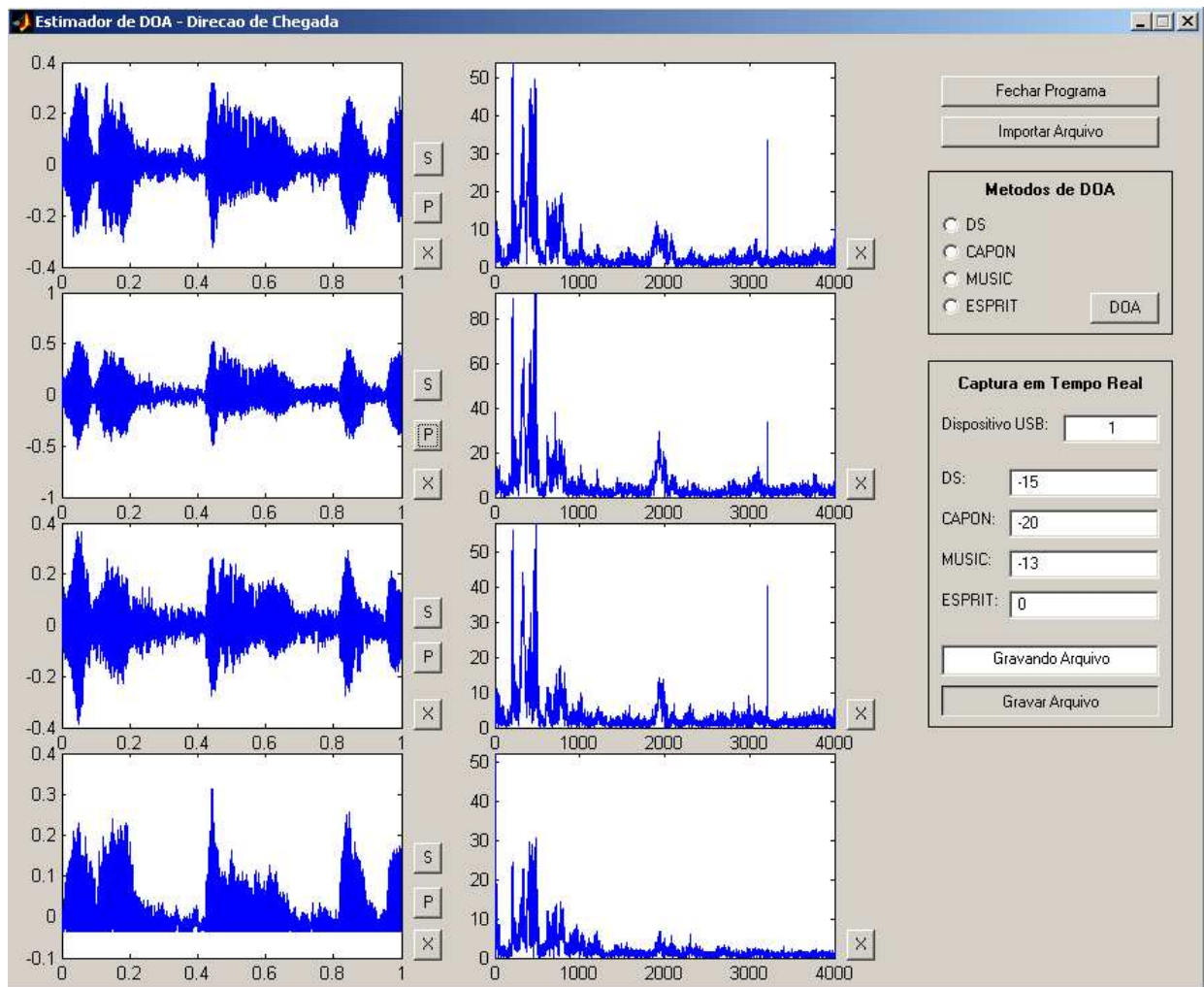


Figura 6.5: Placas de microfones

6.4 PROBLEMAS ENFRENTADOS

A confecção das placas de circuito impresso durou algumas semanas devido a quantidade de placas a serem produzidas, a demanda pela máquina de fresagem, e a necessidade de correções no projeto, o que resultou em alguns atrasos. Problemas com erros de *layout* implicaram em novas versões que também atrasaram a versão final da placa para testes.

Quanto a placa em si, o principal problema foi a tensão DC em que o sinal deveria estar centrado, e a baixa excursão do sinal entregue ao microcontrolador ARM. O diodo zener utilizado para gerar a tensão DC eleva a tensão acima do necessário, chegando a 2,5V, quando o ideal seria 1,6V. Esse fato passou a limitar ainda mais a excursão do sinal final de 1,5V.

Concomitantemente, o projeto passou a depender do programa embarcado no microcontrolador ARM para interfaceamento com o computador, o qual passou a apresentar problemas quando mais de dois canais

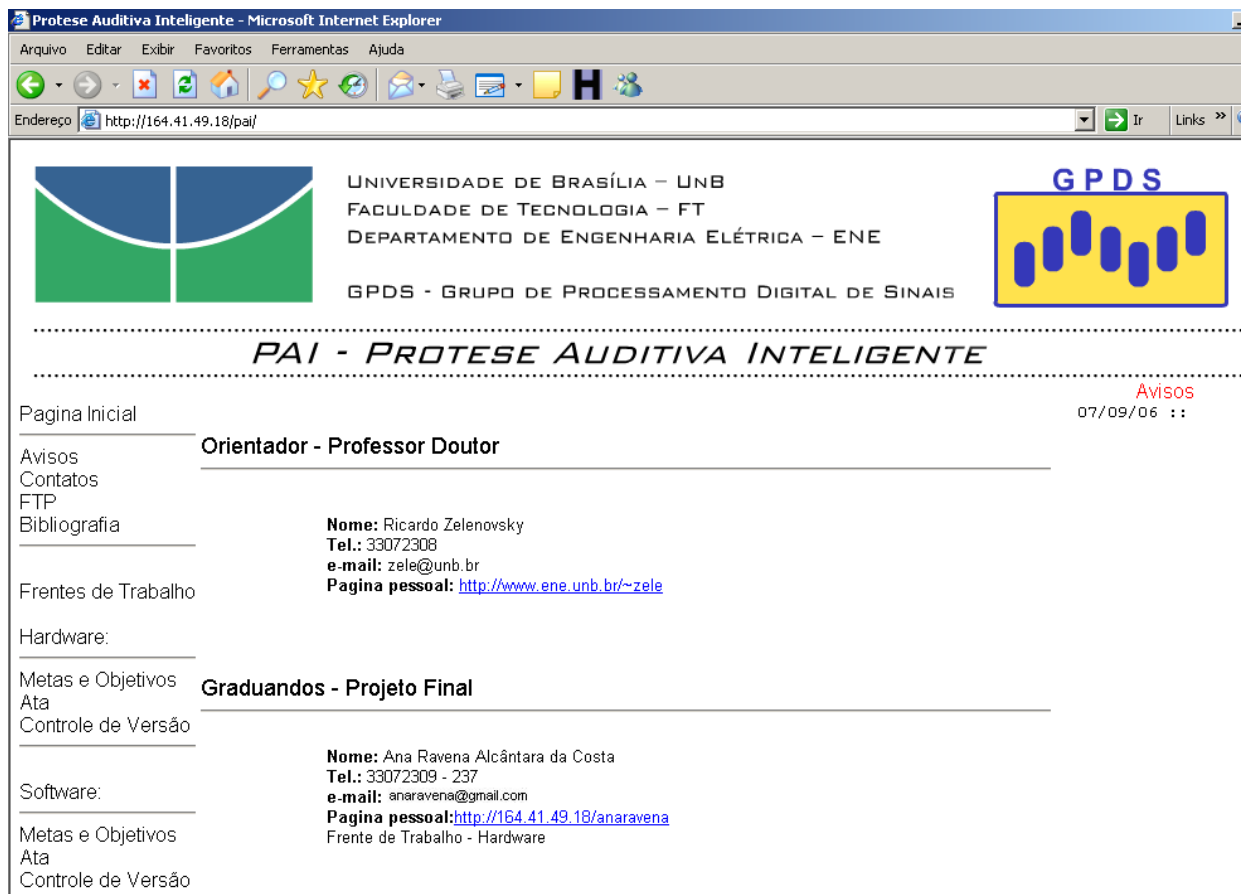


Figura 6.6: Página de internet criada para o grupo do projeto PAI

de áudio eram transferidos. Esse problema, quando solucionado resultou na limitação de quatro canais amostrados a $8kHz$ [26]. A necessidade de sincronia entre as duas frentes de trabalho, *hardware* e *software* passou então a ser um fator limitador na conclusão dos testes.

Por fim, os testes práticos de estimação da direção de chegada após a aquisição dos sinais foram realizados em um tempo reduzido, tendo em vista as dificuldades e atrasos. Os testes de estimação foram feitos, mas foram obtidos resultados incompatíveis entre os diferentes métodos, em especial o ESPRIT. Dessa forma, o projeto ficou carente de uma etapa de calibração tanto da placa, e termos de ganho e filtração, assim como em relação aos métodos de estimação. Havia a necessidade, ainda, de fazer vários testes práticos para a validação por completo da placa e verificação da adequação e da real necessidade de filtros analógicos e do *sample and hold*.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o último ano, período de realização deste projeto de graduação, foi projetado e testado um circuito que pudesse realizar a estimação da direção de chegada de um sinal mecânico em banda básica, mais especificamente, sinais de voz. A motivação do desenvolvimento deste projeto, como já explicitado na introdução e no decorrer do texto, vem de dois motivos, principalmente: do fator social agregado à utilização dos resultados do presente trabalho em uma prótese auditiva inteligente, capaz de identificar, diferenciar e classificar sinais de voz e de ruído, dando um peso proporcional à importância da fonte sonora; da possibilidade de extrapolar os resultados obtidos em banda base para sistemas de rádio, de telefonia de terceira e quarta geração, objetivando aumentar a capacidade do sistema por meio de múltiplo acesso por divisão de espaço, diminuir a ação de interferidores, e permitir reconfigurabilidade.

Dado que o caso de estimação de direção de chegada é um problema matemático, quaisquer sistemas que façam uso de arranjo de sensores pode tirar proveito dos resultados obtidos, bastando adequação da frequência, um *front-end* RF, por exemplo, e de parâmetros de acoplamento e multipercuro.

Para atender aos requisitos de reconfigurabilidade, além de otimizar o tempo de mercado e diminuir os custos associados ao protótipo, a placa de aquisição, com os filtros e amplificadores de excursão, devem ser substituídos, em uma próxima fase, por processamento digital. Os filtros projetados atendem às necessidades locais do projeto, mas impedem o uso do *hardware* digital por outro tipo de interface analógica de sinais que não seja de banda estreita na faixa da voz.

Um outro ponto considerável é o tamanho, comparado à função que ele pretende desempenhar. Para uma prótese, é inviável circuitos que: tenha alto consumo; necessitem de interface com um computador; sejam desconfortáveis ou diminuam qualquer mobilidade do indivíduo. Assim, a próxima versão deve ser totalmente integrada com componentes SMD, *surface mount device* de baixo consumo e de preferência integrados em uma única pastilha de silício. A UnB, Universidade de Brasília, dispõe de técnicas de desenvolvimento de sistemas integrados em chip, *SoC*, podendo compartilhar esforços para esse fim. Uma segunda solução de integração, como visto no capítulo 4, são os FPGAs. As técnicas de descrição de *hardware*, aliadas à versatilidade de se ter *hardware* digital com processadores em *software* no mesmo circuito integrado estão aparecendo com cada vez mais frequência nos sistemas eletrônicos embarcados.

O atual estado da arte, no que diz respeito à sistemas embarcados, levando em conta as novas ferramentas de desenvolvimento de *software*, prevê, inclusive, um sistema operacional de tempo real em execução

no dispositivo. A arquitetura ARM é compatível com isso.

Por último, os resultados alcançados durante um ano de pesquisa não são somente os apresentados nesta monografia. O aprendizado prático, a oportunidade de escrever um texto, montar uma placa, escrever um programa, trabalhar com pessoas de outras áreas, outros grupos, é sempre edificante.

Como continuação desse projeto, sugere-se a validação dos resultados obtidos com os sinais para diversas fontes sonoras e processamento em tempo real com a classe de áudio da USB. Transcrição dos códigos em MATLAB para C a fim de rodá-los no processador ARM, alteração da comunicação USB para a versão 2.0 *Hi-Speed*, redesenho e reprojetado dos filtros e da placa de aquisição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GARCIA, F. A. C. et al. Estimation of doa for a smart antenna using a front-end based in fpga foreseeing a sdr architecture. In: *The first European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2006*. [S.l.: s.n.], 2006.
- [2] YUEN, N.; FRIEDLANDER, B. Doa estimation in multipath: An approach using fourth-order cumulants. In: *IEEE Transactions on Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 1997.
- [3] KISHIGAMI, T.; FUKAGAWA MAKOTO HASEGAWA, T. A. H. I. T. A study on the experimental sector switched antenna by doa estimation for mobile video transmission. In: *IEEE*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 1040–1044.
- [4] ZELENOVSKY, R. *Emprego de arranjo de antenas na recuperação de dados digitais em ambiente CDMA*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- [5] JIAN, M.; KOT, A. C.; ER, M. H. Doa estimation of speech source with microphone arrays. In: *IEEE*. [S.l.: s.n.], 1998. p. v293–v296.
- [6] YU, Z.; RAHARDJA, S. Doa estimation using two closely spaced microphones. In: *IEEE*. [S.l.: s.n.], 1997. p. II 193–II 196.
- [7] COSTA, J. P. C. L. da. *Desenvolvimento de Modelos, Técnicas e Aplicações para Arranjos de Sensores*. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.: [s.n.], 2006.
- [8] LIMA, A. G. M.; MENEZES, L. R. A. X. de; ZELENOVSKY, R. Dfoa — a new application of smart antennas in software defined radios. In: *International Microwave and Optoelectronics Conference - IEEE*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [9] MUNHOZ, R. A.; TORRES, A. M. V. L. *Vez da Voz — Audição e surdez: O que é a perda auditiva e como tratá-la*. [S.l.]: Serviço de Indicação e Adaptação de Próteses Auditivas do Núcleo de Audiologia e Próteses Auditivas Campinas Ltda — Unitron, 2003.
- [10] [S.l.], 1980. Disponível online <http://www.rnid.org.uk/>.
- [11] [S.l.], 2000. Disponível online <http://www.ibge.gov.br/>.

- [12] ALMEIDA, K.; IÖRIO, M. *Próteses Auditivas - Fundamentos teóricos e Aplicações clínicas*. [S.l.]: Ed. Lovise, São Paulo, 1996.
- [13] GODARA, L. C. Application of antenna arrays to mobile communications, part ii: Beamforming and direction-of-arrival considerations. *Proc. of IEEE*, Vol. 85, No. 8, Agosto, pp. 1195-1245, 1997.
- [14] CAPON, J. High resolution frequency-wavenumber spectral analysis. *Proc of IEEE*, Vol. 57, No. 8, pag. 1408-1418, 1969.
- [15] SCHMIDT, R. Multiple location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, No. 3, Março, pag. 276-280, 1986.
- [16] SCHMIDT, R. O.; FRANKS, R. E. Multiple source df signal processing: An experimental system. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, No. 3, Março, pp.281-290, 1986.
- [17] PAULRAJ, A.; ROY, R.; KAILATH, T. Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques-esprit. In: *Proc. 19th Asilomar Conf. Circuits, Syst. Comput., Asilomar, CA, Nov. 1985*. [S.l.: s.n.], 1985.
- [18] ACÇÕES integradas sobre o sentido da audição. [S.l.], 1994. Disponível online <http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva>.
- [19] INSTITUTO de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto. [S.l.], 2000. Disponível online <http://telecom.inescporto.pt/>.
- [20] PERDIGÃO, F. S.; Sá, L. V. de. *Modelo Computacional da Cóclea Humana*. [S.l.], 2000. Disponível online <http://www.co.it.pt/si/sipub/fp98cp01.pdf>.
- [21] [S.l.], 2003. Disponível online <http://www.ti.com>.
- [22] [S.l.], 2003. Disponível online <http://www.national.com>.
- [23] SILVA, F. B. da et al. Development of a testbed to intelligent systems on software defined radio. In: *International Microwave and Optoelectronics Conference - IEEE*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [24] LIMA, A. G. M.; MENEZES, L. R. A. X. de. Determination of the multipath profile of arrival through the use of the time correlation and of an array antenna. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium - IEEE*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [25] MATLAB Version 6.5.0.180913a Release 13 License Number:242255. 2000.

- [26] SASAKI, M. G.; CAIXETA, O. V. *Desenvolvimento de uma Interface USB para Aquisição de Dados de um Arranjo de Microfones: Aplicação em Prótese Auditiva*. 98 p. Monografia (Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Dezembro 2006.

I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS E LISTA DE MATERIAIS

I.1 LISTA DE MATERIAIS

I.1.1 Placa Mãe

Tabela I.1: Lista de Materiais Placa Mãe

Descrição	Designação	Quantidade	Valor
Capacitor Eletrolítico	C1, C2, C27, C28	4	10uF
Capacitor	C11, C22, C23, C26, C37, C40, C49, C52, C53	9	10nF
Capacitor	C5, C6, C17, C18, C31, C32, C43, C44	8	6,8nF
Capacitor	C3, C4, C7, C8, C9, C10, C14, C15, C16, C19, C20, C21, C29, C30, C33, C34, C35, C36, C41, C42, C45, C46, C47, C48, C54, C55	26	100nF
Capacitor	C12, C13, C24, C25, C38, C39, C50, C51	8	1,5nF
Resistor	R50, R51, R52, R53	4	200K
Resistor	R9, R10, R21, R22, R33, R34, R45, R46	8	62K
Resistor	R54, R55, R56, R57, R58, R59, R60, R61	8	47K
Resistor	R5, R6, R17, R18, R29, R30, R41, R42	8	18K
Resistor	R11, R12, R23, R24, R35, R36, R47, R48	8	12K
Resistor	R1, R2, R3, R4, R7, R8, R13, R14, R15, R16, R19, R20, R25, R26, R27, R28, R31, R32, R37, R38, R39, R40, R43, R44	24	4K53
Resistor	R49	1	2K2
Resistor Variável	R62, R63, R64, R65, R66, R67, R68, R69	8	200K
Jack 3 condutores	J1, J2, J3, J4	4	-
Header, 10-Pinos	JP22	1	-
Header, 14-Pinos	JP21	1	-
Header, 2-Pinos	JP17, JP18	2	-
Header, 3-Pinos	JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6, JP7, JP8, JP9, JP10, JP11, JP12, JP13, JP14, JP15, JP16	16	-
Header, 7-Pinos	JP19, JP20, JP23, JP24	4	-
Amplificador Operacional	U1, U2, U3, U4, U6, U7	6	-
Sample Hold 4 canais	U5	1	-
Diodo Zener	D1	1	-

I.1.2 Placa Filha

Tabela I.2: Lista de Materiais Placa Filha

Descrição	Designação	Quantidade	Valor
Capacitor Eletrolítico	C55, C56	2	1000uF
Capacitor Eletrolítico	C1, C2, C27, C28	4	10uF
Capacitor Eletrolítico	C57, C58	2	100uF
Capacitor	C3, C4, C7, C8, C9, C10, C15, C16, C19, C20, C21, C22, C29, C30, C33, C34, C35, C36, C41, C42, C45, C46, C47, C48, C53, C54, C59, C60	28	100nF
Capacitor	C11, C14, C23, C26, C37, C40, C49, C52	8	10nF
Capacitor	C5, C6, C17, C18, C31, C32, C43, C44	8	6,8nF
Capacitor	C12, C13, C24, C25, C38, C39, C50, C51	8	1,5nF
Resistor	R1, R2, R3, R4, R7, R8, R13, R14, R15, R16, R19, R20, R25, R26, R27, R28, R31, R32, R37, R38, R39, R40, R43, R44	24	4K53
Resistor	R9, R10, R21, R22, R33, R34, R45, R46	8	62K
Resistor	R5, R6, R17, R18, R29, R30, R41, R42	8	18K
Resistor	R11, R12, R23, R24, R35, R36, R47, R48	8	12K
Resistor	R49, R50, R51, R52	4	200K
Diodo Retificador	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8	-
Jack 3 condutores	J1, J2, J3, J4	4	-
Jack Fonte	J5, J6	2	-
Header, 2-Pinos	JP17, JP18	2	-
Header, 3-Pinos	JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6, JP7, JP8, JP9, JP10, JP11, JP12, JP13, JP14, JP15, JP16	16	-
Header, 7-Pinos	JP19, JP20	2	-
Sample Hold 4 canais	U5	1	-
Amplificador Operacional	U1, U2, U3, U4	4	-
Regulador 5V	U6	1	-
Regulador -5V	U7	1	-

I.2 ESQUEMÁTICOS

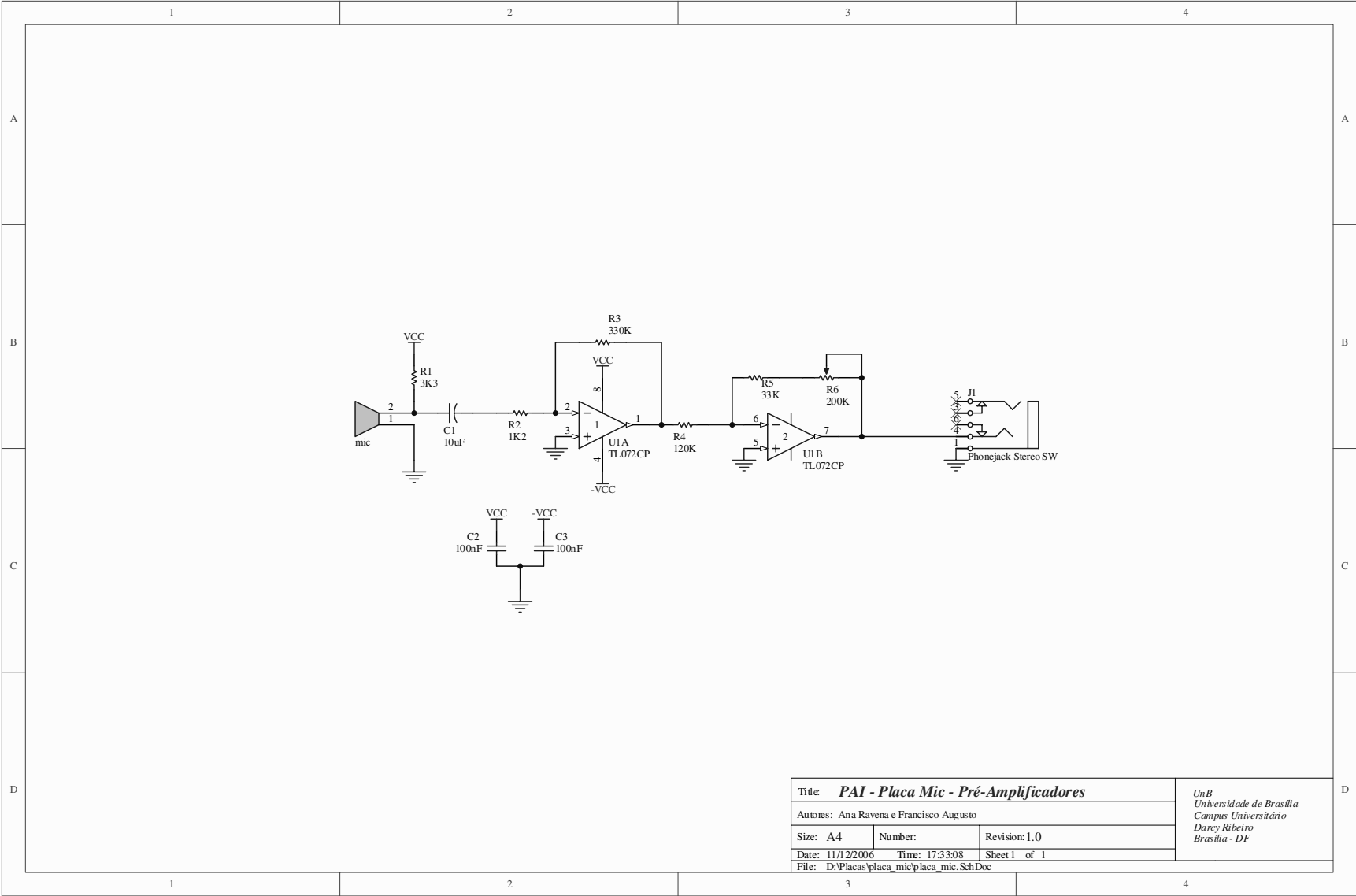


Figura I.1: Diagramas da placa de microfone

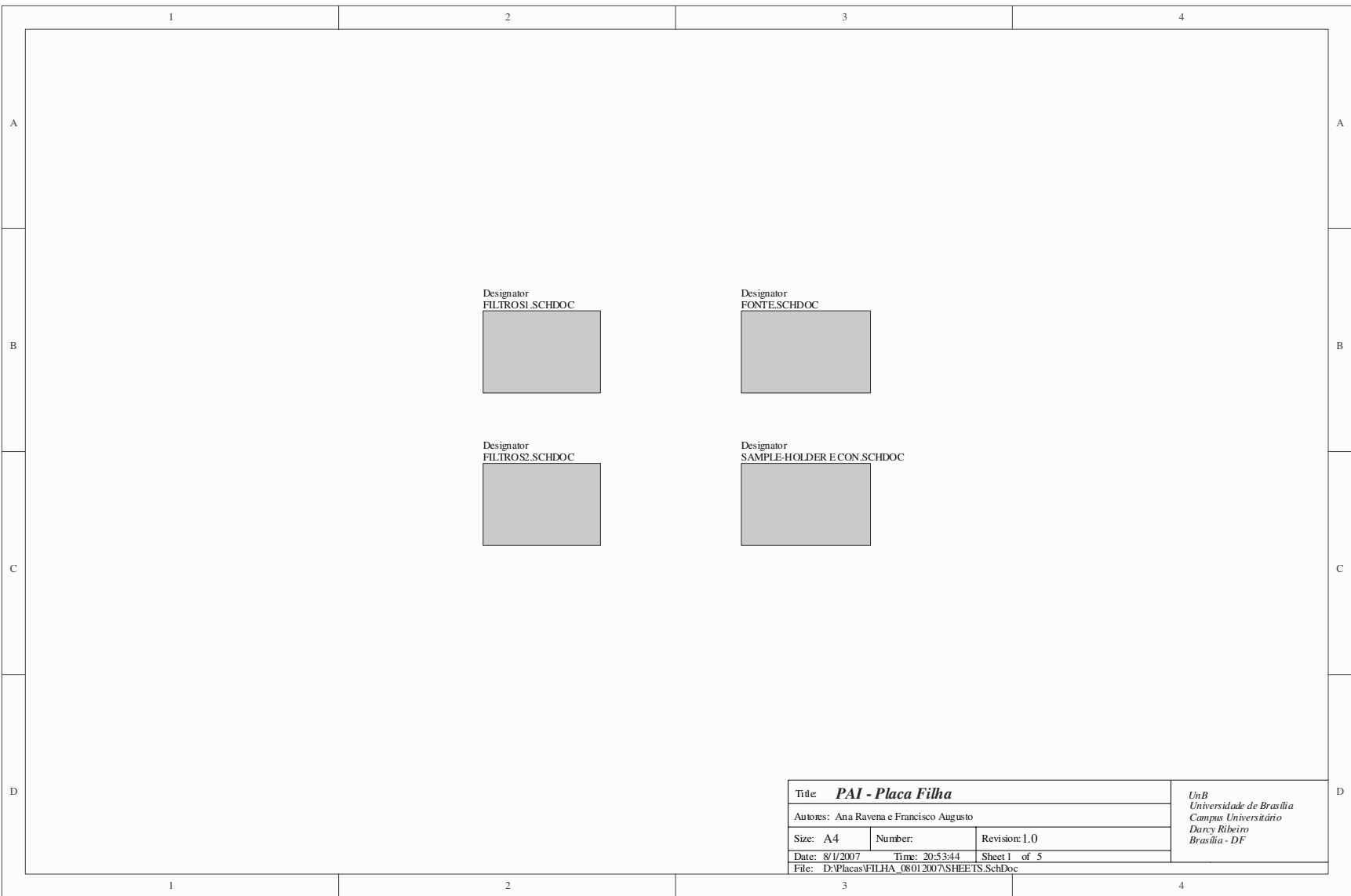
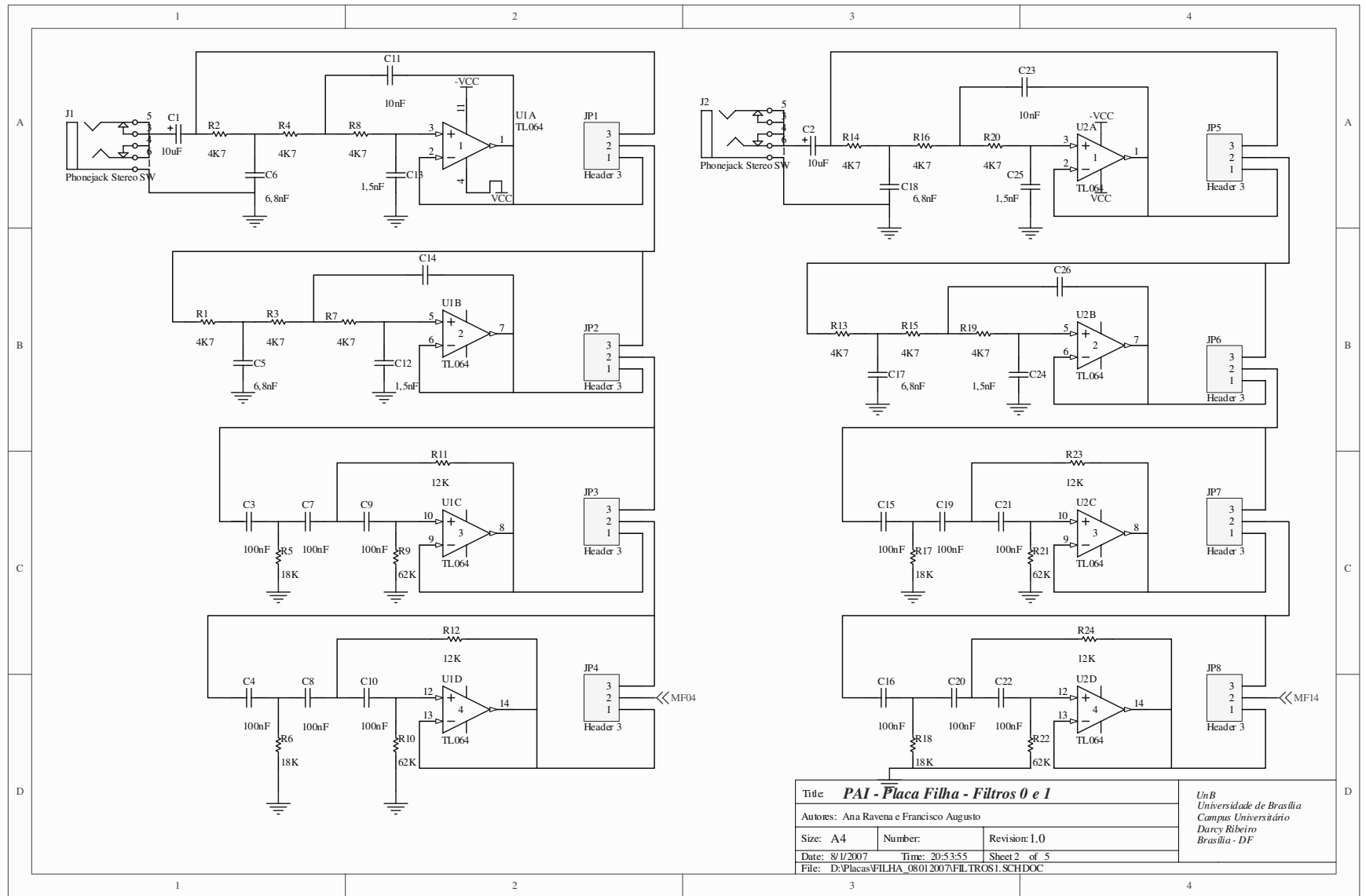


Figura I.2: Diagramas de blocos da placa filha



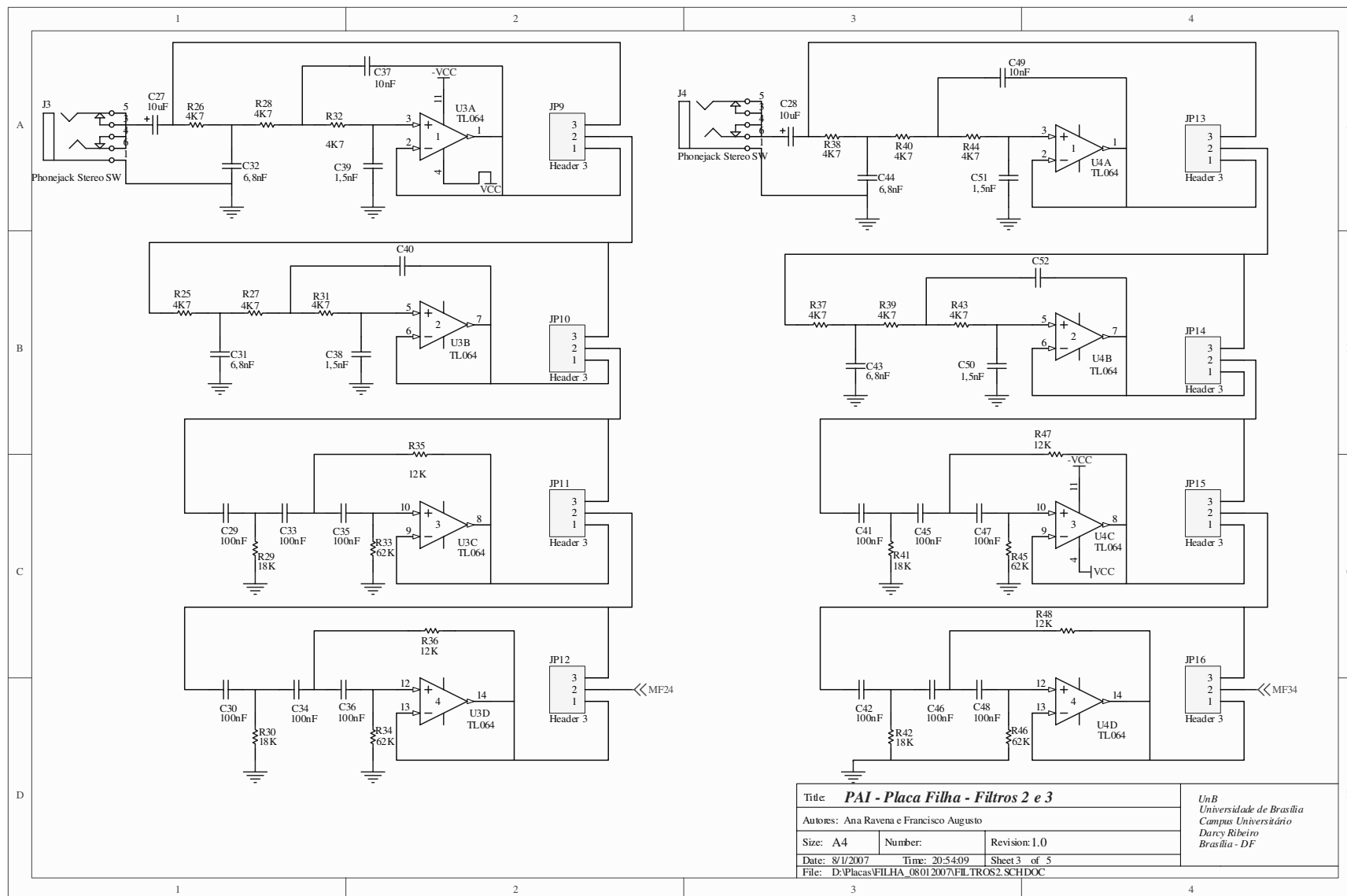


Figura I.4: Placa Filha - filtros 2 e 3 - 2 passa-baixas e 2 passa-altas

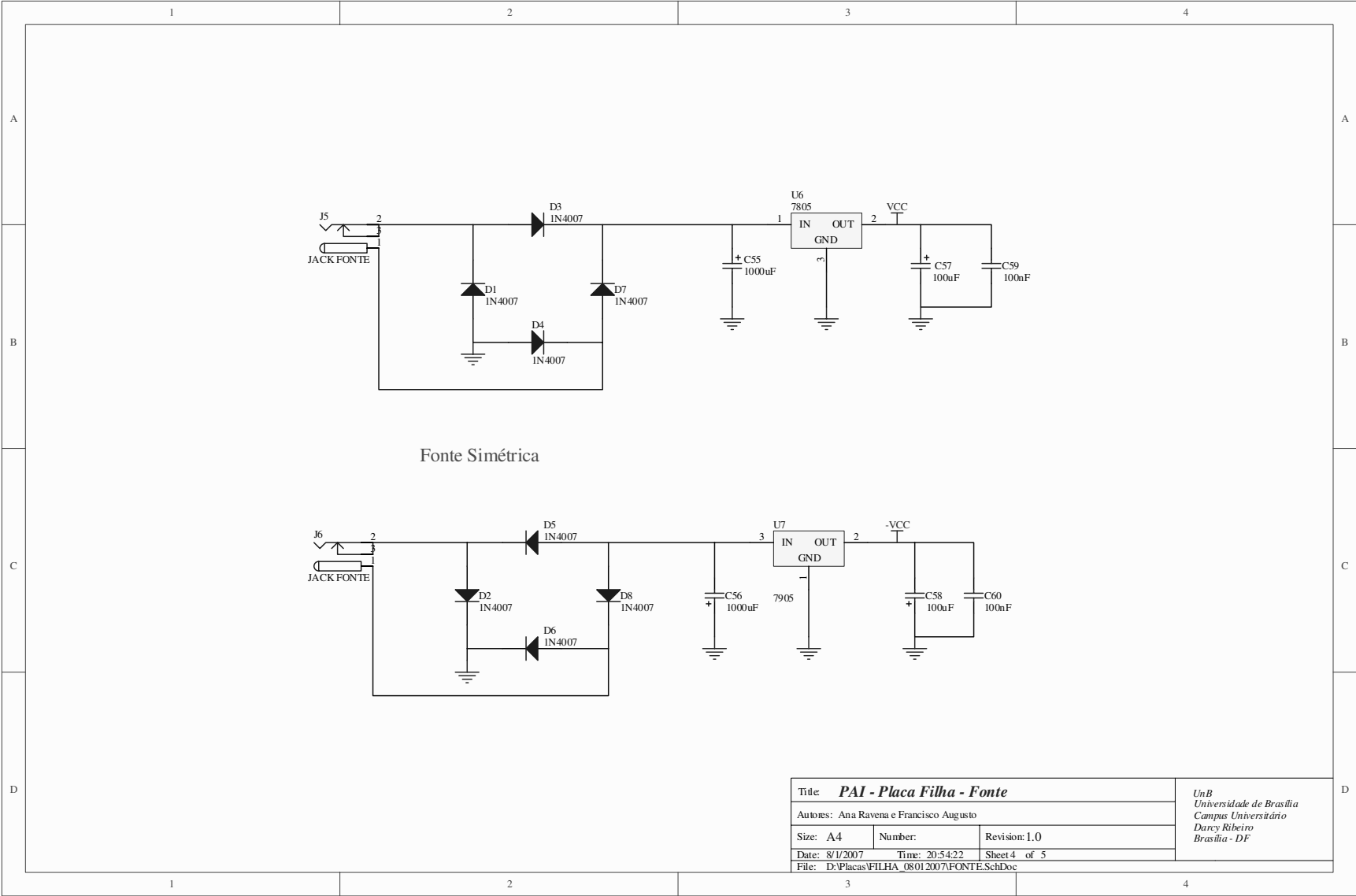


Figura I.5: Placa Filha - Esquemático da alimentação para as placas pela placa filha

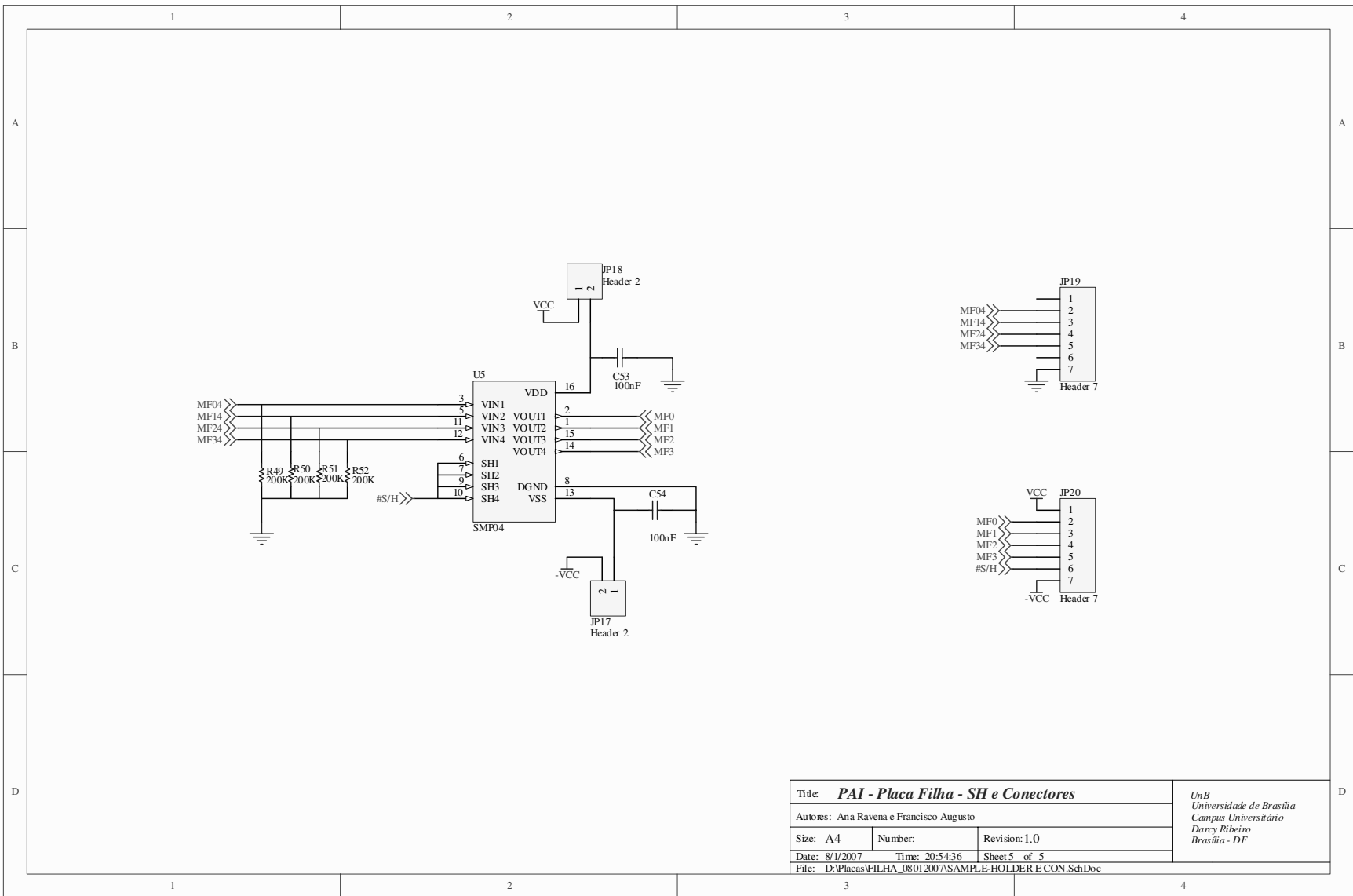


Figura I.6: Placa Filha - sample and hold e conectores

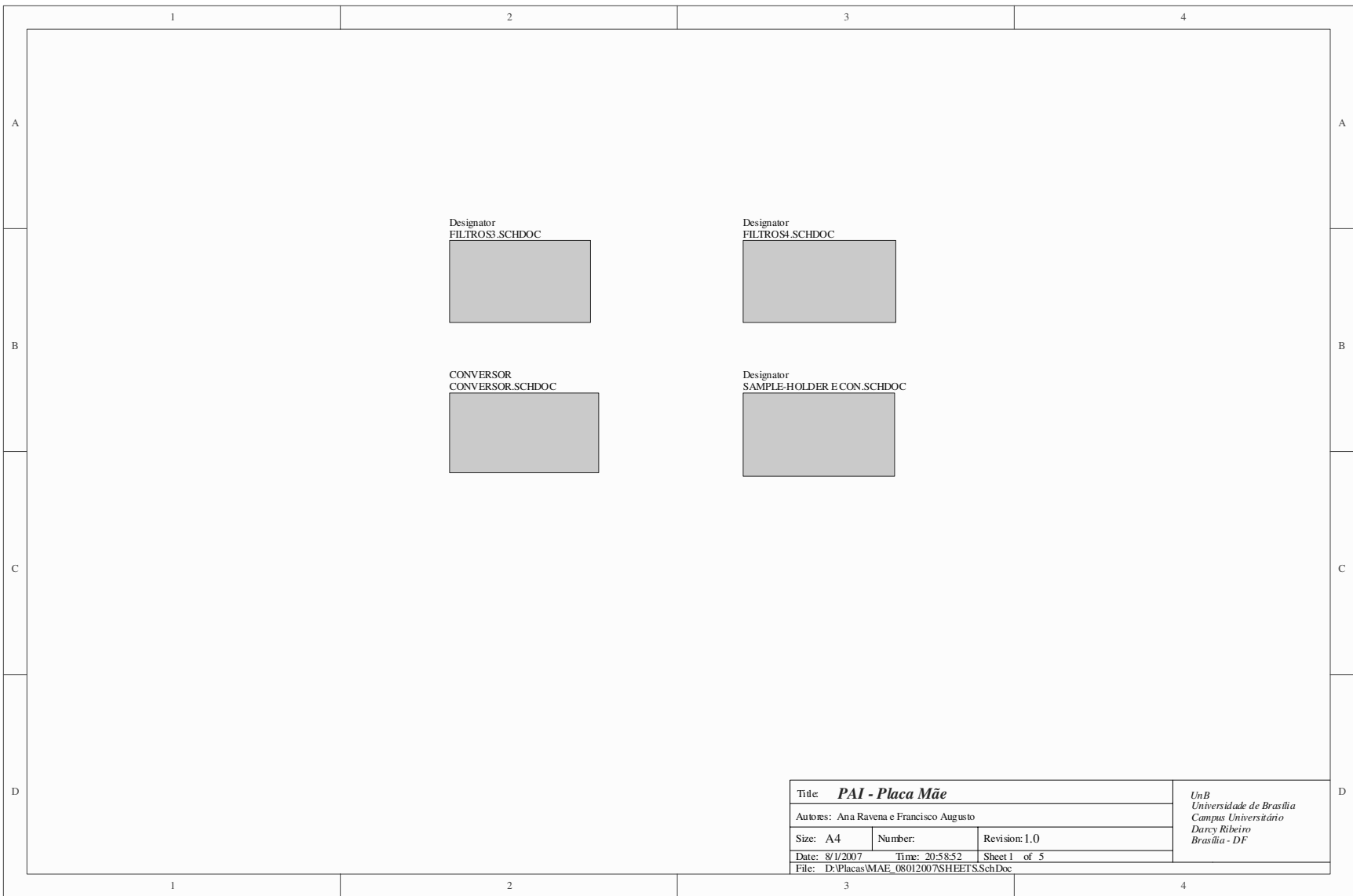
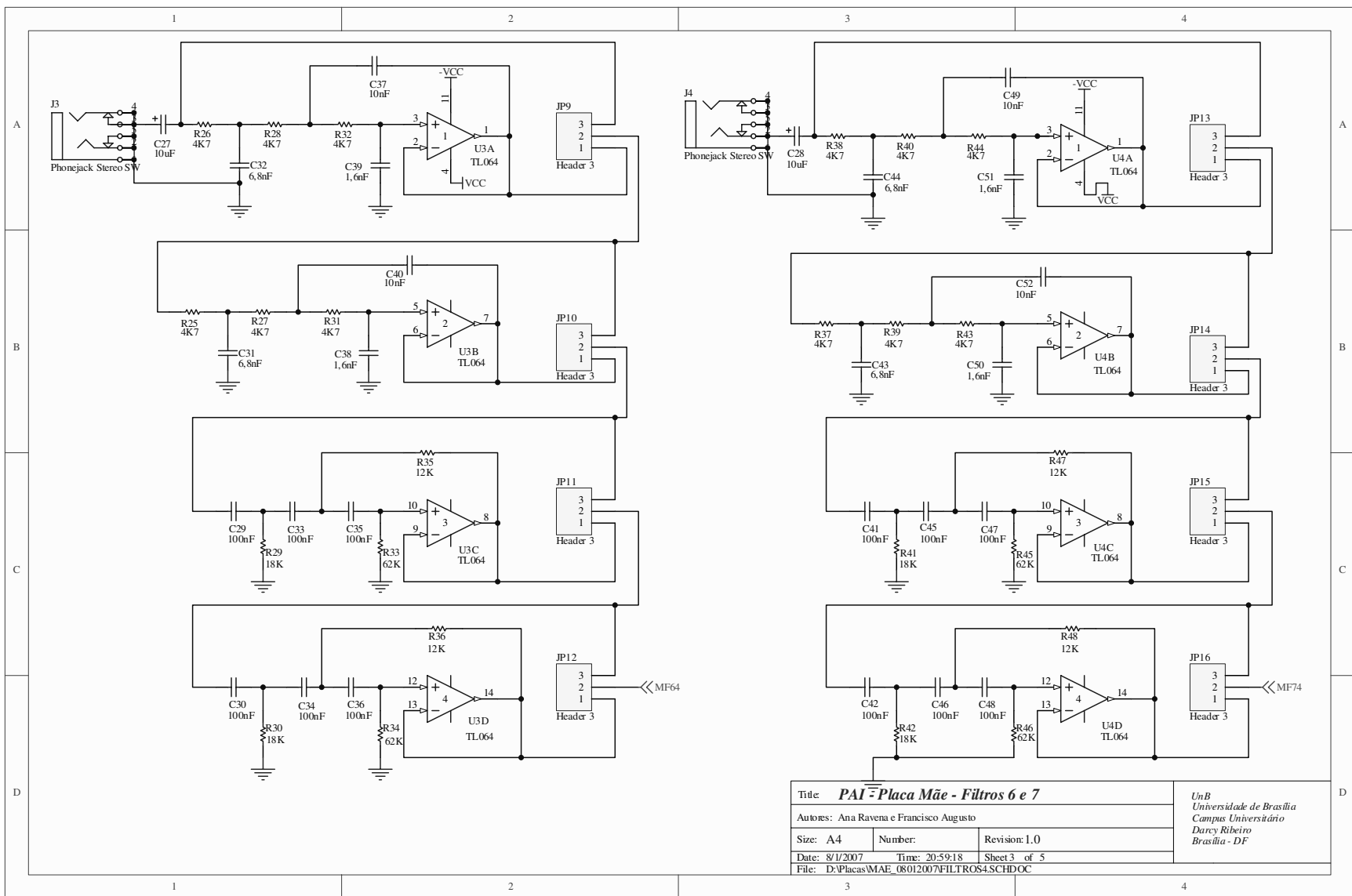


Figura I.7: Diagramas de blocos da placa mãe



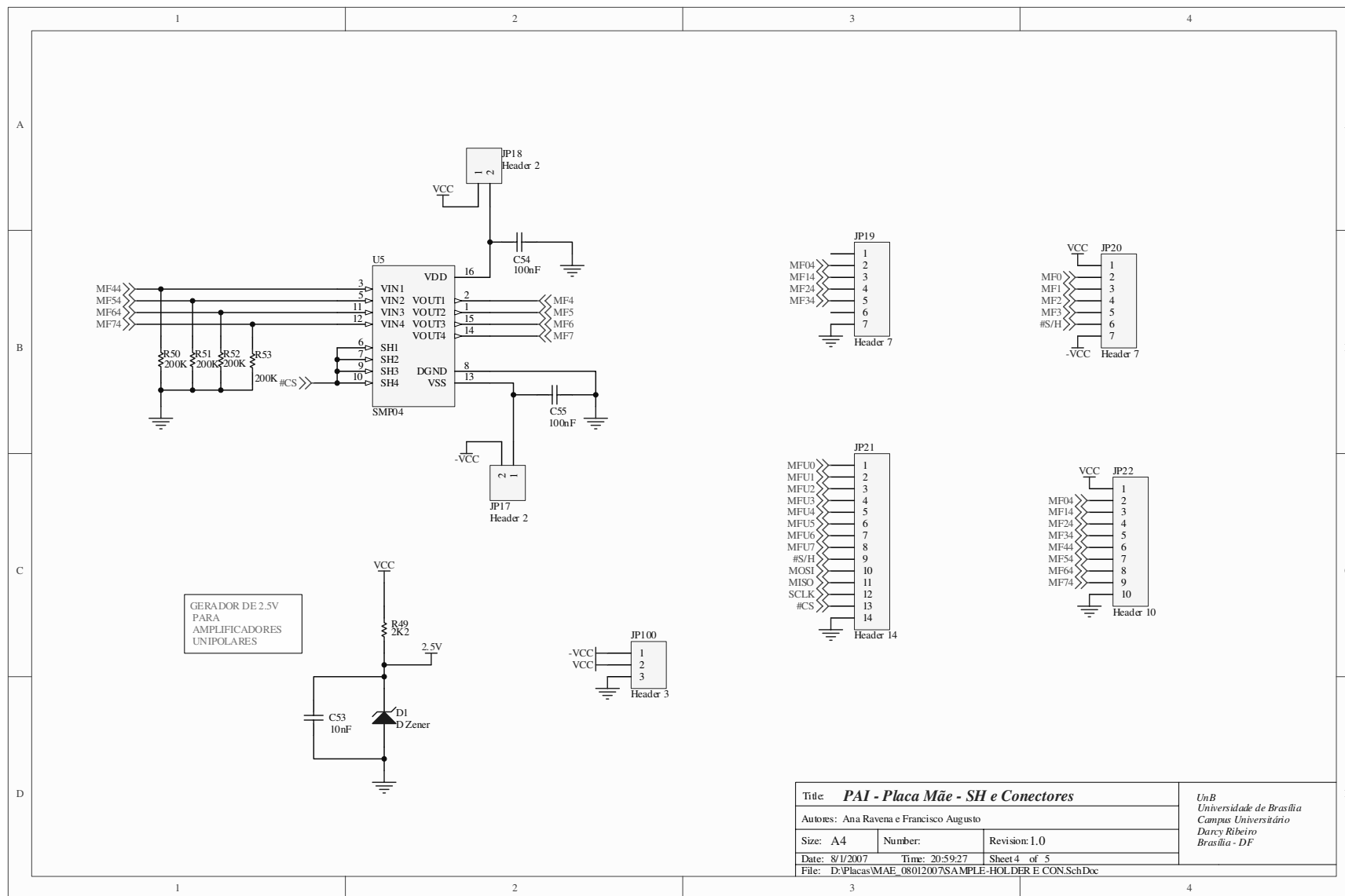
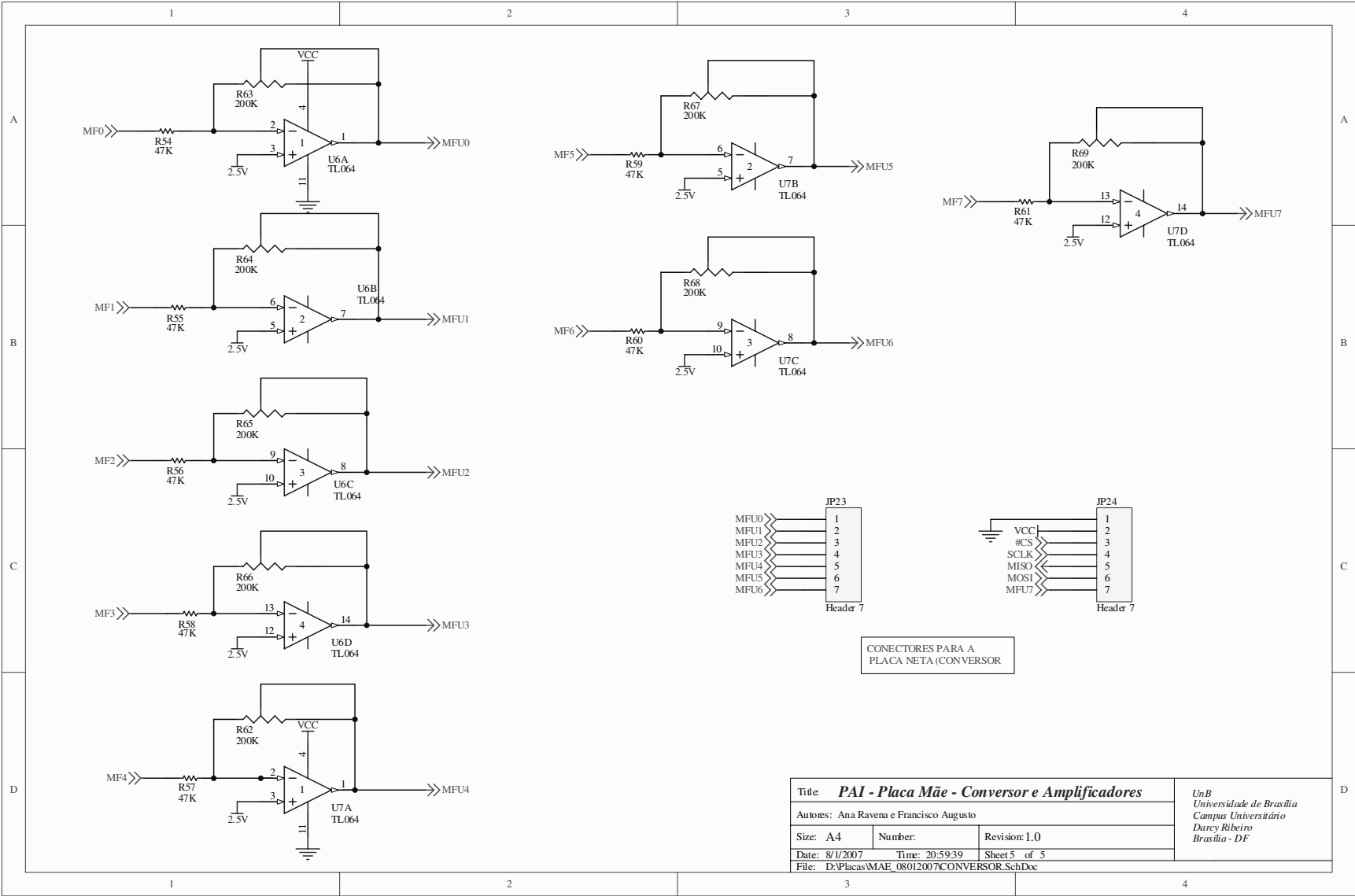


Figura I.10: Placa Mãe - sample and hold e conectores



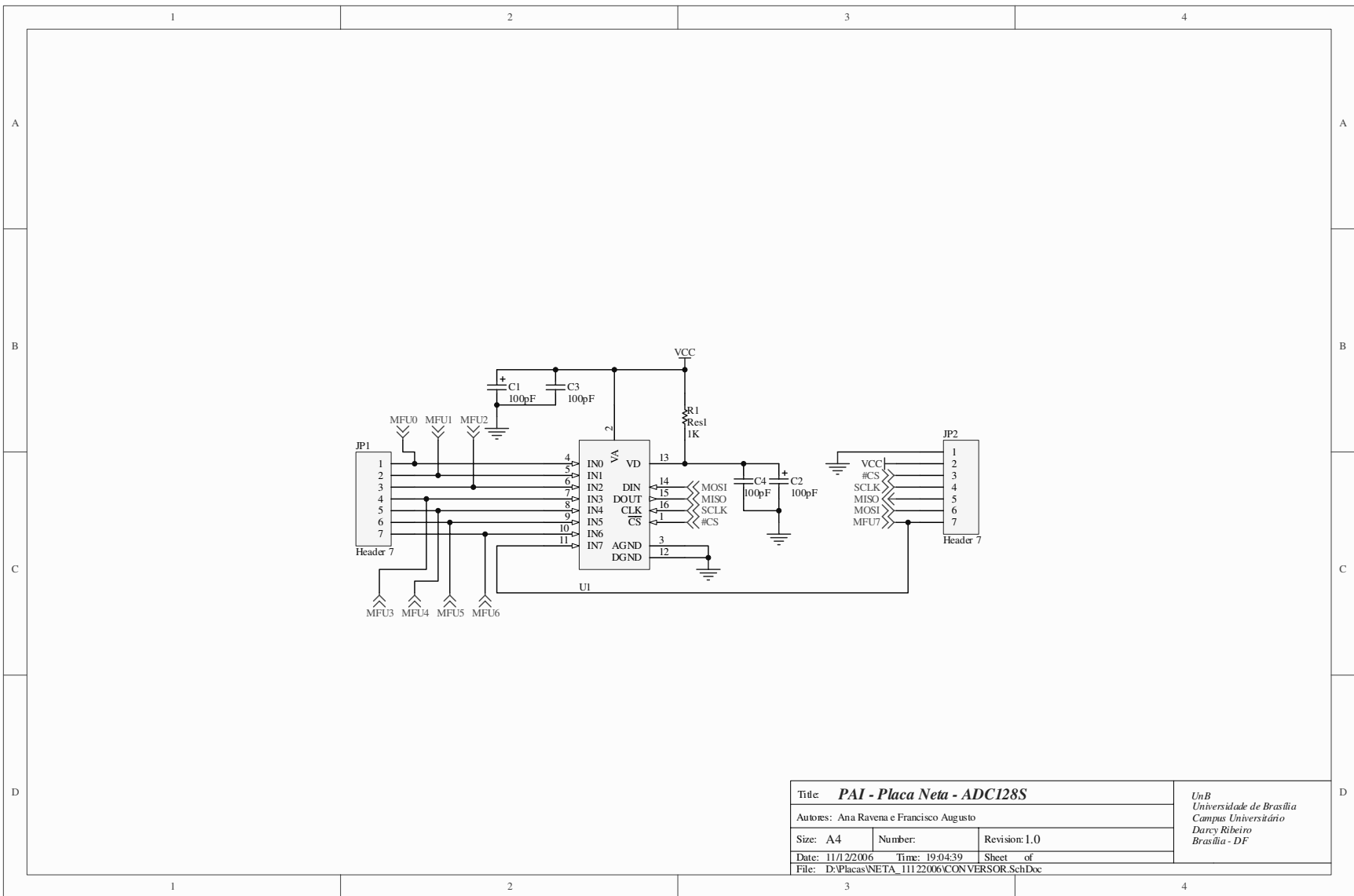


Figura I.12: Diagramas da placa neta - Conversor analógico-digital ADC128S

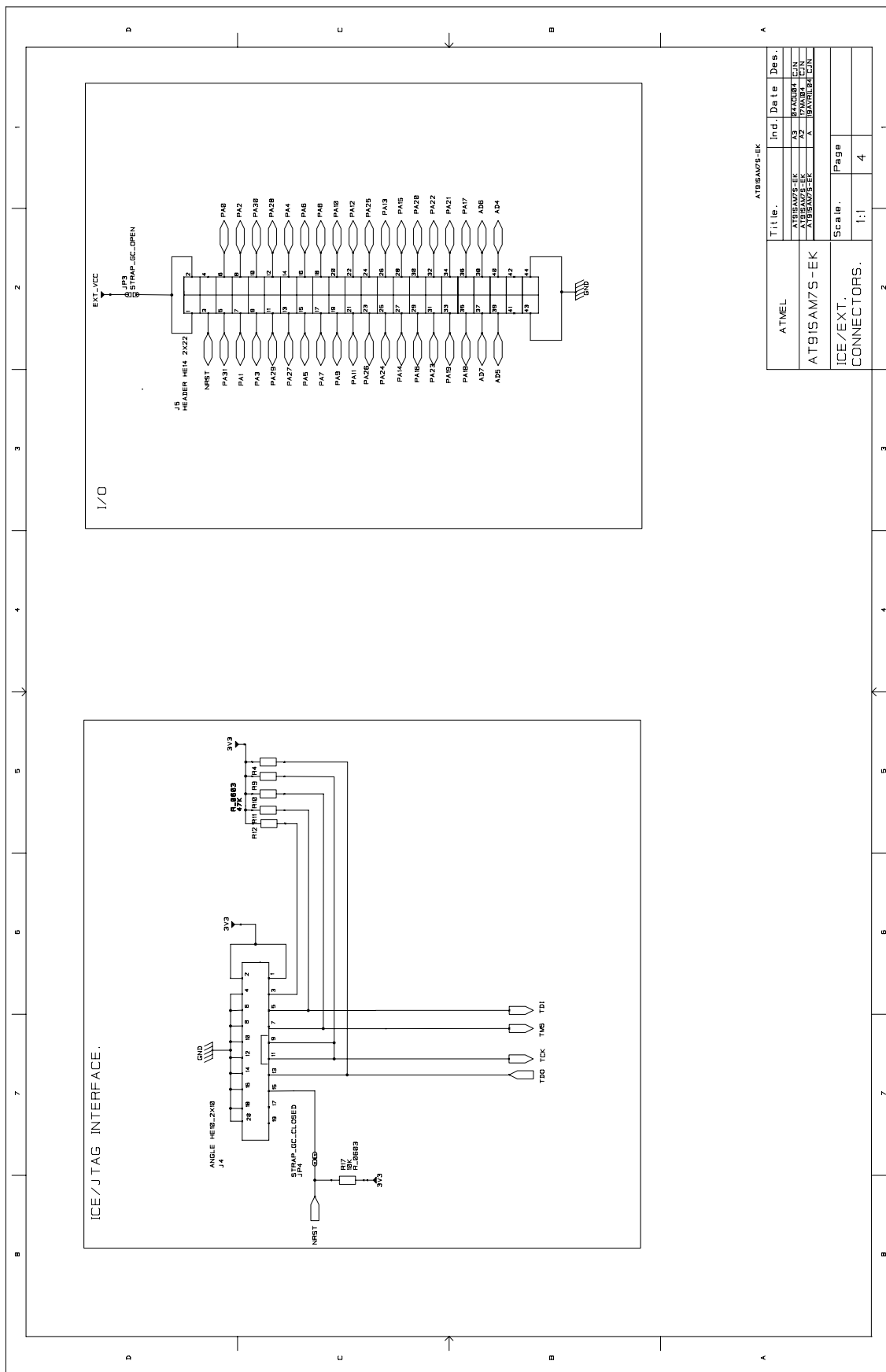
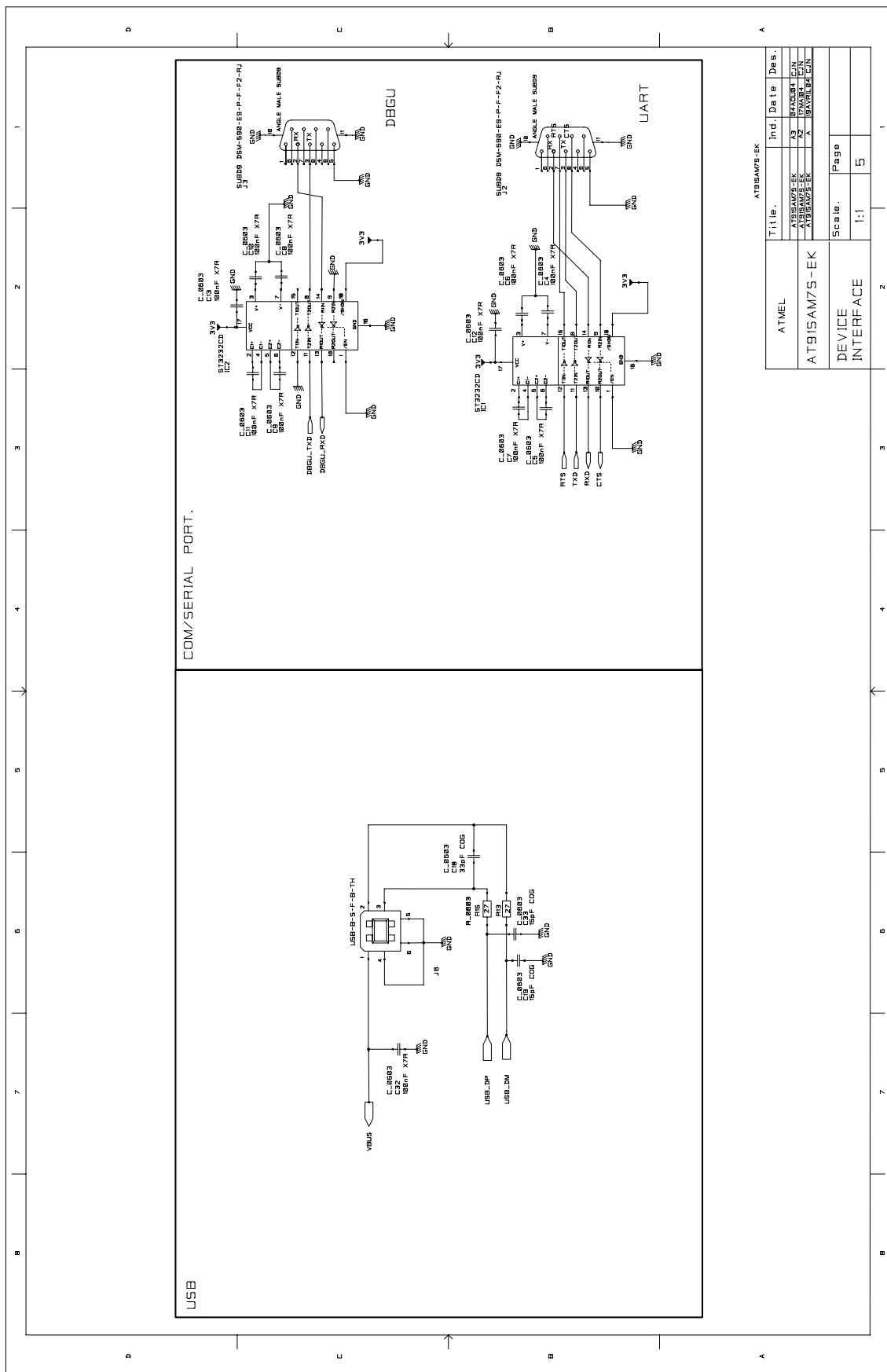


Figura I.15: Diagrama de conexões externas dos pinos do ARM



II. PCB E FOTOS

II.1 PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

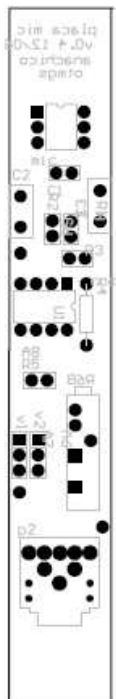


Figura II.1: Placa de circuito impresso - placa Mic

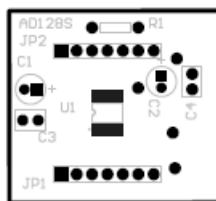


Figura II.2: Placa de circuito impresso - placa Neta

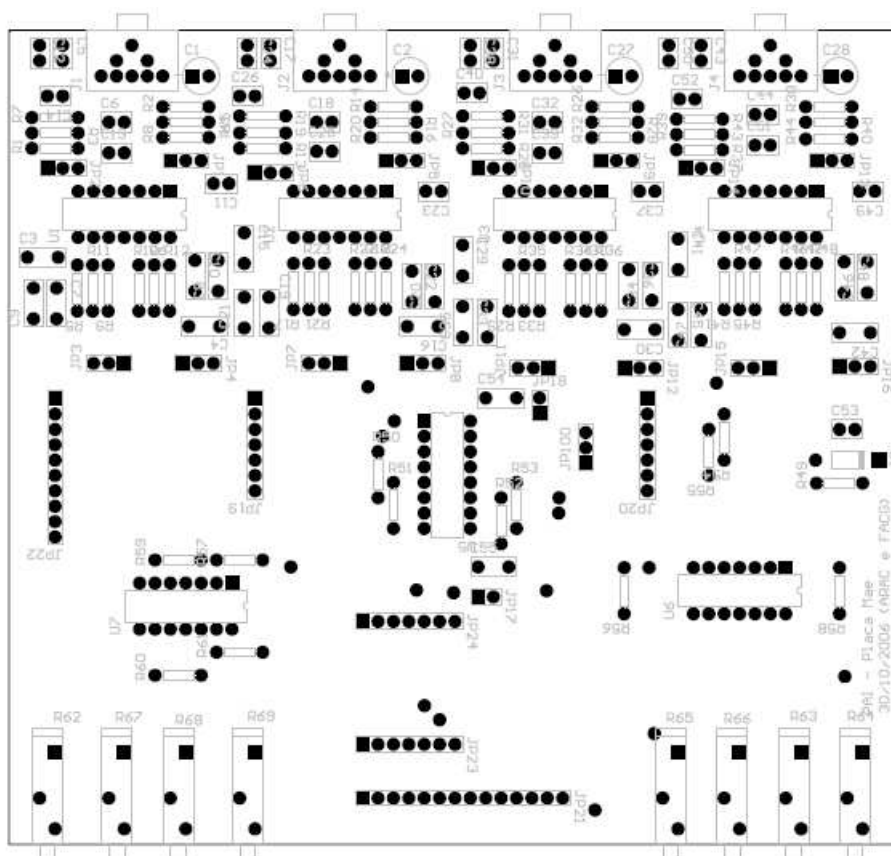


Figura II.3: Placa de circuito impresso - placa Mãe

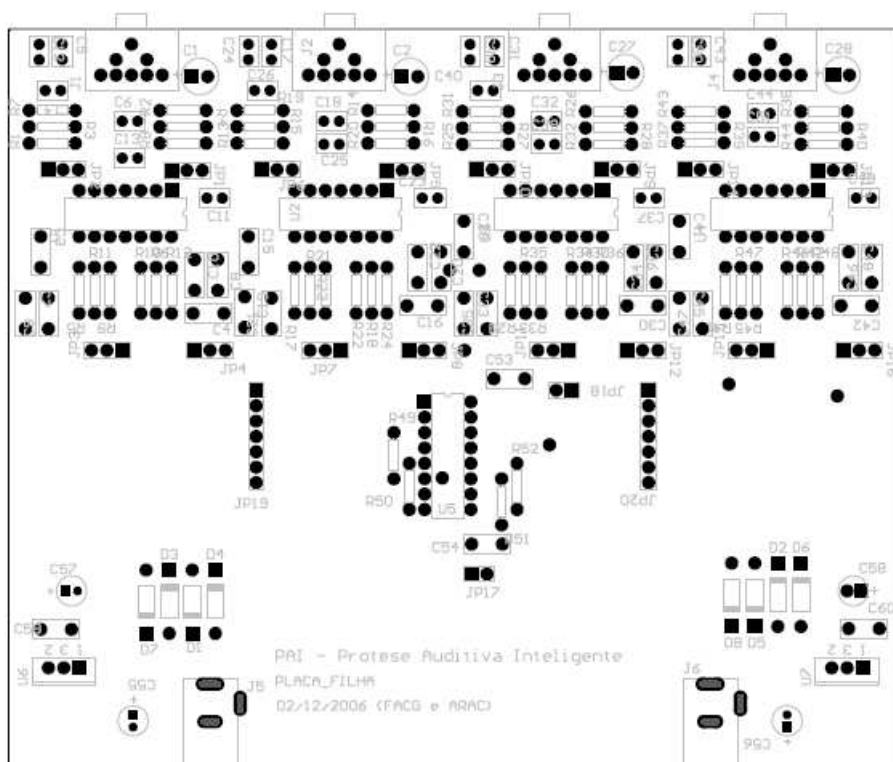


Figura II.4: Placa de circuito impresso - placa Filha

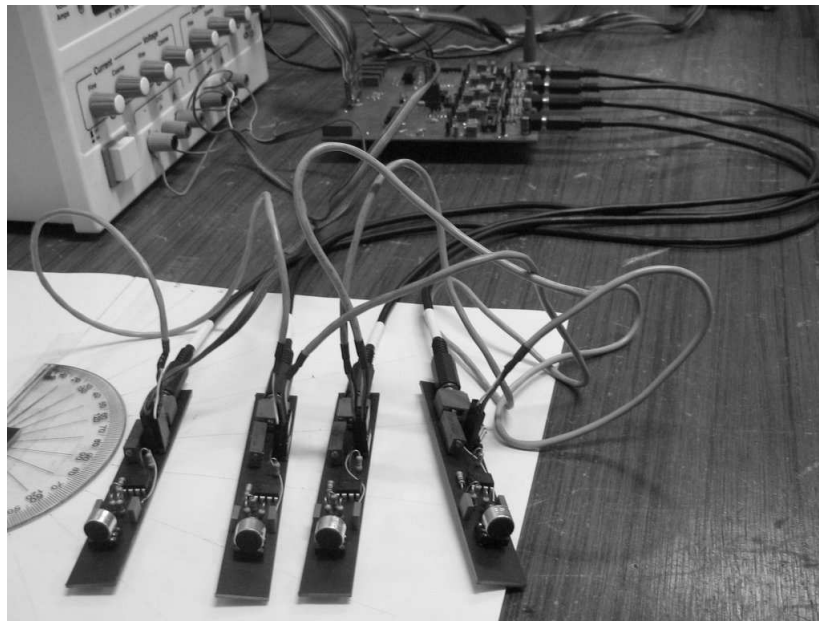


Figura II.5: Placas de microfones

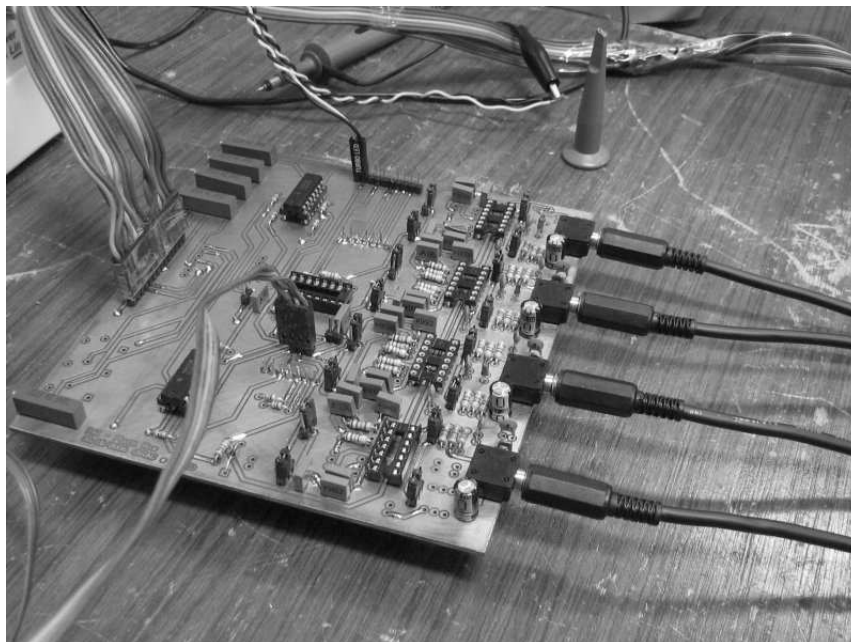


Figura II.6: Placa mãe - 4 filtros, 4 *sample and hold*, amplificadores e ADC

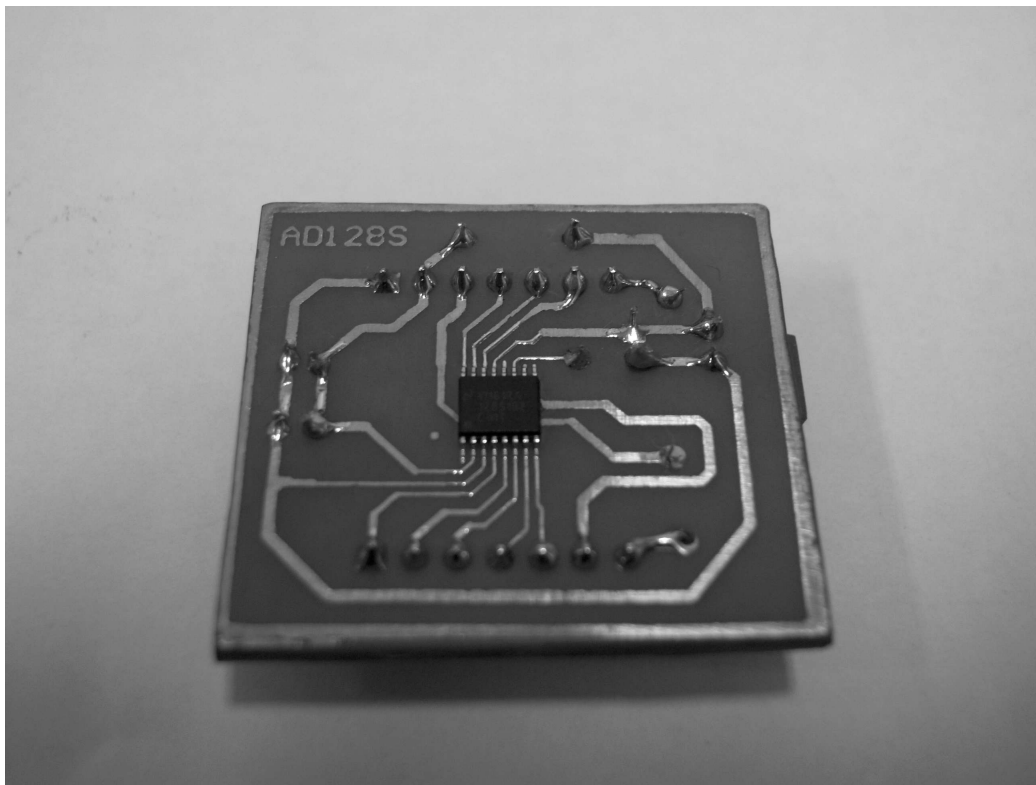


Figura II.7: Placa Neta - ADC AD128S

III. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

III.1 MONOGRAFIA

ProjetoPAIhard.pdf

III.2 ESQUEMÁTICOS E LAYOUT DAS PLACAS

PlacaFilha.pdf

PlacaMae.pdf

PlacaMicrofones.pdf

PlacaNeta.pdf

PlacaFilhaPcb.pdf

PlacaMaePcb.pdf

PlacaMicrofonesPcb.pdf

PlacaNetaPcb.pdf

PlacaKit.pdf

III.3 FOTOS DAS PLACAS

III.4 LISTAS DE MATERIAL

PlacaFilha.xls

PlacaMae.xls

PlacaMicrofones.xls

III.5 ARQUIVOS FONTE DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E IMPRESSÃO DE GRÁFICOS EM MATLAB

paihard.fig - figura do *layout* do programa

paihard.m - programa principal de impressão de telas

calculadoa.m - programa para calcular a DOA dos sinais adquiridos

demux.m - programa para demultiplexar os 4 canais

capturadoa.m - programa que concentra as ações necessárias para calcular a DOA

aquisicao.m - programa para mostrar arquivo já salvo

manifold.m - programa para calcular o *array manifold*

tiraoffset.m - programa para retirar o *offset dos microfones*

pawavrecord.m - programa para aquisição de dispositivos de som no PC

pawavplaya.dll - biblioteca para aquisição de dispositivos de som no PC

pawavplayw.dll - biblioteca para aquisição de dispositivos de som no PC

pawavplayx.dll - biblioteca para aquisição de dispositivos de som no PC

III.6 APRESENTAÇÃO DO PROJETO

ApresentacaoProjetoPAI.pdf

III.7 DOCUMENTAÇÕES

Datasheets utilizados no projeto