

DEVELOPMENT OF SPEAKERS WITH DIGITAL AUDIO COMMUNICATION AND ALIGNMENT IN 3D SOUND ROOM

Fernandes, A.¹, Pinto, F., A.³, Paulo, J.^{1,2}, Azevedo, F.¹, Correia, M.⁵, Tavares, G.^{3,4}

¹ ISEL-Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal

² LAA-Lab. de Áudio e Acústica do ISEL, Portugal

³ INESC - ID - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores - ID

⁴ IST - Instituto Superior Técnico

⁵ IPS - Instituto Politécnico de Setúbal

franciscomcpinto@tecnico.ulisboa.pt, a45913@alunos.isel.pt, joel.paulo@isel.pt, fernando.azevedo@isel.pt,
mariobcorreia@gmail.com, goncalo.tavares@inesc-id.pt

PACS: no. 43.55.Br, 43.60.-c, 07.50.Ek, 43.38.Dv.

Keywords: Coluna de som coaxial, Audio-over-IP, Dante/AES67, Processamento digital de sinal de áudio

ABSTRACT.

The construction of immersive sound rooms (3D sound) requires great care in terms of the performance of room acoustics (acoustical treatment and sound insulation), the speakers of the multichannel system and their alignment so that the sound field in the audience area presents maximum realism. Digital audio communication is a common practice nowadays, where Audio-over-IP (AoIP) is increasingly used due to the flexibility and functionality of the infrastructure that the Ethernet protocol offers. This concept is mainly used in professional audio installations, such as live shows and recording/broadcasting studios. This project aims to develop a multichannel audio system to be installed in an immersive sound room consisting of the electroacoustic and signal processing (equalization of the frequency response of the speaker, application of user parametric filters) using an AoIP adapter (AES67/DANTE) with Power-over-Ethernet (PoE). Final tests will be carried out in a controlled environment, to characterize the quality and reliability of the system, i.e., signal processing to compensate the frequency response and alignment of the speakers, considering objective and perceptual evaluation in the immersive sound room. The evaluation tests are carried out in the anechoic chamber of Instituto Superior Técnico and in the Audio and Acoustics Laboratory of ISEL.

RESUMO.

A construção de salas de som imersivas (som 3D) exige cuidado em termos de desempenho da acústica da sala (tratamento acústico e isolamento acústico), dos altifalantes do sistema multicanal e seu alinhamento para que o campo sonoro na área de audiência apresente o máximo de realismo. A comunicação de áudio digital é uma prática comum nos dias de hoje, onde o Audio-over-IP (AoIP) é cada vez mais utilizado devido à flexibilidade e funcionalidade da infraestrutura que o protocolo Ethernet oferece. Este conceito é usado principalmente em instalações de áudio profissionais, como shows ao vivo e estúdios de gravação/transmissão. Este projeto visa desenvolver um sistema de áudio multicanal para ser instalado em uma sala de som imersivo composto pelo processamento eletroacústico e de sinal (equalização da resposta de frequência do altifalante, aplicação de filtros paramétricos do utilizador) utilizando um adaptador AoIP (AES67/DANTE) com Power-over-Ethernet (PoE). Os testes finais serão realizados em ambiente controlado, para caracterizar a qualidade e confiabilidade do sistema, ou seja, processamento de sinal para compensação da resposta de frequência e alinhamento das colunas de som, considerando avaliação objetiva e perceptual na sala de som imersivo. Os testes de avaliação são realizados na câmara anecóica do Instituto Superior Técnico e no Laboratório de Áudio e Acústica do ISEL.

1. INTRODUÇÃO

A abordagem de som imersivo tem tido uma grande projeção nos últimos anos. Este facto deve-se à popularidade de sistemas de VR/AR e pelo cinema com som 3D (i.e. Dolby Atmos) e também pelos custos de produção terem baixado. Assim, é viável construir-se instalações de reprodução sonora fixas com sistemas multicanal de colunas de som (dezenas de altifalantes colocados à volta de uma sala), criando uma experiência sonora completamente imersiva. Este tipo de recursos tem igualmente muito interesse para fins de investigação e desenvolvimento.

O ISEL está a construir uma sala com estas características seguindo as recomendações técnicas, nomeadamente a norma Rec. ITU-R BS.1116-1, e terá um sistema de som multicanal com 40 altifalantes, como é representado no modelo virtual da Figura 1.

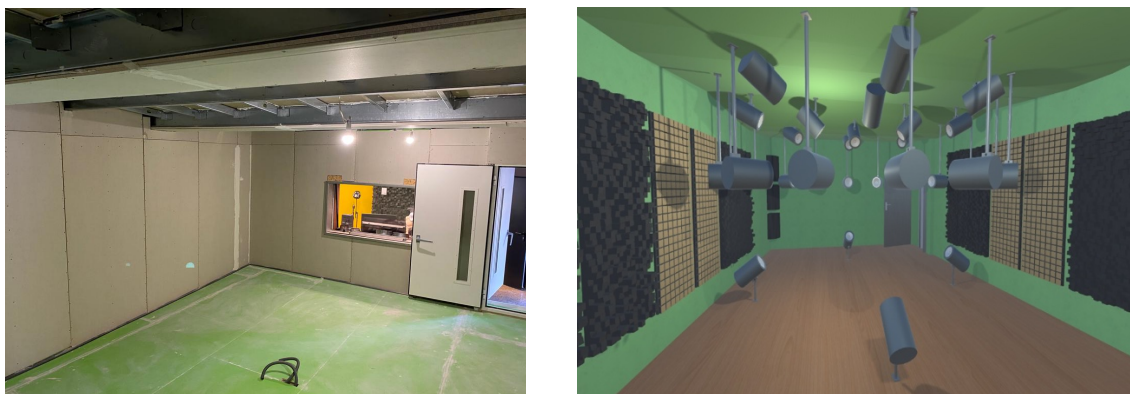


Figura 1 – Sala de Audição Crítica e de Som Imersivo do Laboratório de Áudio e Acústica do ISEL. Sala em construção (lado esquerdo) e modelo virtual da sala final (lado direito).

Um projeto deste tipo envolve várias especialidades, desde a construção civil, acústica de edifícios, eletroacústica, acústica de salas. O sistema eletroacústico é uma componente com custos bastante elevados, essencialmente se se pretender uma qualidade sonora de alta fidelidade (custo de cada coluna de som >1000 Euros). Neste sentido, e porque o ISEL tem valências de engenharia nesta área, decidimos implementar o sistema de reprodução sonora, fazendo o estudo e construção destes projetores de som.

1.1. Objetivos

O projeto em desenvolvimento pretende elaborar o controlo e processamento de uma coluna de som com ligação Áudio-sobre-IP, AoIP, fazer estudo acústico e aplicação dos seus vários componentes, nomeadamente altifalante, amplificador e fichas de ligação, e possuir as seguintes especificações: altifalante coaxial, crossover ativo, inversão de polaridade, ajuste de níveis de entrada e de saída, equalizador paramétrico programável com 10 pontos de equalização e linha de atraso de sinal. No final, o sistema eletroacústico será instalado na sala, com a respetivo alinhamento temporal para se obter um campo sonoro o mais uniforme possível.

1.2. Trabalhos relacionados

O projeto consiste no desenvolvimento de uma coluna de som para instalação para sistemas multicanal do tipo sala de som imersivo/home theater, com características de muito boa qualidade sonora. Uma condição a considerar é a dimensão e o peso do sistema. Desta forma foi feita uma pesquisa de equipamentos similares que existem no mercado, tendo pelo menos comunicação de AoIP (Tabela 1).

Tabela 1 – Loudspeakers with AoIP on the market

Speaker	Manufacturer	Inputs	Num. Presets	Controle Interface	Weight	Dimension [H*W*D]	Price
MONISMS MNS-4AXXICS-2P	MONISMS	DANTE	-	-	± 5kg	683x125x150 mm	-
MONISMS MNS-8AXXWS-1P	MONISMS	DANTE	-	-	± 5kg	362x311x178mm	-
AMADEUS PMX 12 D	AMADEUS	DANTE, Analog, AES/EBU	99	DANTE	22.15kg	551x374x380 mm	>1000€
Genelec 8331A	Genelec	Analog, AES/EBU	Few dozens	AES67	6.7kg	305x189x212mm	± 2000€

Estes equipamentos não apresentam todas as características que pretendemos para este projeto, nomeadamente as colunas do fabricante MONISMS possuem entrada de sinal no formato do protocolo DANTE, não têm forma de controlo ou configuração (são aplicadas em sistemas de Public Address) [1 e 2]. O sistema Amadeus é o mais similar com o projeto apresentado [5]. Contudo, apresenta umas dimensões e peso elevados, o que não é aplicável em sistemas multicanal para uso em salas pequenas, como é o caso de Home Theater e salas de som imersivo.

A Genelec 8331A utiliza a infraestrutura de IP apenas para o controlo dos sistemas de processamento de sinal, os dados áudio não são transmitidos [6].

2. METODOLOGIA

O desafio deste projeto é conseguir desenvolver uma coluna de som de elevada qualidade técnica e sonora, com as características mencionadas anteriormente, que permita equipar salas de som imersivo de pequena/média dimensão.

O projeto é multidisciplinar envolvendo o estudo acústico e mecânico da caixa, o processamento de sinal, a amplificação de sinal, e a alimentação de todo o sistema, como é apresentado na Figura 2.

Os blocos representam componentes, módulos, entradas e saídas para o sistema completo do DigiSpeaker são descritos por:

- As entradas digitais comutadas pelo utilizador: DANTE, AES3 e S/PDIF;
- As entradas analógicas que tem a opção de ser conetadas com jack de 6.3mm ou com XLR de 3 pinos. Isto acontece devido à ficha fêmea do jack ter interruptores físicos que permitem a ligação direta do jack aos pinos Ring e Tip da fêmea quando este está inserido. Quando o jack não está inserido, os pinos Ring e Tip ficam ligados a ficha XLR;
- O módulo DSP recebe informação de qualquer uma das entradas, aplica processamento ao sinal e retorna o sinal analógico processado. Este módulo possui ainda uma entrada digital que recebe áudio no formato I2S e uma entrada analógica diferencial, por isso há a necessidade de conversão das entradas digitais para o formato I2S e da sua multiplexagem para escolher qual das entradas digitais é aplicada ao DSP;
- Os blocos “Converter AES3 to S/PDIF”, “Conversor S/PDIF to I2S” e “Converter DANTE to I2S” fazem os processos conversão da informação para formatos que o módulo de DSP pode receber;
- O módulo “Bootloader and Control” é responsável pelo bootload do programa do DSP, pela interpretação da interação do utilizador através de um encoder rotativo e por apresentar num display OLED, o menu e seleção indicativa do encoder;
- O amplificador de saída, “AMP”, recebe o sinal analógico proveniente do bloco DSP e aplica-o ao altifalante coaxial que reproduzirá esse sinal acusticamente;
- O bloco da alimentação do sistema que está desenhado para haver a opção de alimentar o sistema por PoE ou por tensão alternada da rede elétrica. O relé, quando em repouso, é normalizado para estar fechado para o PoE e quando for inserida uma tensão alternada a bobina do relé é acionada comutando assim a alimentação para a mesma tensão

- alternada. Depois há uma conversão das tensões de entradas para tensões e potências apropriadas para alimentar os vários dispositivos.
- No projeto está contemplada a utilização de uma coluna master e outra slave. A saída do multiplexer de comutação dos sinais I2S, é aplicada tanto entrada da coluna master como da slave. A diferença entre elas é a inexistência do bloco “Converter DANTE to I2S” na coluna slave, sendo que este se encontra na coluna master e fornece um dos dois canais de I2S para a coluna slave. Isto está retratado na seta com a legenda “RJ45-UTP06” e o bloco “DSP SLAVE SPEAKER”.

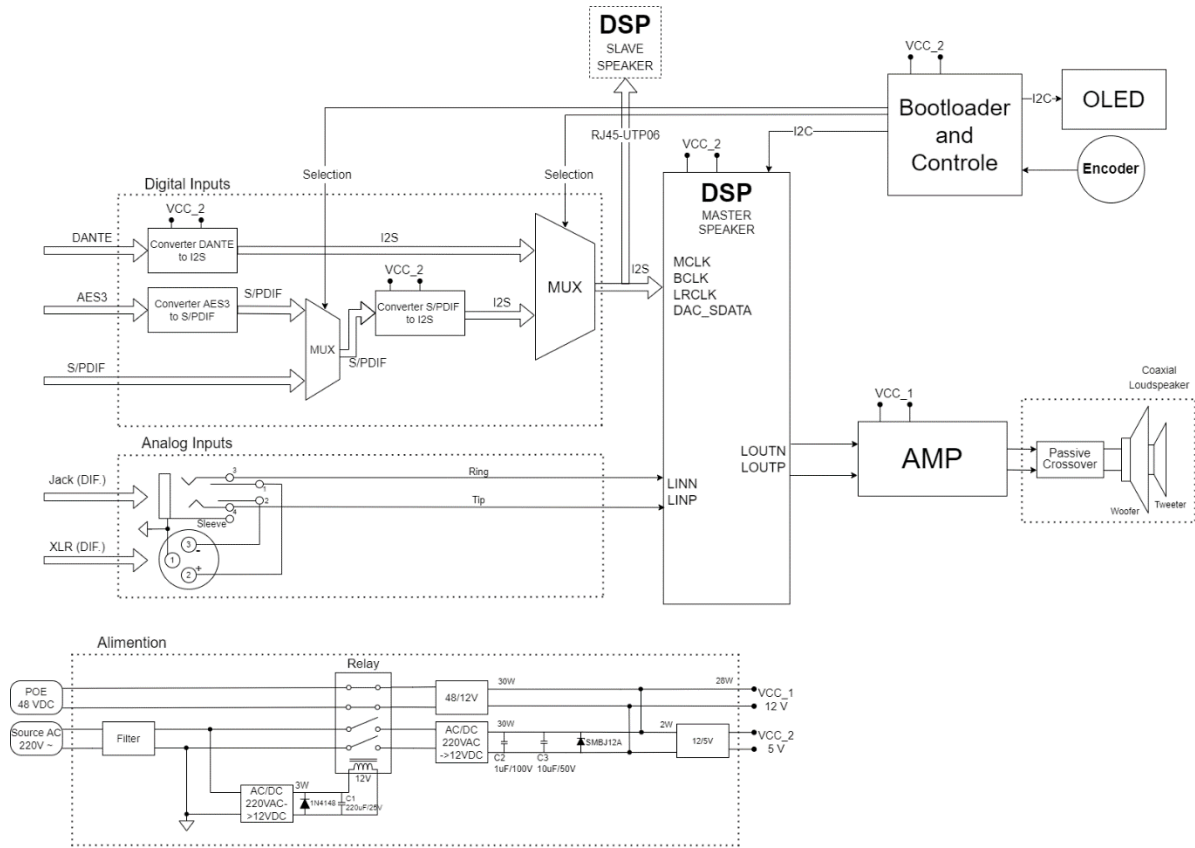


Figura 2 – Block diagram of the project.

3. BLOCO DE DSP

O desenvolvimento do sistema foi realizado com o kit EVAL-ADAU1761 para o bloco de DSP, com a ajuda da plataforma de simulação SigmaStudio [7-9] disponibilizado pelo fabricante Analog Devices. Como referido anteriormente as especificações definidas para este projeto são crossovers digitais, inversão de polaridade, ajuste de níveis de entrada e de saída, um equalizador paramétrico programável com 10 bandas de frequência e linha de atraso de sinal. A Figura 3 mostra o diagrama de blocos correspondente.

O controlo do sistema permite configurar qual o tipo de entrada, analógica ou digital, atraso, equalização, polaridade do sinal, ganho e ativar ou desativar o volume. Considerando também que a resposta em frequência do altifalante poderia ter oscilações e deformações, foi colocado um bloco para a compensação da mesma, o bloco “EQ Flat”. À partida pretendia-se que este bloco tivesse crossovers digitais, mas como o altifalante escolhido, VISATON HX-10, já possui crossovers passivos incorporados no mesmo, não foi necessário implementar qualquer crossover.

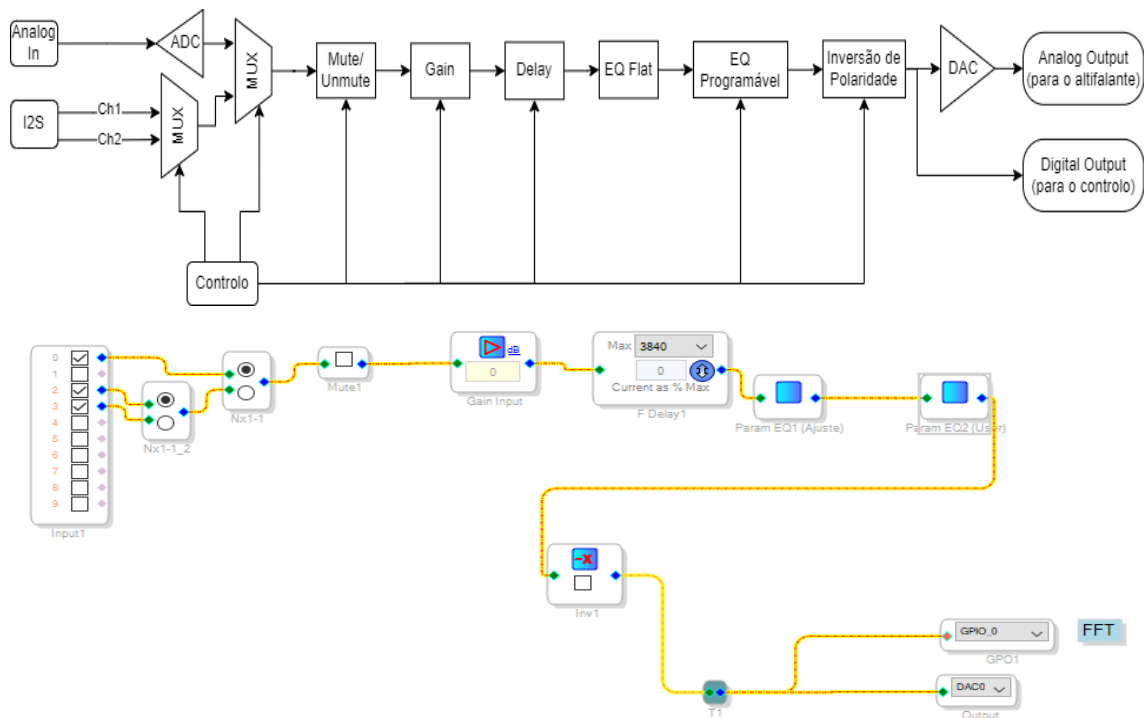


Figura 3 – Block diagram of the DSP block and implementation program on SigmaStudio of Analog Devices.

A resposta em frequência do altifalante foi simulada com um equalizador paramétrico de 10 pontos de frequência, tendo como referência a fornecida pelo fabricante. O resultado da compensação mostra que foi possível elevar as frequências baixas e reduzir as oscilações, sendo que agora tem apenas oscilações de 2dB/3dB, como observado na Figura 4.

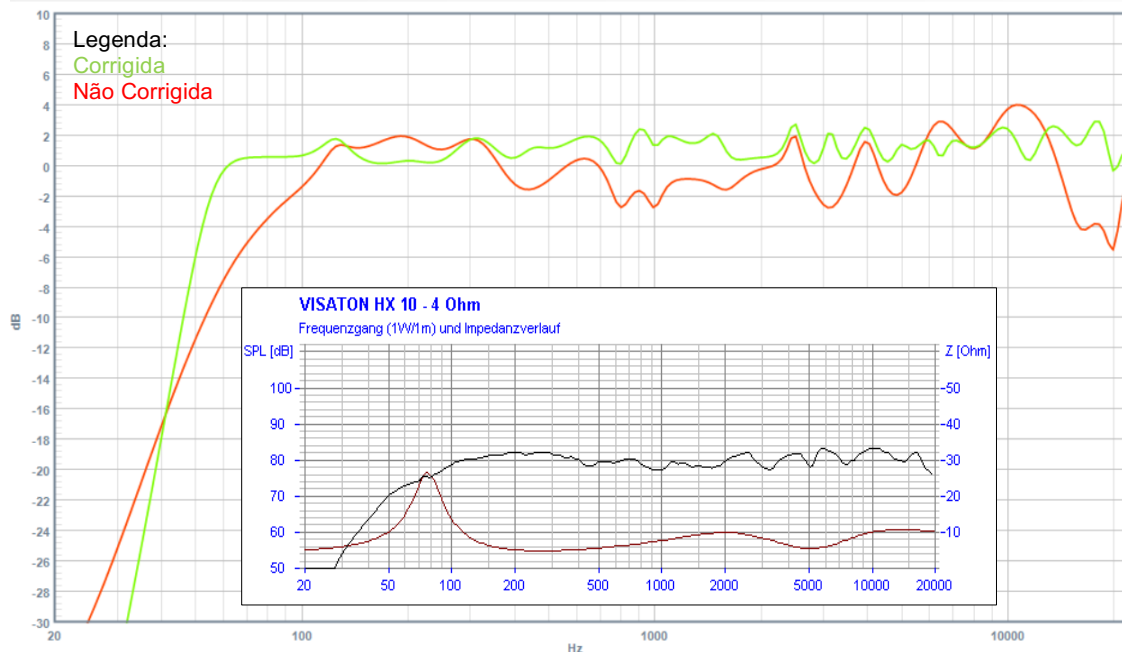


Figura 4 – Real, simulated, and corrected speaker frequency response

Fizeram-se também testes à capacidade de processamento, com o objetivo de saber como planejar a estrutura do bloco de DSP quanto à possibilidade de o projeto poder evoluir para o sistema de duas colunas de som, uma master e a outra slave, diminuindo assim os custos do

projeto, ou seja, apenas um único DSP para o conjunto. Este teste foi realizado para 4 tipos de programas diferentes, em que cada um poderia ser uma abordagem ao bloco de DSP.

Tabela 2 – EVAL-ADAU1761 processing capacity tests.

File	Max delay without filters			Max num. of filters in the EQ			All blocks (Max delay with filters)					
	Inst (Bytes)	Data (Bytes)	Coeff (Bytes)	Inst (Bytes)	Data (Bytes)	Coeff (Bytes)	Inst (Bytes)	Data (Bytes)	Coeff (Bytes)			
processing of only one channel without crossovers	3840 -> 80ms	380	4015	118	70 (+10+10)	1010	599	468	3497 -> 72.85ms	1010	4092	468
		37%	98%	12%		99%	15%	46%		99%	100%	46%
processing of only one channel with crossovers	3840 -> 80ms	424	4047	139	65 (+10+10)	1016	601	464	3495 -> 72.81ms	1016	4092	464
		41%	99%	14%		99%	15%	45%		99%	100%	45%
processing of two channels without crossovers	1901 -> 39.60 ms	544	4094	125	25 (+10+10)	994	600	250	1751 -> 36.48 ms	994	4094	250
		53%	100%	12%		97%	15%	24%		97%	100%	24%
processing of two channels with crossovers	1868 -> 38.92 ms	632	4092	167	21 (+10+10)	1010	624	272	1743 -> 36.31 ms	1010	4094	272
		62%	100%	16%		99%	15%	27%		99%	100%	27%

Numa primeira fase, os testes consistiram em saber qual seria o delay máximo de cada canal do programa com apenas os blocos pretendidos. Isto implicou que a RAM de dados fosse toda ocupada. Depois eliminou-se o bloco do delay, para saber a quantidade máxima de filtros que o bloco do equalizador do utilizador podia ter, sem contar os que já existiam: 10 do equalizador de ajuste à resposta em frequência e outros 10 do utilizador. Foi preciso eliminar o bloco do delay porque ao acrescentar um filtro está a adicionar-se 9, 6 e 5 bytes às RAMs “Inst”, “Data” e “Coeff”, respetivamente.

O processador ADAU-1761 tem 3 tipos de blocos de RAMs: “Inst” corresponde à memória onde o código dos blocos é guardado; “Data” onde se armazenam dados, como por exemplo amostras que sofreram atraso; e “Coeff” onde se armazenam variáveis que influenciam os blocos, como por exemplo o nível de ganho no bloco de Gain. Na última fase de testes estimou-se novamente o delay máximo com todos os filtros acrescentados na fase anterior.

Atendendo a que o EVAL-ADAU1761 possui apenas 2 DAC's, o altifalante escolhido já possui crossovers analógicos na sua composição e o delay máximo reduz para metade nos programas com processamento de dois canais, conclui-se que o ADAU1761 tem capacidade de processamento e armazenamento de apenas um canal de modo a respeitar as especificações definidas para o projeto.

4. BLOCO DE CONTROLO

Devido ao *kit* EVAL-ADAU1761 ser do tipo POR (*Power-off-Reset*) quando este deixa de ser alimentado o código programado previamente será apagado. Para resolver este problema foi acrescentado um módulo que programa o *kit*, *bootloader*, para quando a coluna de som for ligada. O equipamento escolhido foi o Arduino Pro Mini 3.3V ATMEGA328P 8MHz devido a ser de baixo custo e uma vez que este é, na maior parte do tempo, utilizado para comunicação com o utilizador, não sendo assim necessário muita capacidade de processamento. Este equipamento também é responsável pelo controlo e interface com o utilizador.

4.1. Bootload

A fim de testar o *bootload* e controlo do módulo de DSP criou-se um programa mais simples para o DSP. Este programa é constituído por um mute e um controlador de volume. De seguida o código deste mesmo programa foi exportado para ficheiros header de C++ e com esses ficheiros faz-se um pequeno teste no Arduino de desativar o volume durante 3 segundos e ativa o volume

durante 3 segundos, 3 vezes consecutivas e depois decrementar o volume gradualmente 6 vezes [1].

4.2. Interface com o utilizador

O utilizador do DigiSpeaker pode controlar o módulo de DSP, para isso terá de interagir com ele por meio de um *encoder* rotativo e de um ecrã OLED. O *encoder* possibilita a seleção de menus e alteração de parâmetros do DSP e o ecrã mostra esses mesmos menus e parâmetros, por exemplo, o menu principal (Figura 5) divide-se em 6 sub-menus: “Inputs”, “Volume”, “Ganho”, “Atraso”, “Popularidade” e “Equalizador”, e é indicado em qual menu o utilizador se encontra com uma seta e, por exemplo, ao escolher o sub-menu “Ganho” o seu parâmetro poderá ser alterado rodando o *encoder*. Para selecionar um menu é preciso pressionar o botão do encoder uma vez e para sair, pressionar o botão durante um dado período de tempo. A Figura 5 mostra exemplos de menus no ecrã OLED.



Figura 5 – Visualização dos menus no display OLED. Principal menu (lado esquerdo), Inputs menu (centro) e Tipo de filtro (lado direito)

Durante o desenvolvimento desta funcionalidade descobriu-se que o Arduino Pro Mini não seria o equipamento mais indicado para realizar o *bootload* e o controlo ao mesmo tempo, devido ao facto de ter memória dinâmica insuficiente para todas as configurações. Deve escolher-se outro processador com mais memória dinâmica ou providenciar o aumento de memória usando uma SRAM exterior.

5. TESTES À COMUNICAÇÃO DANTE

Afim de testar a comunicação DANTE, realizou-se um teste onde foi fornecido um sinal de áudio no formato do protocolo DANTE, foi usado um *switch*, MikroTik CRS112-8P-4S-IN, que reencaminha de um PC para a placa MNS-DANTE-I2S-R-02-1P, equipamento escolhido para realizar a conversão DANTE para I2S. O sinal no formato DANTE foi gerado no PC usou-se os softwares Dante Via e Dante Controller, para seleccionar a fonte de sinal e o destino do sinal, respetivamente, como se mostra na Figura 6.

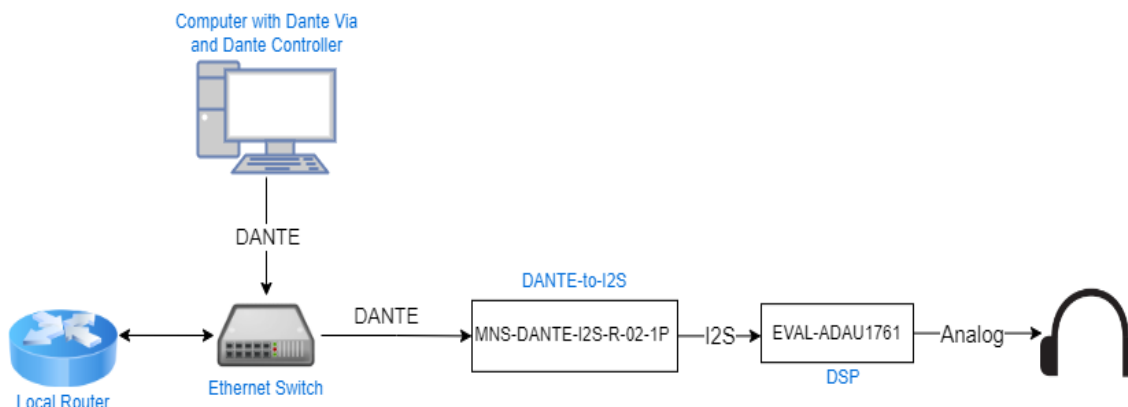


Figura 6 – DANTE communication test diagram.

Para testar a placa MNS-DANTE-I2S-R-02-1P, uma vez que os pinos de ligação são miniatura, desenhou-se e construiu-se uma placa de circuito impresso usando o *software* Eagle, que permitiu testar o desempenho da comunicação por internet.

Os resultados obtidos destes testes preliminares não foram muito positivos, dado que se ouvia o sinal de áudio com ruído, cliques e artefactos devido a problemas de sincronismo de relógio (clock).

6. ENSAIOS EM CÂMARA ANECÓICA

O protótipo DigiSpeaker desenvolvido consiste em um altifalante colocado numa caixa acústica de forma cilíndrica com 20 cm de diâmetro e comprimento variável (entre 30 e 90 cm) [10]. Assim, através do movimento de um êmbolo, podemos estudar melhor o efeito acústico do sistema, nomeadamente, a influência de ondas estacionárias no interior do tubo, em função do comprimento.

O protótipo DigiSpeaker desenvolvido permitiu fazer uma avaliação preliminar em termos perceptuais e objetivos. Os testes perceptuais comparativos foram realizados entre o protótipo passivo (apenas caixa acústica, crossovers e amplificador) e uma coluna de som de referência, a M-Audio BX8 Studiophile (gama de trabalho entre 37Hz e 22kHz). Na data da escrita deste artigo, os testes apenas serviram para ter uma primeira impressão sonora. Verificou-se que o som tinha muito bom detalhe das bandas de frequência médias e agudas, tendo alguma deficiência das frequências graves. Este facto já era previsível dado que o altifalante que estamos a testar (HX-10, Visaton) é de 10 cm de diâmetro, com $F_s = 80$ Hz.

Foram também realizados um conjunto de testes objetivos em câmara anecoica, como mostrado na Figura 7, para medir a resposta em frequência, resposta ao impulso, atraso de grupo, distorção harmónica e por intermodulação, nível de ruído de fundo, ao altifalante e ao protótipo DigiSpeaker.

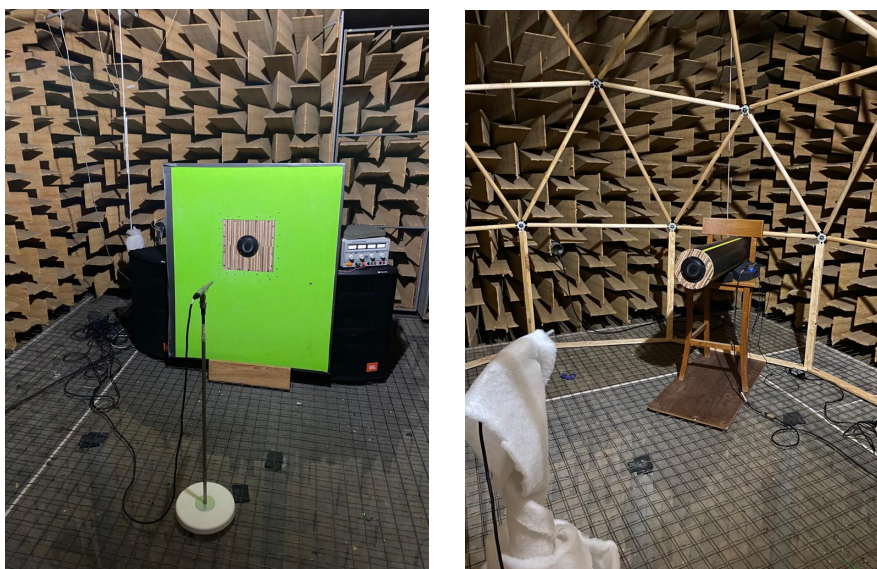


Figura 7 – Setup instalado na câmara anecoica para realização dos ensaios acústicos ao altifalante (DIN 45575) e ao protótipo DigiSpeaker.

Como foi referido anteriormente, os ensaios são preliminares, e apontam para algumas deficiências na resposta em frequência do sistema. Como premissa, esta coluna de som deverá ter uma dimensão entre 30 e 45 cm, para ser possível a sua utilização em salas de pequena/média dimensão. Assim, os resultados de interesse serão apenas para estas condições. A Figura 8 apresenta as respostas em frequência do protótipo obtidas em câmara anecoica.

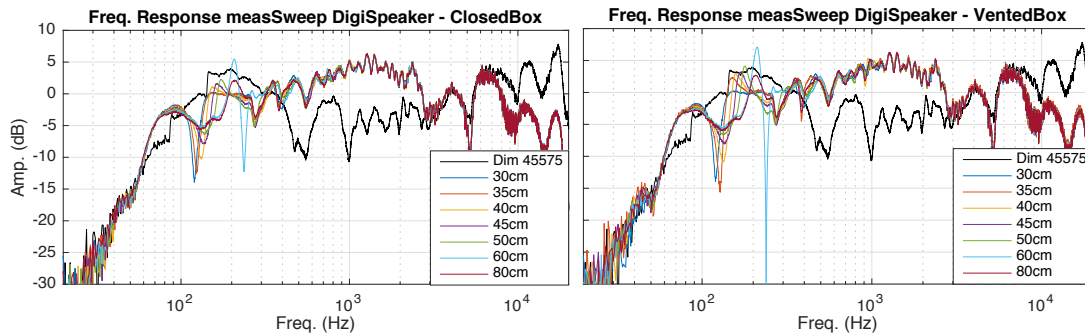


Figura 8 – Respostas em frequência na câmara anecóica do altifalante (DIN 45575) e ao protótipo DigiSpeaker para vários comprimentos da caixa acústica e para ClosedBox (lado esquerdo) e VentedBox (lado direito).

Os resultados preliminares mostram que a banda das baixas frequências é aumentada em cerca de 30 Hz (começando nos 60 Hz) em relação às características dadas pelo fabricante Visaton, para o altifalante HX-10.

Existem poucas diferenças entre o tipo ClosedBox e VentedBox. Suspeitamos que a selagem do êmbolo utilizado no protótipo não esteja a ser feita convenientemente, o que requer mais estudo. Verificam-se cancelamentos da resposta na banda de frequências entre os 120 Hz e 180 Hz, devido ao protótipo não ter material absorvente no interior, o que faz realçar o fenómeno de geração de ondas estacionárias no interior do tubo que provocam oscilações. Existe igualmente uma perda nas altas frequências, a partir sensivelmente dos 7000 Hz. O fenómeno da difração nas arestas do painel frontal onde o altifalante está fixado está a condicionar os resultados, provocando oscilações na resposta.

7. CONCLUSÕES

Este projeto multidisciplinar visa o estudo e desenvolvimento de uma coluna de som com comunicação por ethernet, AoIP. Neste sentido, foram desenvolvidos os módulos de controlo, processamento de sinal e o sistema eletroacústico (caixa acústica + altifalante).

Até ao momento conseguiram-se tirar algumas conclusões sobre os equipamentos usados e dos resultados dos testes aos mesmos. Nomeadamente, o kit EVAL-ADAU1761 necessita de um bootloader, pelo motivo de ser Power-off-Reset, e ele tem capacidade de processamento e armazenamento de apenas um canal, de modo a respeitar as especificações definidas para o projeto. Verificou-se também que o ajuste da resposta em frequência simulada do altifalante apresentou bons resultados com uma oscilação de apenas 3dB, o Arduino Pro Mini 3.3V ATMEGA328P 8MHz possui pouca memória dinâmica para ser usado para concretização do bloco de controlo e obteve-se resultados insatisfatórios na comunicação Dante, devido a sincronismo.

A parte do sistema eletroacústico, constituída pela caixa acústica, altifalante e amplificador, encontra-se ainda em inicial. Desta forma, os resultados são ainda preliminares e não satisfatórios, verificando-se que anomalias na resposta em frequência do sistema. Estamos ainda a avaliar vários outros altifalantes que apresentem melhor desempenho, quer ao nível da resposta em frequência quer em termos de detalhe em termos psicoacústicos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho está a ser suportado pelo Laboratório de Áudio e Acústica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ISEL, LAA
<https://acusticaudiolab.isel.pt>

REFERÊNCIAS

- [1] [Online]. Available: <https://www.monisms.com/en-us/products/poe-dante-active-column-speakers-mns-4axxics-2p>. [Acedido em 19 Março 2022].
- [2] [Online]. Available: <https://www.monisms.com/en-us/products/poe-dante-wall-mounted-wooden-speakers-mns-8axxws-1p>. [Acedido em 19 Março 2022].
- [3] Chip Audinate Ultimo, [Online]. Available: <https://www.audinate.com/products/manufacturer-products/dante-ultimo>. [Acedido em 8 Maio 2022].
- [4] [Online]. Available: <https://www.monisms.com/en-us/products/mns-dante-i2s-tr-xx-1p-dante-i2s-audio-transmitter-receiver-module>. [Acedido em 19 Março 2022].
- [5] Coluna AMADEUS PMX 12 D, [Online]. Available: https://amadeuslab.com/en/pmx_12d.php. [Acedido em 8 Maio 2022].
- [6] Coluna Genelec 8331A, [Online]. Available: <https://www.genelec.com/8331a>. [Acedido em 8 Maio 2022].
- [7] Datasheet EVAL-ADAU1761, [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/EVAL-ADAU1761Z.pdf>. [Acedido em 8 Maio 2022].
- [8] A. D. "Tutorial "Interfacing SigmaDSP Processors with a Microcontroller", [Online]. Available: <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/sigmastudio/tutorials/microcontroller>. [Acedido em 8 Maio 2022].
- [9] Analog Devices. (2021). Interfacing SigmaDSP Processors with a Microcontroller. Retrieved from <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/sigmastudio/tutorials/microcontroller>
- [10] Olson, H., Direct Radiator Loudspeaker Enclosures, JAES Volume 0 Issue 1 (Audio Engineering Magazine Vol 35:11) pp. 34, 36, 38, 59-64; November 1951