



Hardware reconfigurável para interface háptico

Abílio Camelo

UMinho | 2020

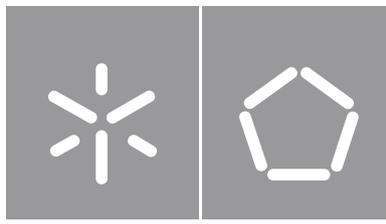


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Abílio José Pinheiro Camelo

Hardware reconfigurável para interface háptico

novembro de 2020



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Abílio José Pinheiro Camelo

Hardware reconfigurável para interface háptico

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e
Computadores
Sistemas Embebidos e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Cabral

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual
CC BY-NC-SA

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Agradecimentos

As primeiras palavras de agradecimento vão naturalmente para os meus pais, António Camelo e Ana Pinheiro, ao meu irmão Bernardo por serem um pilar na minha vida, sem eles nada disto seria possível.

Um obrigado ao Professor Doutor Jorge Cabral pela oportunidade, pela motivação e pelo apoio em todo este percurso.

Não podia deixar ainda de agradecer ao Eduardo Mendes e ao João Carvalho pela constante disponibilidade, pelo apoio e sem dúvida pela paciência.

Ao Embedded Systems Research Group (ESRG) do Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho que me acolheu e por ter proporcionado as condições necessárias à realização da dissertação.

Um agradecimento especial aos membros do laboratório ESRG-IBS, Novais, Paulo, Eládio, Lobo, Mesquita, Naia, Rui Almeida, Rui Ferreira, Vale, pelo apoio, pela camaradagem e pelo bom ambiente criado no laboratório.

Por último, aos meus amigos, com quem partilhei todos os momentos, obrigado por tudo.

This work is supported by: European Structural and Investment Funds in the FEDER component, through the Operational Competitiveness and Internationalization Programme (COMPETE 2020) [Project n° 037902; Funding Reference: POCI-01-0247-FEDER-037902].

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

A evolução tecnológica que se vive actualmente também se faz sentir no domínio das interfaces de utilizador, sendo de notar uma crescente preocupação na dimensão táctil destas interfaces.

Haptic é uma terminologia utilizada para a interacção homem-máquina através da via sensorial do toque. Esta abrange, entre outros temas, a percepção, a concepção e até a comunicação por meio do toque. Nos próximos anos, com a maturação das tecnologias hápticas, prevê-se uma adopção generalizada por parte da indústria e a utilização desta tecnologia nos automóveis, na medicina ou em ambientes virtuais.

O Embedded Systems Research Group (ESRG) da Universidade do Minho desenvolveu, como prova de conceito, um sistema háptico. Este consiste num conjunto de transdutores ultra-sónicos, controlados de forma precisa para criarem um ponto focal, em pleno ar, que é capaz de induzir uma sensação de toque ao utilizador.

No entanto, esta tecnologia apresenta problemas que podem limitar a sua aceitação. A percepção do ponto focal é considerada ténue para determinadas aplicações e, para gerar o ponto focal, a tecnologia cria um campo acústico de elevada pressão sonora. Este último factor pode ser inclusivé um risco para a saúde humana, nomeadamente a nível auditivo.

Os objetivos principais para a dissertação são o levantamento do estado da arte associado à percepção humana do toque provocado por um sistema ultra-sónico *Mid-Air Haptic*. É também realizada uma análise detalhada ao sistema existente de modo a proceder-se à sua otimização, tanto ao nível do protótipo existente, do modelo de simulação em *MATLAB* (otimizado e validado recorrendo a metrologia), como pela integração de novas funcionalidades na arquitectura interna do sistema.

No global, o presente trabalho de investigação permitiu uma maior compreensão da tecnologia, estabelecendo um novo conjunto de oportunidades de desenvolvimento. De modo a reduzir o consumo de energia e a dissipação de calor nos transdutores, foram desenvolvidas estratégias de actuação do conjunto de transdutores.

Palavras-Chave: FPGA, *Mid-Air Haptic*, Ultra-sons

Abstract

The technological evolution that is currently experienced is also been felt in the domain of user interfaces, with a growing concern in the tactile dimension of these interfaces.

Haptic is a terminology used for human-machine interaction through the sense of touch. This covers, among other topics, perception, conception, and even communication through touch. In the coming years, with the maturation of haptic technologies, the widespread adoption by the industry and the use of this technology in cars, medicine or in virtual environments is expected.

The Embedded Systems Research Group (ESRG) of the University of Minho developed a haptic system as proof of concept. This consists of a set of ultrasonic transducers, precisely controlled to create a focal point, in midair, which is capable of inducing a feeling of touch to the user.

However, this technology presents problems that can limit its acceptance. The perception of the focal point is considered tenuous for certain applications and, to generate the focal point, the technology creates an acoustic field of high sound pressure. This last factor can even be a risk to human health, namely for the auditory system.

The dissertation's main objectives are to survey the state of the art associated with the human perception of touch caused by an Ultrasonic Mid-Air Haptic system. A detailed analysis is also carried out on the existing system to proceed to its optimization, both in terms of the existing prototype and the MATLAB simulation model (optimized and validated using metrology), as well as by the integration of new functionalities in the internal architecture of the system.

Overall, the present research work allowed a greater understanding of the technology, establishing a new set of development opportunities. In order to reduce energy consumption and heat dissipation in the transducers, strategies were developed for the set of transducers.

Keywords: FPGA, Mid-Air Haptic, Ultrasound.

Índice

Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiii
Lista de acrónimos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização e motivação	1
1.2 Objectivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Estado da arte	5
2.1 Princípios básicos das ondas acústicas	5
2.1.1 Percepção humana em contexto <i>Mid-Air Haptic</i>	8
2.2 Tecnologias hápticas	11
2.3 <i>Mid-Air Haptic</i>	12
2.3.1 Vórtices de ar	13
2.3.2 Ultra-sons	14
2.4 <i>Ultrasonic Mid-Air Haptic</i>	15
2.4.1 Universidade de Tóquio	15
2.4.2 Universidade de Bristol	17
2.4.3 Universidade do Minho	18

3	Especificação do sistema	23
3.1	Requisitos do sistema	24
3.2	Arquitectura do sistema	25
3.2.1	Actuação periódica	27
3.2.2	Actuação aleatória	27
4	Simulação	29
4.1	Modelo de simulação	29
4.1.1	Gráfico de directividade	30
4.2	Geometria da rede	31
4.3	Actuação aleatória	37
4.4	Espaçamento entre transdutores	40
4.5	Quantidade de transdutores	42
4.6	Actuação pulsada	44
5	Implementação	46
5.1	Visão geral	46
5.2	<i>Software</i>	47
5.3	Hardware reconfigurável	48
5.4	Módulo <i>Pulse</i>	50
5.5	Módulo <i>Random</i>	52
5.6	Integração no sistema	54
6	Testes e resultados	57
6.1	Plataforma de teste	57
6.2	Caracterização do protótipo	61
6.2.1	Comportamento térmico	61
6.2.2	Comportamento acústico	64
6.3	Actuação aleatória	66
6.3.1	Comportamento térmico	66
6.3.2	Comportamento acústico	67
6.4	Actuação pulsada	68

6.4.1	Comportamento térmico	68
6.4.2	Comportamento acústico	69
7	Conclusões e trabalho futuro	71
7.1	Conclusões	71
7.2	Trabalho futuro	72
	Referências	76

Lista de figuras

2.1	Espectro sonoro.	6
2.2	Reflexão da onda na transição de meio material.	7
2.3	Desfasamento das ondas sonoras.	8
2.4	Receptores tácteis na pele humana.	9
2.5	91 transdutores.	16
2.6	324 transdutores.	16
2.7	Modulação em amplitude (AM) e lateral (LM).	16
2.8	Ultrahaptics.	17
2.9	InnovHaptic - 100 transdutores.	19
2.10	InnovHaptic - 248 transdutores.	19
2.11	PCB dos transdutores.	20
2.12	PCB de suporte ao SoM.	20
2.13	<i>SoM TE0745-02-45-21A</i>	21
2.14	Resposta em frequência.	22
2.15	Gráfico de directividade.	22
3.1	Diagrama do sistema.	23
3.2	Arquitectura do sistema.	26
3.3	Estratégia de pulsar.	27
3.4	<i>Linear-Feedback Shift Register 8-bits</i>	28
4.1	Gráfico de directividade MA40S4S fornecido pelo fabricante.	31
4.2	Gráfico de Directividade.	31
4.3	Geometria da rede.	32
4.4	Disposição dos lóbulos laterais.	33
4.5	Geometria da rede.	35

4.6	Ausência de lóbulos laterais.	36
4.7	Média de 1000 amostras de uma rede aleatória.	37
4.8	192 transdutores activos.	38
4.9	Média de 1000 amostras (192 transdutores).	39
4.10	Intensidade sonora do ponto focal vs Espaçamento entre transdutores.	40
4.11	Espaçamento entre transdutores.	41
4.12	Intensidade sonora do ponto focal vs Quantidade de transdutores.	42
4.13	Emissão contínua.	44
4.14	Emissão de um pulso a cada $1250\mu s$	45
5.1	Visão geral do sistema.	46
5.2	Interface do módulo <i>Pulse</i>	51
5.3	Máquina de estados do módulo <i>Pulse</i>	51
5.4	Interface do Módulo <i>Random</i>	52
5.5	Máquina de estados do módulo <i>Random</i>	53
5.6	Máquina de estados do módulo <i>NRandom</i>	53
5.7	RTL do Linear-Feedback Shift Register.	54
5.8	Lógica de integração dos módulos.	55
5.9	Lógica de detecção de transição ascendente do sinal.	56
6.1	Câmara térmica FLIR i7.	58
6.2	Dispositivo de aquisição de dados NI USB-6281 DAQ.	58
6.3	Plataforma de testes - Microfone(1), Sistema de posicionamento(2), InnovHaptic(3).	59
6.4	Resposta em frequência do microfone.	60
6.5	Comportamento térmico de 248 transdutores - 50% <i>duty-cycle</i>	61
6.6	Comportamento térmico de 248 transdutores - 3% <i>duty-cycle</i>	62
6.7	Intensidade relativa do conjunto de transdutores.	63
6.8	Curva de desempenho dos transdutores.	63
6.9	Evolução da intensidade acústica e da temperatura durante 1h de funcionamento.	64
6.10	Campo acústico - 248 transdutores - 3% <i>duty-cycle</i>	65
6.11	Comportamento térmico de transdutores aleatórios a 18kHz - 3% <i>duty-cycle</i>	66
6.12	Campo acústico - 192 transdutores aleatórios - 3% <i>duty-cycle</i>	67

6.13	Comportamento térmico de transdutores pulsados a 200Hz.	69
6.14	Campo acústico - 100 pulsos a 200Hz - 3% <i>duty-cycle</i>	69

Lista de tabelas

4.1	Parâmetros do campo acústico - Geometria da Rede.	34
4.2	Parâmetros do campo acústico - Distribuição aleatória.	37
4.3	Parâmetros do campo acústico - Espaçamento entre transdutores.	42
4.4	Parâmetros do campo acústico - Número de transdutores.	43
6.1	Parâmetros do campo acústico - 248 transdutores.	65
6.2	Parâmetros do campo acústico - 192 transdutores aleatórios.	68
6.3	Parâmetros do campo acústico - 100 pulsos a 200Hz - 3% <i>duty-cycle</i>	70

Lista de acrónimos

ADC *Analog-to-Digital Converter.*

ARM *Advanced RISC Machine.*

ATM *Automated Teller Machine.*

AXI *Advanced eXtensible Interface.*

ESRG *Embedded Systems Research Group.*

FPGA *Field Programmable Gate Array.*

FWHM *Full Width at Half Maximum.*

IP Core *Intellectual Property Core.*

LFSR *Linear Feedback Shift Register.*

LRA *Linear Resonant Actuator.*

PCB *Printed Circuit Board.*

PL *Programmable Logic.*

PS *Processing System.*

RMS *Root Mean Square.*

SNR *Signal to Noise Ratio.*

SoC *System on Chip.*

SoM *System on Module.*

SPL *Sound Pressure Level.*

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.*

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, o tema da dissertação é contextualizado, assim como se destaca a relevância das interfaces hápticas *Mid-Air* e se evidenciam os factores que motivaram a escolha deste tema. De seguida, clarificam-se os objectivos da presente dissertação. Por último, é descrita a estrutura da mesma.

1.1 Contextualização e motivação

A presença de sistemas embebidos é cada vez mais habitual nos mais variados equipamentos do dia a dia, desde uma máquina de lavar roupa aos modernos *smartwatches*. A sua utilização pelos consumidores depende em grande medida de quão fácil é a interacção entre ambos, sendo que o design de produtos electrónicos deve levar em conta a experiência proporcionada ao utilizador. Neste contexto, as interfaces homem-máquina recebem uma especial atenção da indústria na sua concepção.

Apesar da constante inovação, o desenvolvimento das interfaces sensoriais não tem sido similar entre si. A evolução deu-se fundamentalmente nas interfaces visuais e auditivas, pelo que o sentido do toque é ainda pouco explorado. Actualmente, verifica-se uma crescente preferência por *displays* na interacção com o utilizador, nomeadamente no sector automóvel e nos *smartphones*, que contam com grandes superfícies de visualização.

O uso exclusivo de um único estímulo sensorial nas interfaces homem-máquina tem as suas desvantagens. No caso do automóvel, a atenção do condutor é, na presença de todas essas interfaces visuais, continuamente desviada do ambiente externo ao veículo. Tal ocorre, por exemplo, aquando da utilização de sistemas como *infotainment* e controlo do ar condicionado, que requerem o contacto visual do condutor. A distração provocada por estes sistemas terá certamente influência no risco de acidente rodoviário e num aumento do stress por parte do condutor.

O recurso a estímulos diferentes para realizar o interface com o condutor podem permitir manter a sua atenção no ambiente externo ou na estrada. O objectivo passa por promover um maior equilíbrio multisensorial, actualmente ameaçado pela presença exclusiva de *displays* no interior do habitáculo. Caso a interacção homem-máquina inclua um *feedback* táctil ou auditivo em complemento ao *feedback* visual, o utilizador terá uma maior facilidade em interpretar a resposta do sistema à sua acção. A conjugação das sensações permite mitigar a fadiga e o tempo que o condutor passa com o olhar desviado da estrada, contribuindo para o bem estar de todos os ocupantes do veículo [1]. A experiência do utilizador será, no geral, mais completa e irá potenciar a comunicação do utilizador com os equipamentos electrónicos.

O *feedback* táctil é criado por uma interface háptica, que é capaz de interagir e comunicar através do toque com o utilizador. Ao nível das interfaces hápticas existem várias tecnologias actualmente em voga, reconhecendo-se um interesse especial pela categoria de *Mid-Air Haptic*. O conceito baseia-se na capacidade de gerar sensações tácteis em pleno ar, sem qualquer restrição ao movimento do utilizador. Um exemplo curioso do uso da tecnologia é a simulação de um instrumento musical como o AirPiano [2].

A dinâmica de utilização das interfaces hápticas *Mid-Air* destaca-se face aos sistemas hápticos convencionais, em função da elevada resolução espacial e temporal e à capacidade de miniaturização do sistema. Razão pela qual se tem notado um especial interesse no seu estudo e na procura de novas aplicações. A integração da tecnologia *Mid-Air Haptic* com interfaces por gestos, como o *LeapMotion* [3] mostra-se promissora pois permite que ao mesmo tempo que os movimentos corporais do utilizador são reconhecidos, os estímulos surjam em pleno ar.

As capacidades da tecnologia *Mid-Air Haptic* motivam um grande número de aplicações na indústria em geral como é o caso do ramo automóvel, médico e da indústria do entretenimento.

A importância do sentido do tacto na área do entretenimento é bastante evidente na esfera do *gaming*. A ambição passa por transportar cada vez mais o jogador para o interior do mundo virtual. A introdução da realidade virtual foi por si só um avanço muito significativo, mas a inclusão de uma interface háptica irá proporcionar uma experiência mais imersiva ao utilizador.

O sector do entretenimento pode, eventualmente, aproveitar as características do corpo humano de forma a iludir o utilizador acerca da posição dos seus próprios membros [4]. Outra abordagem é a interacção da interface háptica de forma indirecta com o utilizador [5]. A movimentação de um objecto que esteja presente no ambiente, como a folha de uma planta, ou o som resultante desse movimento resultam num estímulo visual e auditivo.

No âmbito médico e hospitalar, o *Mid-Air Haptic* adequa-se a cenários que requerem cuidados higiénicos mais rigorosos. A utilização de um sistema de detecção de gestos, em associação com vários tipos de *feedback*, promovem uma maior universalidade dos sistemas, com a inclusão de utentes com as mais variadas patologias. A inexistência de contacto com as superfícies dos equipamentos hospitalares promove a diminuição da transmissão de doenças contagiosas [6].

Seguindo ainda esta linha de pensamento, sistemas públicos como máquinas ATM, *vending machines*, máquinas de venda de bilhetes (comboio, metropolitano), entre outras, poderão tornar-se mais higiénicas com a adopção da tecnologia *Mid-Air Haptic*. O contacto com as superfícies do teclado ou do *display* é desnecessário, o que num cenário de pandemia tem um impacto no risco de contágio entre os utilizadores.

Todas estas aplicações levam a que esta temática do *Mid-Air Haptic* apresente um carácter inovador e imenso potencial, assim como uma enorme margem de progressão no seu desenvolvimento.

1.2 Objectivos

O ESRG desenvolveu de raiz um protótipo de uma interface háptica *Mid-Air* baseado em ultra-sons. Essa interface apresenta ainda limitações na sua aparência e no seu funcionamento, pelo que é necessário proceder à sua optimização.

Algumas limitações são inerentes à tecnologia de *Ultrasonic Mid-Air*, o que restringe a sua aplicabilidade. A percepção do ponto focal é considerada ténue para determinadas aplicações, apesar da intensidade do campo acústico ser considerada elevada para a audição humana. A frequência elevada resulta num aumento muito significativo da temperatura de funcionamento. A união destas realidades demonstra a ineficiência energética da interface háptica.

Por outro lado, a criação do ponto focal provoca o aparecimento de pontos focais secundários de pressão sonora equivalente, denominados lóbulos laterais. O que se torna incompatível com o objectivo de atingir uma adequada percepção do ponto focal, distraindo o utilizador do estímulo principal.

Assim sendo surge a necessidade de optimizar a interface háptica. Seja pela intervenção no campo acústico seja na redução da temperatura de funcionamento do sistema. A concretização destes objectivos depende das seguintes etapas:

- Levantamento do estado da arte, de forma a compreender os princípios acústicos e da percepção humana por detrás da tecnologia;

- Portar e validar o sistema no novo protótipo;
- Optimizar e caracterizar o sistema háptico, incluindo o modelo de simulação e a implementação de novas funcionalidades;

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. No capítulo 1 é introduzido o tema da dissertação e descrita a sua relevância. São descritos os objectivos da dissertação, e é detalhada a estrutura do documento. O capítulo 2 apresenta alguns princípios básicos acerca das ondas acústicas e à percepção humana no contexto *Mid-Air*. Além de ser composto pela revisão do estado da arte relativo às interfaces hápticas, em particular do *Mid-Air Haptic*. No capítulo 3 identificam-se as principais limitações do protótipo e estabelecem-se os requisitos funcionais e não funcionais do sistema. Descreve-se ainda a arquitectura geral do sistema. O capítulo 4 é relativo à simulação do comportamento do sistema, perante a modificação dos mais variados parâmetros da interface háptica. É também analisado a influência da adição das novas funcionalidades, descritas no capítulo 3. No capítulo 5 é detalhada a implementação, em hardware reconfigurável, das funcionalidades simuladas e a respectiva integração no protótipo. No capítulo 6 apresentam-se os resultados experimentais das funcionalidades introduzidas no protótipo, ao nível do comportamento térmico e da intensidade acústica do sistema. Por último, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões da dissertação, assim como sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da arte

Este capítulo apresenta inicialmente alguns princípios da tecnologia *Mid-Air Haptic*, designadamente da propagação do som e interacção dos ultra-sons com o corpo humano. É também descrita a evolução constante das interfaces hápticas e mais propriamente no que ao *Mid-Air Haptic* diz respeito que abordagens estão ser seguidas nesta tecnologia.

2.1 Princípios básicos das ondas acústicas

O *Ultrasonic Mid-Air Haptic* tem por base a propagação de ondas sonoras, por essa razão é importante compreender os princípios físicos subjacentes, desde as interações com o meio material à influência exercida entre diferentes ondas acústicas.

O som é uma onda mecânica e por isso é capaz de transmitir energia através da propagação de ondas de pressão num meio material, nomeadamente no ar. Em contraste, no vácuo, o som não se propaga.

A propagação de uma onda sonora é caracterizada pela existência de zonas de alta pressão intercaladas por baixas pressões, em relação à pressão atmosférica, nomeadas regiões de compressão e rarefacção. A pressão existente nestas regiões é quantificada através de um parâmetro denominado pressão de radiação acústica, cuja unidade S.I. é o *Pascal*.

A direcção de propagação das ondas sonoras pode ser de dois tipos, longitudinal em que a direcção de vibração das partículas do meio é paralela à direcção de movimento da onda ou transversal, quando a vibração das partículas é perpendicular à propagação da onda. Cada um destes tipos de onda apresenta uma maior capacidade para se propagar em diferentes estados da matéria. No caso das ondas longitudinais são capazes de se propagar, de forma eficiente, em tecido mole. Por outro lado, as ondas transversais apresentam a capacidade de percorrer materiais sólidos como o osso humano, ao contrário das longitudinais que não possuem essa faculdade.

Outra característica do som, como onda mecânica, é a sua classificação de acordo com a frequência a que se propaga. O espectro sonoro abrange os infra-sons com frequências até aos 20Hz, a gama do som audível entre os 20Hz e os 20kHz, e por fim os ultra-sons com frequências acima dos 20kHz.

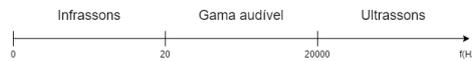


Figura 2.1: Espectro sonoro.

A velocidade das ondas sonoras varia com as condições do meio de propagação. A velocidade de uma onda longitudinal (ou de pressão) num meio elástico, de massa volúmica ρ , é dada pela equação 2.1, onde B é o módulo de elasticidade (*bulk modulus*), que define a resistência à deformação do meio material [7]. Num meio gasoso com um gás ideal, em condições de pressão adiabáticas, a velocidade do som é calculada através da equação 2.2, que deriva da equação 2.1, onde γ , R e M são respectivamente, constante adiabática, constante do gás e a massa molar. Estas constantes caracterizam o meio gasoso e tal como a temperatura do meio variam a velocidade de propagação do som.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.1) \quad v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2.2)$$

As equações 2.1 e 2.2 explicam a razão do som se propagar a uma maior velocidade em materiais sólidos e em fluidos, como o alumínio (6400m s^{-1}) e a água (1480m s^{-1}), em comparação com o ar (330m s^{-1}). No corpo humano existe uma grande diferença entre a velocidade na estrutura óssea (4080m s^{-1}) e nos diferentes tecidos, onde varia próximo dos 1550m s^{-1} .

A resolução espacial da onda sonora tem um papel fundamental na percepção da sensação háptica e está directamente relacionada com o comprimento de onda da onda sonora. O comprimento de onda (λ) depende da frequência da onda sonora (f) e da velocidade do som no meio material (c), como se observa na equação 2.3. Por consequência, a resolução espacial varia com as condições do meio material, conforme demonstrado em 2.1 e 2.2. As condições ambientais distintas introduzem uma variabilidade nas sensações hápticas consoante os diferentes contextos de utilização da tecnologia.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

Os diversos meios materiais apresentam diferentes características e comportamentos quando em contacto com ondas sonoras, que são evidentes nas diferentes impedâncias acústicas que os caracterizam.

A impedância acústica de um meio material é calculada através da equação 2.4, onde ρ é a densidade do meio material (kg/m^3) e c a velocidade do som no meio material (m/s).

$$Z = \rho c \quad (2.4)$$

$$Z_{\text{ar}} = 0.0004 \times 10^6 \text{kg}/\text{m}^2\text{s} \quad (2.5)$$

$$Z_{\text{músculo}} = 1.71 \times 10^6 \text{kg}/\text{m}^2\text{s}$$

Na propagação de uma onda sonora existem transições entre meios de propagação. Em cada um destes acontecimentos existe, dependendo das características dos meios materiais, a reflexão numa maior ou menor percentagem da energia da onda sonora. A relação entre as impedâncias acústicas (Equação de Fresnel), presente na equação 2.6, permite quantificar a energia acústica transmitida para o novo meio de propagação [7]. No âmbito desta dissertação é do maior interesse a transição ar-músculo, que ocorre na superfície da pele no contexto do *Mid-Air Haptic*, por esse motivo na equação 2.5 apresenta-se os cálculos da impedância acústica para cada um destes meios materiais.

$$R = \left(\frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right)^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \theta_i = \theta_t = 0^\circ \quad (2.6)$$

Na equação 2.7 é efectuado o cálculo do coeficiente de reflexão na transição de meio material ar-músculo e que alcança um coeficiente de 0.99, como representado na figura 2.2. Quer isto dizer que, durante a propagação, se as ondas sonoras se depararem com a alteração do meio de propagação (ar-músculo), 99% da energia é reflectida e unicamente 1% é transmitida para o músculo [7]. A pele humana pode ser encarada, de certo modo, como um escudo do corpo humano, atenuando a radiação acústica que tenta penetrar através do mesmo.

$$R = \left(\frac{1.71 \times 10^6 - 0.0004 \times 10^6}{1.71 \times 10^6 + 0.0004 \times 10^6} \right)^2 = 0.99 \quad (2.7)$$

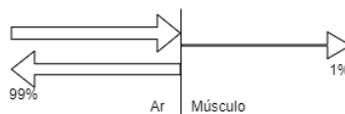


Figura 2.2: Reflexão da onda na transição de meio material.

Para além de toda a influência do meio material, existe uma dinâmica relativa à interação entre ondas acústicas. Quer isto dizer, e a título de exemplo, que duas ondas ao propagarem-se e ao se cruzarem no mesmo espaço de tempo podem interagir construtivamente ou destrutivamente. Por um lado, na figura 2.3a é possível observar a acção construtiva de duas ondas com um desfasamento de 45° , em 2.3b encontra-se representado a acção destrutiva entre duas ondas com um desfasamento de 180° .

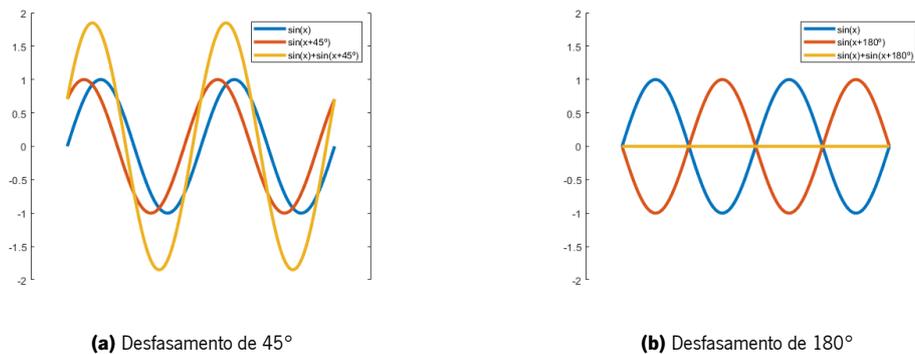


Figura 2.3: Desfasamento das ondas sonoras.

2.1.1 Percepção humana em contexto *Mid-Air Haptic*

O uso de ultra-sons no *Mid-Air Haptic* tem como princípio fundamental a pressão de radiação acústica. O sentido táctil humano pode ser estimulado por diferenças no deslocamento da superfície da pele ou pela activação dos mecanorreceptores. A activação de mecanorreceptores é o instrumento fundamental para transmitir as sensações hápticas.

Os mecanorreceptores integram o sistema nervoso periférico e encontram-se distribuídos por toda a superfície do corpo humano, o que permite a utilização de um sistema de *Mid-Air Haptic* em teoricamente qualquer zona da superfície corporal. Estes receptores são constituídos por organismos sensoriais, que, analogamente ao comportamento de um sensor comum, transformam um fenómeno físico num sinal eléctrico. A ligação entre o sistema nervoso periférico e o sistema nervoso central, é realizado através de fibras nervosas, onde circulam os estímulos eléctricos oriundos do sentido táctil.

O corpo humano apresenta vários tipos de mecanorreceptores, que podem ser observados na figura 2.4 [4]. De acordo com [4], classificam-se segundo o tamanho da área sensível ao estímulo - I (pequena) e II (grande) e o tempo da resposta ao estímulo - SA (adaptação lenta) e RA (adaptação rápida). Os estímulos físicos que activam as células sensoriais são outro método de diferenciação. Desta forma, agrupam-se os corpúsculos de *Pacini* (RA-II) e os de *Meissner* (RA-I) como mecanorreceptores de resposta rápida e os discos de *Merkel* (SA-I) e corpúsculos de *Ruffini* (SA-II) de resposta lenta ao estímulo.

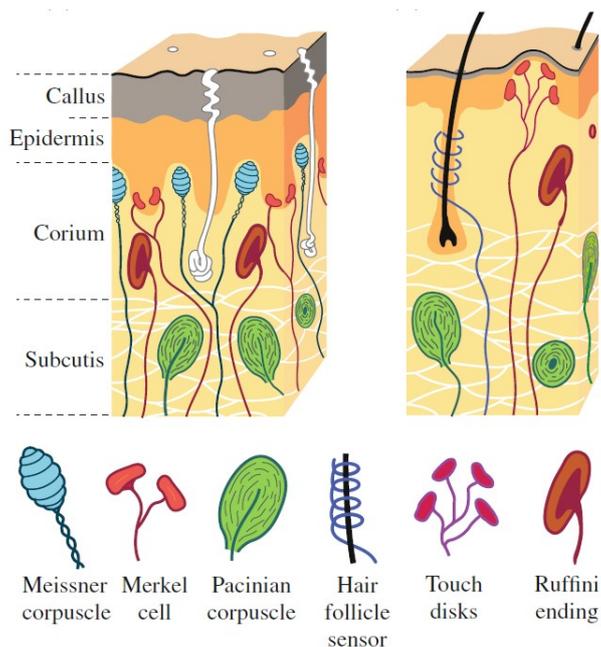


Figura 2.4: Receptores tácteis na pele humana.

No contexto do *Mid-Air Haptic*, cada um dos mecanorreceptores apresenta reacções a diferentes tipos de estímulo, permitindo desta forma uma grande abrangência nas sensações produzidas e na forma como são aplicadas. Estas diferenças são resultado de características intrínsecas, como a frequência alvo de cada tipo de célula sensorial e os respectivos *thresholds*, que resultam da estrutura biomecânica de cada mecanorreceptor. No caso dos corpúsculos de Ruffini e Pacinian, o seu comportamento é bastante influenciado pela temperatura.

Outra característica relevante é a capacidade dos mecanorreceptores agregarem informação de diferentes momentos e complementar as várias informações. Estímulos temporal e espacialmente próximos podem ser interligados com o objectivo de criar informação mais completa e fiável. De seguida, são descritas, em particular, as características de cada tipo de mecanorreceptores, conforme [4].

Os corpúsculos de Meissner são sensíveis aos movimentos tangentes à superfície da pele numa área de, aproximadamente, 7 a 19mm² ao seu redor e à presença de rugosidades na ordem dos 2mm em superfícies planas. A resolução espacial dos receptores RA-I é da ordem dos 3 a 5mm² e possuem a capacidade de conjugar a informação de estímulos em diferentes zonas do espaço, assim como diferenciam vibrações na ordem de frequências de 10 a 50Hz.

Os corpúsculos de Ruffini reagem ao alongamento da pele, o que contribui para a percepção da posição dos diferentes membros do corpo humano, ou seja para a propriocepção. Os receptores SA-II permitem também detectar a direcção de uma força externa aplicada na superfície da pele numa área

entre 50 a 75mm². A sua sensibilidade é da ordem dos 10mm, reagem tanto a estímulos estáticos como a frequências de até 50Hz e são capazes de interpretar sensações captadas em janelas temporais próximas.

Os discos de Merkel apresentam sensibilidade às deformações na direção normal e de cisalhamento. Em conjugação com a adaptação lenta e a elevada resolução espacial na ordem dos 0.5mm, decorrente da grande densidade sensorial, permite a percepção de elevações, extremidades e curvaturas. É por isso fundamental no reconhecimento da forma e textura de objectos. As frequências mais adequados para estimular este mecanorreceptor são inferiores a 20Hz, reagindo igualmente a estímulos quase estáticos, numa área semelhante à dos corpúsculos de Meissner.

Os corpúsculos de Pacinian apresentam um campo de recepção de 100 a 300mm² e tem a capacidade de associar estímulos com dimensão temporal e espacial próximo. Os receptores RA-II permitem detectar o aparecimento de vibrações numa gama de frequências entre 40 a 1000Hz.

Os mecanorreceptores como referido anteriormente encontram-se presentes em toda superfície corporal, embora estejam distribuídos de forma não uniforme. Existem zonas com uma maior sensibilidade já que possuem uma maior quantidade de mecanorreceptores na mesma área superficial. Do mesmo ponto de vista, para duas pessoas diferentes na mesma zona corporal a quantidade de mecanorreceptores é semelhante, mas a área superficial a que estão associados pode variar, como descrito em [4]. O que se traduz numa densidade de mecanorreceptores diferente de indivíduo para indivíduo e consequentemente em níveis de sensibilidade diferentes. Para além das diferenças de percepção que são explicadas pelas diferentes áreas de contacto, de acordo com [4], factores como a temperatura e humidade da pele, a idade do utilizador, ou condições de saúde como bulimia e anorexia nervosas, ou mesmo o ciclo menstrual, motivam percepções diferentes. Esta multiplicidade de condições e variáveis leva a diferentes experiências e reacções aquando da utilização de um sistema de *Mid-Air Haptic*.

Tendo em conta a estrutura da pele, a distribuição dos mecanorreceptores nos primeiros dois milímetros da pele permite ao ser humano perceber as ondas ultra-sónicas. Caso estes se localizassem a uma maior profundidade, isso não seria possível uma vez que 99% da energia dos ultra-sons é reflectida pela superfície corporal, como explicado na secção 2.1.

Uma questão relevante em toda a interação entre os ultra-sons e o corpo humano é a potência sonora a que o ser humano pode estar sujeito sem que existam efeitos nefastos a curto prazo ou com uma exposição prolongada. O índice de absorção de ultra-sons do corpo humano é de 1%, como é referido na secção 2.1, o que se traduz numa pequena quantidade de energia que é absorvida pela pele humana.

Os sistemas *Mid-Air* ultra-sónicos requerem no mínimo cem transdutores para criarem efeitos tácteis perceptíveis a uma distância de 20cm. Contabilizando essa quantidade de actuadores, a potência sonora emitida é teoricamente proporcional a essa variável, o que torna inevitável ponderar os efeitos na saúde desta tecnologia.

2.2 Tecnologias hápticas

Desde o início do desenvolvimento dos primeiros sistemas electrónicos que existe uma grande preocupação com as interfaces com o utilizador, procurando o melhor compromisso entre comodidade e funcionalidade. Nos últimos anos têm-se experienciado uma enorme evolução neste domínio, nomeadamente nas interfaces visuais e auditivas. Exemplo disso é a presença de *displays* no nosso quotidiano, assim como de fontes sonoras nas mais variadas situações. Estas têm sido usadas como a forma primordial de comunicação entre o utilizador e os dispositivos, o que tem impulsionado a sua evolução. De certa forma, hoje em dia, as tecnologias visuais e auditivas estão a atingir um ponto de saturação tecnológica. Isto leva a que comece a existir uma crescente preocupação com outros tipos de interacção com o utilizador. As interfaces hápticas preenchem essa lacuna ao explorarem o maior órgão do ser humano (a pele) e o sentido do tacto. É expectável que estas tecnologias evoluam consideravelmente nos próximos anos, quer por serem menos estudadas, comparativamente às visuais e auditivas, quer pela procura actual da sociedade por novas formas de interacção.

As primeiras abordagens e que ainda hoje perduram na generalidade dos dispositivos aplicam movimentos mecânicos ao problema. Uma das mais simples e antiga é a vibração dos telemóveis. Uma massa excêntrica acoplada ao rotor de um pequeno motor gira quando é alimentado, provocando a vibração. Inicialmente, o estímulo era algo arcaico, pois aplicava uma vibração generalizada ao dispositivo com o objectivo de notificar o utilizador. Apesar do baixo custo e complexidade, estas soluções possuem um atraso na sua actuação, na ordem dos milissegundos. A sua aplicabilidade é desse modo limitada, pois não possibilita que se formem padrões vibratórios mais sofisticados. O *Linear Resonant Actuator* (LRA) vem atenuar o referido problema pois gera vibrações com um atraso mínimo, é mais eficiente do ponto de vista energético e de menores dimensões. Actualmente, já se encontra em vários modelos *iPhone* e é usado para enriquecer a experiência em diversos jogos e aplicações.

Um exemplo já mais complexo é o *Novint Falcon* [8], que apresenta três graus de liberdade (3-DOF), permitindo perceber objectos, a sua textura e movimentos, como o coice de uma arma num videojogo.

O seu princípio de funcionamento tem por base vários braços mecânicos e motores, que oferecem ou não resistência aos movimentos do utilizador. Devido a esta característica, este tipo de sistemas são comumente designados de cinestésicos, pois a sensação de tacto é originada nos músculos, ligamentos e outros receptores internos. O sistema caracteriza-se por uma resolução temporal baixa devido aos vários elementos mecânicos que o compõe.

Como alternativa, o princípio da levitação magnética originou o *Maglev 200* [9], que possui seis graus de liberdade (6-DOF). Permitindo desta forma manipular a posição nos eixos xx , yy , zz , bem como a rotação em torno dos mesmos (*roll*, *pitch* e *yaw* respectivamente). O protótipo permite perceber o volume e o peso de objectos. A inexistência de elementos mecânicos, em contraste ao *Novint Falcon*, possibilita uma utilização fluída, devido à ausência de atrasos derivados da inércia do movimento dos motores.

Ambos os protótipos, *Novint Falcon* e *Maglev 200*, apresentam a restrição do utilizador estar imóvel e assim ficar confinado a uma pequena área de interacção. Eles estão fixados a uma superfície (como o chão) ou então possuem um elevado peso para permanecerem imóveis e assim serem eficientes na sensação que transmitem. Por oposição a este conceito, as luvas hápticas possibilitam um comportamento dinâmico. O utilizador pode explorar áreas de interacção mais amplas, como por exemplo uma sala concebida para realidade virtual.

Na categoria de luvas hápticas, sobressai principalmente a *HaptX* [10], com um contributo para evolução da tecnologia. Os equipamentos aplicam-se à indústria *gaming* ou a tarefas de tele-operação, embora possuam o inconveniente de ser necessário equipar o usuário com todo o dispositivo. Não tornando possível a sua aplicação em contextos mais momentâneos do dia a dia, estilo *grab-and-go*, ou usando uma terminologia háptica, *touch-and-go*.

Motivada pelo desejo em aumentar a dinâmica de utilização dos sistemas hápticos em contexto quotidiano, a variante háptica que permite uma interacção mais cómoda é o *Mid-Air Haptic*. Não possui atrasos e descarta a necessidade de vestir qualquer tipo de equipamento, e que será detalhado na secção 2.3.

2.3 *Mid-Air Haptic*

O *Mid-Air Haptic* tem a finalidade de produzir sensações tácteis nos utilizadores em pleno ar, sem estes necessitarem de estar imóveis e sem a obrigação de contacto directo com algum tipo de dispositivo.

O princípio de funcionamento baseia-se na diferença de pressão criada por estes sistemas em pleno ar, capaz de estimular os mecanorreceptores presentes na pele humana [11].

A presença de mecanorreceptores por todo o corpo humano permite a estimulação do utilizador, sem a necessidade de tocar directamente em nenhuma superfície ou dispositivo. Apenas é necessário que o utilizador esteja no raio de acção da interface.

A categoria de *Mid-Air Haptic* subdivide-se de acordo com o método de actuação. Nas secções seguintes, 2.3.1 e 2.3.2, são abordadas as alternativas baseadas em vórtices de ar e em ultra-sons.

2.3.1 Vórtices de ar

A utilização de vórtices de ar foi a opção seguida por dois projectos, *AIREAL* [5] e *AirWave* [12], desenvolvidos pela *Disney Research* e pela *Microsoft*, respectivamente.

As sensações induzidas por estes projectos resultam do contacto do corpo humano com vórtices de ar. Este fluxo de ar perpetua um movimento giratório, em torno do próprio eixo de translação, o que induz diferenças de pressão entre o centro do vórtice e a periferia do mesmo. Quando o vórtice entra em contacto com a superfície corporal, a diferença de pressões estimula os mecanorreceptores distribuídos pela pele. A utilização de um vórtice, contrariamente a uma simples deslocação de ar, permite conservar as propriedades do fluxo de ar, durante o deslocamento, até à sua dissipação.

O *AIREAL* tem como objetivo fornecer *feedback* táctil para reconhecimento de gestos, ou ainda virtualizar a sensação de objectos ou criaturas. Cada módulo *AIREAL* é constituído por um conjunto de cinco colunas de som agrupadas numa estrutura desenvolvida de raiz pelos investigadores. O diafragma de cada uma delas é responsável por sugar um volume de ar para o interior da estrutura, que em conjunto com um *gimbal* permitem a emissão direccionada de um vórtice. O módulo permite atingir uma resolução espacial na ordem dos 8.5cm a um metro de distância, [5], o que juntamente com o *field of view* de 75° proporciona uma área de actuação alargada.

O *AirWave* utiliza o movimento do diafragma de uma única coluna de som (com maior dimensão que as usadas no *AIREAL*), para mover ar para o interior de uma caixa. Posteriormente liberta o ar acumulado através de uma abertura, sendo capaz de gerar um vórtice com uma resolução espacial de 5cm a um metro de distância. Uma das desvantagens é a impossibilidade de direccionar o vórtice, ou seja o *field of view* é de zero graus.

Ambos os sistemas apresentam como pontos a favor um grande alcance de funcionamento e a possibilidade de transmitir a sensação de impacto ao utilizador. Por outro lado, o uso das colunas de som

para formar o vórtice resulta na existência de um ruído associado, que advém da distensão do diafragma das colunas. Embora se baseiem no mesmo princípio de funcionamento, eles caracterizam-se por se integrarem em contextos distintos de aplicação. No entanto, ambos tiram partido do seu alcance, estando a sua utilização mais vocacionada para espaços amplos. O *AIREAL* insere-se num contexto mais recreativo, de entretenimento, nomeadamente na área do *gaming*, já o *AirWave* adequa-se a interacções homem-máquina com interfaces por gestos.

2.3.2 Ultra-sons

Uma alternativa ao uso de vórtices de ar é a utilização de ultra-sons como actuadores para a interface háptica *Mid-Air*.

Os transdutores ultra-sónicos produzem vibrações de elevada frequência que se propagam no ar à velocidade do som. Com o controlo adequado da matriz ou conjunto de transdutores, de modo a somar as diversas vibrações num ponto específico do ar, criam uma zona de elevada pressão acústica. Local comumente designado por ponto focal. Em complemento a este fenómeno, uma estratégia cuidada, que permita variar este ponto focal no tempo ou no espaço, possibilita a criação de diferenças de pressão capazes de serem sentidas pelos mecanorreceptores da pele humana.

O princípio de actuação acima descrito é a base dos sistemas *Mid-Air* ultra-sónicos que tiram partido do fenómeno de variação da pressão acústica (descrito na secção 2.1). Comparativamente à solução dos vórtices de ar (secção 2.3.1), esta tecnologia possui uma resolução espacial muito superior, na ordem de 8.5mm. Dado que os transdutores, usados para este fim, operam tipicamente a uma frequência de 40kHz. Outra vantagem é o facto de o atraso na actuação ser desprezável, pois é ditado pela velocidade do som. Entre as várias limitações da tecnologia encontra-se o reduzido alcance, normalmente inferior a um metro. No que concerne à percepção humana, uma interface *Ultrasonic Mid-Air Haptic* para dispôr de uma sensação háptica satisfatória necessita de um elevado número de transdutores em funcionamento. Sendo a fraca sensação táctil a maior limitação da tecnologia.

Na próxima secção (secção 2.4.1 a 2.4.3) serão abordados diversos trabalhos e protótipos desenvolvidos neste âmbito. É de realçar o primeiro trabalho que tirou partido da tecnologia, desenvolvido por H.Shinoda em 2009 [13] e a popularidade inquestionável do *Ultrasonic Mid-Air Haptic*.

2.4 *Ultrasonic Mid-Air Haptic*

A relevância do *Ultrasonic Mid-Air Haptic* é demonstrada pela diversidade de equipas de investigação e respectivas universidades que, nos últimos anos, têm dado atenção ao desenvolvimento desta tecnologia. Seja no desenvolvimento de novos tipos de modulação, seja na procura de novas aplicações para o *Mid-Air Haptic*.

2.4.1 Universidade de Tóquio

O princípio da pressão da radiação acústica foi demonstrado, em primeiro lugar, num trabalho publicado por Hiroyuki Shinoda em 2008 [11]. Neste, foi descrito um protótipo em forma de matriz hexagonal, composta por 91 transdutores ultra-sónicos (figura 2.5 [11]). A frequência de operação dos transdutores é 40kHz, cujas fases foram controladas de modo a criar um ponto focal. Este foi modulado em amplitude (AM), sensivelmente a 80Hz e induziu uma vibração ligeira na palma da mão dos participantes envolvidos na aquisição de resultados. Este trabalho bem sucedido permitiu criar um ponto focal (recorrendo a transdutores ultra-sónicos) para criar um sensação táctil. Medições ao protótipo mostraram que o ponto focal realizou uma força de 7.8mN a uma distância de 25cm do centro da matriz.

Shinoda e a sua equipa [14] têm investigado nesta área até hoje, e conseguiram para além de grandes melhorias ao protótipo inicial, grandes avanços no que diz respeito ao domínio do Haptic baseado em ultrasons. Em 2010, o mesmo autor publicou um trabalho contendo uma versão melhorada do protótipo [13]. Consistia numa matriz rectangular onde 324 transdutores (figura 2.6 [13]) geram um ponto focal com 15.7mN e com uma resolução de 20mm. Ainda, no mesmo documento, são abordadas questões como a percepção e a segurança humana. Este último dizendo respeito à audição. A título de exemplo, a pele humana reflete 99% de energia acústica incidente, actuando como um escudo natural do corpo humano. No entanto, a audição carece de tal protecção, e na presença de tão elevadas pressões sonoras, a equipa que desenvolveu o artigo sublinha a necessidade em usar protecção auditiva.

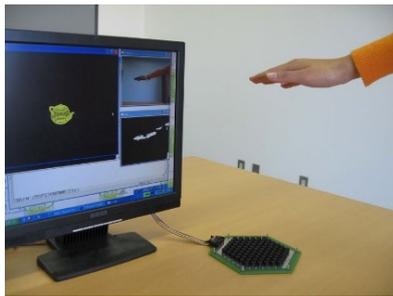


Figura 2.5: 91 transdutores.

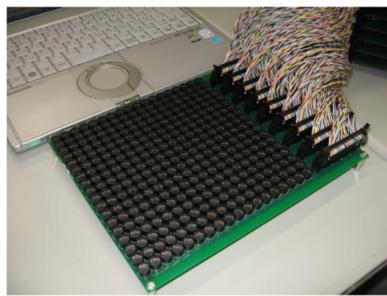


Figura 2.6: 324 transdutores.

Mais recentemente outros artigos envolveram o estudo de modulação do ponto focal [15] [16]. A modulação é a questão principal para a percepção humana, conseguida por este tipo de sistemas. A pele humana é sensível a frequências inferiores a 1kHz, pelo que criar simplesmente um ponto focal a uma frequência de 40kHz não é suficiente para provocar sensações hápticas. De modo a estimular os mecanoreceptores é necessária uma modulação do ponto focal. Para além da modulação em amplitude já mencionada no início da secção, o trabalho de investigação reportado em [15] propõe uma nova técnica, denominada de modulação lateral (LM). A diferença entre a modulação em amplitude e a lateral é que, no primeiro tipo, a intensidade do ponto focal é modulada ao longo de um período tempo. Por sua vez, na modulação lateral (figura 2.7 [16]), o ponto focal encontra-se sempre à sua máxima intensidade sendo a sua posição no espaço variada lateralmente numa dada distância, a uma determinada frequência. Segundo o estudo este tipo de modulação cria o dobro da energia acústica (face à AM) o que inevitavelmente aumenta a sensação táctil.

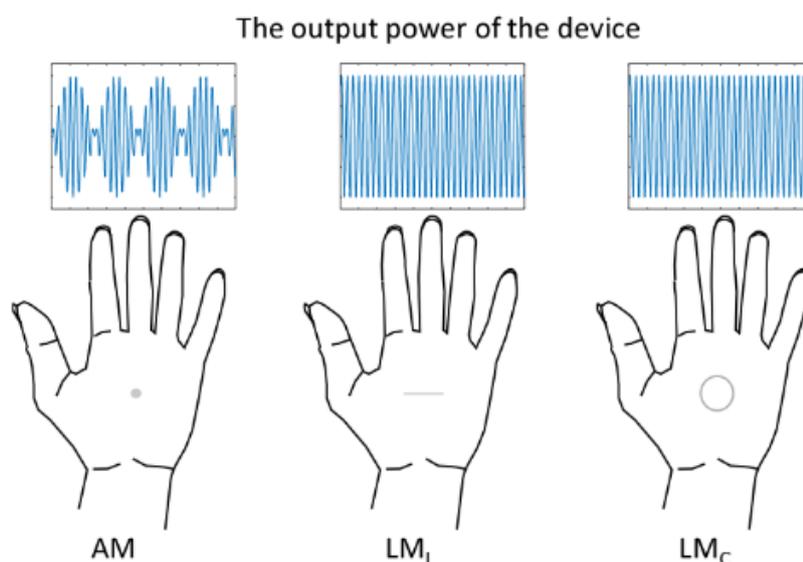


Figura 2.7: Modulação em amplitude (AM) e lateral (LM).

2.4.2 Universidade de Bristol

O projecto *Ultrahaptics* começou por ser desenvolvido na Universidade de *Bristol* [4], por uma equipa de investigação que para além de criar uma prova de conceito, realizou estudos da percepção humana de *Ultrasonic Mid-Air Haptic*.

A primeira versão do protótipo mostrado na figura 2.8 [17] tinha por base um sistema repartido, com os cálculos demorados do desfasamento dos transdutores a serem executados num *Host PC*, sendo a actuação destes realizada por intermédio de microcontroladores. O sistema era modular e permitia o fácil redimensionamento do protótipo consoante a aplicação.

A emissão dos ultra-sons vê a sua eficácia reduzida quando se defrontam com a existência de um material que dificulte a propagação das ondas sonoras. Torna evidente a necessidade de procurar materiais permeáveis, que permitam a criação de pontos focais com o mínimo de interferência. Com base nestes princípios, a equipa de investigação desenvolveu materiais inovadores, acusticamente transparentes.

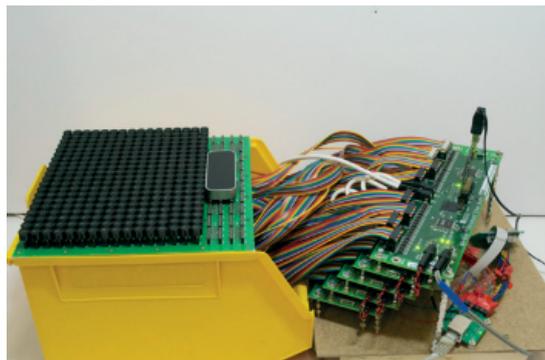


Figura 2.8: Ultrahaptics.

Para além de toda a componente de desenvolvimento da interface háptica, tecem algumas considerações em [18], relativamente à percepção humana. Através de um estudo, demonstraram que um simples ponto focal é suficiente para provocar um estímulo, porém se se adaptar o ponto focal em diferentes pontos no espaço e em diferentes momentos, é possível alcançar um melhor resultado.

Outro ponto importante da pesquisa do grupo é a busca por novos campos de aplicação e respectiva integração do *Ultrasound Mid-Air* na realidade virtual e as interfaces por gestos. Para isto, apostaram no desenvolvimento da tecnologia, através de algoritmos para a criação de formas 2D [19].

Após o seu desenvolvimento em contexto académico e com o conhecimento adquirido, o projecto do *Ultrahaptics* deu mais um passo quando no ano de 2013 originou uma empresa *spin-off*, com o objectivo de comercializar a interface háptica.

A partir do protótipo inicial, a empresa *Ultrahaptics* [20] comercializa três versões em 2017, constituídas por um *array* de transdutores e um controlador com arquitectura *ARM-FPGA*, com características diferentes, o módulo háptico *STRATOS™ Inspire*, o *kit* de desenvolvimento *STRATOS™ Explore* e o *Touch*, todos eles possuem um módulo *Leap Motion®* para reconhecimento de gestos. O suporte para diferentes sistemas operativos está garantido em todas as opções assim como o suporte ao motor de jogo *Unity®*, encontram-se também disponibilizadas *APIs* para as linguagens C#, C++.

O *STRATOS™ Inspire* e o *STRATOS™ Explore* são constituídos por 256 transdutores, e permitem a criação de até oito pontos focais. Estas duas opções operam a uma frequência de atualização de 40kHz, com um alcance de até setenta centímetros e possibilitam a criação de efeitos hápticos complexos, assim como experienciar linhas e curvas contínuas.

O *Touch* apresenta características mais modestas em relação aos outros dois produtos, um menor número de transdutores, 192 transdutores, só permite a formação de quatro pontos focais, a uma frequência de atualização de 400Hz, com um alcance inferior a cinquenta centímetros. Este *kit* de desenvolvimento permite unicamente a criação de pontos discretos, e por isso encontra-se mais adequado a aplicações como casas inteligentes, e em contexto médico e industrial.

2.4.3 Universidade do Minho

O *InnovHaptic*, desenvolvido em 2017, é o resultado da aposta do ESRG da Universidade do Minho no desenvolvimento da sua própria interface háptica, em parceria com o grupo empresarial *Bosch*. Numa primeira instância, foram controlados quatro transdutores de forma a criar um foco direccionado no espaço, com o objectivo de fazer vibrar um papel de alumínio. A prova de conceito foi realizada com sucesso e partiu-se para o desenho e construção de um modelo com 100 actuadores ultra-sónicos.

O protótipo é composto por uma matriz de transdutores de ultra-sons e uma plataforma de desenvolvimento da família *Xilinx Zynq*, que tem a função de controlar todo o sistema.

A matriz de actuadores é conectada à plataforma *ZC706* através de *flat-cables*, como observado em 2.9, que transmitem os sinais responsáveis por actuar cada transdutor individualmente. A arquitectura presente na plataforma é uma arquitectura híbrida da família *Zynq*, composta por um CPU (Arm Cortex-A9) e uma FPGA.

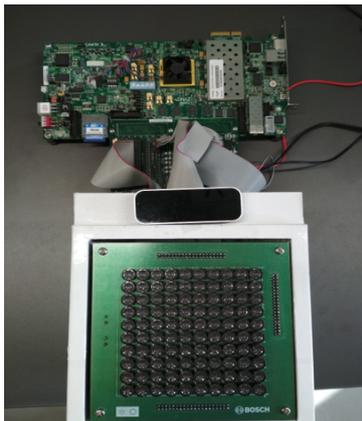


Figura 2.9: InnovHaptic - 100 transdutores.

A tecnologia FPGA vem satisfazer um requisito fundamental no *Ultrasonic Mid-Air*, o controlo preciso e síncrono do desfasamento entre as ondas sonoras emitidas. Recorrendo ao paralelismo da FPGA, os transdutores são actuados de forma síncrona e sem latência (*jitter*) entre si.

Ao nível do software de controlo, este foi desenvolvido em linguagem de programação C e sem presença de sistema operativo, isto é em *baremetal*. A aplicação é responsável por configurar os parâmetros do sistema como, frequência portadora, tipo de modulação e sua frequência, posição do ponto focal relativamente à superfície da matriz, entre outros.

Para tornar mais intuitiva a interacção e a configuração do sistema foi desenvolvido uma aplicação gráfica. Na mesma linha de pensamento, foi desenvolvido uma aplicação em linguagem *Python* que tira partido do sensor por gestos *LeapMotion*. O seguimento da palma da mão do utilizador gera um feedback háptico adaptativo.

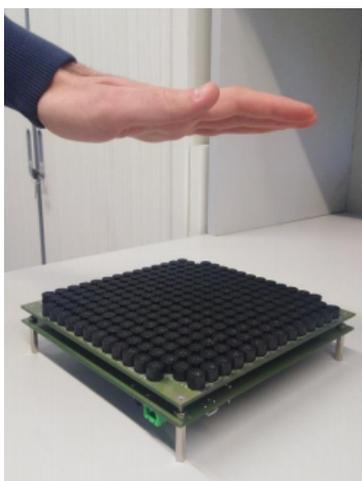


Figura 2.10: InnovHaptic - 248 transdutores.

O passo seguinte foi idealizar um sistema mais compacto e que mitigasse alguns dos problemas do protótipo anterior. O novo hardware pode ser dividido em três componentes: um *System on Module* (figura 2.13), a PCB dos transdutores (figura 2.11) e uma PCB de suporte (figura 2.12) que interliga os elementos anteriores.

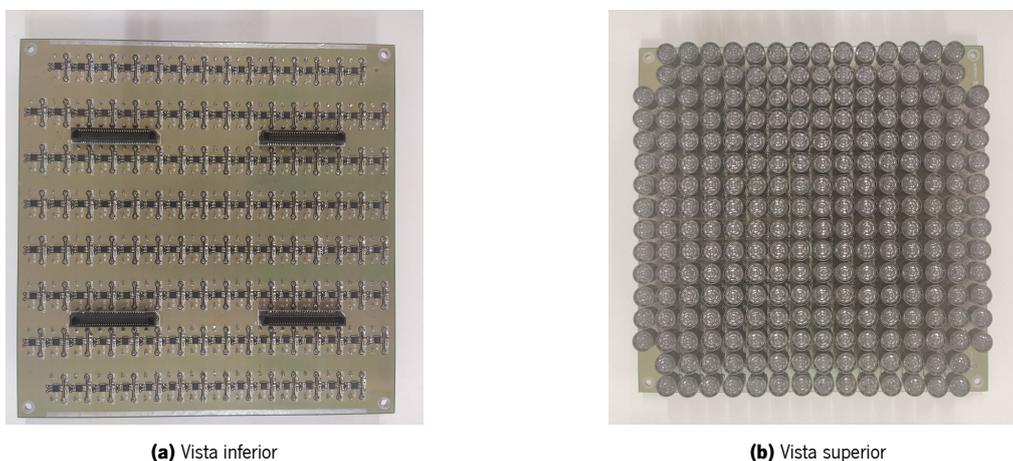


Figura 2.11: PCB dos transdutores.

A PCB da figura 2.11 é composta por transdutores ultra-sónicos (Murata MA40S4S) e respectivos *drivers* de actuação, além dos conectores para possibilitar a comunicação com a PCB de suporte. Ou seja, tornando-as peças independentes. Em operação, os transdutores alcançam temperaturas altas (cerca de 92°C). Por essa razão, existiu um especial cuidado na colocação dos transdutores, tendo estes sido soldados à PCB com uma altura de 0.5cm. O objetivo foi minimizar a temperatura de aquecimento através da circulação de ar sob eles.

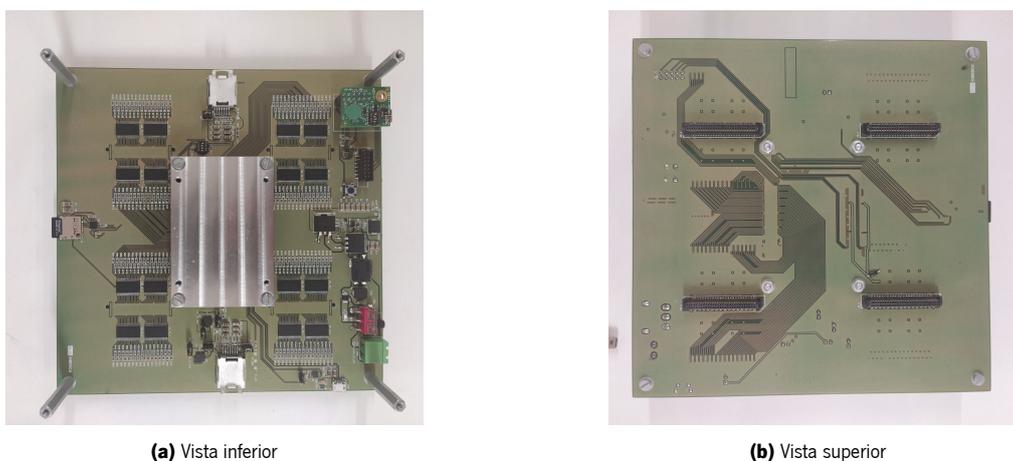


Figura 2.12: PCB de suporte ao SoM.

Por último, a PCB de suporte inclui todas as ligações com o SoM e a PCB dos actuadores, assim como toda a gestão da alimentação do protótipo. Possui ainda diferentes interfaces de comunicação com o exterior, nomeadamente interface USB, JTAG para depuração e programação do processador presente no SoM e a interface para o cartão microSD.

2.4.3.1 *System on Module*

O SoM é parte central no desenvolvimento do novo protótipo. Com o objectivo de minimizar o esforço de prototipagem e portabilidade do sistema já existente no InnovHaptic, optou-se por um *System on Module* (SoM) com uma arquitectura Zynq-7000. Esta família de dispositivos tem uma gama diversificada de módulos, o que facilita a escolha do SoM mais adequado.

A preferência recaiu sobre a série *TE0745* da *Trenz Electronic GmbH*, mais propriamente o SoM *TE0745-02-45-2IA*, apresentado na figura 2.13.



Figura 2.13: SoM *TE0745-02-45-2IA*.

O módulo integra um *System on Chip Xilinx Zynq-7045*. Detém portanto uma arquitectura idêntica à existente na ZC706, com dois processadores ARM Cortex-A9 MPCore e FPGA. Disponibiliza 250 *GPIOs* acessíveis pela FPGA, o que permite flexibilidade total e estratégias de controlo independentes para os 248 transdutores da interface háptica.

A dimensão do módulo é perfeitamente adequada à integração que se pretende atingir com este novo protótipo. Apresenta uma área de $5.2 \times 7.6 \text{ cm}^2$. Além do SoC inclui todos os periféricos vitais ao seu bom funcionamento, como memórias e o necessário à sua protecção e acondicionamento eléctrico.

Para satisfazer a gama de aplicações do conceito de *Mid-Air Haptic*, o SoM apresenta certificação industrial, incluindo o funcionamento numa gama de temperaturas entre os -40°C e 85°C . Condição relevante tendo em consideração as altas temperaturas que o sistema alcança. O módulo vem equipado com um dissipador térmico, o que auxilia na questão térmica do protótipo.

Os esquemáticos da plataforma *carrier* serviram de base no desenvolvimento da PCB, presente na figura 2.12.

2.4.3.2 Transdutor de ultra-sons

Os actuadores da interface háptica são transdutores piezoeléctricos, ou seja quando é aplicada uma tensão eléctrica a cada um destes componentes eles sofrem uma compressão. Quando a tensão deixa de existir, retomam novamente o seu formato. O movimento mecânico induz uma oscilação periódica nas partículas do ar.

O parâmetro fundamental de caracterização de um transdutor de ultra-sons é o valor de *Sound Pressure Level* (SPL), que corresponde à diferença de pressão que a onda acústica provoca no meio face à pressão existente no ambiente (em equilíbrio). Os gráficos das figuras 2.14 e 2.15 [21] caracterizam a intensidade da radiação acústica emitida. Deste modo, a resposta em frequência permite quantificar o SPL do transdutor consoante a frequência de operação. O transdutor MA40S4S atinge um valor de pico de 120 dB a uma frequência de 40kHz a uma distância de trinta centímetros, quando alimentado a 20V_{pp}. O gráfico de directividade caracteriza a atenuação do SPL da onda sonora de acordo com o ângulo de propagação. A orientação com maior atenuação corresponde ao ângulo $\pm 90^\circ$, com -20dB a trinta centímetros da superfície do transdutor.

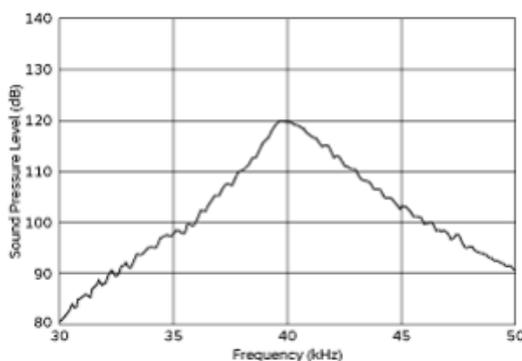


Figura 2.14: Resposta em frequência.

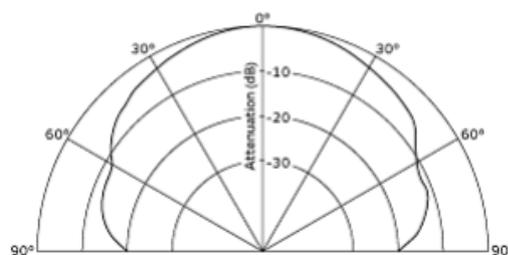


Figura 2.15: Gráfico de directividade.

Capítulo 3

Especificação do sistema

O InnovHaptic é um interface háptico, descrito na secção 2.4.3, que permite criar sensações tácteis em pleno ar. O protótipo é composto por dois subsistemas, PCB de suporte ao SoM e uma PCB com os actuadores (figuras 2.11 e 2.12). Como complemento inclui , de forma a converter o protótipo numa interface por gestos.

O sistema é configurado a partir de um *host* que faz interface com uma câmara de infravermelhos *LeapMotion*, de forma a converter-lo numa interface por gestos. A lógica programável, perante os parâmetros recebidos, calcula as características das ondas acústicas a emitir e actua individualmente o conjuntos de transdutores.

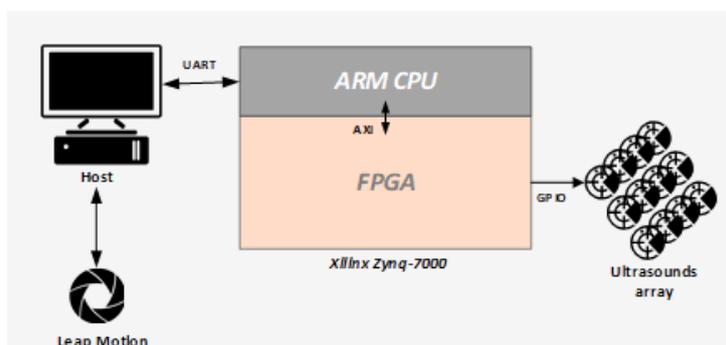


Figura 3.1: Diagrama do sistema.

O protótipo actual marca um novo patamar no aperfeiçoamento da interface háptica. No entanto apresenta alguns inconvenientes no seu funcionamento, seja pelas temperaturas elevadas que atinge, seja pela criação de lóbulos laterais. Ambas as situações contribuem para a ineficiência da interface háptica. Se por um lado o comportamento térmico influencia a propagação das ondas sonoras e provoca a flutuação da pressão acústica, a longo prazo irá causar o desgaste dos componentes. Já os lóbulos laterais são responsáveis por uma diminuição da percepção do utilizador, dado serem pontos com um nível de pressão acústica semelhante ao ponto focal.

Para colmatar os problemas descritos acima, o sistema a desenvolver nesta dissertação pretende manter as capacidades apresentadas no protótipo *InnovHaptic*. Ao mesmo tempo que procurará minimizar a sua temperatura de funcionamento e a presença de lóbulos laterais, tentando sempre reduzir a intensidade da radiação acústica emitida.

3.1 Requisitos do sistema

A presente dissertação tem como grande objetivo de aumentar a eficiência da interface háptica, por intermédio da redução da temperatura de funcionamento e de uma melhoria na sensação táctil produzida.

A elevada temperatura relaciona-se em grande medida com a potência sonora emitida pelos transdutores, que ao vibrar à potência máxima dissipam uma grande quantidade de energia na forma de calor. A redução da temperatura estará inevitavelmente ligada à diminuição da intensidade acústica da interface háptica.

Apesar disso, o efeito da redução da pressão acústica no ponto focal na sensação háptica deverá ser sempre tido em conta, pois é um factor relevante na experiência do utilizador. Porém a percepção do ponto focal é igualmente afectada pela presença marcante dos lóbulos laterais, dada a sua proximidade ao ponto focal e à pressão sonora muito significativa.

Para este fim idealizou-se, com base em estudos na área da disposição aleatória dos transdutores [22], a introdução de aleatoriedade na actuação dos transdutores. A localização aleatória dos transdutores elimina a presença dos lóbulos laterais, todavia no protótipo actual o posicionamento dos transdutores segue uma rede quadrangular predefinida (figura 2.11b). Deste modo, surge a necessidade de adaptar a estratégia. Optou-se por realizar a actuação de subgrupos aleatórios de transdutores. A alternância entre os subconjuntos permitirá, em teoria, recriar diferentes distribuições aleatórias. A actuação dos transdutores irá ser suspensa momentaneamente ao longo do tempo, o que adicionalmente irá permitir o arrefecimento da interface háptica.

Uma segunda abordagem pretende explorar a anatomia sensorial humana, beneficiando de técnicas de emissão periódica das ondas acústicas. Ao descartar a necessidade da emissão contínua dos ultrasons, existirá um impacto no comportamento térmico do sistema, ajustado ao intervalo de tempo da inactividade. Relativamente à estimulação do corpo humano, os diferentes tipos de mecanorreceptores são sensíveis a diferentes frequências de operação, o que com o devido refinamento pode potenciar o estímulo háptico.

Ao nível da arquitectura do sistema, as novas funcionalidades terão de ser integradas no protótipo anterior, o que levará a uma redefinição da arquitectura já existente. Posto isto foram definidos requisitos, funcionais e não funcionais, para os dois principais objetivos da dissertação.

Requisitos funcionais

- Aleatoriedade dos transdutores;
- Funcionamento periódico dos transdutores.

Requisitos não funcionais

- Reduzir a temperatura de funcionamento;
- Manter ou aumentar a sensação háptica.

3.2 Arquitectura do sistema

O sistema utiliza um SoM da família *Xilinx Zynq-7000*, mais concretamente o módulo TE0745, apresentado na secção 2.4.3.1. O facto deste apresentar uma arquitectura mista permite colocar em prática o princípio de co-design, evidenciado na figura 3.2. Tirando partido deste princípio, o desenho da arquitectura realiza-se de acordo com um *trade-off* entre o esforço de desenvolvimento e o desempenho de determinada opção. O sistema pode ser dividido entre o *Processing System* (PS) e a *Programmable Logic* (PL), mantendo o equilíbrio entre as duas métricas.

A lógica programável alberga todos os cálculos necessários à criação do ponto focal por parte da matriz de transdutores. O paralelismo deste tipo de implementação permite calcular rapidamente as fases para cada um dos transdutores. A validade do desfasamento entre os transdutores está dependente de que a actuação dos 248 transdutores da matriz seja efectuada no mesmo instante de tempo. Por outro lado, através da criação de uma *pipeline*, a FPGA consegue realizar cálculos sucessivos das fases para cada um dos transdutores, o que proporciona uma elevada taxa de actualização do ponto focal.

A implementação em hardware reconfigurável apresenta um elevado desempenho, no entanto em certos contextos o benefício não compensa o esforço despendido. Por essa razão, a existência de um *Processing System* traz uma maior versatilidade ao sistema. Exemplo disto é câmara LeapMotion que será

integrada futuramente no protótipo, dispensando a ligação intermédia ao *host*. Dado os requisitos pouco exigentes da sua função no sistema, não tem interesse a inclusão na lógica programável. A execução no *Processing System* permite equilibrar a complexidade e a performance do sistema.

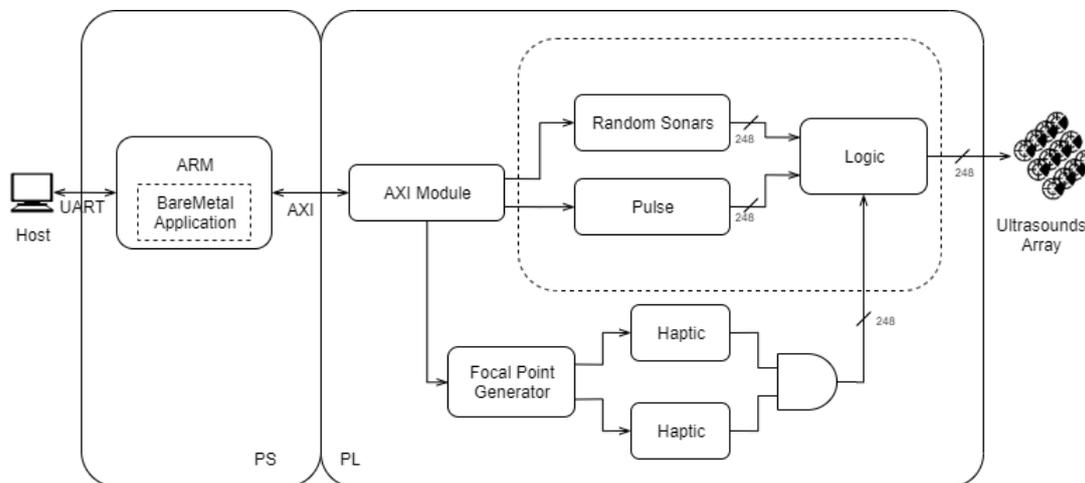


Figura 3.2: Arquitectura do sistema.

A interface com o utilizador é, igualmente, executada no PS, através de uma aplicação *baremetal*, que comunica com o *host* por uma interface de comunicação UART. A aplicação tem o propósito de configurar diversos parâmetros da interface háptica, nomeadamente a posição do ponto focal e a disposição dos transdutores no espaço, a frequência portadora, o tipo e a frequência de modulação, o *duty-cycle* do sinal aplicado a cada transdutor, entre outros. Para actualizar os vários módulos implementados na lógica programável com os parâmetros recebidos do exterior, é fundamental a existência de uma interface de comunicação AXI entre o *Processing System* e a *Programmable Logic*. O meio escolhido para realizar a configuração dos *IP Cores* presentes na FPGA, foi através de interface AXI *Lite*, sendo esta uma interface mapeada em memória, desenvolvida pela ARM. É uma das mais utilizada neste tipo de contexto por possuir taxas elevadas de *throughput* e baixa latência na transferência de dados entre o processador e os *IP Cores*.

A arquitetura do sistema ao nível da FPGA possui vários blocos de processamento *IP Core*, de forma a aproveitar ao máximo o potencial de paralelização do sistema. O módulo *AXI Redirector* faz a interface entre o processador e os restantes *IP Core* instanciados. O seu papel é meramente o de redireccionar os sinais provenientes do *Processing System* para a *Programmable Logic*, visto que é mapeado em memória, através da interface AXI *Lite* que detém, é facilmente acessível pelo *software*. Do ponto de vista do *software*, é apenas necessário ter-se a descrição dos registos de *hardware*. O *Focal Point Generator IP Core* é responsável por indicar ao módulo *Haptic* as coordenadas dos transdutores na PCB e a posição

no espaço do ponto focal. Seguidamente, o *Haptic IP Core* tem como principal função calcular as fases dos transdutores para a geração do ponto focal e de fazer a actuação dos mesmos. Para isso conta com parâmetros do sistema, necessários ao cálculo das fases, como a temperatura do meio, o tipo de modulação, o ponto de origem dos transdutores e a localização do ponto focal.

Após a discussão no seio do grupo de investigação, e tendo por base o descrito na secção 3.1, delinear-se-iam duas estratégias que irão originar dois *IP Cores*, nomeados de *Pulse* e *Random*.

3.2.1 Actuação periódica

O módulo *Pulse* tem como objectivo evitar a emissão acústica contínua por parte dos transdutores, ao mesmo tempo que explora a anatomia da mão humana em prol do sistema. Ao existir uma actuação intermitente é expectável que haja uma redução da temperatura da interface háptica.

O módulo, exemplificado na figura 3.3, activa cada um dos transdutores durante o período de actuação do transdutor $T = \frac{1}{40kHz} = 25\mu s$, os quais só voltam a ser activados após um tempo configurável, T_{pulse} . Os parâmetros necessários à sua configuração são a frequência de actuação, o número de pulsos, assim como a frequência a que é emitida a nova onda. A onda deixa de ser um sinal ininterrupto, para se tornar um sinal pulsado.

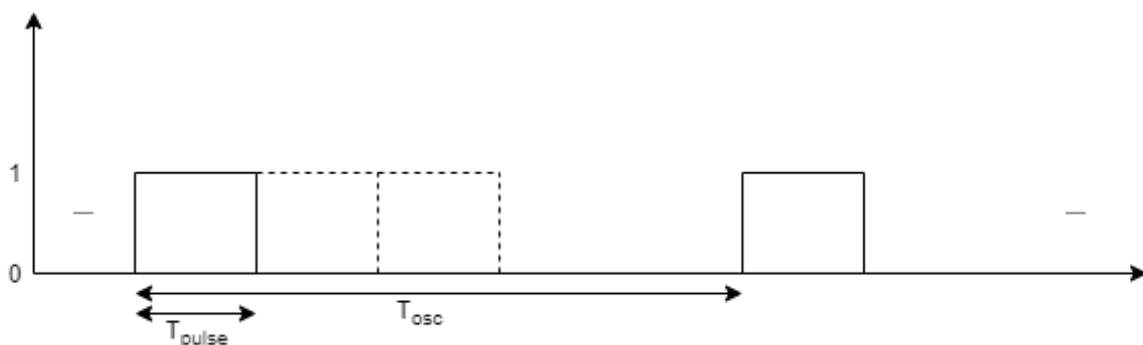


Figura 3.3: Estratégia de pulsar.

3.2.2 Actuação aleatória

Por sua vez, o módulo *RandomSonars* vai tentar explorar a componente aleatória na disposição dos transdutores mencionada em [22]. Contudo de uma abordagem distinta, pois no presente protótipo a disposição dos ultra-sons na PCB é fixa, na forma de uma matriz espelhada. Para isso irá escolher um

pequeno grupo de transdutores para estar inactivo, que irá alternar entre todos os elementos, promovendo o arrefecimento do protótipo.

O módulo *RandomSonars* tem a capacidade de activar um conjunto de transdutores da PCB, durante um período de tempo, após o qual procede à escolha de um novo conjunto aleatório. A escolha aleatória será por intermédio de um *Linear Feedback Shift Register* (LFSR), seguindo o trabalho de *Marsaglia* [23] [24]. Para isto necessita de receber como parâmetro a quantidade de transdutores activos e a frequência a que será escolhido cada novo conjunto.

Um LFSR é capaz de gerar números pseudo-aleatórios, através da introdução de um valor inicial, denominado semente, no *shift-register*. A cada ciclo de relógio, o LFSR irá gerar um novo valor, através de um deslocamento do registo, com a eliminação do *LSB* e a introdução de um novo *bit* no *MSB*. O valor lógico do novo *bit* é atribuído em função do estado anterior do *shift-register*.

Na figura 3.4 encontra-se representado um LFSR de 8 *bits*, este é capaz de gerar números pseudo-aleatórios entre 0 e 255, em que o *MSB* resulta da seguinte operação $[8] \oplus [6] \oplus [5] \oplus [4]$.

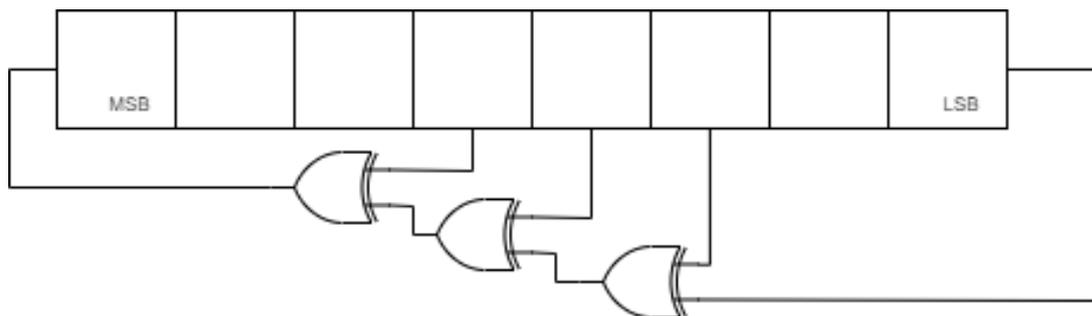


Figura 3.4: *Linear-Feedback Shift Register 8-bits.*

Capítulo 4

Simulação

A interface háptica, desenvolvida pelo grupo de investigação (figura 2.9), apresenta uma distribuição em rede quadrangular bastante compacta. A disposição dos transdutores não só dificulta a dissipação térmica do sistema, como origina o aparecimento de lóbulos laterais.

Neste capítulo pretende-se realizar uma simulação comportamental do sistema háptico, assim como estudar a influência de determinados parâmetros do sistema. Pretende-se ainda verificar o efeito das estratégias descritas no final do capítulo 3.

4.1 Modelo de simulação

O modelo de simulação pretende representar a criação de um ponto focal através da emissão de ondas sonoras, por um conjunto de transdutores de ultra-sons. O elemento-chave na formação do ponto focal é a fase da onda emitida por cada transdutor. A fase de cada elemento deve reflectir a sua distância ao ponto focal, de forma a que as cristas das ondas sonoras alcancem o local no mesmo instante. Para isso, após o cálculo do comprimento de onda (λ), associado à frequência de operação do transdutor e já com a localização de todos os transdutores, é possível relacionar o comprimento de onda com a distância ao ponto focal e assim determinar o desfasamento de cada transdutor.

O modelo de aproximação ao campo acústico tem por base o princípio de *Ray Tracing*, segundo o qual a energia acústica se propaga ao longo de uma linha recta desde a fonte sonora até ao ponto em análise. O princípio da aproximação é matematicamente simples, porém é bastante complexo a nível computacional e por isso pouco eficiente. Apesar da simplicidade, é capaz de modelar o foco das ondas sonoras, no entanto não modela fenómenos acústicos como a reflexão e a refacção de ondas sonoras.

Contudo o modelo mostra-se adequado ao estudo de interfaces hápticas Mid-Air, já que o Ultrasonic Mid-Air Haptic apresenta um curto alcance de operação e sem presença de obstáculos que interfiram na criação do ponto focal.

O campo acústico, gerado pela propagação das ondas sonoras, corresponde a um espaço tridimensional $[xyz]$, que se encontra subdividido em $N * N * N$ pontos. A dimensão e a resolução do campo acústico determinam o valor de N . O facto do método de *Ray Tracing* analisar cada ponto individualmente, leva a que o modelo apresente uma complexidade de N^3 . Para diminuir a carga computacional e permitir uma visualização adequada do campo acústico, o modelo calcula unicamente a intensidade acústica nos planos xy ($z = 0.15m$), xz ($y = 0.25m$) e yz ($x = 0.25m$).

A intensidade do campo acústico corresponde ao somatório das pressões exercidas pelas ondas sonoras emitidas. O contributo de cada elemento da interface háptica varia com a distância e o ângulo a cada ponto do campo acústico. Segundo [21], as ondas acústicas emitidas por cada transdutor (secção 2.4.3.2) são ondas sinusoidais com uma intensidade acústica de 120dB SPL a uma distância normal de 30cm. O modelo de simulação segue essa indicação e considera-as ondas sinusoidais puras. As conclusões das simulações do presente capítulo são por isso optimistas, pois assumem um comportamento ideal dos transdutores.

4.1.1 Gráfico de directividade

Os transdutores de ultra-sons irradiam ondas acústicas com uma determinada potência, no entanto o sinal sonoro é atenuado à medida que se afasta da origem. O ângulo de emissão é outro motivo de atenuação dos ultra-sons. A caracterização deste parâmetro pode ser analisada através de um gráfico de directividade, como o da figura 4.1 [25].

Um dos objetivos da dissertação era proceder à optimização do modelo de simulação. A precisão de cálculo das intensidades da pressão de radiação acústica no espaço tridimensional requer uma representação cuidada do gráfico de directividade. Deste modo procedeu-se a uma caracterização mais pormenorizada do gráfico de directividade do transdutor, descrito na secção 2.4.3.2. O gráfico resultou de um pedido à empresa de componentes electrónicos *Murata*, que disponibilizou a documentação de teste do transdutor, datada de Setembro de 1995. O aperfeiçoamento foi alcançado pela utilização de aproximações lineares em segmentos menores, a partir dos dados do gráfico da figura 4.1.

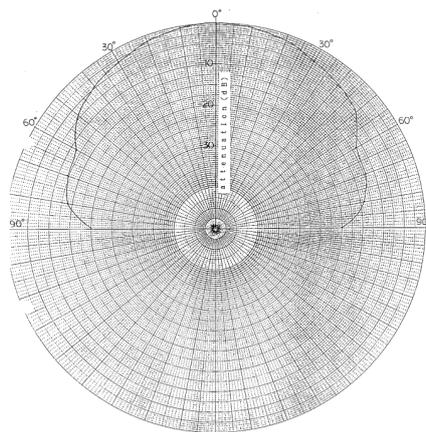


Figura 4.1: Gráfico de directividade MA40S4S fornecido pelo fabricante.

Através da observação das figuras 4.2a e 4.2b é perceptível a melhoria na representação da directividade do transdutor. A aproximação linear em segmentos de 15° permite recriar a depressão alcançada na proximidade dos $\pm 60^\circ$, que torna o gráfico muito semelhante ao fornecido pelo fabricante.

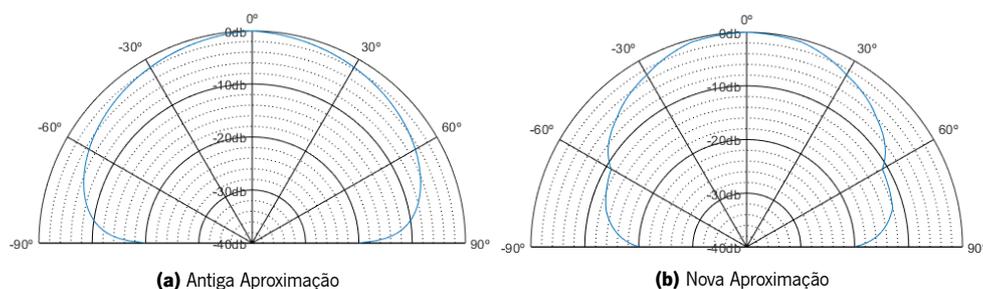


Figura 4.2: Gráfico de Directividade.

Tendo um modelo de simulação que represente de forma adequada o campo acústico é relevante analisar o efeito de determinados parâmetros da interface na criação do ponto focal. Para além disto, estudou-se o efeito das duas estratégias descritas na secção 3.2 no desempenho da matriz de transdutores. Pretendeu-se com as simulações comprovar se a criação do ponto focal seria afectada e de que forma a intensidade do ponto focal seria influenciada por estas abordagens.

4.2 Geometria da rede

Os transdutores de uma interface háptica podem ser distribuídos aleatoriamente ou de uma forma ordenada por meio de uma rede. Seguindo uma distribuição ordenada é possível optar por uma rede de polígonos regulares, ou uma composta por diferentes tipos de polígonos, neste caso denominada como

semi-regular. A análise irá incidir sobre as três redes de geometria regular (quadrangular, triangular e hexagonal) e uma rede semi-regular, denominada kagome.

Cada rede é constituída por diferentes tipos de polígonos e em alguns casos com uma organização distinta desses elementos. A diversidade que se observa nas figuras 4.3a a 4.3d demonstra que as redes em análise apresentam uma densidade de transdutores diferente.

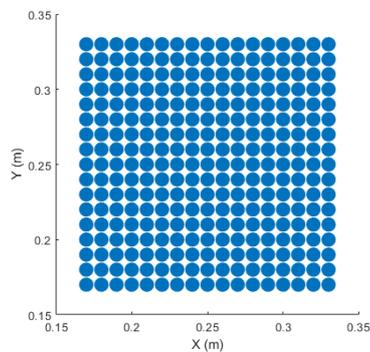
O padrão de repetição das redes em estudo é diferente nos eixos do xx e do yy . À medida que redimensionamos a rede é importante manter a proporção entre os eixos. Por isso, a fim de manter o equilíbrio do conjunto, não é possível desenhar uma rede para uma qualquer quantidade de transdutores. O parâmetro n existe para regular a expansão da rede e corresponde ao número de repetições do polígono. As equações 4.1 a 4.4 permitem calcular o número de vértices da rede (N), que neste caso representa o número de transdutores presentes na interface háptica.

$$N_{quadrangular} = (n + 1)(n + 1) \quad (4.1)$$

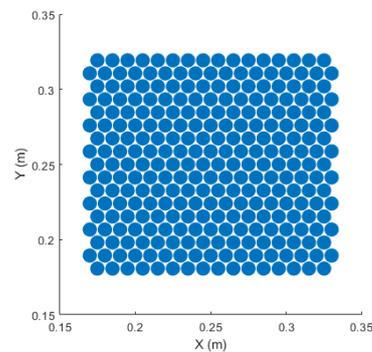
$$N_{triangular} = 2n(2n + 1) + n \quad (4.2)$$

$$N_{hexagonal} = (2n + 1)(n + 1) \quad (4.3)$$

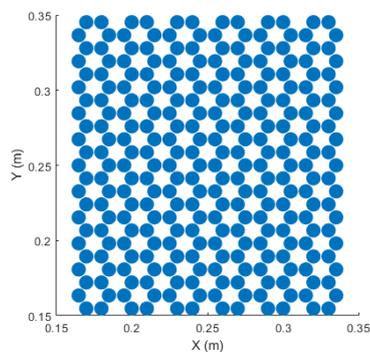
$$N_{kagome} = \frac{(n + 1)(5n + 1)}{2} + \frac{n(n - 1)}{2} \quad (4.4)$$



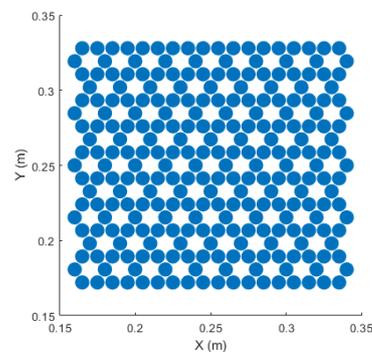
(a) Rede Quadrangular ($n=16$, 289 transdutores)



(b) Rede Triangular ($n=8$, 280 transdutores)



(c) Rede Hexagonal ($n=11$, 276 transdutores)



(d) Rede Kagome ($n=9$, 266 transdutores)

Figura 4.3: Geometria da rede.

O posicionamento desigual dos elementos na rede e o factor de ampliação da mesma impossibilitam um número igual de transdutores na mesma área superficial. Para tornar viável uma comparação do campo acústico gerado pelas diferentes redes, optou-se por dimensioná-las com uma quantidade de transdutores semelhante, conseguindo assim obter uma densidade de elementos igual, sendo a área da interface um pouco diferente.

Com uma distribuição espacial dos transdutores distinta é expectável que existam alterações no campo acústico. Nas figuras seguintes, apresenta-se o campo acústico no plano xy ($z = 0.15m$) para cada tipo de rede presente na figura 4.3.

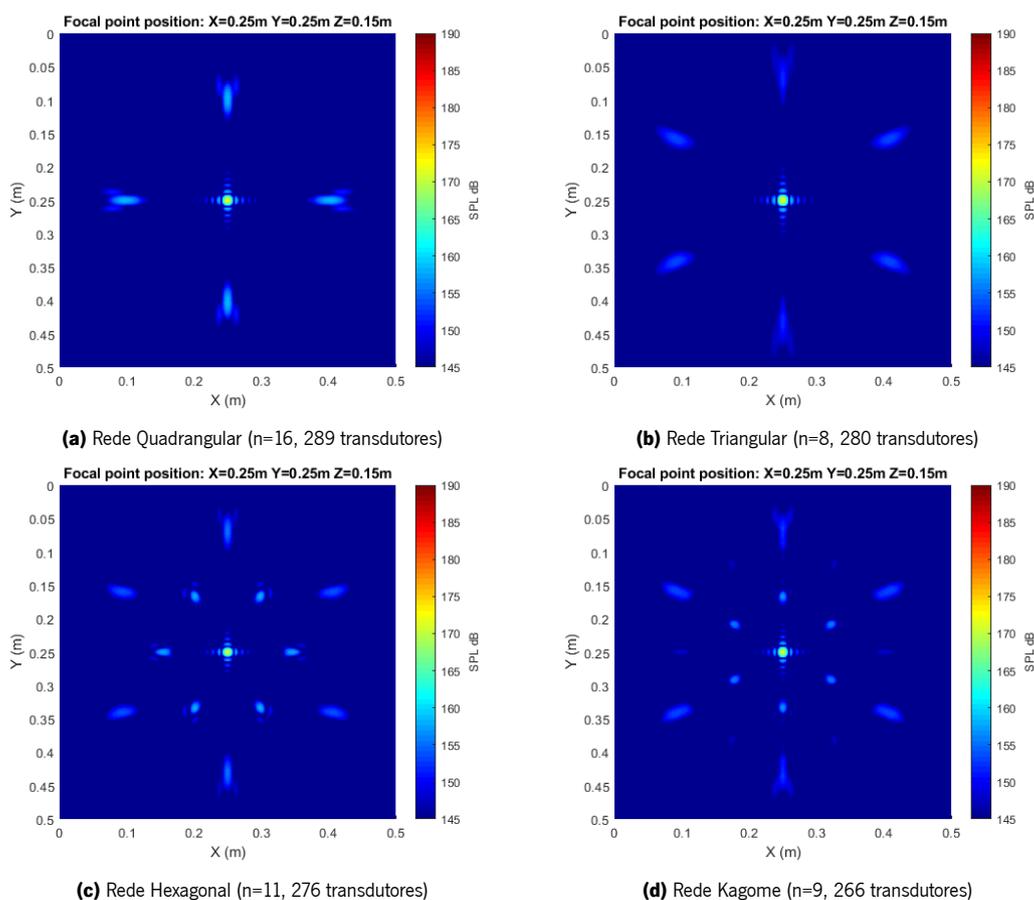


Figura 4.4: Disposição dos lóbulos laterais.

A quantidade de transdutores é semelhante em cada um dos exemplos, contudo a sua disposição é bastante diferente, variando com a geometria da rede. Comparando a orientação das figuras 4.4a e 4.4b, verifica-se que cada par de lóbulos está alinhado com um dos eixos de simetria das figuras 4.3a e 4.3b, respectivamente. A existência de lóbulos laterais está por isso relacionada com a simetria do conjunto de

transdutores. Sendo que a um maior número de eixos de simetria está associado a criação de um maior número de lóbulos laterais.

Os lóbulos laterais de cada uma das figuras encontram-se angularmente equidistantes no plano xy , de acordo com o ângulo interno do polígono que origina a rede. No caso da rede quadrangular, os lóbulos laterais formam um ângulo de 90° entre si, já na rede triangular existe um ângulo de 60° entre os lóbulos.

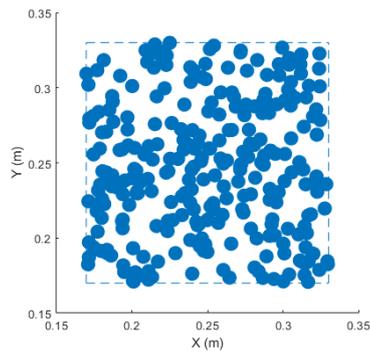
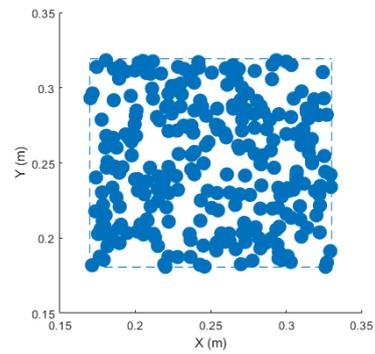
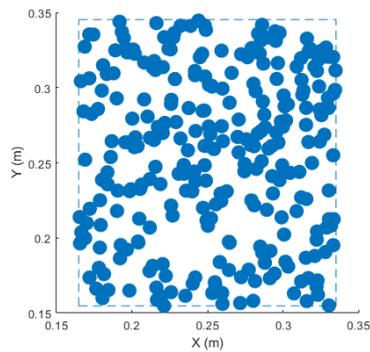
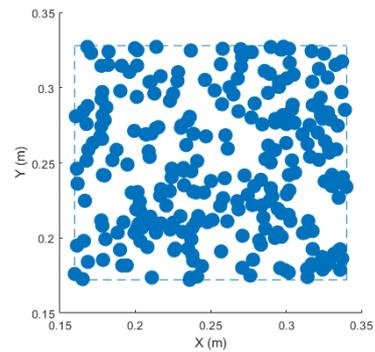
As diferentes geometrias são comparáveis por meio da intensidade e disposição dos lóbulos laterais, bem como pelo ponto focal. Através da tabela 4.1 demonstra-se que todas as situações apresentam um nível de intensidade do ponto focal muito semelhante, o que não acontece com o valor do *Signal to Noise Ratio* (SNR). O SNR corresponde ao rácio entre a intensidade sonora do ponto focal e a intensidade dos lóbulos laterais. Deste ponto de vista, a rede quadrangular apresenta o rácio mais baixo, o caso oposto é o da rede triangular com o SNR mais elevado, contudo com um maior número de lóbulos laterais.

A resolução do ponto focal é avaliada por meio da *Full Width at Half Maximum* (FWHM) e da divergência do feixe. A FWHM corresponde à distância entre os dois pontos com metade da intensidade sonora do ponto focal. A resolução do ponto focal criado pelas quatro redes é bastante semelhante, visto que o parâmetro FWHM varia no máximo quatro milímetros, comparando a rede hexagonal e a rede triangular. No entanto, a variação da divergência do feixe entre cada caso é mais significativa. A divergência do feixe avalia o aumento do diâmetro do feixe com a distância, no qual a rede hexagonal tem o maior ângulo de divergência e que contrasta com a rede triangular com um feixe de 25.64° . Considerando os dados da tabela 4.1, o melhor compromisso está na rede triangular, que a uma menor influência dos lóbulos laterais se soma o menor ângulo de divergência do feixe.

Rede	Intensidade do Ponto Focal (dB)	SNR (dB)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe ($^\circ$)
Quadrangular	171.67	11.39	0.011	29.15
Triangular	171.74	15.12	0.013	26.99
Hexagonal	170.77	14.00	0.009	49.40
Kagome	170.80	13.82	0.011	29.15

Tabela 4.1: Parâmetros do campo acústico - Geometria da Rede.

Com o objectivo de complementar a análise às distribuições espaciais acima descritas, optou-se por distribuir os transdutores aleatoriamente (figuras 4.5a a 4.5d). Para ser possível comparar ambas as situações, o número de transdutores e área disponível serão iguais, o que se traduz numa igual densidade de transdutores.

**(a)** 289 Transdutores Aleatórios (figura 4.3a)**(b)** 280 Transdutores Aleatórios (figura 4.3b)**(c)** 276 Transdutores Aleatórios (figura 4.3c)**(d)** 266 Transdutores Aleatórios (figura 4.3d)**Figura 4.5:** Geometria da rede.

A distribuição dos transdutores nas figuras 4.3a a 4.3d é a organização óptima para aquele número de elementos na área correspondente. Com a escolha aleatória torna-se impossível alcançar uma rede tão compacta, surgindo a necessidade de ampliar o critério de espaçamento entre os elementos da rede. Assim, nas figuras 4.5a a 4.5d, a distância entre os transdutores tem de ser superior a zero, ou seja a única condicionante é a não sobreposição dos mesmos. Nas figuras 4.6a a 4.6d representa-se o plano xy referente às distribuições da figura 4.5a a 4.5d.

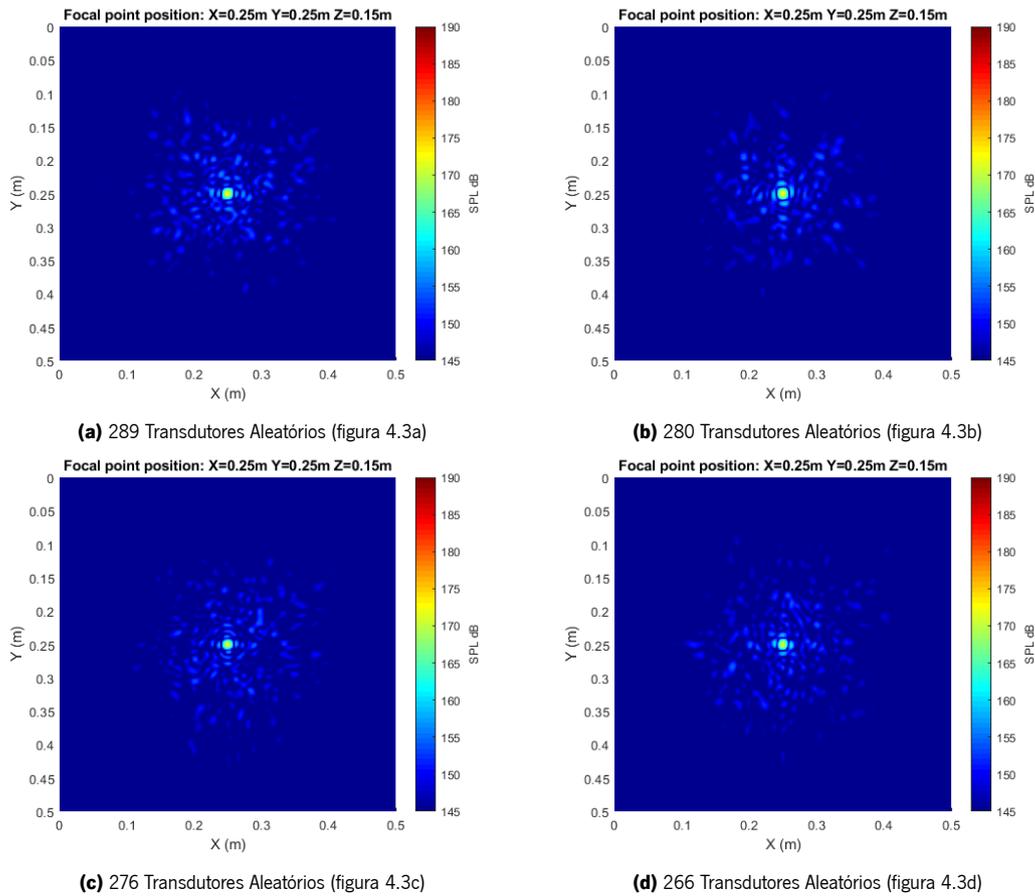


Figura 4.6: Ausência de lóbulos laterais.

Pela análise das figuras 4.6a a 4.6d, verifica-se a ausência de lóbulos laterais de elevada intensidade, o que comprova mais uma vez a relação entre a simetria da rede e a existência de lóbulos laterais.

Comparando o ponto focal de cada uma das figuras é possível verificar que não existe uma diferença clara ao ponto focal gerado por uma distribuição ordenada. Existe um aumento residual da intensidade sonora do ponto focal a tender para as distribuições aleatórias. A resolução espacial (FWHM) do ponto focal criado é igual em ambas as situações, todavia a divergência do feixe varia consoante o caso em questão. Uma vez que não existem lóbulos laterais significativos não existe a necessidade de calcular o SNR para estes casos.

Distribuição aleatória	Intensidade do Ponto Focal (dB)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe (°)
figura 4.6a	171.97	0.012	30.22
figura 4.6b	171.88	0.013	5.72
figura 4.6c	170.98	0.011	55.84
figura 4.6d	170.86	0.011	40.60

Tabela 4.2: Parâmetros do campo acústico - Distribuição aleatória.

Após verificar as alterações que a disposição aleatória introduziu no campo acústico, nomeadamente o aparecimento de diversos pontos secundários dispersos (figura 4.6a), calculou-se a média de 1000 amostras de redes semelhantes à figura 4.5a. Com esta simulação pretende-se averiguar se, além de eliminar os lóbulos laterais, é possível ao alterar a localização dos transdutores eliminar a nuvem de pequenas réplicas da figura 4.6. O ponto focal mantém as mesmas características da figura 4.6a, e como se pretendia ocorre o desaparecimento da nuvem de réplicas (figura 4.7a).

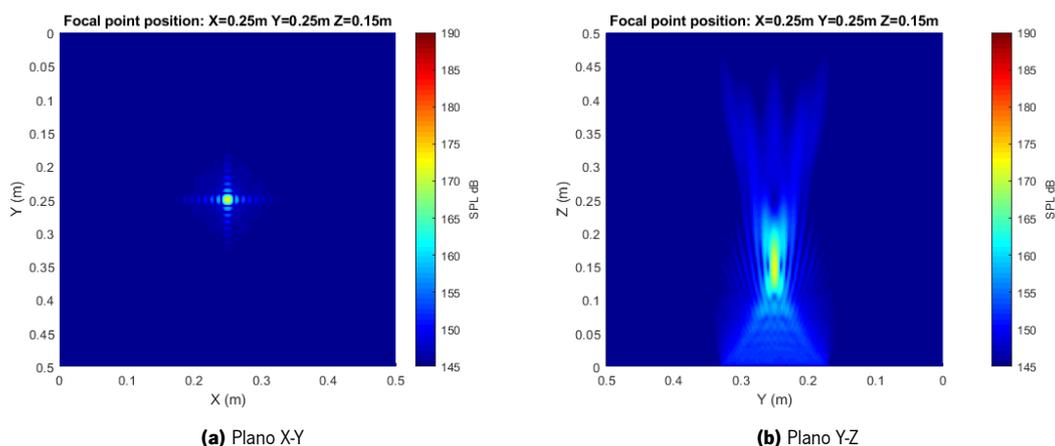


Figura 4.7: Média de 1000 amostras de uma rede aleatória.

4.3 Actuação aleatória

Os lóbulos laterais tornam-se quase irrelevantes quando se opta pela disposição aleatória dos transdutores, como se comprova na figura 4.6. Pelo facto do interface háptica já se encontrar em produção, com os transdutores organizados segundo uma rede quadrangular, foi necessário procurar uma forma alternativa de aplicar esta conclusão ao protótipo actual. Optou-se por estudar o efeito da actuação de um subconjunto aleatório de transdutores, de forma a tentar reproduzir o princípio da figura 4.6a.

Para a análise da estratégia de emissão aleatória dos transdutores simulou-se o funcionamento aleatório de um subconjunto de 192 transdutores. A figura 4.8 é constituída pelas perspectivas dos planos xz , yz , xy e uma visão a três dimensões do conjunto.

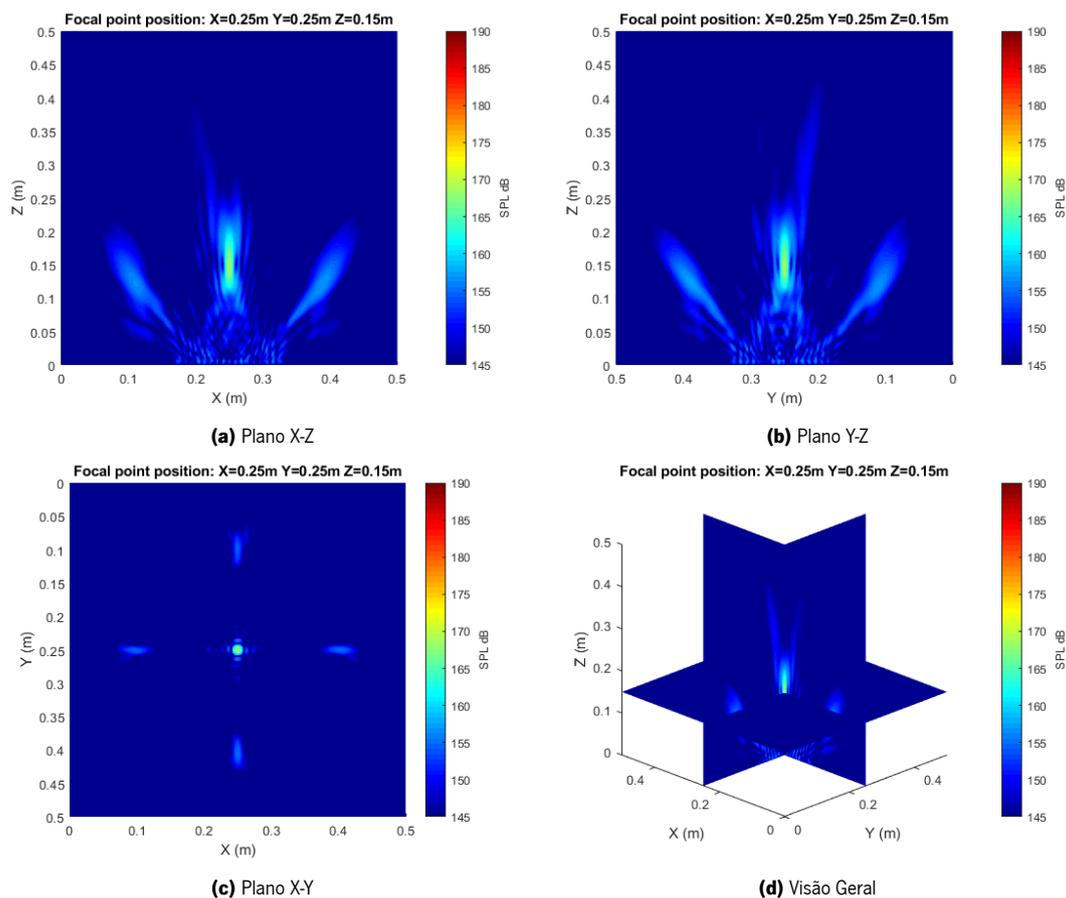


Figura 4.8: 192 transdutores activos.

Na figura 4.8 é visível a assimetria resultante da inactivação de 64 dos 256 transdutores, sendo mais perceptível no plano da figura 4.8b. O ponto focal atinge uma intensidade na ordem dos 167dB SPL e apresenta-se bastante concentrado, embora se constate que ao seu redor surgem alguns pontos secundários, ainda que de baixa intensidade.

À medida que a quantidade de transdutores activos diminui, deixa de existir qualquer regularidade na zona do ponto focal, resultado do desequilíbrio nos vários eixos de simetria da matriz de ultra-sons. A assimetria é notória no plano xz da figura 4.8 entre os pontos $(0.125m, 0.225m)$ e $(0.175m, 0.225m)$. Como seria de esperar o decréscimo no número de transdutores, ao longo das várias simulações, motiva a diminuição da intensidade do ponto focal a um ritmo aproximado de 1dB SPL entre cada um dos casos apresentados, alcançando uma intensidade um pouco acima de 166dB SPL no cenário da figura 4.8.

Apesar de ser relevante compreender as alterações no campo acústico, torna-se mais importante verificar o contributo das várias comutações no campo acústico. A alternância entre os conjuntos aleatórios de transdutores é o que permite o arrefecimento dos transdutores e a redução dos lóbulos laterais.

A frequência de comutação entre cada novo conjunto aleatório de transdutores deve ser muito menor que a frequência de emissão das ondas acústicas, ou seja muito inferior a 40kHz.

Por isso, com o objectivo de compreender a propagação das ondas acústicas na estratégia em análise e tendo em consideração a capacidade de percepção do utilizador, recorreu-se ao cálculo de uma média de um conjunto de amostras. A capacidade de percepção aproxima-se, no melhor dos casos, do décimo de segundo, logo para representar, adequadamente, uma frequência de comutação de 10kHz, é necessário um conjunto de 1000 amostras.

Na figura 4.9 observa-se o campo acústico representativo da média de mil conjuntos aleatórios de 192 transdutores. No conjunto das amostras, cada transdutor tem um contributo idêntico na criação do ponto focal. A simetria nos diferentes planos do campo acústico comprova isso mesmo. É de notar igualmente que tal como o ponto focal não observa nenhuma alteração na sua criação, unicamente vê diminuída a sua intensidade, também os lóbulos laterais se mantêm no campo acústico da figura 4.9.

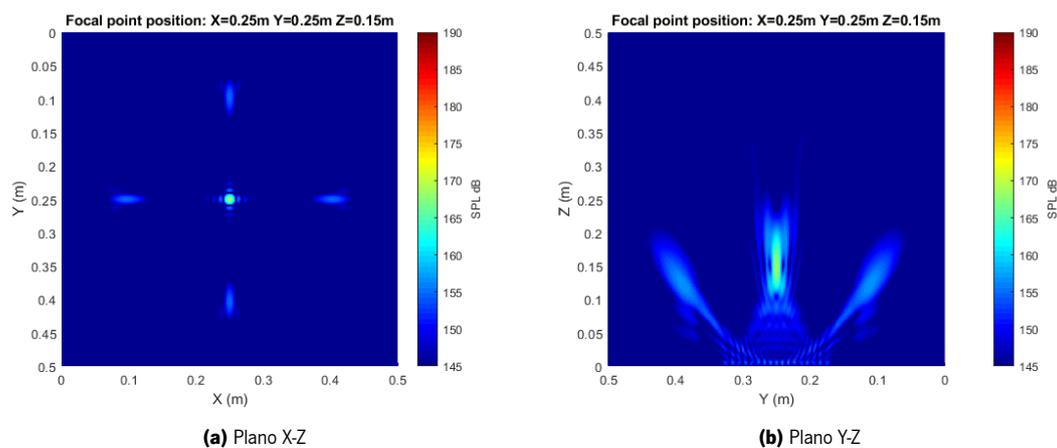


Figura 4.9: Média de 1000 amostras (192 transdutores).

A permanência dos lóbulos laterais no campo acústico deve-se à actuação aleatória ser realizada sobre subconjuntos de elementos dispostos em \mathbb{Q}^2 . Os transdutores tem posições fixas na PCB seguindo uma rede regular (figura 4.3a), com $\forall x, y \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15\}$. Independentemente da aleatoriedade introduzida na actuação irão sempre existir transdutores alinhados e com algum grau de simetria entre si. Se fosse possível reposicioná-los durante o funcionamento segundo \mathbb{R}^2 (figura 4.7), o conjunto de transdutores seria assimétrico e por consequência os lóbulos laterais desapareceriam.

4.4 Espaçamento entre transdutores

O campo acústico da interface háptica não só é modificado pelo tipo de rede, mas também pelo espaçamento entre cada um dos elementos que a constituem. A influência deste factor deve ser analisada tendo como referência o valor do comprimento de onda do sinal emitido, que neste caso é de $\lambda = 8.5mm$. No gráfico da figura 4.10 está representada a variação da intensidade sonora do ponto focal mediante o espaçamento entre cada transdutor. É possível observar uma diminuição da intensidade sonora à medida que a distância entre transdutores aumenta. Em particular, temos uma atenuação no ponto focal de aproximadamente 10dB SPL, com um afastamento entre os elementos superior a 3λ .

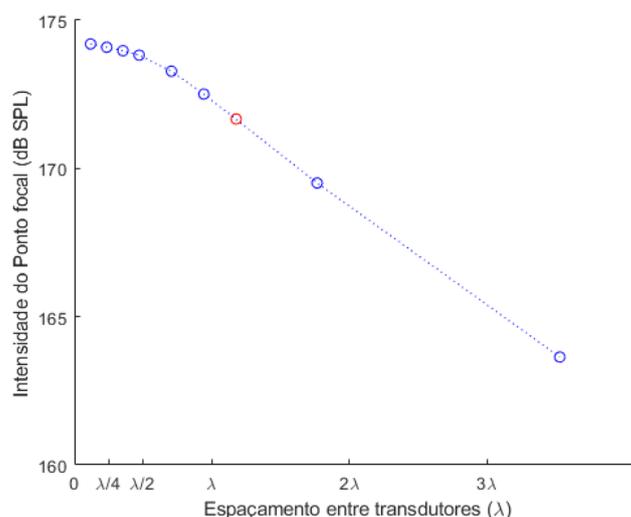


Figura 4.10: Intensidade sonora do ponto focal vs Espaçamento entre transdutores.

Contudo não é só a intensidade sonora no ponto focal o único critério para a análise do campo acústico. Deve-se por isso procurar um compromisso entre a intensidade e a resolução espacial do ponto focal, assim como a presença de lóbulos laterais. Nas figuras 4.11a a 4.11i encontram-se representados os planos yz ($x = 0.25m$) do campo acústico da rede quadrangular.

Verifica-se que, quando a distância entre elementos da rede se aproxima de zero, o ponto focal, embora possua uma maior intensidade acústica, encontra-se extremamente difuso. O conjunto de transdutores da rede possui um comportamento um tanto semelhante ao de uma única fonte sonora, neste caso com elevada intensidade.

Quando a distância entre os transdutores é superior ao comprimento de onda, existe uma diminuição acentuada da intensidade sonora do ponto focal. Surgem ainda vários pontos de pressão secundários no campo acústico. Nos casos limite em que os transdutores estão distanciados mais de 3λ , é possível

observar que o ponto focal é criado com pouca intensidade. Isto ocorre devido à directividade do transdutor, sendo que o sinal emitido é mais intenso no sentido normal à superfície do mesmo. Neste caso, em que o distanciamento é elevado, a maior contribuição energética do ponto focal advém dos transdutores no centro da rede, pelo que os mais afastados, nas extremidades, contribuem pouco devido à sua directividade.

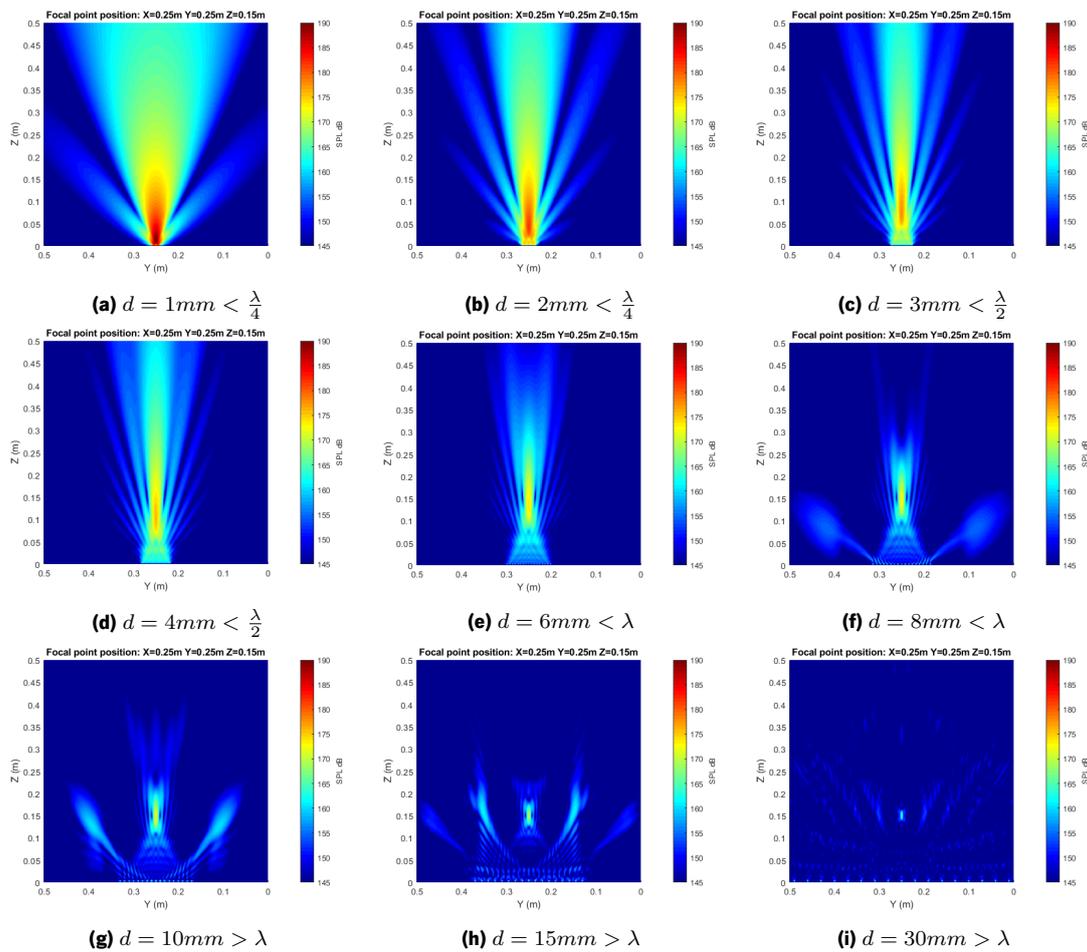


Figura 4.11: Espaçamento entre transdutores.

Na tabela 4.3 encontram-se resumidos os diferentes parâmetros do campo acústico das figuras 4.11a a 4.11i. Com a observação das figuras e os dados da tabela verifica-se que o melhor compromisso no distanciamento entre transdutores será próximo dos 6mm. Neste caso o campo acústico ainda não apresenta lóbulos laterais, o ponto focal apresenta uma intensidade acústica de 173.28dB SPL e uma resolução espacial adequada.

Espaçamento	Intensidade do Ponto Focal (dB)	SNR (dB)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe (°)
1mm	174.20	-	0.089	31.28
2mm	174.09	-	0.045	18.18
3mm	173.97	-	0.031	11.42
4mm	173.82	-	0.023	9.14
6mm	173.28	-	0.017	6.86
8mm	172.51	17.78	0.013	11.42
10mm	171.67	11.39	0.011	29.15
15mm	169.51	8.27	0.009	51.28
30mm	163.64	10.65	0.007	49.40

Tabela 4.3: Parâmetros do campo acústico - Espaçamento entre transdutores.

4.5 Quantidade de transdutores

O aumento do número de transdutores é uma das formas de aumentar a intensidade do ponto focal. Porém, com o aumento da intensidade no ponto focal, sucede também o aumento da intensidade dos lóbulos laterais. No gráfico da figura 4.12 representa-se a evolução da intensidade acústica do ponto focal com o aumento do número de transdutores.

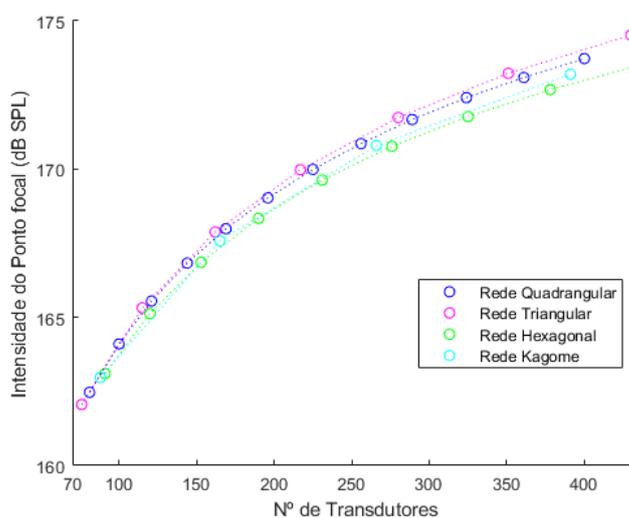


Figura 4.12: Intensidade sonora do ponto focal vs Quantidade de transdutores.

Pela observação do gráfico é possível separá-lo em duas zonas principais, quando o número de transdutores é igual a 150. Até este limite a relação entre as duas variáveis é quase proporcional. A partir

daí, a dimensão do conjunto torna-se bastante significativa e nota-se uma menor influência por parte dos transdutores da periferia, devido à maior distância ao ponto focal. No gráfico da figura 4.12 verifica-se que com o redimensionamento de 70 para 150 transdutores existe um aumento de 5dB SPL, porém para aumentar mais 5dB SPL é necessário aumentar de 150 para 300 transdutores, aproximadamente.

A relação entre as curvas presentes no gráfico é também explicada pela densidade de rede. Quanto maior for o valor deste parâmetro, maior é o número de transdutores numa determinada área, por isso mais compacta é a interface háptica. A rede triangular para o mesmo número de transdutores é a que atinge uma maior intensidade no ponto focal, ao contrário da rede hexagonal.

Tendo em mente a geometria do protótipo da figura 2.9, é essencial destacar o efeito do aumento do número de transdutores no comportamento da geometria quadrangular (tabela 4.4). Em primeiro lugar, com o aumento do número de elementos da interface está assente uma diminuição do parâmetro FWHM do ponto focal, o que indica um aumento da resolução do ponto focal. Por outro lado, a divergência do feixe varia no sentido contrário, à medida que o parâmetro da rede aumenta existe igualmente um aumento do ângulo correspondente.

Quantidade	Intensidade do Ponto Focal (dB)	SNR (dB)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe (°)
81	162.47	10.90	0.019	6.86
100	164.10	10.63	0.017	6.86
121	165.55	10.75	0.015	6.86
144	166.83	11.29	0.015	6.86
169	167.99	11.41	0.013	9.14
196	169.03	11.19	0.013	26.99
225	169.99	11.42	0.013	26.99
256	170.86	11.48	0.011	29.15
289	171.67	11.39	0.011	29.15
324	172.41	11.51	0.011	47.50
361	173.09	11.59	0.011	47.50
400	173.73	11.57	0.009	63.59

Tabela 4.4: Parâmetros do campo acústico - Número de transdutores.

4.6 Actuação pulsada

A simulação da estratégia de emissão de pulsos pelos ultra-sons proporciona uma visualização distinta das figuras das secções anteriores, pois permite visualizar a propagação das ondas acústicas.

Assim sendo, na figura 4.13, observa-se o caso de controlo, em que o ponto focal está presente continuamente no espaço de simulação e é resultado da contribuição de todos os 256 transdutores de ultra-sons. Nos instantes das figuras 4.13a a 4.13d são perceptíveis os diferentes momentos de propagação das ondas sonoras.

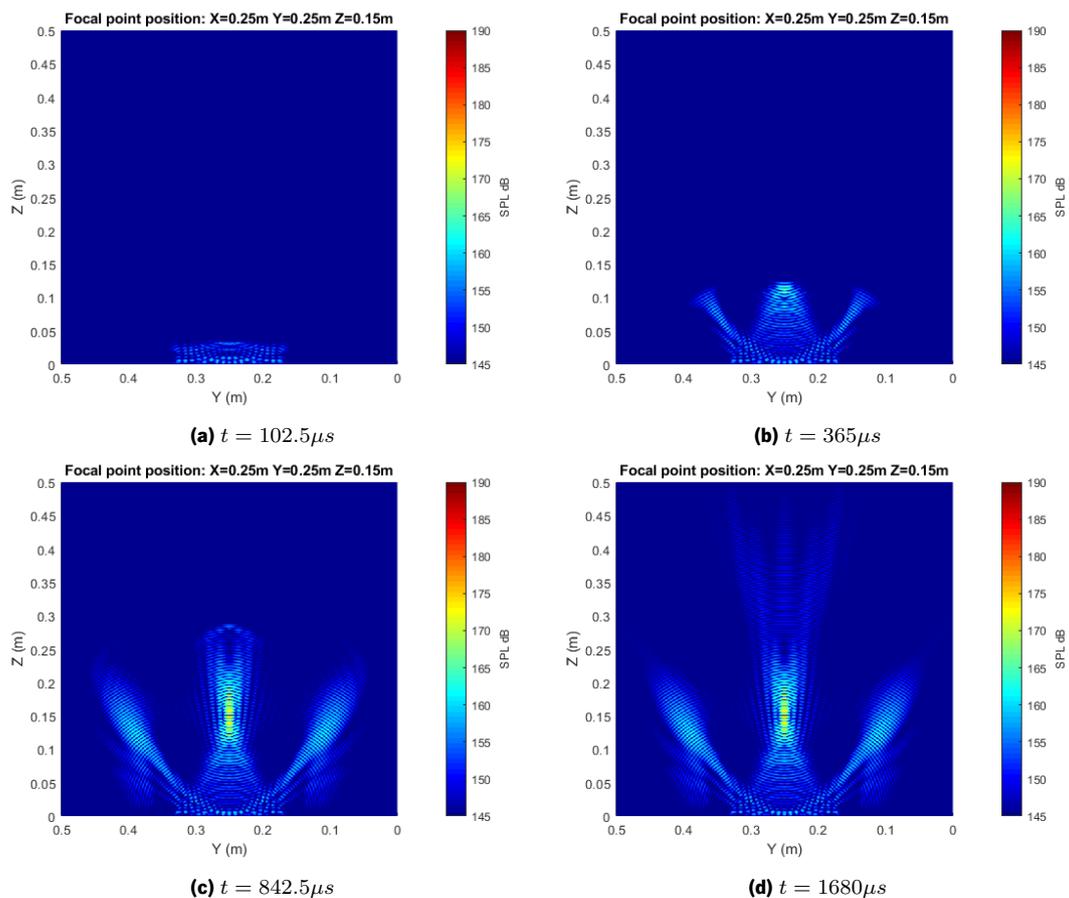


Figura 4.13: Emissão contínua.

Por outro lado, apresenta-se a criação do ponto focal na forma pulsada a uma frequência de 800Hz na figura 4.14. Em contraponto à simulação da figura 4.13, o ponto focal está presente durante um período de tempo limitado, $T_{osc} = \frac{1}{f_{osc}} = 25 \mu s$ (figura 4.14b). Durante $T_{pulse} - T_{osc}$, com $T_{pulse} = \frac{1}{f_{pulse}} = 1.25 ms$, a interface deixa de emitir ondas sonoras (figura 4.14c). O ponto focal não é criado, ocorre somente a propagação das ondas acústicas, que lhe deram origem, até à sua dissipação (figura 4.14c).

No início de um novo período do pulso, o ponto focal volta a estar presente no campo acústico durante T_{osc} , repetindo-se novamente este ciclo ao longo da simulação.

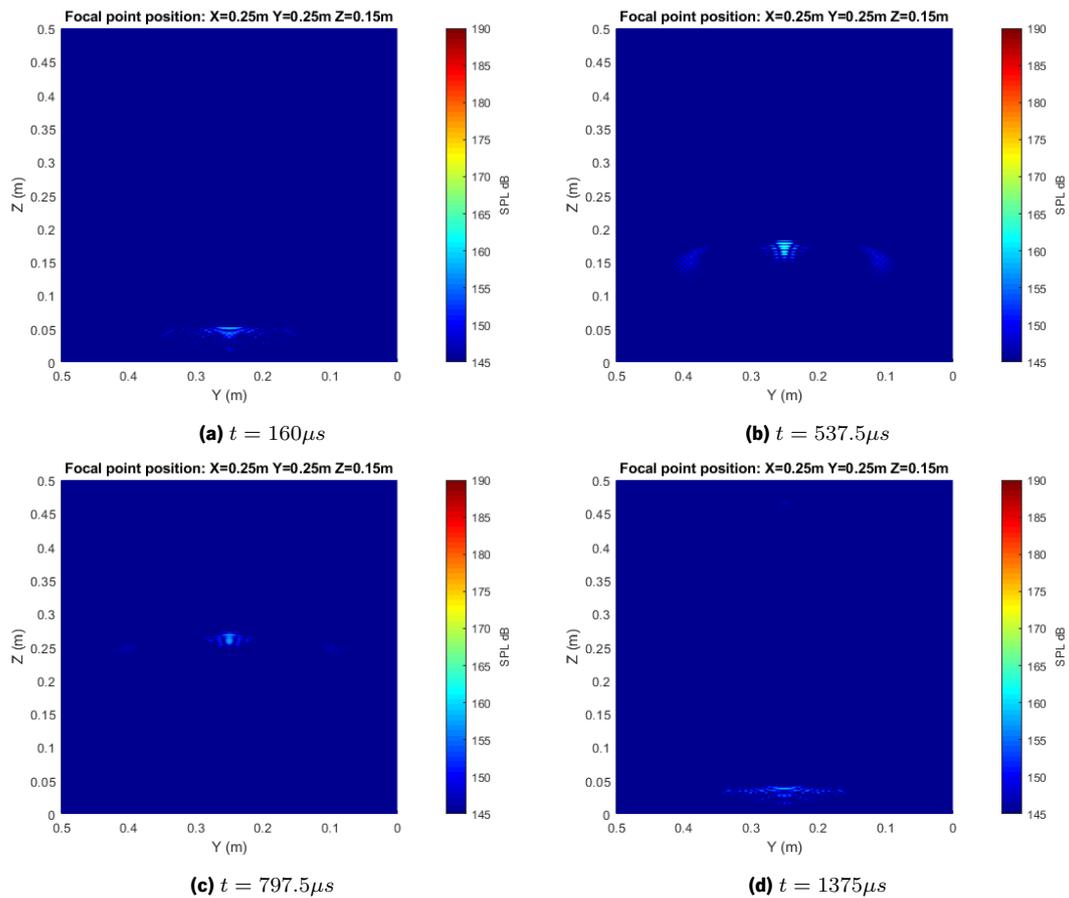


Figura 4.14: Emissão de um pulso a cada $1250 \mu s$.

O uso da estratégia de pulsar leva ao desaparecimento do ponto focal periodicamente, o que poderá ser benéfico na diminuição da temperatura de funcionamento. Desta forma os transdutores só emitem um pulso durante um intervalo de tempo. Através da modulação do pulso e no caso de se optar por um valor de frequência na ordem dos 200Hz, como descrito na secção 2.1.1, a sensação táctil pode não ser afectada de forma preponderante, servindo-se deste artifício para criar um estímulo no utilizador.

Capítulo 5

Implementação

O desenvolvimento da dissertação foi realizado no seio de um grupo de investigação, contando já o projecto com protótipos funcionais. Numa parte inicial do capítulo é descrito simplificada o sistema em que a dissertação se baseou. No decorrer são apontados alguns problemas que o sistema em causa possui e nos quais a presente dissertação se baseou, procurando solucionar os mesmos.

5.1 Visão geral

A grande parte da implementação que será de seguida descrita encontrava-se já desenvolvida, e foi herdada do protótipo anterior. O sistema manteve a mesma arquitectura, ou seja, usou-se a mesma família de dispositivos *Zynq-7000*. Foram apenas necessárias ligeiras modificações para escalar o sistema, já que o número de transdutores passou de 100 para 248 transdutores.

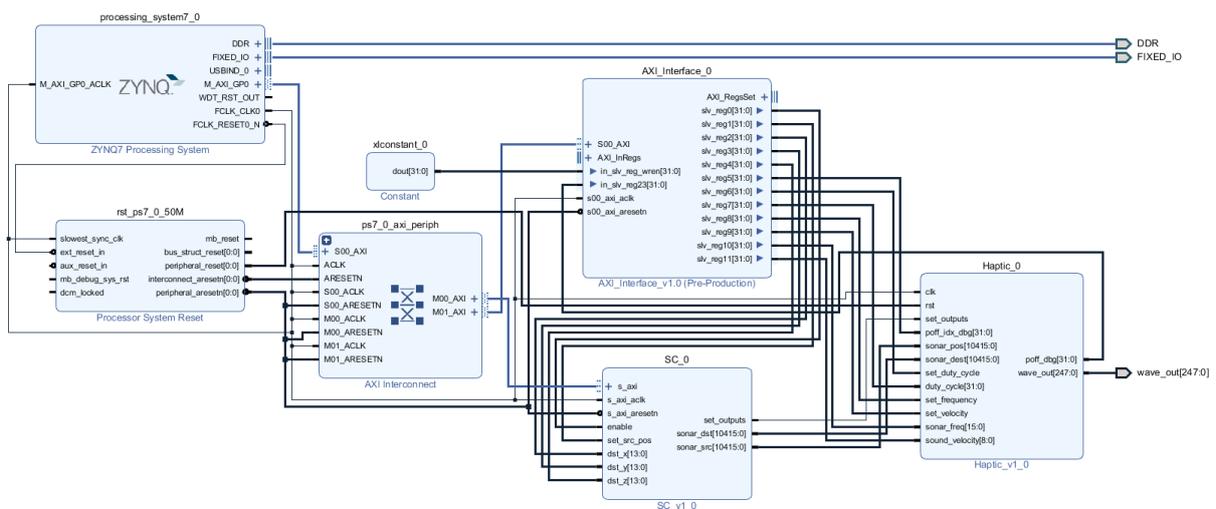


Figura 5.1: Visão geral do sistema.

O sistema háptico subdivide-se em duas componentes, a camada de software e a camada de hardware reconfigurável. A camada de software é responsável por interagir directamente com o utilizador e por controlar (parametrizar) o sistema implementado na FPGA.

Os requisitos do sistema implicam a opção por este tipo de plataforma. Tirando partido do paralelismo desta tecnologia é possível satisfazer as restrições temporais, que requerem um processamento rápido e síncrono. Esta camada é responsável por interpretar os parâmetros recebidos e gerar os sinais de controlo correspondentes, que irão actuar os transdutores ultra-sónicos da forma pretendida.

5.2 Software

O bloco ZYNQ7 Processing System (figura 5.1) simboliza a unidade de processamento da plataforma, apesar de ser dual-core apenas um dos processadores (ARM Cortex-A9) foi utilizado pelo software. Quanto ao código, propriamente dito, em linguagem de programação C, este possui um fluxo de execução bastante simples, mas que responde às necessidades do projeto. Em primeiro lugar é feita a inicialização de periféricos, bem como é parametrizado o sistema háptico por defeito, nomeadamente a posição dos transdutores ultra-sónicos na PCB. A próxima fase de execução é um ciclo infinito, que mantém uma interação constante com o utilizador, através de um menu. Este permite seleccionar e configurar todas as funcionalidades do sistema háptico. Contudo apenas as mais relevantes serão descritas.

1. Especificação espacial (3D) do ponto focal – a possibilidade de definir a posição do ponto focal instantaneamente permite a fácil movimentação do ponto no espaço;
2. Especificação da posição dos transdutores no plano – o controlo sobre a posição dos transdutores no espaço (ou seja, na PCB) providencia a fácil adaptação a diferentes matrizes de transdutores;
3. Definição do *duty-cycle* – concede o controlo, em tempo-real, da potência da matriz de transdutores;
4. Definição da temperatura ambiente – a temperatura ambiente influencia a velocidade de propagação sonora e através desta opção avalia-se o impacto da temperatura na criação do ponto focal;
5. Especificação da frequência de operação dos transdutores - permite escolher diferentes frequências de operação e assim avaliar o seu impacto;
6. Escolha do tipo de modulação – esta opção permite a escolha da modulação lateral ou da *double side band*. Como não são o foco da dissertação, não serão detalhadas;

7. Opções de depuração - permitem a análise e validação de diversos parâmetros do sistema.

A comunicação entre o *Processing System* e a lógica programável realiza-se através de barramentos de comunicação dedicados. Este permite uma troca de dados rápida e eficiente com a FPGA sendo igualmente simples a sua utilização. A troca de dados remete a informações tais como posição do ponto focal e dos transdutores, *duty-cycle* e frequência.

5.3 Hardware reconfigurável

O hardware reconfigurável, isto é, a implementação em lógica programável é parte crucial no que toca à implementação do sistema. Na figura 5.1 observam-se os diferentes módulos, que serão descritos de seguida.

O módulo Haptic é o principal de todo o sistema, pois é este que executa o algoritmo de controlo e actua os transdutores ultra-sónicos. De um modo geral, o módulo possui uma máquina de estados que controla a sua operação que, por defeito, se encontra num estado de espera. Quando, a partir do software, forem definidos todos os parâmetros de inicialização do módulo, o utilizador deverá enviar um sinal de comando que irá desencadear a alteração do estado inicial.

O próximo estado resume-se ao processamento do algoritmo responsável pelo cálculo da fase para cada transdutor. A este passo corresponde a maior carga computacional, graças a uma série de operações matemáticas, que se traduzem em algumas dezenas de ciclos de relógio até à sua conclusão. Após esta etapa, o estado altera-se automaticamente e os transdutores são actuados de forma síncrona. Tendo sido clarificado o funcionamento geral do módulo Haptic, é conveniente aprofundar a implementação de cada uma das etapas acima referidas.

O estado inicial é dedicado principalmente à configuração do módulo, que deve ser efectuada a priori pelo utilizador. Os parâmetros configuráveis são: *duty-cycle*, velocidade do som, frequência de actuação dos transdutores, posição dos transdutores e do ponto focal. Em todo o caso as variáveis possuem valores por defeito (*hardwired*) e podem ser actualizadas durante o funcionamento da interface háptica.

Como já foi referido, o utilizador deve enviar um sinal de controlo ao módulo após completar a configuração. Perante a recepção do sinal, o estado do módulo altera-se e será executado o algoritmo para o cálculo das fases dos transdutores. A implementação do algoritmo não é o foco do documento, por isso irão ser descritos os seus traços fundamentais.

O algoritmo implementa a equação 5.1 para o cálculo da distância do ponto focal a cada transdutor. Ou seja, o algoritmo é calculado um número de vezes respectivo à quantidade de transdutores. O valor é usado posteriormente para o cálculo da fase, que cada transdutor deve possuir.

$$FP_{dist} = \sqrt{(x_{dist} - x_{source})^2 + (y_{dist} - y_{source})^2 + (z_{dist} - z_{source})^2} \quad (5.1)$$

A implementação utiliza vários blocos IP do fabricante *Xilinx*, dado a sua fácil integração. De acordo com a equação acima, foram usados quatro tipos de blocos IP. São eles os seguintes (e enumerados consoante a sua ordem de utilização): subtração, multiplicação (usado como operação quadrada), soma e raiz quadrada.

Após esta etapa, já é conhecido o valor da distância de cada transdutor ao ponto focal. Por fim, a fase é extraída através da expressão 5.2.

$$\theta = 2\pi \frac{FP_{dist}}{\lambda} = 2\pi f \frac{FP_{dist}}{c} \quad (5.2)$$

O cálculo da fase resulta da multiplicação da distância do transdutor ao ponto focal (FP dist) por o quociente entre frequência de emissão do transdutor (f) com a velocidade do som (c), novamente usando os blocos IP da *Xilinx*. A fase da onda necessita de ser convertida num intervalo de tempo (equação 5.3). O valor calculado representa o atraso temporal de cada uma das ondas acústicas face às restantes.

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega} \quad (5.3)$$

É importante salientar que o processo de cálculo da fase é efectuado para cada um dos transdutores da interface. Para aproveitar ao máximo os recursos da FPGA, o sistema paraleliza todo o processamento. Desta forma, os cálculos da fase para os 248 transdutores estão perfeitamente sincronizados.

Os diferentes blocos possuem atrasos de processamento, de acordo com a complexidade das operações por eles desempenhadas. Considerando desde o primeiro bloco (subtração) até ao último (multiplicação) para o cálculo da fase, ocorrem dezenas de ciclos de relógio.

A utilização de uma *pipeline*, para paralelizar o cálculo, permite reduzir o tempo de cálculo da fase para os transdutores. O primeiro valor calculado tem um tempo de espera associado, em que a pipeline é iniciada. A partir do primeiro valor de fase, o cálculo será idêntico para os restantes e depende do número de ciclos de relógio do estágio da *pipeline*.

Um submódulo é responsável por realizar a actuação dos transdutores, tendo em conta as fases iniciais anteriormente calculadas. A partir da frequência de actuação dos transdutores e através de um comparador com o valor do *duty-cycle*, é gerada uma onda quadrada com a especificação pretendida.

O módulo Sonar Coordinates (figura 5.1) reencaminha as coordenadas da posição dos transdutores e do ponto focal para o módulo Haptic. Este módulo tem o papel de intermediário entre o software e o módulo Haptic, no sentido que recebe as coordenadas dos enúmeros transdutores, e recebe também a posição do ponto focal. Da forma que o sistema se encontra desenhado, leva a um considerável fluxo de dados que são geridos especificamente por este módulo. Por fim, de referir no que toca à posição do ponto focal, apenas é necessário descrever a posição de um único ponto focal. O sistema não suporta múltiplos pontos.

Outro aspeto igualmente importante é o facto de o barramento de comunicação anteriormente abordado se encontrar diretamente acoplado a este módulo. Como o barramento possui elevada performance, permite que a posição dos transdutores na PCB possa ser especificada em tempo-real, concedendo flexibilidade ao sistema.

Existem ainda outros módulos no seu design, embora não sejam relevantes ao tema abordado. Entre eles encontram-se: um timer usado para coordenar a modulação espacial e o módulo AXI redirector, que através da sua interface AXI proporciona uma interface simples com os restantes módulos do sistema.

O desempenho da interface háptica apesar de satisfatório possui alguns problemas, nomeadamente a temperatura elevada e a presença de lóbulos laterais. Posto isto, foi necessário modificar o funcionamento da interface, através das estratégias simuladas no capítulo 4. Por um lado, a introdução de aleatoriedade pretendia atenuar a influência da simetria da rede no campo acústico, já a emissão de pulsos tinha como objectivo diminuir o tempo de operação dos transdutores.

5.4 Módulo *Pulse*

O módulo *Pulse* modifica a actuação dos transdutores, de acordo com a estratégia simulada na secção 4.6. A emissão acústica deixa de ser contínua e os transdutores passam a emitir pulsos, como representado na figura 3.3. Os parâmetros fundamentais na configuração do módulo são a frequência de actuação e da onda pulsada, assim como o número de pulsos. Cada transdutor é por isso capaz de emitir um dado número de pulsos a uma frequência configurável.

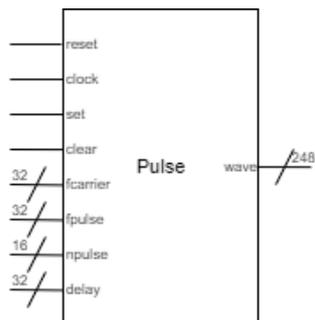


Figura 5.2: Interface do módulo *Pulse*.

Por defeito, o módulo não influencia o funcionamento do sistema a menos que seja activado pelo sinal de entrada *set*. A activação do módulo *Pulse* inicia o cálculo dos valores iniciais dos contadores responsáveis pela geração do sinal (figura 3.3). Para tal, como observado na figura 5.3, efectua-se as divisões da frequência de *clock* do sistema pela frequência da onda e pela frequência de actuação. No estado *DIVISION3*, o módulo *PulseGenerator* é activo e dá-se a transição para o estado *STANDBY*. O estado não se irá alterar, a não ser que o sinal de entrada *set* volte a ser activado, nesse caso o processo irá se repetir. Caso o sinal de entrada *clear* seja accionado, o módulo *PulseGenerator* irá deixar de compôr a onda pulsada, mantendo-se no estado *STANDBY*.

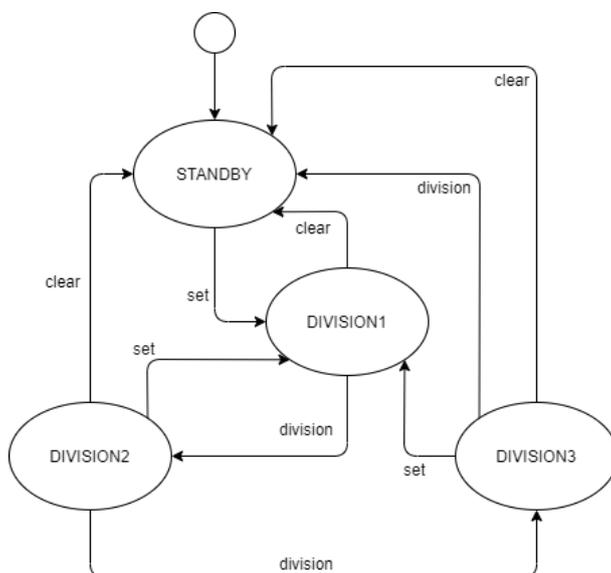


Figura 5.3: Máquina de estados do módulo *Pulse*.

A onda gerada pelo submódulo *PulseGenerator* segue o descrito na figura 3.3. Este resultado é atingido através da utilização de dois contadores, tendo por base o quociente das divisões efectuadas no módulo *Pulse*. Um dos contadores é responsável por temporizar o período de actuação. O segundo contador é responsável por contabilizar o periodicidade da nova onda pulsada. Para além disto, através

do número de pulsos é possível regular o rácio do tempo em que o transdutor está activo face ao período total da nova onda.

5.5 Módulo *Random*

O módulo *Random* permite actuar diferentes subconjuntos de transdutores, de forma aleatória ao longo do tempo, conforme simulado na secção 4.3. O funcionamento dos transdutores da interface háptica está assim dependente do número de elementos actuadores (ONnum) e da frequência de comutação entre conjuntos (frequency).

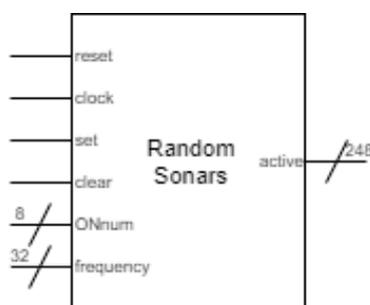


Figura 5.4: Interface do Módulo *Random*.

Tal como no módulo *Pulse*, por defeito, o módulo não apresenta qualquer influência no funcionamento do sistema. No estado *INITIAL*, a saída *active* actua continuamente todos os 248 transdutores. Através do sinal de entrada *set*, o módulo é activo e transita para o estado *DIVISION*, como apresentado na figura 5.5. Neste estado é executada a divisão entre o valor da frequência de clock do sistema e a frequência de comutação entre conjuntos, que permite contabilizar o tempo entre dois conjuntos aleatórios de transdutores. Após finalizar o cálculo comuta para o estado *PROCESS*. De seguida, ocorre a activação do módulo *NRandom*, responsável pela escolha dos transdutores inactivos no sistema, após a selecção transita para o próximo estado. No estado *STANDBY*, o módulo fica em suspenso durante o tempo de comutação entre conjuntos aleatórios. O ciclo volta a repetir-se para a escolha de um novo conjunto, com o retorno ao estado *PROCESS*.

A cadeia de funcionamento entre o estado *PROCESS* e *STANDBY* mantém-se indefinidamente até ocorrer um reset do sistema. Por meio dos sinais de entrada *set* e *clear* é possível redefinir ou desativar o funcionamento do módulo, retornando para o estado *DIVISION* e *INITIAL*, respectivamente.

A quantidade de transdutores activos deve ser superior ao número de transdutores inactivos, de modo a não interferir na criação do ponto focal. Perante isto, torna-se lógica a escolha das posições que pretendemos desactivar ao invés das que pretendemos manter activas.

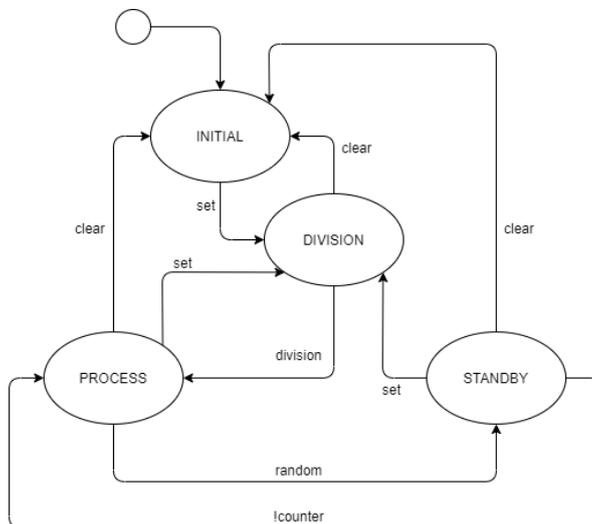


Figura 5.5: Máquina de estados do módulo *Random*.

Quando é necessário escolher um novo conjunto de transdutores aleatórios, o módulo *NRandom* intervém. Este módulo é activo através do sinal de entrada *set*, transitando do estado *STANDBY* para o *PROCESS*, como observado na figura 5.6. O funcionamento do módulo irá manter-se no estado *PROCESS*, enquanto não concluir a escolha da posição dos transdutores a desactivar, por intermédio do módulo *LFSR*. Por fim ocorre o retorno ao estado *STANDBY*. Posteriormente, voltará ao estado *PROCESS* e a seleccionar um novo conjunto de posições.

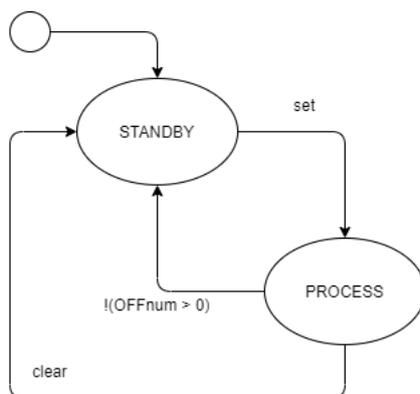


Figura 5.6: Máquina de estados do módulo *NRandom*.

O módulo LFSR é responsável pela geração de valores pseudo-aleatórios de oito bits ou seja, com intervalo suficiente para representar todos os transdutores da matriz. Na figura 5.7 é visível uma parte

do circuito lógico deste módulo, incluindo o *linear-feedback shift register*. Na inicialização pelo sinal *set*, a semente a introduzir no *LFSR* é selecionada a partir de um contador presente neste módulo. Sempre que o módulo estiver com o sinal *enable* habilitado, a cada clock será gerado um novo valor, representativo da posição de um transdutor.

A semente do *LFSR* é selecionada, a partir do contador referido, no momento em que o módulo é inicializado e sempre que seja necessário gerar um novo conjunto de posições aleatórios.

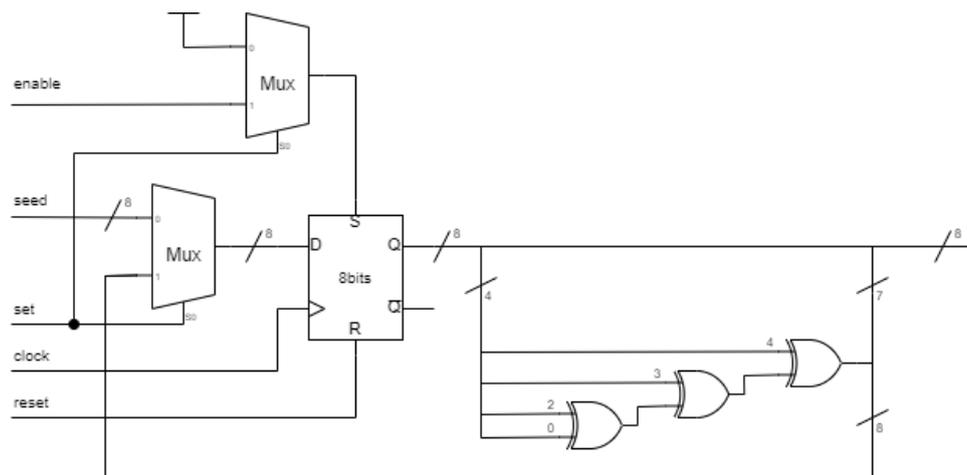


Figura 5.7: RTL do Linear-Feedback Shift Register.

O *LFSR* irá ser configurado de forma automática pelo *Processing System*. A semente irá ser escolhida sempre no mesmo instante após o reset do sistema, o que se traduzirá na pseudo-aleatoriedade desta solução. Ao contrário do que acontece ao realizar a configuração manualmente pela interface de utilizador, situação em que o módulo é activado em momentos diferentes.

5.6 Integração no sistema

Com a introdução dos novos módulos não se pretendia uma reformulação profunda ao nível arquitectural, mas que se traduzisse mais numa adição ao sistema. Por essa razão desenvolveram-se os dois módulos descritos nas secções 5.4 e 5.5. Como se pode observar na figura 5.8, as estratégias de redução da temperatura de funcionamento e dos lóbulos laterais são totalmente independentes da criação do ponto focal.

A integração no restante sistema carece apenas da introdução de alguns circuitos lógicos adicionais, com o propósito de sincronizar os sinais de controlo e de interligar o módulo *Haptic* com os módulos

desenvolvidos. Do lado do *Processing System* surge a necessidade de atualizar a interface de aplicação, adicionando os parâmetros de configuração de cada um dos módulos.

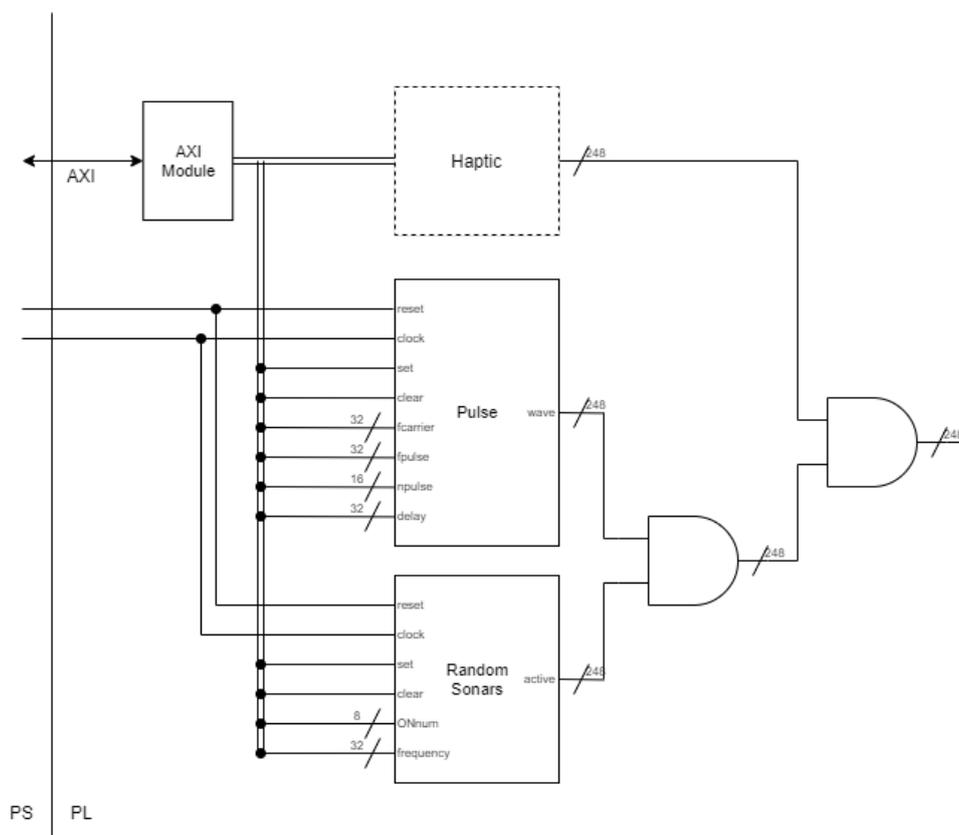


Figura 5.8: Lógica de integração dos módulos.

No que diz respeito à actuação dos transdutores, introduziu-se um circuito com duas portas lógicas *AND* para cada um dos 248 transdutores, com a função de combinar as saídas dos três módulos numa única. Uma porta lógica *AND* permite multiplicar os sinais de entrada ou seja, num dado instante se um dos sinais se encontrar a zero, a saída será zero. Por isso, neste contexto se ambas as estratégias desenvolvidas estiverem desactivadas, a saída da primeira porta lógica *AND* estará a continuamente a 1 para cada transdutor. Não existirá portanto qualquer influência no funcionamento dos mesmos, a não ser a exercida pela modulação do módulo *Haptic* necessária à criação do ponto focal.

No caso de qualquer uma das estratégias estar activa, o sinal modulado gerado pelo módulo *Haptic* irá ser alterado, através da multiplicação com os sinais dos módulos *Pulse* e *Random*. Esta transformação pode significar a aleatoriedade ou a activação pulsada dos transdutores de ultra-sons.

Dessa forma a activação e configuração dos módulos é realizada por via de um terminal. O processador unicamente interpreta os comandos de texto recebidos e através do barramento de comunicação coordena o funcionamento dos vários módulos presentes na lógica programável.

Para sincronizar a activação dos módulos é necessário que os sinais de controlo *set* e *clear* de cada um dos módulos, incluam o mecanismo lógico da figura 5.9. Este circuito lógico tem a capacidade de detectar as transições ascendentes do sinal, de forma a precaver sucessivas activações involuntárias do módulo. A detecção da transição ascendente do sinal resulta da negação do valor lógico anterior, e da multiplicação com o valor lógico actual, por meio de uma porta lógica AND.

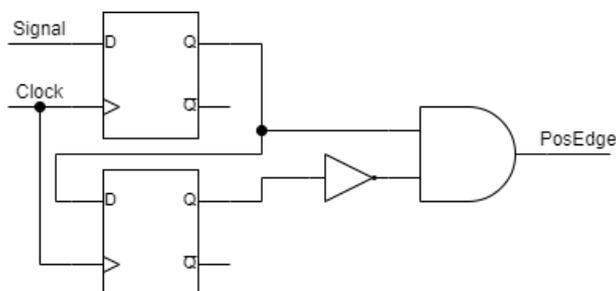


Figura 5.9: Lógica de detecção de transição ascendente do sinal.

Posto isto e após proceder à confirmação de que as funcionalidades, que se pretendia implementar, apresentam o comportamento adequado, é necessária a execução de testes mais pormenorizados no que diz respeito ao comportamento do novo sistema, nomeadamente à sua temperatura de funcionamento e à intensidade da pressão de radiação acústica.

Capítulo 6

Testes e resultados

Tendo em conta os requisitos enumerados na secção 3.1, é importante avaliar fundamentalmente a temperatura do protótipo em funcionamento, bem como a pressão acústica que é capaz de gerar. No presente capítulo é realizada uma caracterização térmica e ao nível da intensidade acústica do protótipo. Esta serve como referência para os testes realizados posteriormente, que são dedicados às funcionalidades desenvolvidas na presente dissertação. Inicialmente é descrita a plataforma de testes utilizada.

6.1 Plataforma de teste

A avaliação térmica e a relativa ao desempenho acústico da interface háptica necessitou de diferentes equipamentos. Seja para aquisição de variáveis de interesse, seja para o tratamento dos dados. Ao nível da aquisição acústica e térmica, os equipamentos englobam um microfone *free-field*, uma câmara térmica e um termopar, respectivamente.

Contudo, outros materiais foram necessários para a realização dos testes. A título de exemplo foi utilizado um conjunto de sistemas de posicionamento para movimentar o microfone em dois graus de liberdade. Na mesma linha de pensamento, utilizou-se um *Analog-to-Digital Converter* (ADC) para a digitalização do sinal acústico e térmico, para posterior análise no software Matlab.

O uso da câmara térmica permite quantificar a temperatura em diferentes zonas da protótipo e identificar as zonas mais problemáticas. O modelo da câmara térmica utilizado nas medições é o *FLIR i7* (figura 6.1 [26]). A gama de temperaturas varia entre -20°C a 250°C , com uma resolução de 0.1°C , o que para a situação em análise é mais que suficiente.

Uma característica útil na análise térmica, fornecida pela *FLIR i7*, é a possibilidade de, automaticamente, indicar o ponto com a temperatura mais elevada numa determinada área (*hotspot*).



Figura 6.1: Câmara térmica FLIR i7.

O termopar é adequado a uma análise térmica, prolongada no tempo e localizada. O termopar usado é do tipo K e mede temperaturas entre -50°C e 204°C , com uma resolução de $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

Em condições ideais, a análise térmica deveria ser realizada num local isolado, de modo a manter a temperatura ambiente estável.

De modo a quantificar a pressão de radiação acústica do sistema háptico procedeu-se ao varrimento do campo acústico. A utilização de dois sistemas de posicionamento permitiu movimentar o microfone ao longo dos planos xy e yz . O campo acústico pode ser observado na figura 6.3, nomeadamente na zona entre o microfone e a superfície da PCB. Apesar de ainda não mencionado, o sistema de aquisição acústica conta com um adaptador BNC/LEMO, uma fonte de alimentação e um ADC.

A fonte de alimentação é do mesmo fabricante do sistema de medição acústico (em suma microfone e adaptador) e como tal é específica para estes equipamentos. O ADC utilizado é o *NI USB-6281 DAQ* (figura 6.2 [27]) e dispõem de uma elevada taxa de amostragem, suficiente para o cenário de testes.



Figura 6.2: Dispositivo de aquisição de dados NI USB-6281 DAQ.

Ainda relacionado com o sistema de captura acústica, existem dois factores a considerar. O primeiro prende-se com a intensidade máxima de aquisição do microfone cujo valor máximo está fixado nos 138dB SPL. Este limite é insuficiente para uma medição precisa da intensidade do protótipo.

O segundo factor diz respeito à largura de banda, que é limitada aos 20kHz (figura 6.4). A frequência de operação do sistema é de 40kHz, deste modo e a priori é certo que o microfone não é capaz de conceder uma análise quantitativa precisa. Apenas poderá conferir uma avaliação qualitativa.

De seguida, são enumerados alguns dos componentes do sistema de teste:

- Microfone *Free-field* 1/2" CCP GRAS 146AE;
- Adaptador BNC/LEMO GRAS AG0002;
- Fonte de alimentação GRAS Type 12AK;
- Dispositivo de aquisição de dados NI USB-6281 DAQ;
- Sistema de posicionamento com motor de passo e controlador integrado Thor Labs LTS300/M.

A área de caracterização do campo acústico está limitada ao curso do sistema de posicionamento, o que se traduz em cortes com uma dimensão de 30cm × 30cm. Dado que o espaçamento entre medições é de 0.5cm, o microfone adquire informação em 61 × 61 posições por secção do campo acústico. Cada ponto é representado por um segmento de áudio de dois segundos, com uma frequência de amostragem de 500kHz. O tratamento dos dados amostrados foi realizado através da ferramenta *Matlab*, calculando-se o valor de RMS para cada amostra. Por fim, os dados foram organizados de forma a criar uma imagem 2D de cada um dos cortes do campo acústico.

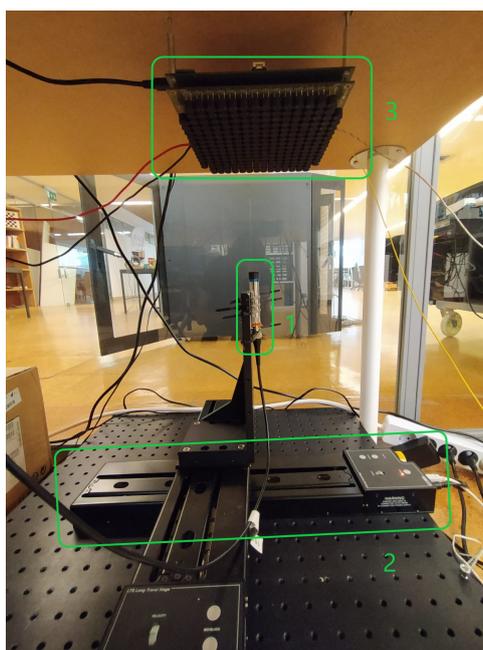


Figura 6.3: Plataforma de testes - Microfone(1), Sistema de posicionamento(2), InnovHaptic(3).

As simulações da dissertação representam o campo acústico em planos de corte com $50\text{cm} \times 50\text{cm}$. No entanto, o curso do sistema de posicionamento apenas permite um varrimento de 30cm em cada eixo. A área do plano de corte é por isso inferior à dos planos simulados no capítulo 4. Por essa razão, o sistema de aquisição irá omitir parte da representação do campo acústico.

Como anteriormente referido, as características técnicas do sistema de aquisição existente são desadequadas ao protótipo em estudo. A pressão sonora, produzida pelo sistema háptico com um *duty-cycle* de 50%, ultrapassa largamente a intensidade máxima captada pelo microfone (138dB SPL). A saturação do equipamento inviabiliza a análise acústica do sistema no seu máximo desempenho. Por essa razão, todas as aquisições são efectuadas com a actuação dos transdutores condicionada a 3% de *duty-cycle*.

Contudo, o ponto mais problemático é a resposta do microfone à frequência de operação (40kHz) dos transdutores de ultra-sons. O fabricante garante um desempenho adequado até aos 20kHz (figura 6.4 [28]), embora já com alguma distorção do sinal captado. Ainda assim é possível comparar o comportamento acústico do protótipo com o modelo de simulação (capítulo 4). Colocando de parte a necessidade de quantificar a intensidade absoluta do campo acústico, o presente sistema de aquisição permite analisar o efeito das estratégias de actuação.

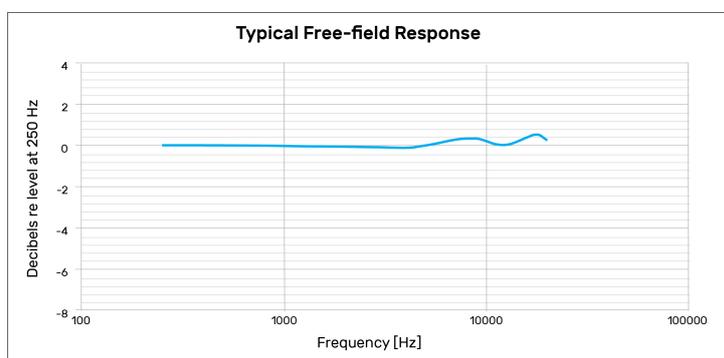


Figura 6.4: Resposta em frequência do microfone.

Após a descrição da plataforma de testes, é relevante pormenorizar os testes propriamente ditos. O ponto de partida é caracterizar, ao longo do tempo, a evolução do sistema em pleno funcionamento. Perante as observações irá se demonstrar a necessidade da implementação de estratégias para colmatar o stress térmico do sistema. Seguidamente, serão avaliadas as estratégias desenvolvidas na dissertação.

6.2 Caracterização do protótipo

A diminuição da temperatura na superfície da PCB dos transdutores de ultra-sons apresenta-se como um dos principais requisitos do sistema. A realização de um estudo térmico ao protótipo permite comprovar a necessidade das estratégias desenvolvidas.

Em simultâneo, avaliou-se o impacto da temperatura no desempenho acústico da interface. Isto é, estudou-se a evolução da intensidade sonora ao longo do tempo. Por último, o campo acústico, produzido pelo sistema, foi adquirido por intermédio da plataforma de testes (figura 6.3).

6.2.1 Comportamento térmico

O estudo do comportamento térmico deve analisar a temperatura de funcionamento do protótipo e destacar a utilidade das estratégias de actuação desenvolvidas.

O ensaio foi realizado com todos os 248 transdutores a emitir com um *duty-cycle* de 50%. Em instantes de tempo pré-determinados (5, 10 e 15 minutos), a câmara térmica retratou o comportamento térmico da interface háptica no seu máximo desempenho.

A análise térmica da figura 6.5 beneficia da utilização da câmara térmica. Além de quantificar a temperatura máxima no protótipo, analisa o comportamento térmico em diferentes zonas da PCB em simultâneo.

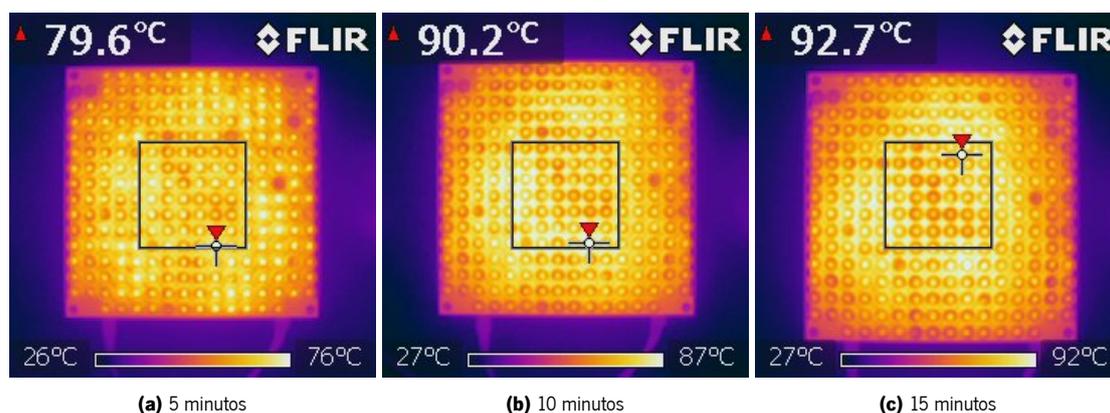


Figura 6.5: Comportamento térmico de 248 transdutores - 50% *duty-cycle*.

Através das imagens térmicas da figura 6.5 conclui-se que existe um aumento significativo de 26°C para 80°C, aproximadamente, durante os primeiros 5 minutos de funcionamento. O incremento da temperatura acaba por não ser tão intenso, cerca de 10°C, entre os cinco e os dez minutos, comparando

com os minutos iniciais do ensaio. Após um período de quinze minutos, o protótipo ultrapassa os 92°C de temperatura.

Com este ensaio demonstra-se a necessidade da implementação de estratégias para a redução da temperatura de funcionamento. Após um curto período de utilização, o protótipo aproxima-se do limiar da temperatura máxima de funcionamento (85°C) dos transdutores *Murata*. O funcionamento prolongado nestas condições contribui para uma redução da vida útil deste componente.

Apesar da figura 6.5 justificar a relevância da temperatura da interface, a análise no presente capítulo deve ter em consideração os limites técnicos do sistema de aquisição acústica. Uma vez que se pretende relacionar a temperatura e a pressão acústica, as secções 6.3 e 6.4 terão como referência a actuação a 3% de *duty-cycle*. A imagem térmica da figura 6.6 representa o comportamento térmico do sistema nessas condições, ao fim de cinco minutos de utilização.

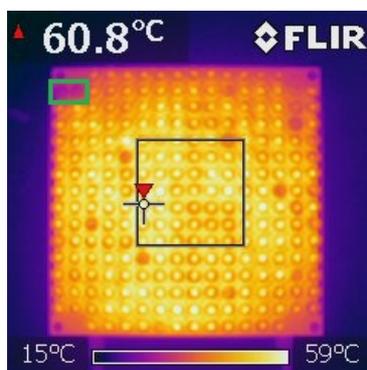


Figura 6.6: Comportamento térmico de 248 transdutores - 3% *duty-cycle*.

A resolução da câmara térmica evidencia diferentes graus de degradação dos transdutores, que conduzem a diferentes desempenhos por parte de cada elemento. No canto superior esquerdo são visíveis, por exemplo, dois transdutores totalmente danificados, em oposição aos vários elementos com coloração amarela e alaranjada com um desempenho normal. A fim de verificar o nível de deterioração do protótipo, foi necessário analisar o estado dos ultra-sons em detalhe.

O mapeamento avaliou a intensidade acústica produzida por cada um individualmente. O método consistiu em medir o valor RMS do sinal adquirido pelo microfone durante um curto período de tempo. Dada a variedade de valores de tensão das medições, o mapeamento classifica os transdutores por níveis de intensidade. A figura 6.7 representa a intensidade relativa de cada transdutor. Em correspondência com a figura 6.5, é de notar o evidente não funcionamento dos dois elementos no canto superior esquerdo da PCB.

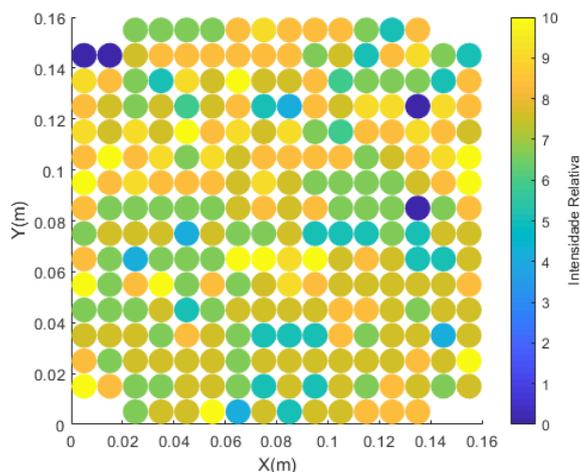


Figura 6.7: Intensidade relativa do conjunto de transdutores.

A partir do mapeamento da figura 6.7, é perceptível a concentração de uma maior quantidade de actuadores em determinados níveis de intensidade. O gráfico da figura 6.8 apresenta a quantidade de componentes de acordo com a intensidade relativa. Através da curva do gráfico 6.8, é visível que a grande maioria encontra-se numa posição intermédia de desempenho (coloração laranja), sendo de notar ainda um subgrupo com desempenho inferior (cor verde). Existe ainda um pequeno grupo totalmente deteriorado, com uma intensidade relativa de zero.

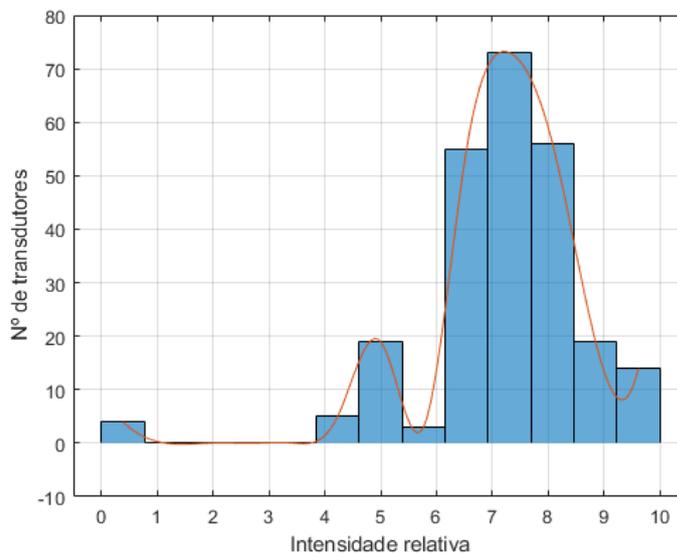


Figura 6.8: Curva de desempenho dos transdutores.

6.2.2 Comportamento acústico

A temperatura influencia consideravelmente o desgaste dos transdutores, porém deve-se também investigar o papel da temperatura na intensidade acústica gerada pelo protótipo.

A análise consistiu em medir a pressão no ponto focal durante um período de tempo, em simultâneo com a temperatura da PCB, através do termopar. O teste realizou-se com a interface a emitir a 3% de *duty-cycle* ao longo de uma hora, mantendo assim a pressão acústica dentro da capacidade de leitura do microfone.

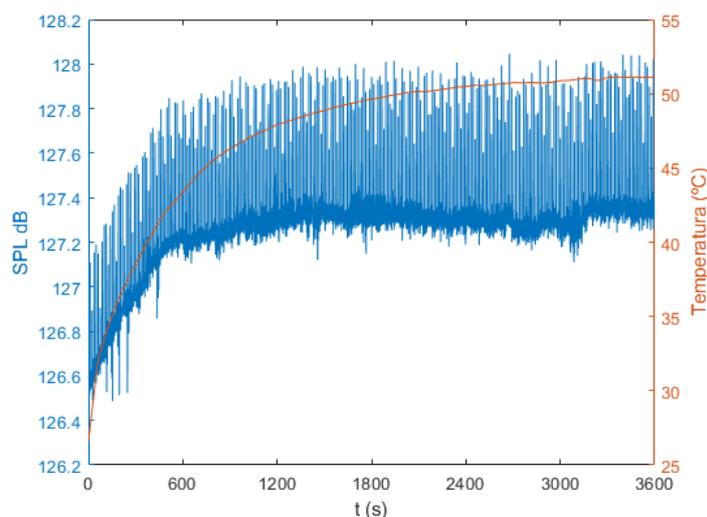


Figura 6.9: Evolução da intensidade acústica e da temperatura durante 1h de funcionamento.

A evolução da intensidade acústica divide-se em duas fases principais. Até aos 600s temos um incremento (0.7dBA), muito significativo, em linha com o aumento da temperatura. Em seguida, existe um ligeiro aumento de 0.1dBA até aos 1200s, aproximadamente, a partir do qual o desempenho do protótipo estabiliza. Por seu lado, a temperatura mantém um aumento, que se tornará residual, durante o restante período de teste.

A ideia preconcebida inicialmente atribuía à elevada temperatura do protótipo a degradação progressiva dos transdutores. Contudo, a figura 6.10 demonstra que a temperatura tem uma influência positiva na intensidade acústica da interface háptica.

A caracterização da interface háptica não ficaria completa sem o estudo do campo acústico. Apesar das imprecisões da plataforma de testes, quer pela atenuação do microfone como pelo alcance do sistema de posicionamento, é possível construir uma representação do campo acústico.

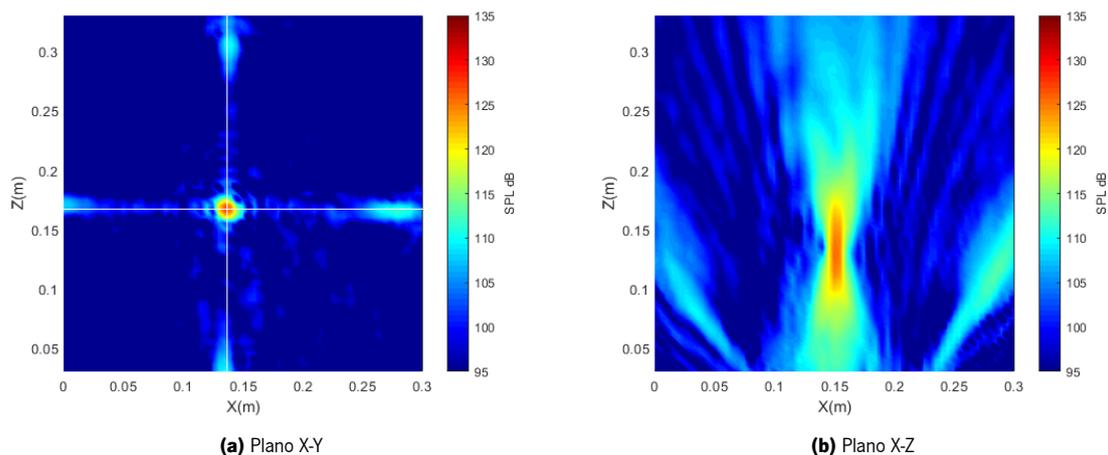


Figura 6.10: Campo acústico - 248 transdutores - 3% *duty-cycle*.

Os transdutores da interface háptica organizam-se segundo uma rede quadrangular. A figura 6.10a comprova a relação entre o tipo de rede, o número e o posicionamento dos lóbulos laterais. Como foi descrito na secção 4.2 do capítulo de simulação, uma rede quadrangular apresenta quatro lóbulos laterais, angularmente equidistantes.

Apesar da existência dos lóbulos laterais, a figura 6.10b apresenta um aspecto diferente face às simulações realizadas. É evidente uma desproporção entre os lóbulos laterais, em oposição à simetria patente nas simulações. A desigualdade resulta de um desvio na orientação do plano de corte, visível através das linhas traçadas na figura 6.10a. O problema surge da plataforma de testes não estar fixa ao protótipo, o que dificulta o ajuste da posição do plano.

Ao longo do capítulo de simulação estabeleceram métricas com o objectivo de relacionar as várias simulações. No presente capítulo, recorreu-se aos mesmos parâmetros para comparar os campos acústicos adquiridos. O rigor das métricas da tabela 6.1 está dependente das características da plataforma de testes. A intensidade do ponto focal e o SNR estão limitados pela resposta do sistema de aquisição à intensidade acústica e à frequência de operação do protótipo. A resolução do varrimento, neste caso de 5mm, diminui a exactidão da FWHM e da divergência do feixe.

Intensidade do Ponto Focal (dBA)	SNR (dBA)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe (°)
123.93	10.77	0.015	43.60°

Tabela 6.1: Parâmetros do campo acústico - 248 transdutores.

6.3 Actuação aleatória

A actuação aleatória dos transdutores tem como propósito desactivar, momentaneamente, elementos ao acaso e promover o arrefecimento da PCB. Inicialmente, pretendia inclusive eliminar os lóbulos laterais do campo acústico. A hipótese foi descartada após a realização da simulação da secção 4.3.

6.3.1 Comportamento térmico

A actuação aleatória tem como objectivo reduzir a temperatura do protótipo, por essa razão deve ser realizado o estudo do comportamento térmico perante o novo funcionamento do protótipo.

O ensaio foi realizado com uma actuação a 3% de *duty-cycle*, consoante as limitações do sistema de aquisição acústica. A estratégia de actuação consistiu na comutação entre conjuntos aleatórios de transdutores a uma frequência de 18kHz. O impacto da alteração foi avaliado variando o número de transdutores activos em cada conjunto.

As imagens térmicas da figura 6.11 representam o sistema com 128, 160 e 192 ultra-sons activos, durante um período de cinco minutos. Entre cada cenário existiu um período de arrefecimento até à temperatura ambiente.

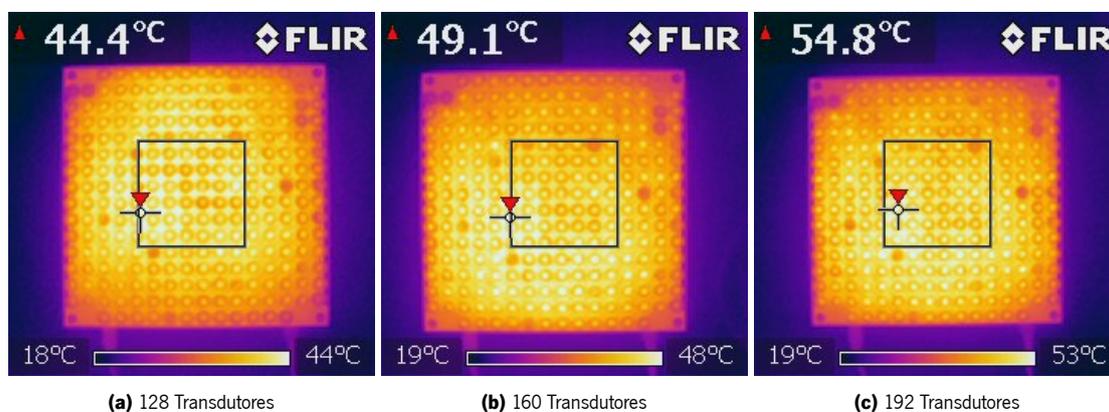


Figura 6.11: Comportamento térmico de transdutores aleatórios a 18kHz - 3% *duty-cycle*.

O comportamento térmico na figura 6.11 distingue-se pelo número de transdutores activos em cada conjunto aleatório. Quanto maior é a quantidade de transdutores inactivos, menor é o consumo energético do sistema. Por consequência, a capacidade de arrefecimento da PCB é superior. Pela análise da figura 6.11 verifica-se uma diminuição de 5°C por cada 32 transdutores inactivos. A comparação entre a actuação de 248 transdutores (60.8°C) e a actuação aleatória de 192 transdutores (54.8°C) assinala uma diferença de 5.2°C.

Quando o parâmetro modificado é a frequência de comutação entre conjuntos aleatórios, não existe uma diferença assinalável da temperatura do protótipo. A única consequência é modificar o tempo de comutação, o que não altera o consumo energético da interface. O ajuste da frequência de comutação poderá interessar na perspectiva de aumentar a percepção háptica através da estimulação dos mecanorreceptores, sensíveis a determinadas frequências.

6.3.2 Comportamento acústico

A diminuição da temperatura resulta da redução da energia acústica emitida pelos transdutores. O campo acústico criado pela interface háptica será em função disto modificado.

O comportamento do sistema será analisado tendo por base a representação criada pelo sistema de aquisição acústico. O teste pretende avaliar a existência de lóbulos laterais e quais as alterações na criação do ponto focal, provocadas pela actuação aleatória.

O teste irá debruçar-se na actuação aleatória de 192 transdutores com uma frequência de comutação entre conjuntos de 18kHz. A emissão dos ultra-sons será realizada com um *duty-cycle* de 3%.

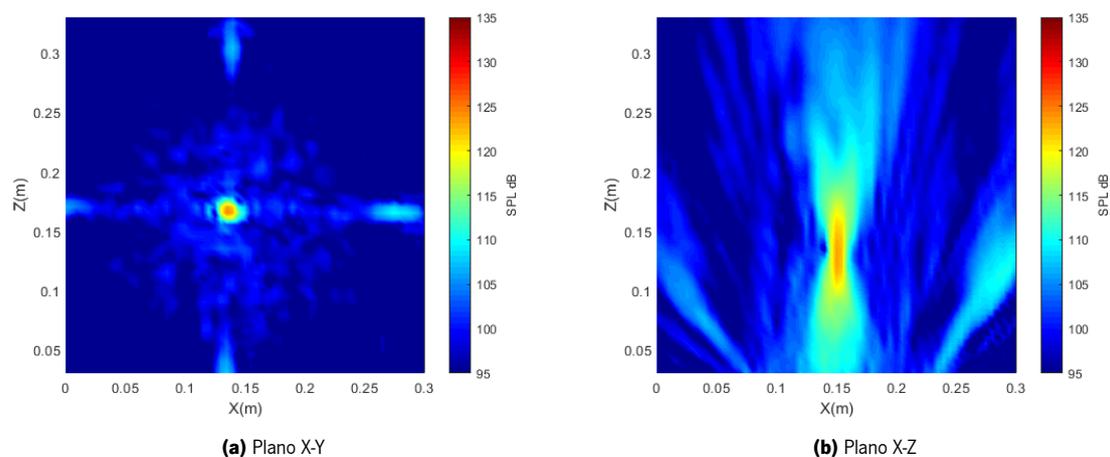


Figura 6.12: Campo acústico - 192 transdutores aleatórios - 3% *duty-cycle*.

O curso do sistema de posicionamento do microfone e a orientação do plano de corte limitam novamente a representação do campo acústico do protótipo. Ainda assim, a figura 6.12 permite confirmar a presença dos lóbulos laterais no campo acústico. Tal como se previa na secção 4.3, onde se simula a situação em estudo, a actuação aleatória não interfere na criação dos lóbulos laterais.

A análise e comparação do campo acústico deve ser realizada com base em métricas bem definidas. Os parâmetros da tabela 6.2 permitem relacionar as várias actuações em estudo. O rigor das métricas

está contudo dependente das especificações da plataforma de testes. A resposta do sistema de aquisição à intensidade e frequência de operação limitam a exactidão da intensidade do ponto focal e do SNR. Os valores da FWHM e da divergência do feixe dependem da resolução do sistema de posicionamento do microfone.

Intensidade do Ponto Focal (dBA)	SNR (dBA)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe (°)
121.89	11.28	0.015	43.60°

Tabela 6.2: Parâmetros do campo acústico - 192 transdutores aleatórios.

De acordo com a tabela 6.2, o ponto focal vê reduzida a sua intensidade, o que era previsto com um menor número de transdutores em funcionamento. Em comparação com a actuação de referência do protótipo (tabela 6.1), há uma redução de, cerca de -2dBA, para os 121.89dBA. O impacto na intensidade do campo acústico causa um aumento no valor SNR para 11.28dBA.

Os valores da FWHM e da divergência do feixe mantêm-se inalterados, visto que a actuação aleatória não modificou o tipo nem as dimensões da rede em que estão dispostos os transdutores.

6.4 Actuação pulsada

A estratégia de actuação pulsada pretende diminuir a temperatura do protótipo, através da redução do consumo energético. O tempo de funcionamento da interface é reduzido, mediante a emissão de uma quantidade variável de pulsos a uma determinada frequência.

6.4.1 Comportamento térmico

A redução da temperatura de funcionamento da interface é um requisito da presente dissertação, por esse motivo deve ser realizado um estudo ao efeito da actuação pulsada na interface háptica.

O princípio da actuação pulsada reside nos ultra-sons interromperem a emissão acústica em determinados momentos. A interface emite uma quantidade configurável de pulsos de 40kHz de frequência, após os quais permanece em suspenso. O ciclo de emissão acústica repete-se de acordo com a frequência de actuação.

A frequência de actuação usada no ensaio é de 200Hz, o que indica que poderiam ser emitidos 200 pulsos em cada ciclo da estratégia. A figura 6.13 apresenta a análise térmica da interface para a emissão de 50, 100 e 150 pulsos. O estudo foi realizado com os transdutores a emitir com um *duty-cycle* de 3%.

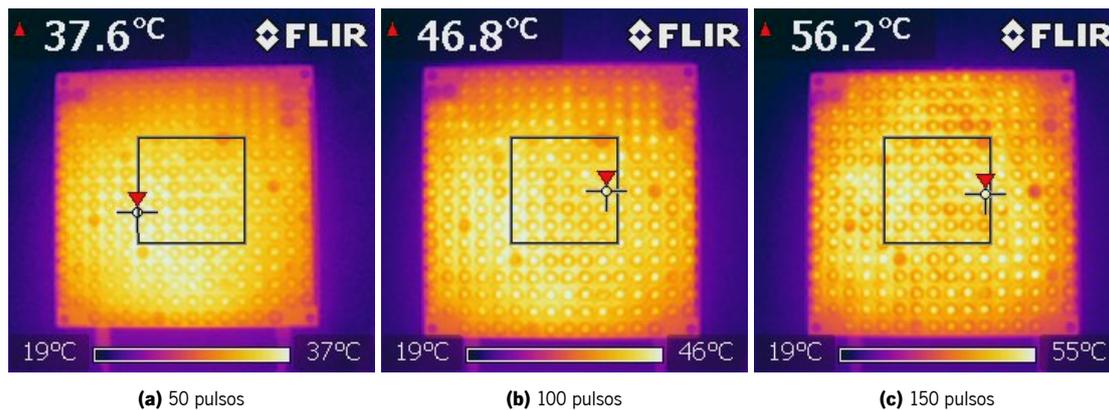


Figura 6.13: Comportamento térmico de transdutores pulsados a 200Hz.

A diferença de temperatura entre os casos da figura 6.13 é significativa. De acordo com as imagens térmicas conclui-se que, por cada incremento de 50 pulsos (frequência 40kHz), existe uma diferença de 10°C, aproximadamente. A emissão de 100 pulsos (46.8°C), em comparação com o funcionamento de referência do protótipo (figura 6.6) com uma temperatura de 60.8°C, evidencia uma redução de 14°C.

À medida que o número de pulsos diminui, existe um menor consumo energético dos transdutores. No caso das imagens térmicas da figura 6.13, é expectável uma redução para $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$, respectivamente, da energia emitida. Daí o arrefecimento da interface háptica ser inevitável.

6.4.2 Comportamento acústico

A redução da energia acústica emitida pelos transdutores, provocada pela diminuição do tempo de funcionamento, trará alterações ao campo acústico do protótipo. O estudo do comportamento acústico da actuação pulsada destina-se em especial ao ponto focal. A existência de lóbulos laterais não é relevante para a estratégia em análise. O teste avaliará a actuação pulsada com uma frequência de actuação de 200Hz, com a emissão de 100 pulsos. O *duty-cycle* dos transdutores será de 3%.

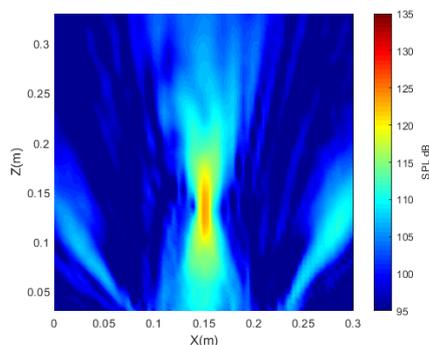


Figura 6.14: Campo acústico - 100 pulsos a 200Hz - 3% *duty-cycle*.

Pela análise da figura 6.14, conclui-se que a criação do ponto focal não é afectada por este tipo de actuação. No entanto, os parâmetros da tabela 6.3 permitem quantificar o efeito do menor consumo energético na intensidade do ponto focal. O rigor das métricas da tabela está mais uma vez dependente das particularidades da plataforma de testes.

Intensidade do Ponto Focal (dBA)	SNR (dBA)	FWHM do Ponto Focal (m)	Divergência do Feixe (°)
122.56	11.35	0.015	43.60°

Tabela 6.3: Parâmetros do campo acústico - 100 pulsos a 200Hz - 3% *duty-cycle*.

Apesar das condicionantes técnicas, os parâmetros da tabela 6.3 permite comparar a actuação em estudo com o cenário de normal funcionamento do protótipo. O ponto focal vê diminuída a sua intensidade, cerca de 1dBA para 122.56dBA, em relação ao funcionamento de referência (tabela 6.1).

O valor do *Signal to Noise Ratio* apresenta um ligeiro aumento para 11.35dBA. A melhoria do SNR deriva, possivelmente, da orientação do plano de corte. O desvio na orientação leva à medição da intensidade numa zona menos intensa do lóbulo lateral. A diferença entre a intensidade do lóbulo lateral e a do ponto focal irá portanto aumentar.

A FWHM do ponto focal e a divergência do feixe mantêm-se constantes, uma vez que a disposição dos transdutores não é alterada pela actuação pulsada.

Capítulo 7

Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo serão descritas as principais conclusões da dissertação, assim como as próximas etapas no desenvolvimento da interface háptica.

7.1 Conclusões

A dissertação tinha como objectivos a redução da temperatura da interface háptico e a eliminação dos lóbulos laterais.

Através do modelo de simulação, verificou-se que a existência dos lóbulos laterais resulta da disposição simétrica dos transdutores na PCB. O tipo de rede, em que se organizam os transdutores, altera o número e o posicionamento dos lóbulos laterais.

O princípio da actuação aleatória pretendia criar assimetrias na rede quadrangular, através da selecção aleatória de subconjuntos de transdutores da PCB. Contudo, as posições dos transdutores coincidem com a rede inicial, logo as simetrias entre os actuadores permanecem. Por esta razão, a estratégia de actuação aleatória não provoca o desaparecimento dos lóbulos laterais.

As estratégias de actuação aleatória e pulsada pretendiam ainda reduzir a temperatura de funcionamento, de modo a minimizar o desgaste dos transdutores. A análise acústica e térmica mostraram alterações em comparação com o funcionamento normal da interface háptica. O arrefecimento do protótipo mostrou-se considerável nas duas estratégias. No entanto, uma vez que a abordagem de ambas se baseia na redução do consumo energético, existe por consequência uma diminuição da intensidade do campo acústico. A actuação aleatória de 192 transdutores permitiu uma redução de 5.2°C na temperatura e de 2dBA SPL na intensidade do ponto focal. Já a actuação pulsada (100 pulsos a 200Hz) diminuiu a intensidade acústica do ponto focal em 1dBA SPL, em conjunto com uma redução de temperatura de

14°C, aproximadamente. A utilização das estratégias de actuação não modificou a criação o ponto focal, unicamente diminuiu a percepção por parte do utilizador.

A frequência de funcionamento das actuações, responsável pela troca entre conjuntos aleatórios e pela emissão periódica da onda pulsada, cria um ruído indesejável, que é audível quando o *duty-cycle* é elevado.

No caso da actuação aleatória, através da aquisição do campo acústico confirmou-se a permanência dos lóbulos laterais.

O desgaste verificado no conjunto de transdutores já era previsto, tendo em conta as elevadas temperaturas. Desde o início supunha-se que o aumento da temperatura teria unicamente desvantagens para o protótipo, contudo a caracterização do protótipo colocou de parte este pressuposto. Ao analisar a evolução da intensidade acústica em conjunto com a temperatura de funcionamento, concluiu-se que o aumento da temperatura permite à interface háptica atingir o máximo desempenho acústico.

Em resumo, nesta dissertação foram realizadas as seguintes tarefas de modo a optimizar o protótipo: elaborar um modelo de simulação, incluindo as possíveis geometrias para a localização dos transdutores; *porting* para o *System on Module*; implementação de soluções para a minimização do consumo energético/dissipação térmica; análise térmica; implementação do *setup* de metrologia que permitiu demonstrar a validade da ferramenta de simulação.

7.2 Trabalho futuro

O estudo desenvolvido no capítulo de simulação permitiu uma maior compreensão acerca da tecnologia, o que se tornou importante para planear o futuro do protótipo. Apesar da actuação aleatória não reduzir a presença dos lóbulos laterais, idealizaram-se possíveis modificações à interface háptica.

A opção por uma disposição aleatória dos transdutores irá eliminar as simetrias existentes na rede quadrangular do protótipo, o que resultará na ausência dos lóbulos laterais. A alteração da distância entre os transdutores é uma outra alternativa para eliminar os pontos de pressão secundários. Se a distância for inferior ao comprimento de onda, os lóbulos laterais são inexistentes no campo acústico simulado.

Em relação à temperatura do protótipo deverá ser equacionada a utilização de um sistema de arrefecimento activo.

A plataforma de testes permitiu tecer algumas considerações acerca do protótipo. No entanto, a interface háptica deverá ser caracterizada com um microfone apropriado a este contexto. As suas características deverão incluir uma resposta adequada à frequência de 40kHz e a intensidades sonoras elevadas, acima dos 170dB.

Referências

- [1] UltraLeap, “Automotive | 6 Reasons Haptics will Improve Vehicle UI,” 2019, accessed Mar. 5 2020. [Online]. Available: <https://www.ultraleap.com/company/news/blog/haptics-improve-vehicle-ui/>
- [2] I. Hwang, H. Son, and J. R. Kim, “AirPiano: Enhancing music playing experience in virtual reality with mid-air haptic feedback,” in *2017 IEEE World Haptics Conference, WHC 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., jul 2017, pp. 213–218.
- [3] Ultraleap, “Tracking | Leap Motion Controller | Ultraleap,” 2020, accessed Apr. 14 2020. [Online]. Available: <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>
- [4] C. Hatzfeld and T. A. Kern, *Engineering haptic devices : a beginner’s guide*, 2nd ed. Springer-Verlag London, 2014.
- [5] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, and A. Israr, “AIREAL: Interactive tactile experiences in free air,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, no. 4, jul 2013.
- [6] UltraLeap, “10 Reasons the Best VR Controller is No Controller,” 2019, accessed Mar. 5 2020. [Online]. Available: <https://ultraleap.com/news/blog/vr-controllers-vs-hands/>
- [7] J. A. Zagzebski, *Essentials of Ultrasound Physics*. Mosby, 1996.
- [8] Haptipedia, “Haptipedia | Accelerating Haptic Device Discovery,” 2019, accessed Apr. 10 2020. [Online]. Available: <https://haptipedia.org/?device=Novint3DOF2007>
- [9] ButterflyHaptics, “Maglev 200 product characteristics | Butterfly Haptics, LLC,” 2019, accessed Apr. 9 2020. [Online]. Available: <https://butterflyhaptics.com/products/system/>
- [10] HaptX, “HaptX | Haptic gloves for VR training, simulation, and design,” 2019, accessed Apr. 9 2019. [Online]. Available: <https://haptx.com/>
- [11] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, “Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries*

- Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics*, vol. 5024 LNCS. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 504–513. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-69057-3_64
- [12] S. Gupta, D. Morris, S. N. Patel, and D. Tan, “AirWave: Non-contact haptic feedback using air vortex rings,” in *UbiComp 2013 - Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 2013, pp. 419–428.
- [13] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, jul 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5406524/>
- [14] Shinoda & Makino Lab, “Shinoda & Makino Lab,” 2019, accessed Apr. 10 2020. [Online]. Available: <https://hapislab.org/?lang=en>
- [15] R. Takahashi, K. Hasegawa, and H. Shinoda, “Lateral Modulation of Midair Ultrasound Focus for Intensified Vibrotactile Stimuli,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 10894 LNCS. Springer Verlag, jun 2018, pp. 276–288.
- [16] R. Takahashi, K. Hasegawa and H. Shinoda, “Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus,” *IEEE Transactions on Haptics*, oct 2019, accessed Jun. 21 2020. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31634143>
- [17] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, “UltraHaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces,” in *UIST 2013 - Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2013, pp. 505–514.
- [18] G. Wilson, T. Carter, S. Subramanian, and S. Brewster, “Perception of ultrasonic haptic feedback on the hand: Localisation and apparent motion,” in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. Association for Computing Machinery, 2014, pp. 1133–1142.
- [19] B. Long, S. A. Seah, T. Carter, and S. Subramanian, “Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound,” in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 33, no. 6. Association for Computing Machinery, nov 2014.

- [20] UltraLeap, “Digital worlds that feel human | Ultraleap,” 2020, accessed Apr. 11 2020. [Online]. Available: <https://www.ultraleap.com/>
- [21] Murata, “Ultrasonic Sensor Open Structure Type,” 2017, accessed Dec. 6 2019. [Online]. Available: <https://www.murata.com/{~}/media/webrenewal/products/sensor/ultrasonic/open/datasheet{ }maopn.ashx?la=en>
- [22] L. R. Gavrilov, “The possibility of generating focal regions of complex configurations in application to the problems of stimulation of human receptor structures by focused ultrasound,” *Acoustical Physics*, vol. 54, no. 2, pp. 269–278, mar 2008.
- [23] G. Marsaglia, “Random Number Generators,” *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, vol. 2, no. 1, may 2003. [Online]. Available: <https://digitalcommons.wayne.edu/jmasm/vol2/iss1/2>
- [24] G. Marsaglia, “Xorshift RNGs,” *Journal of Statistical Software*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, jul 2003.
- [25] Murata, “Test Data Sheet of Transducer MA40S4R/S,” 1995.
- [26] FLIR, “FLIR i7,” 2012, accessed Nov. 12 2020. [Online]. Available: <http://www.flir.com>
- [27] N. Instruments, “USB-6281 - NI,” 2020, accessed Nov. 12 2020. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-pt/support/model.usb-6281.html>
- [28] GRAS, “Technology GRAS 146AE 1/2” CCP Free-field Microphone Set,” 2020, accessed Nov. 12 2020. [Online]. Available: <https://www.grasacoustics.com/products/measurement-microphone-sets/constant-current-power-ccp/product/ss{ }export/pdf2?product{ }id=771>