

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



***BioSoundScape: Sonificação de Biossinais***

Carolina Rosa Nobre Margarido

**Mestrado em Engenharia Biomédica e Biofísica**

Dissertação orientada por:

Prof. Nuno Garcia

Prof. Hugo Gamboa

## Resumo

Numa atualidade marcada pelos rápidos avanços tecnológicos e pela ascensão da inteligência artificial, competências tradicionalmente valorizadas, como a memorização e previsão, perdem relevância. Para que os humanos prosperem na era da inteligência artificial é crucial que não repliquem o seu comportamento, mas que a usem como um aliado à singularidade humana. Perante este cenário, torna-se urgente explorar novas formas de ensino que privilegiem a criatividade, a emoção e a participação ativa dos estudantes.

Este trabalho investiga o potencial da personalização da música a partir de bio-sinais como ferramenta educativa, procurando responder à questão central: *Como a personalização da música baseada em bio-sinais pode ser usada para ensinar conceitos de fisiologia e melhorar a percepção dos utilizadores sobre o funcionamento do seu próprio corpo?*

Para responder à questão, foi desenvolvido o projeto *BioSoundScape*, que transforma o batimento cardíaco em experiências musicais, ensinando estudantes não só sobre o funcionamento do corpo humano, mas também promovendo o autoconhecimento e a autorregulação. Foram criadas três experiências distintas: *What Do I Sound Like*, *Our Song* e *Hearts in Sync*, sendo apresentadas aos estudantes do ensino secundário no evento Expo FCT. A validação incluiu observação direta, aplicação de inquéritos e a comparação com uma versão de controlo baseada em som sintetizado.

Os resultados mostraram que a maioria dos participantes considerou as experiências “muito apelativas”, tendo aprendido conceitos como frequência cardíaca, variabilidade e efeitos da respiração e do exercício. Ficou também evidente que os adolescentes preferem experiências musicais esteticamente próximas dos seus géneros de eleição em detrimento de sonificações abstratas, confirmando a importância da dimensão estética no sucesso pedagógico.

Concluiu-se que a personalização da música com base em bio-sinais constitui uma abordagem inovadora e eficiente na aprendizagem sobre o funcionamento do corpo humano, abrindo caminho para reinventar a educação atual, alinhando-a com os desafios da era digital.

**Palavras-chave:** Bio-sinais, Sonificação, Educação, Música

## Abstract

In today's world, marked by rapid technological advances and the rise of artificial intelligence, traditionally valued skills such as memorization, prediction, and pattern recognition are losing relevance. For humans to thrive in the age of artificial intelligence, it is crucial not to replicate its behavior, but to use it as an ally to human uniqueness. In this scenario, it becomes urgent to explore new forms of teaching that emphasize creativity, emotion, and active student participation.

This work investigates the potential of music personalization from biosignals as an educational tool, seeking to answer the central question: *How can the personalization of music based on biosignals be used to teach concepts of physiology and improve users' perception of their own body?*

To address this question, the *BioSoundScape* project was developed, transforming participants' heartbeats into interactive musical experiences. These experiences taught secondary school students not only about the human body in general but also about their own physiology, fostering self-knowledge and self-regulation. Three experiences were created: *What Do I Sound Like*, *Our Song*, and *Hearts in Sync*, and presented at the Expo FCT event. Validation combined observation, surveys, and comparison with a control version based on synthesized sound.

Results showed that most participants considered the experiences "very appealing," reporting they had learned concepts such as heart rate, variability, and the effects of breathing and exercise. Moreover, adolescents preferred musical experiences aesthetically closer to the genres they usually listen to rather than abstract sonifications, confirming the importance of the aesthetic dimension in pedagogical success.

It was concluded that the personalization of music based on biosignals is an innovative and effective approach to learning about the human body and physiology, paving the way to reinvent education by integrating it with art, emotion, and technology, aligned with the challenges of the digital age.

**Keywords:** Biosignals, Sonification, Education, Music

## Conteúdo

Resumo.....	II
Abstract .....	III
Lista de Figuras .....	VI
Lista de Siglas .....	VII
1. Introdução.....	1
1.1. Contexto e Motivação .....	1
1.2. Objetivos .....	2
2. Conceitos fundamentais .....	4
2.1. O que são bioassinais? .....	4
2.2. Bioassinais que refletem a atividade cardíaca.....	4
2.3. Biofeedback.....	6
2.4. Sonificação .....	6
2.5. A relação entre bioassinais, arte e educação .....	7
3. Revisão de Literatura .....	9
3.1. Nota Introdutória .....	9
3.2. Contexto Histórico .....	9
3.3. Trabalhos Atuais.....	10
3.3.1. Objetivos dos Estudos Atuais .....	10
3.3.2. Métodos Utilizados .....	12
3.3.3. Considerações Finais.....	15
3.4. O Corpo como Matéria Estética .....	16
3.4.1. Rafael Lozano-Hemmer e o ciclo “Pulse” .....	16
3.4.2. Marco Donnarumma .....	17
3.4.3. Lisa Park.....	19
3.4.4. Atau Tanaka .....	19
3.4.5. Rudolfo Quintas .....	20
3.4.6. Considerações Finais.....	21
4. Materiais e métodos .....	22
4.1. Escolha dos bioassinais .....	22
4.2. Colheita de sinais .....	22
4.3. Modelação de música através de bioassinais .....	22

4.3.1.	Processamento dos Sinais de ECG (bpms do ecg) .....	22
4.3.2.	Processamento dos BPMs da Música.....	23
4.3.3.	Ajuste do Tempo da Música.....	23
4.4.	Criação de experiências apelativas.....	23
4.4.1.	What Do I Sound Like?.....	24
4.4.2.	Our song .....	24
4.4.3.	Hearts in Sync .....	25
5.	Validação e resultados .....	27
5.1.	Metodologia de Validação.....	27
5.2.	Resultados dos Inquéritos.....	28
5.2.1.	Resultados dos Inquéritos em geral.....	28
5.2.2.	Resultados dos inquéritos por experiência .....	29
5.2.3.	Comparação com som sintetizado.....	31
5.2.4.	Análise de Preferências Musicais.....	32
5.2.5.	Sugestões de Melhorias .....	32
5.2.6.	Observações qualitativas (não incluídas no inquérito): .....	32
5.2.7.	Considerações Finais.....	32
6.	Trabalhos Futuros.....	33
7.	Conclusão.....	34
	Bibliografia.....	35

## Lista de Figuras

Figura 1- Esquema do sinal ECG com identificação das ondas e intervalos [14].....	5
Figura 2- Dois Posicionamentos para os Eléttodos do ECG na Configuração de Einthoven (RA- Braço Direito, LA -Braço Esquerdo, LF-Perna Esquerda) [14][15].....	5
Figura 3- Sinal do BVP [19].....	6
Figura 4- Instalação Pulse Topology em colaboração com a BMW no Art Basel em Miami Beach [39].....	17
Figura 5- Workshop Xth Sense Biophysical Music [41] .....	18
Figura 6- Workshop Xth Sense Biophysical Music [41] .....	18
Figura 7- Exibição Eunonia (Vr. 2) [43].....	19
Figura 8- Atau Tanaka - Spotify [45] .....	20
Figura 9- Instalação audiovisual "Black Hole" [47].....	21
Figura 10- Apresentação do projeto aos alunos do secundário na Expo FCT .....	27
Figura 11- Resultado dos Inquéritos em Geral.....	29
Figura 12- Resultado dos Inquéritos sobre a Experiência” What do I Sound Like” .....	30
Figura 13- Resultado dos Inquéritos sobre a Experiência “Our Song” .....	30
Figura 14- Resultado dos Inquéritos sobre a Experiência “Hearts in Sync” .....	31

## Lista de Siglas

Sigla	Significado
<b>API</b>	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de programação de aplicações)
<b>BVP</b>	<i>Blood Volume Pulse</i> (Volume de Pulso Sanguíneo)
<b>ECG</b>	Eletrocardiograma
<b>EDA</b>	<i>Electrodermal Activity</i> ( <i>Resposta Galvânica da Pele</i> )
<b>EEG</b>	Eletroencefalograma
<b>EMG</b>	Eletromiograma
<b>EOG</b>	Eletrooculograma
<b>FM</b>	Modulação em frequência
<b>HCI</b>	<i>Human-Computer Interaction</i> (Interação Humano-Computador)
<b>HRV</b>	<i>Heart Rate Variability</i> (Variabilidade da Frequência Cardíaca)
<b>MIDI</b>	<i>Musical Instrument Digital Interface</i> (Interface Digital de Instrumentos Musicais)
<b>MIT</b>	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
<b>MMG</b>	Mecanomiografia
<b>OSC</b>	<i>Open Sound Control</i> (protocolo de comunicação)
<b>PPG</b>	Fotopletismografia
<b>QRS</b>	Complexo QRS (parte do sinal de ECG)
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i> (média quadrática)
<b>RR</b>	Intervalo RR (intervalo entre picos R do ECG)
<b>STEAM</b>	<i>Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics</i>
<b>SVM</b>	<i>Support Vector Machine</i> (classificador de <i>machine learning</i> )

*Art = Science*

# 1. Introdução

## 1.1. Contexto e Motivação

“Até 2030, aumentar substancialmente o número de jovens e adultos que tenham **habilidades relevantes**, incluindo competências técnicas e profissionais, para emprego, trabalho decente e empreendedorismo.” [1] – Uma das premissas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável referentes à educação de qualidade.

No entanto, será a atual hegemonia do paradigma da educação tradicional um entrave a estas metas? Quanto atrito existe entre a educação pré expansão tecnológica e o prosperar num mundo onde a tecnologia replica quase todas as capacidades humanas? E qual o impacto desta obsolescência humana face às máquinas e do hedonismo proclamado pelas redes sociais, no incentivo à educação?

Num mundo dominado pelo estilo de vida fácil e hedonista derivado dos altos rendimentos financeiros obtidos através das redes sociais, os estudantes nos dias de hoje acabam por apresentar um baixo aproveitamento escolar, ou até a interrupção da educação, quando deparados com as ofertas laborais de muito menor complexidade oferecidas pela comunicação digital [2], [3]. Existindo uma forte correlação ( $r=0,675$ .  $p=0,006$ ) entre o estilo de vida disponibilizado pelas redes sociais e a taxa de evasão dos alunos [1]. Assim, revela-se que a ausência de um estímulo ao interesse pela aprendizagem, adequado à nova geração de alunos, desencadeia um aumento do abandono escolar [2], [3]. Esta lacuna vai afetar não só o desenvolvimento académico, mas também competências sociais e emocionais dos estudantes, impactando o seu desenvolvimento enquanto adultos [4], [5].

Para além disto, a falta de adequação das matérias escolares ao mundo tecnológico em que passámos a viver, também se vem a revelar um fator desafiante à criação de habilidades relevantes no prosperar num futuro mundo globalizado. Competências e conhecimentos tradicionalmente valorizados perdem relevância, dando lugar a um novo conjunto de habilidades [6]. A memorização, previsão, reconhecimento de padrões e realização de tarefas de forma sistemática estão em declínio devido à ascensão da inteligência artificial [7]. Emergem, por outro lado, um conjunto de competências contemporâneas, tais como criatividade, pensamento crítico, empreendedorismo e comunicação [8]. Para que os seres humanos prosperem na era da inteligência artificial é crucial que não repliquem o seu comportamento, mas que a usem como um aliado à singularidade humana [3].

Resultado desta mudança de paradigma, a educação irá passar por grandes alterações na próxima década. Assim, o enfoque primordial do currículo deve ser o desenvolvimento das capacidades dos estudantes, em detrimento da mera transmissão de conteúdos e conhecimentos padronizados. É crucial equipar os alunos com habilidades para lidar com o desconhecido e incerto, ao invés de exigir a memorização de soluções conhecidas para problemas conhecidos [4], [6], [7], [8].

Foi desta mistura eclética entre a falta de um estímulo adequado à aprendizagem da nova geração de alunos e o foco nas competências contemporâneas que nasceu o *BioSoundScape*.

## 1.2. Objetivos

O *BioSoundScape* é uma exposição de arte em desenvolvimento, que surge para diminuir a lacuna entre arte, ciência e educação, através da exploração de bioassinais como meio de expressão artística.

Bioassinais fornecem informações fisiológicas valiosas, mas sua tradução em formas perceptíveis pode ser desafiadora. Ao aproveitar as características únicas da percepção sonora, a exposição permitirá aos visitantes **criar música através dos seus próprios bioassinais**, enquanto ganham uma compreensão mais profunda de sua própria fisiologia. Desta forma, o visitante é convidado a se tornar artista e obra, revelando as sinfonias escondidas dentro de si.

Esta dissertação busca investigar o potencial dos bioassinais como meio de expressão artística e educacional, fornecendo uma perspectiva inovadora sobre o corpo humano e seus processos fisiológicos. Surge como resposta à necessidade de reinventar a forma como se comunica conhecimento científico, aproximando os conteúdos de fisiologia à realidade sensorial e emocional dos adolescentes. Inspirado na abordagem STEAM<sup>1</sup>, o projeto visa tornar a aprendizagem mais apelativa, incorporando bioassinais como matéria-prima para criar experiências sonoras personalizadas.

O trabalho exposto neste documento visa responder à pergunta central:

**Como a personalização da música baseada em bioassinais pode ser usada para ensinar conceitos de fisiologia e melhorar a percepção dos utilizadores sobre o funcionamento do seu próprio corpo?**

Para aprofundar essa investigação, várias subperguntas emergem, talhando nuances e direções específicas para a pesquisa:

1. Como podem ser utilizados os bioassinais para modelar músicas?
2. Como criar, através da modelação de música a partir de bioassinais, experiências apelativas que incentivem o público a participar e a aprender?
3. Qual é a melhor forma de comunicar ciência e melhorar a experiência do utilizador?
4. Quais os conhecimentos que podem ser ensinados a partir das experiências desenvolvidas?

Todas estas questões serão devidamente exploradas e esclarecidas ao longo deste documento, proporcionando uma compreensão abrangente sobre o uso de bioassinais na educação e na arte.

O objetivo desta investigação é a criação de uma base sólida para a formação da exposição *BioSoundScape*, um passo em frente na educação do futuro, onde a fusão da ciência e da arte desvela as melodias ocultas que habitam em cada um de nós.

---

<sup>1</sup> O modelo STEAM prevê a integração de conhecimentos de Artes, Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática, possibilitando ao aluno se preparar para desafios como cidadão e também no mercado de trabalho. A metodologia surgiu nos Estados Unidos na década de 1990, após ser constatado o desinteresse de alunos pelas ciências exatas.

*Ciência e a arte.*

*Muitas vezes vistas como opostos polares.*

*Uma junção de mundos que parecem separados por um abismo intransponível.*

*No entanto poderão elas complementar-se?*

*Não serão, na verdade, amantes secretas a dançar uma valsa invisível?*

## 2. Conceitos fundamentais

### 2.1. O que são bioassinais?

Os bioassinais definem-se como dados de manifestações fisiológicas, de natureza elétrica, mecânica, acústica, térmica ou ótica. Visam espelhar a atividade do organismo, refletindo o funcionamento dos seus sistemas, órgãos e tecidos [9], [10]. Um bioassinal pode ser elétrico ou não elétrico, sendo os primeiros os mais comuns. Estes sinais bioelétricos são o resultado das variações de corrente elétrica produzidas pela soma das diferenças de potencial elétrico, que podem ser medidas de maneira não invasiva, por meio de eletrodos diretamente sobre a pele [9], [10]. Estes sinais permitem monitorizar em tempo real a atividade elétrica subjacente a processos fisiológicos [10], [11]. Entre os exemplos mais comuns, encontram-se o eletroencefalograma (*EEG*) que regista a atividade elétrica do cérebro, o eletrocardiograma (*ECG*) que reflete a atividade elétrica do coração, o eletromiograma (*EMG*) que regista a atividade elétrica proveniente da contração muscular e a resposta galvânica da pele (*EDA*) que mede a variações da condutância elétrica cutânea [9], [10], [11]. Além destes exemplos, existem ainda bioassinais não elétricos, como medições de trocas gasosas, fotopletismografia, parâmetros metabólicos ou indicadores de percepção sensorial, como por exemplo, deteção de odores ou variações térmicas na superfície da pele [9].

### 2.2. Bioassinais que refletem a atividade cardíaca

Compreender a atividade cardíaca é essencial quer seja em contextos clínicos ou para própria percepção. Para isto existem diversos bioassinais que fornecem informações relevantes sobre o funcionamento do coração. Entre estes estão o eletrocardiograma (*ECG*), o volume de pulso sanguíneo (*BVP*). Estes sinais diferem entre si na forma como são captados, na precisão que oferecem e na adequação ao contexto de utilização.

#### 2.2.1. ECG

O *ECG* é um método não invasivo que permite a avaliação da frequência e dos ritmos cardíacos, possibilitando a deteção de anomalias como arritmias ou bloqueios, sendo uma ferramenta indispensável em contextos clínicos [12].

Num *ECG* é possível identificar 3 componentes, como se pode ver na Figura 1 [12], [13]:

- Onda P: Representa a despolarização dos átrios.
- Complexo QRS: Representa a despolarização dos ventrículos.
- Onda T: Representa a repolarização dos ventrículos.

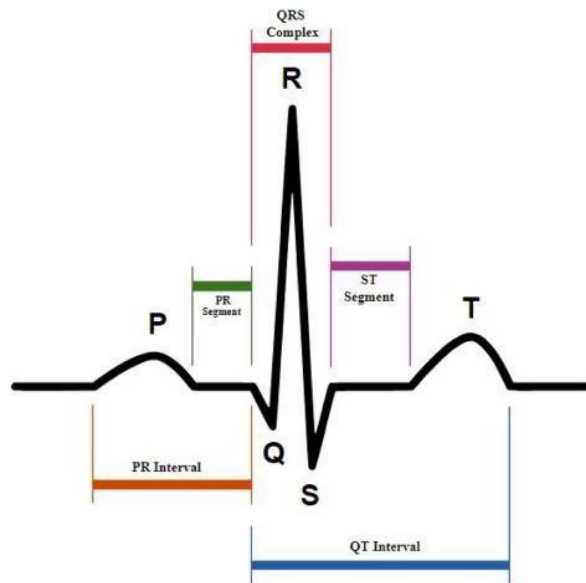


Figura 1- Esquema do sinal ECG com identificação das ondas e intervalos [14]

Para a realização deste exame, elétrodos são posicionados na pele, de modo a detetar a atividade elétrica do coração, sendo que o número ou o posicionamento dos elétrodos pode variar consoante o estudo. As configurações mais comuns requerem apenas 3 elétrodos colocados no tórax, braços e/ou pernas [13], como se pode ver na Figura 2, no entanto, implica que haja ainda assim contacto direto com zonas do corpo que podem gerar desconforto nos participantes, especialmente em ambientes públicos e não clínicos. Em contextos interativos e artísticos, como o deste projeto, a prioridade é garantir conforto, rapidez na instalação e respeito pela privacidade dos participantes. Por esse motivo, optou-se pela utilização do sinal de *BVP*.

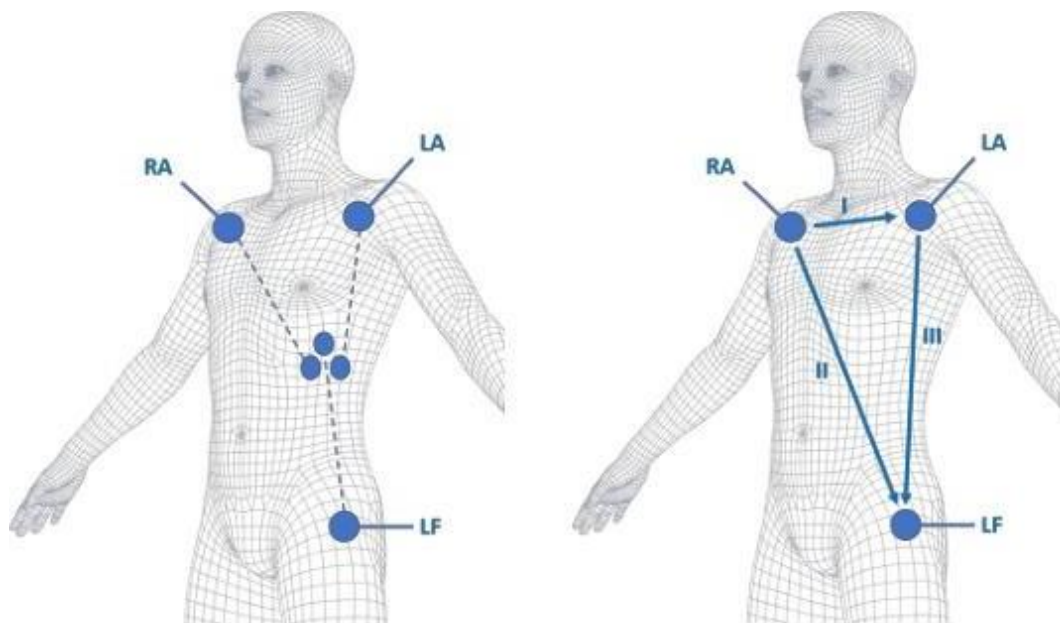


Figura 2- Dois Posicionamentos para os Elétrodos do ECG na Configuração de Einthoven (RA- Braço Direito, LA -Braço Esquerdo, LF-Perna Esquerda) [14][15]

### 2.2.2. BVP

O *BVP* é um sinal que mede as variações do volume sanguíneo nas artérias, por meio da emissão de luz, de modo a detectar mudanças na translucidez das artérias. Aquando do bombeamento do sangue pelo coração, o volume de sangue nas artérias aumenta e estas tornam-se mais opacas, levando a que menos luz passe por elas até ao detetor [16], [17], [18]. O *BVP* não mede diretamente os impulsos elétricos do coração, mas sim o seu efeito periférico: o resultado da contração cardíaca na circulação do sangue. No *BVP*, ao contrário do *ECG* as ondas P, T e o complexo QRS não se encontram discriminadas, não permitindo uma análise tão profunda da saúde cardíaca. No entanto, oferece uma representação da onda pulso, que permite medir eficazmente a frequência cardíaca, a variabilidade do ritmo cardíaco (*HRV*) e responder a alterações emocionais ou de stress. Esta abordagem não invasiva permite obter dados cardiovasculares fíaveis de forma mais acessível e cómoda, sem comprometer a experiência do utilizador [17], [18].

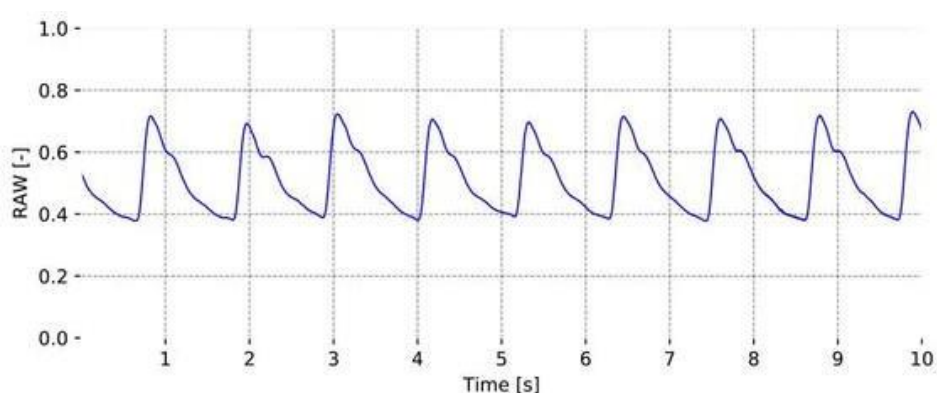


Figura 3- Sinal do BVP [15]

### 2.3. Biofeedback

O *biofeedback* é um método que permite que uma pessoa regule voluntariamente as suas reações fisiológicas e emocionais, através da monitorização dos dados de funcionamento do seu corpo (como é o caso dos biosinais) e do retorno em tempo real dessa informação à pessoa. Esta ferramenta terapêutica permite desenvolver a perceção consciente de processos que, habitualmente, decorrem de modo involuntário com o objetivo a autorregulação [20], [21]. O *biofeedback* é amplamente usado em contexto clínico desde meados do século XX, nomeadamente no tratamento de ansiedade e reabilitação motora [22].

Na vertente educativa e artística o *biofeedback* potencia o autoconhecimento, a curiosidade a autorregulação emocional, através da exploração da relação com próprio corpo, o meio envolvente e a tecnologia [20].

### 2.4. Sonificação

A sonificação tem por base a transformação/tradução de dados numéricos relativos a um determinado fenómeno, numa sequência de elementos acústicos, de modo a criar representações auditivas de ocorrências que podem não ser diretamente audíveis, como variações fisiológicas ou dados ambientais, a fim de facilitar a sua interpretação e monitorização [23], [24].

Deste modo, a integração da sonificação com bio-sinais permite uma melhor compreensão do corpo e dos seus processos fisiológicos, acrescentando uma contribuição significativa na vertente educativa.

## 2.5. A relação entre bio-sinais, arte e educação

A combinação entre bio-sinais, *biofeedback* e sonificação tem aberto novas possibilidades na criação de experiências imersivas e participativas, que podem ser simultaneamente artísticas, educativas e terapêutica, como irão ser exploradas no capítulo seguinte de revisão de literatura. Ao tornar audível ou visível a dimensão invisível do corpo, estas práticas promovem uma percepção ampliada sobre o próprio corpo, estimulam a curiosidade científica e potenciam o envolvimento emocional.

O presente trabalho propõe explorar este cruzamento de linguagens, utilizando o **batimento cardíaco** como ponto de partida **para desenvolver uma experiência sensorial** inovadora que contribua para **aproximar a ciência do público**, através de estratégias que valorizem a emoção, a interatividade e a participação.

*Onde a ciência e a arte se cruzam*

## 3. Revisão de Literatura

### 3.1. Nota Introdutória

No âmbito da sonificação, o corpo transcende o papel de uma entidade biológica para se tornar um repositório de dados complexos. Esta complexidade resulta da interseção entre percepção, cognição e interação com o ambiente. Contudo, a tecnologia não só revela esta complexidade, mas também transforma a maneira como interagimos com ela. Distâncias são criadas entre aqueles que estão fisicamente próximos, ao mesmo tempo que se aproxima quem está distante. Assim, surgem questões sobre como o som pode reafirmar a sua capacidade de mediador na criação de presença física e emocional, em oposição à invisibilidade imposta pela digitalização [25].

Neste contexto, sistemas de *biofeedback* baseados em bio sinais emergem como uma ponte entre o digital e o humano. Estes sistemas utilizam sinais como EEG e EMG para transformar gestos subtis em experiências sonoras, ampliando a percepção sobre estados corporais e emocionais. Transformam o corpo num instrumento musical, promovendo uma conexão entre intencionalidade e som, além de possibilitarem a exploração de gestos subconscientes, revelados por meio da projeção sonora em tempo real [26].

Ademais, a música, como intervenção terapêutica e educativa, apresenta um impacto profundo e multifacetado. Estudos [27], [28], [29] comprovam que a música pode reduzir o stress e a ansiedade, regular estados emocionais e alinhar ritmos biológicos aos padrões sonoros. No entanto, o potencial de combinação da música com tecnologias como o permanece subexplorado. Este campo surge como uma oportunidade de expandir o uso da música não apenas como experiência estética, mas também como ferramenta para sincronizar estados fisiológicos com experiências sonoras imersivas [30].

Com os avanços na Interação Humano-Computador (HCI), os músicos podem agora utilizar dados de sensores para controlar performances em tempo real, expandindo as fronteiras da criação musical. Estes avanços permitem uma maior integração entre dados biológicos e processos criativos, aproximando a tecnologia das dimensões humanas [31].

A combinação destas dinâmicas desafia os limites do que entendemos como som, corpo e interatividade. Assim, o estado de arte apresentado de seguida explora a evolução histórica, os avanços tecnológicos e as aplicações atuais das interfaces baseadas em bio sinais, com foco na sua relevância terapêutica, educativa e criativa. Este trabalho busca destacar as potências emergentes destas tecnologias e como elas podem redefinir a nossa relação com o som e o corpo.

### 3.2. Contexto Histórico

A transformação de bio sinais em música remete ao início do século XX, com a invenção do *Theremin* por Lev Termen e do *Ondes Martenot* por Maurice Martenot. Através de movimentos corporais, estes dois instrumentos permitiam o controlo de parâmetros musicais, estabelecendo as bases para o uso do corpo como interface musical [26], [32].

Todavia, a utilização direta de bioassinais na composição musical só teve início em 1965, com a obra *Music for Solo Performer*, de *Alvin Lucier*. Nesta peça, os sinais provenientes do *EEG* eram utilizados para ativar instrumentos de percussão, criando uma experiência sonora nunca antes vista [31], [32]. Esta peça inspirou artistas como *Richard Teitelbaum* e *David Rosenboom*, que utilizaram não só *EEGs* como também *ECGs* para criar peças como *Spacecraft* e *Ecology of the Skin*, respetivamente [32].

O conceito de *biofeedback* surgiu como marco bastante relevante. Inicialmente utilizado em contextos médicos, através da tradução de sinais fisiológicos em estímulos audíveis ou visuais, o *biofeedback* promoveu práticas de autorregulação emocional e fisiológica. Foi nos anos 80 que esta abordagem foi adaptada à música com o desenvolvimento do *BioMuse* por *Benjamin Knapp* e *Hugh Lusted*, permitindo o controlo de sistemas eletrónicos a partir de bioassinais como *EEG*, *EMG* e *ECG* [32]. Esta apropriação artística representa um ponto de viragem na história dos bioassinais, que deixaram de ser utilizados exclusivamente para uso técnico ou militar e passaram a incentivar a autoexpressão artística do corpo [25].

Nos anos 1990, a performance musical baseada em bioassinais ganhou uma nova abordagem com artistas como *Marco Donnarumma*. O seu sistema *XTH Sense* captava oscilações mecânicas subcutâneas resultantes de movimentos musculares e do fluxo sanguíneo, traduzindo-as em som em tempo real. Este trabalho aprofunda a ideia do corpo como instrumento completo e autónomo na criação sonora [33].

Contudo, uso artístico de bioassinais não se limitou ao *EEG* e *EMG*. Sinais cardíacos, como os captados por *ECG*, também tiveram papel central. *Teitelbaum*, por exemplo, usou estes sinais para controlar sintetizadores eletrónicos, revelando a relação íntima entre ritmo cardíaco e estrutura musical [31], [32]

Com a emergência de dispositivos *wearables*, como o *Apple Watch* e sensores *ECG* portáteis, os bioassinais tornaram-se mais acessíveis ao público em geral. Esta democratização tecnológica abriu espaço para novas formas de experimentação artística, educativa e terapêutica [34]. Instituições como o *MIT Media Lab* têm desempenhado um papel central neste processo, ao promover projetos que combinam arte, ciência e engenharia, como o *Conductor's Jacket*, que mapeia sinais fisiológicos em tempo real [32].

Deste modo, o contexto histórico da utilização de bioassinais na música mostra-nos não só a sua evolução tecnológica como também uma mudança de paradigma na forma como concebemos o corpo.

### 3.3. Trabalhos Atuais

Atualmente, foram realizados vários estudos no âmbito da sonificação de bioassinais, com um amplo espectro de objetivos e metodologias, abrangendo desde aplicações clínicas até expressões artísticas e emocionais. Deste modo, neste capítulo, foram reunidos os principais objetivos dos estudos atuais e respetivos métodos utilizados.

#### 3.3.1. Objetivos dos Estudos Atuais

A sonificação de bioassinais apresenta um amplo espectro de finalidades, abrangendo desde diagnósticos clínicos a exibições artísticas. Neste subcapítulo são apresentados os principais propósitos dos trabalhos atuais.

### 3.3.1.1. Human Computer Interaction (HCI)

Muitos dos estudos recentes no âmbito da sonificação de bio-sinais giram em torno da *Human Computer Interaction*, criando performances musicais com instrumentos controlados em tempo real através dos bio-sinais dos músicos, como é o caso em [31].

Já o estudo [22], adiciona uma camada extra a esta interação, através da utilização de sinais em tempo real e sinais pré-gravados, para a criação de uma performance musical. Neste caso são utilizados os bio-sinais em tempo real de duas pessoas e o chamado ‘estado congelado’ que age como uma terceira pessoa, correspondendo a bio-sinais adquiridos previamente. Construindo-se uma performance musical através da fusão do presente e do passado.

Nestes estudos cada bio-sinal controla diferentes elementos relacionados à música: o *ECG* controla ritmos do instrumento musical digital, os dados normalizados da respiração são usados para controlar o *pitch*, os pontos de modulação e a amplitude.

### 3.3.1.2. Melhorar Diagnósticos e Aplicações Clínicas

Outra vertente bastante importante da sonificação de bio-sinais é o seu uso em aplicações clínicas, em especial na melhoria de diagnósticos. No estudo [35] é avaliado como a sonificação de *ECGs* pode ajudar na deteção de patologias cardíacas, como infarto do miocárdio e fibrilação atrial. Foram usados os dados de 12 *ECGs* (provenientes de uma base de dados pública), em que múltiplos canais de *ECG* são simultaneamente representados por sons com diferentes *pitchs*. Através deste método o estudo conclui que a sonificação de *ECGs* se mostrou muito útil no reconhecimento de padrões patológicos de forma auditiva.

### 3.3.1.3. Criar Experiências Artísticas e Estéticas

Grande parte dos estudos de sonificação de bio-sinais também se foca muito na sua componente artística, objetivando criar experiências imersivas que combinam ciência e arte. Exemplo disto é o trabalho [36] que propõe a sonificação de dados fisiológicos que seja não só fiel aos dados adquiridos, mas em especial que esses dados passem a ser esteticamente interessantes. Para isto, os sinais foram transformados em sons, que obtiveram uma maior componente estética através de filtros, ressonâncias, efeitos sonoros.

Já o artigo [31], tem como objetivo utilizar bio-sinais provenientes de *EEG*, *EMG*, *ECG* e *EOG* para controlar algoritmos de síntese sonora de modo a construir um instrumento musical através de dados biológicos.

O estudo [33] teve como objetivo a criação de um sistema de aquisição de bio-sinais (*EMG* e acelerómetro) e o mapeamento desses sinais, para transformar gestos em síntese sonora através de dois métodos: sonificação direta ao transformar os sinais provenientes dos músculos em sons e controlador paramétrico ao utilizar os sinais para manipular os sons. Esta síntese sonora através de gestos foi utilizada em concertos.

Também o estudo [34] teve como objetivo a criação de instrumentos musicais através de dados biológicos, através do mapeamento de bio-sinais para sons e imagens.

Já o artigo [37] tem como objetivo fornecer um estudo teórico sobre como transformar emoções em sons utilizáveis em performances artísticas. Para isto foram estudadas teorias sobre as emoções, analisados métodos de medições fisiológicas e também de sonificação, a história das emoções na música e propôs métodos de exploração da sonificação de emoções.

#### 3.3.1.4. Regular Estados Emocionais e Promover Bem-Estar

A sonificação de bio-sinais é também utilizada em muitos projetos que visam promover o bem-estar. No trabalho [30], por exemplo, é utilizada a sonificação de parâmetros fisiológicos como por exemplo a respiração e o ritmo cardíaco como medida de *biofeedback*, de modo que o participante ao ouvir os seus bio-sinais obtenha um maior entendimento sobre os seus estados fisiológicos e emoções e promovendo uma maior consciência sobre o próprio corpo e consequente autorregulação e relaxamento.

### 3.3.2. Métodos Utilizados

Os estudos analisados utilizam não só uma grande variedade de bio-sinais, como também diversos métodos: foram utilizadas diferentes técnicas de captação, processamento e geração sonora no espectro de estudos analisados. Deste modo, este subcapítulo detalha os principais métodos adotados.

#### 3.3.2.1. Captação de Bio-sinais

Cada um dos estudos analisados utilizou a sua própria seleção de bio-sinais. Os principais sinais utilizados incluem:

##### 1. Sinais cardíacos (*ECG*, *BVP* e *PPG*):

- Utilizado no estudo [30], através do dispositivo *g.MOBilab+*, tendo sido colocados 3 elétrodos (dois nas clavículas e outro na costela inferior esquerda) em cada participante. A medida principal a ser extraída do sinal de *ECG* adquirido foram os BPMs dos participantes, que controlavam a velocidade da música, sendo que o volume da música foi controlado pela amplitude do sinal.
- No estudo [31] foram também adquiridos sinais de *ECG*, mas desta vez através do biopac MP100.
- Também no artigo [35] foram utilizados *ECGs*, no entanto estes não foram recolhidos pelos autores uma vez que recorreram a um banco de dados público de sinais de *ECGs*.
- Em [36] foi posicionado no pulso dos participantes um sensor de *PPG*.
- No estudo [22] para além do *ECG* também foi medido o *BVP*, através de um sensor de clip posicionado na extremidade do dedo.

##### 2. *EMG*:

- Registado no estudo [31] através do *Biopac MP100*.
- Também utilizado no estudo [33], no qual foi criado o próprio sistema de aquisição, em que para além do sistema de aquisição de *EMG* também possuía um acelerómetro integrado.

- No estudo [22] também recorreram ao *EMG*.

### 3. **Respiração e volume torácico:**

- No estudo [36] foram medidos dois parâmetros de respiração através do protocolo *ZigBee*: a temperatura da respiração, em que o sensor foi posicionado à saída da narina, de modo a medir a amplitude da respiração e outro sensor responsável por medir a expansão da caixa torácica.
- Também no estudo [30] um sensor respiratório foi colocado na parte superior do torax de modo a medir as fases de inalação e de exalação de cada participante. Neste estudo esta medida foi apenas utilizada como variável de controlo, uma vez que influencia o ritmo cardíaco.
- Em [22] também foram utilizados sensores que detetam o movimento do tórax durante a respiração.

### 4. **EDA:**

- Empregada em [22] para monitorizar estados emocionais.

### 5. **EEG:**

- No estudo [31] para além dos sinais acima referidos também foram utilizados sinais de *EEG*, adquiridos através de um *DTI cap* com 19 canais e taxa de amostragem de 64 Hz. Os elétrodos foram posicionados seguindo o sistema internacional 10-20 e Cz como referência. Os sinais são adquiridos com o participante concentrado em diferentes tarefas enquanto se encontra num espaço de trabalho comum.
- Também o [34] utilizou o mesmo capacete utilizado no estudo [31] supracitado.

### 6. **EOG:**

- Utilizado também no [31], sendo adquirido através de um amplificador com um ganho de 4000 e um filtro passa banda de 0.4-69 Hz.

#### 3.3.2.2. **Processamento de Sinais, Sonificação e Softwares utilizados**

Os dados capturados são processados de modo a remover ruídos e extrair características relevantes, sendo posteriormente convertidos em áudio. Dependendo do estudo e/ou dos sinais utilizados são empregues diferentes métodos de processamento de sinal e de sonificação, bem como diferentes sistemas de hardware e software. Deste modo, neste subcapítulo são explorados estes métodos, com especial foco nos sinais cardíacos, uma vez que o projeto desenvolvido nesta dissertação utiliza somente estes sinais.

## 1. Sinais cardíacos (ECG, BVP e PPG):

- Em [30], o *ECG* foi adquirido com o sistema *g.MOBILab+* e processado em *Simulink*. Os sinais foram filtrados através de um filtro *notch* de 50 Hz para remover interferências elétricas e foi utilizado o algoritmo *Pan-Tompkins* para a detecção dos complexos QRS e cálculo de intervalos *RR*. Assim, foram adquiridos os *BPMs* dos participantes, que controlavam a velocidade da música, sendo que o volume da música foi controlado pela amplitude do sinal. Para a reprodução e manipulação da música foi utilizado o *software Max/MSP* em conjunto com o *Ableton Live 8*.
- Em [35] os sinais foram reamostrados a 257 Hz, não tendo sido aplicados filtros para processar os *ECGs*. Foi aplicado um método de *parameter-mapping sonification* que converteu o sinal de *ECG* num som polifônico. Foram utilizados 6 canais do *ECG* em que cada canal foi mapeado para uma nota musical fixa, na escala de ré menor. A amplitude do sinal controlava o volume do som e pequenas variações na frequência (~3%, meia nota) controlavam o *pitch*. Foram também adicionados harmônicos simples (3°, 4°, 5°) para enriquecer o timbre. Foi utilizado o *Matlab R2015b* e foi também disponibilizado em *SuperCollider*.
- Já em [31] não foi feito processamento de sinal, sendo que o sinal proveniente do *ECG* controlava diretamente os instrumentos. Os algoritmos de processamento de sinal foram sobretudo aplicados aos sinais de *EEG* e *EMG* também adquiridos, sendo escritos em *Matlab* e implementados em *Simulink*. Para a síntese musical foi utilizado o *software Max/MSP*.
- Em [36] o sinal do pulso cardíaco foi adquirido através de *LabView* e gravado através da plataforma *MAX/MSP*, sendo convertido num sinal sonoro através da técnica “*sample and hold*”. De modo a tornar o som gerado mais harmônico foram utilizados três filtros passa banda ressonantes (55 Hz, 100 HZ, 220 HZ).
- Em [22] os bio-sinais (*EEG*, *EMG*, *ECG*, *BVP*, *EDA*, respiração e temperatura) foram adquiridos através dos sistemas Nexus-10 e Nexus-4, tendo longo passado por uma análise primária e remoção de artefactos, através da *API* do fabricante. Depois de adquiridos, os dados foram enviados para a plataforma Bio-Music, através do protocolo *OSC*, sendo que o seu processamento foi feito através dos softwares *Pure Data*, *Biotrace+* e *Python*. Os sinais de *ECG* foram combinados com os sinais provenientes do *EDA*, que através da detecção dos picos R e da variabilidade inter-batimento, mapearam o ritmo cardíaco. Este ritmo controlava o instrumento de música digital, gerando padrões rítmicos dinâmicos. Em vez da representação sonora convencional do batimento cardíaco, os autores optaram por uma sonificação baseada em ruído e amostras ‘*glitch*’, criando texturas onde ainda se podia reconhecer a estrutura do ritmo cardíaco. Embora neste estudo também tenham sido adquiridos sinais de *BVP*, não é descrito o método de sonificação deste sinal, atuando mais como um complemento do sinal de *ECG*.

## 2. Outros bio-sinais

Embora o foco desta dissertação esteja nos sinais cardíacos, os estudos analisados recorreram igualmente a outros bio-sinais, tendo para isso utilizado também diferentes métodos para o seu processamento e sonificação:

- **Respiração e expansão torácica:**

Estes sinais foram alvo de um maior processamento face aos sinais cardíacos, incluindo a obtenção das fases respiratórias, a utilização de ruído branco filtrado com controlos em amplitude e frequência e a aplicação de síntese subtrativa vozeada e não vozeada. No estudo IBIS foi ainda utilizada para controlar síntese FM.

- **EMG:**

Os sinais de *EMG* foram processados através de filtros digitais (passa alto, passa baixo, notch, etc) e extraídas algumas *features* como a energia ou RMS, análise no domínio temporal (ex.: *RMS*, energia), que permitiram fazer um processo de sonificação direta em alguns estudos. Noutros estudos foi utilizada também o controlo de parâmetros em síntese granular e polifónica baseada em *samples*. Em [33], foi recorrido também a algoritmos de *machine learning* interativo.

- **EEG:**

Os sinais de *EEG* foram alvo de um processamento mais complexo, face aos outros bio-sinais. No processamento dos sinais de *EEG* foram utilizados filtros passa-banda (0.5–30 Hz), transformadas de *wavelet*, *filter banks* para ritmos alfa, mu e beta e ainda classificadores como *SVM* para distinguir tarefas motoras. Através deste processamento mais complexo foi possível explorar sonificações mais sofisticadas.

### 3.3.3. Considerações Finais

Através desta análise foi possível denotar que a sonificação assume diferentes objetivos, desde experiências artísticas e imersivas até aplicações clínicas e de promoção de bem-estar. Este espectro de finalidades reflete o potencial que a sonificação de bio-sinais tem para conectar ciência, tecnologia e arte, promovendo avanços no entendimento do corpo humano.

Também se verificou que diferentes estudos recorrem a diferentes métodos de processamento e sonificação, evidenciando uma tendência clara: quanto mais complexos forem os sinais, mais sofisticadas se tornam as técnicas de processamento e sonificação, enquanto sinais mais simples, como os sinais cardíacos, exigem um processamento mínimo ou até mesmo nenhum, dependendo da sua finalidade.

No entanto, permanece uma lacuna relevante: muitos destes estudos, mesmo os que revelam uma preocupação estética no foro artístico, apresentaram sonificações com carácter excessivamente sintetizado, priorizando a fidelidade aos dados dos bio-sinais em detrimento de uma experiência estética agradável. Este facto é reconhecido por alguns autores: “*This is problematic because ultimately every sonification strives for a good sound design (with more or less success). But what is a ‘good sound design’ is also difficult to define*” [36]. Esta problemática reforça a necessidade de estudos que privilegiem o apelo do som gerado como objetivo central. Neste âmbito, a presente dissertação encaixa-se nesta lacuna, procurando tornar a sonificação de bio-sinais não só informativa e educativa, como também apelativa e musicalmente agradável.

## 3.4. O Corpo como Matéria Estética

A componente estética da transformação de bio-sinais em música revelou-se uma apropriação sensorial do invisível importante na arte contemporânea, com a criação de obras que questionam o lugar do corpo na cultura tecnológica e convidam a uma reflexão sobre como cada corpo se inscreve na componente artística através da sua identidade própria.

Diversos artistas contemporâneos emergem neste campo, ao explorar a simbiose da arte e tecnologia, como tradutores do corpo humano. Neste capítulo foram analisados os trabalhos dos artistas mais relevantes desta área, cujas obras combinam biossensores com síntese sonora e interfaces digitais, explorando o potencial expressivo do corpo.

### 3.4.1. Rafael Lozano-Hemmer e o ciclo “Pulse”

*Rafael Lozano-Hemmer* [38] é conhecido por criar e apresentar instalações interativas em espaços públicos por todo o mundo. Recorre a tecnologias como luzes robóticas, fontes digitais, sistemas de vigilância computadorizados, grandes painéis multimédia e redes telemáticas, as suas instalações procuram interromper a condição urbana cada vez mais homogeneizada, através da auto-representação.

De entre vários projetos e exposições utilizando diversos sensores, destaca-se, na monitorização do sinal cardíaco, um conjunto de obras conhecido por ciclo ‘Pulse’. As diferentes instalações que compõem o ciclo *Pulse*, entre as quais se incluem *Pulse Room*, *Pulse Tank*, *Pulse Front*, *Pulse Topology* e *Pulse Forest*, partilham uma preocupação comum: transformar o batimento cardíaco num material estético e relacional. A primeira exposição de ‘Pulse’, denominada de ‘*Pulse Room*’, remete a 2006, consistindo numa instalação interativa com mais de 300 lâmpadas incandescentes transparentes, suspensas por cabos a três metros do chão, sendo distribuídas uniformemente pela sala de exposição, preenchendo-a por completo. Num dos lados da sala encontra-se um sensor que deteta a frequência cardíaca dos participantes. Quando alguém segura no dispositivo, um computador deteta o seu pulso e aciona imediatamente a lâmpada mais próxima para piscar ao ritmo exato do coração dessa pessoa. Quando o dispositivo é largado, todas as luzes se apagam brevemente, e a sequência de piscar avança para a lâmpada seguinte. Cada vez que alguém toca no dispositivo, o padrão do batimento cardíaco é registado e enviado para a primeira lâmpada, empurrando para a frente todas as gravações existentes. Em qualquer momento, a instalação mostra os registos dos participantes mais recentes. Este mecanismo cria uma memória efêmera que acumula os sinais vitais de diferentes participantes, transformando a sala num arquivo provisório de presenças.

Já em 2021, esta instalação ganhou novas proporções, denominando-se de ‘*Pulse Topology*’, visível na Figura 4, e sendo exibida no museu *Superblue Miami*, ilustrado na Figura 4. Esta exposição contou com a colaboração da BMW, sendo composta por 3000 lâmpadas, suspensas a diferentes alturas, que pulsam em resposta aos sinais vitais dos visitantes. A experiência propõe um *memento mori* contemporâneo, onde cada batimento individual se dilui num coro coletivo, evocando a vulnerabilidade e a interdependência da existência.

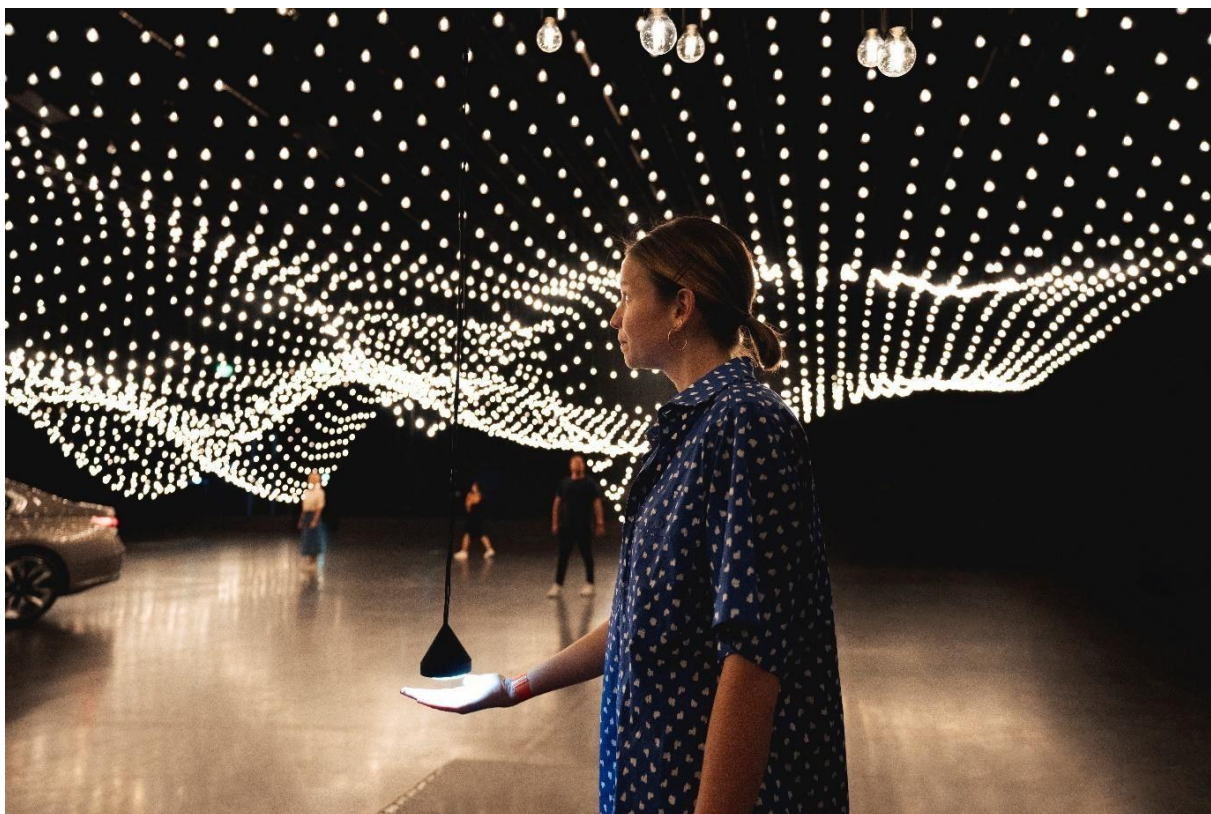


Figura 4- Instalação *Pulse Topology* em colaboração com a BMW no Art Basel em Miami Beach [35]

Ao longo dos anos, diversas variações destas exposições foram feitas. Como em *Pulse Tank* (2008), em que o artista explora o mesmo princípio, mas recorrendo a tanques de água, em que ondas são geradas ao ritmo cardíaco dos participantes. Ou *'Pulse Front'* em que diversos holofotes ao emitir luz e mudam de direção ao ritmo dos sinais cardíacos dos participantes.

Estes, e outros projetos *'Pulse'* propõem uma visualização poética da vida biológica, transformando o corpo em matéria sensível que deixa rastros na memória partilhada.

### 3.4.2. Marco Donnarumma

*Marco Donnarumma* [40] é um artista conhecido pela transformação do corpo em instrumentos musicais através das relações entre gesto, som e tecnologia. A sua contribuição mais relevante neste âmbito é o projeto *XTH Sense* (2010), visível nas Figuras 5 e 6, no qual são amplificados os sons do coração, do fluxo sanguíneo e dos músculos para criar música, vídeo ou luz. O princípio central do *XTH Sense* consiste em abordar o corpo humano como um instrumento completo por si só, em vez de o “interligar” a um sistema interativo. Para isto, durante a performance, os movimentos musculares e o fluxo sanguíneo, que produzem ondas sonoras subcutâneas de baixa frequência (sinais mecanomiográficos, ou MMG), que são captados através de dois microfones-sensores e posteriormente processados e amplificados. Isto permite que o participante module não só a textura, a ressonância e a espacialidade do som através da intensidade e qualidade do esforço físico, mas também através das flutuações vitais do seu organismo. Deste modo, o *XTH Sense* transcende o paradigma da interface de utilizador ao captar a matéria sonora e dados de controlo diretamente do corpo do participante. Este sistema tem sido usado desde então nos trabalhos do artista, que vão desde concertos de música biofísica a performances de arte de ação, instalações e produções de teatro-dança, como se pode ver [aqui](#).



*Figura 5- Workshop Xth Sense Biophysical Music [41]*



*Figura c- Workshop Xth Sense Biophysical Music [41]*

### 3.4.3. Lisa Park

Na exibição “*Eunoia*” (grego para “*belo pensamento*”) [42] são utilizados sensores de *EEG* para transformar em som os estados mentais atuais da artista. Neste caso, o volume, a altura (pitch) e a espacialização (*panning*) do som são calibrados de acordo com os valores de “Atenção” e “Meditação” detetados nos dados de *neurofeedback*.

Esses dados são também convertidos em vibrações que agitam a superfície de taças com água, permitindo visualizar os estados mentais da artista.

A motivação por trás desta performance era alcançar a serenidade interior, através do controlo sobre a própria consciência e pensamentos, tendo como fim atingir um momento de completa quietude, em que nenhum som pudesse ser ouvido e nenhuma vibração fosse visível na água.

Em *Eunonia (Vr. 2)*, refletida na Figura 7, a exibição expande-se ao público, convidando-o a observar o impacto das suas emoções em fenómenos físicos. A artista destaca estes projetos como estratégias de autoconhecimento e metáforas da fragilidade emocional, como se pode ver [aqui](#).



Figura 7- Exibição *Eunonia (Vr. 2)* [43]

### 3.4.4. Atau Tanaka

*Atau Tanaka* [44] é um artista e investigador que usa os sinais provenientes do *EMG* para tornar o corpo humano num instrumento musical.

Em 1993 *Atau Tanaka* em conjunto com *Zbigniew Karkowski* e *Edwin van der Heide* formaram o *Sensorband*, uma banda em que cada membro toca um instrumento único, utilizando o próprio corpo para produzir música. *Tanaka* toca o *BioMuse*, *Karkowski* toca numa “*gaiola invisível*” de feixes de infravermelhos que, quando interrompidos, disparam amostras sonoras e *Van der Heide* toca um condutor *MIDI* com controlos semelhantes a joysticks.

Em 2000 e 2017 também publicou diversas músicas, como é ilustrado na Figura 8, produzidas através de biosinais, sendo possível serem ouvidas [aqui](#).

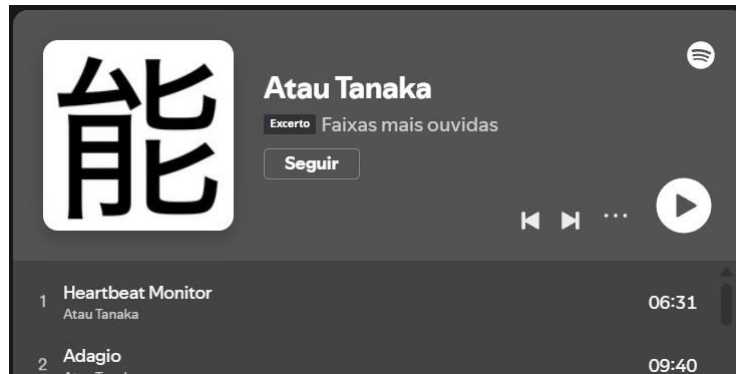


Figura 8- Atau Tanaka - Spotify [45]

### 3.4.5. Rudolfo Quintas

*Rudolfo Quintas* [46] é um artista visual português cujas obras examinam criticamente a relação entre cultura e tecnologia. As suas investigações artísticas abordam o impacto da tecnologia nas esferas sociais, políticas e psicológicas, através de projetos que vão desde pinturas computacionais em tempo real e instalações imersivas até performances, bem como desenhos, pinturas e esculturas.

Num diálogo contínuo entre o físico e o digital, *Quintas* investigou extensivamente o corpo e o comportamento como interfaces, o impacto da sobrecarga de informação e comunicação na saúde mental, e as implicações dos sistemas autónomos de poder e controlo na democracia.

Estas investigações artísticas levaram-no a formular diversas exposições artísticas nas quais os sinais humanos se fundem com a tecnologia, criando um meio onde arte, ciência e filosofia se cruzam para propor relações mais inclusivas, participativas e diversas com a inteligência artificial e a tecnologia, como é exemplo a Figura 9. Um exemplo relevante é a instalação *Displacement*, onde sensores registam a respiração e o movimento do público, traduzindo esses estímulos num ambiente audiovisual que reage de forma dinâmica à presença do corpo, que pode ser visualizada [aqui](#).



Figura 5- Instalação audiovisual "Black Hole" [47]

### 3.4.6. Considerações Finais

As abordagens dos artistas analisados evidenciam que os bio-sinais podem ultrapassar a dimensão meramente funcional e constituir-se como matéria poética. Seja através de uma dimensão mais monumental como *Rafael Lozano-Hemmer*, ou mais minimalista e introspectiva como *Lisa Park*, estas obras aproximam a ciência da arte, propondo novas formas de consciência sobre o próprio corpo.

Na presente dissertação as obras destes artistas servem não só como exemplos da plasticidade conceptual dos bio-sinais, mas também como fonte de inspiração sobre o seu potencial como mediadores de experiências artísticas e educativas. Embora em menor escala e com menos recursos, os princípios destas exposições constituem um ponto de partida importante no que toca à componente estética e artística deste trabalho, promovendo novas formas de explorar o batimento cardíaco enquanto elemento mediador do potencial educativo dos bio-sinais.

## 4. Materiais e métodos

O trabalho experimental desta pesquisa envolveu diversas etapas, de modo a responder às subperguntas elencadas no capítulo 1. Como tal, os materiais e métodos utilizados para atender a estas questões encontram-se fracionados em cinco fases:

1. Escolha dos bio-sinais a ser utilizados.
2. Colheita de bio-sinais
3. Modelação de música através de bio-sinais.
4. Criação de experiências apelativas, através dos progressos feitos no ponto 3.
5. Melhorar a experiência do utilizador.

Deste modo, cada uma destas fases será detalhada, em seguida, nos seus respetivos subcapítulos, abordando os materiais e métodos específicos utilizados em cada etapa da pesquisa.

### 4.1. Escolha dos bio-sinais

Para este estudo, foi necessário escolher os bio-sinais mais adequados à criação da exposição. A escolha dos sinais fisiológicos foi baseada na **precisão** e **praticidade** de aquisição dos dados num ambiente de museu de ciência.

No início desta pesquisa elegeu-se o *ECG* para a modelação musical. No entanto, devido ao local de aplicação dos elétrodos, a sua aplicação pode ser inconveniente e intrusiva, acrescentando dificuldade na instalação e aquisição dos sinais em ambientes como museus. Deste modo, decidiu-se utilizar o sensor *BVP*, que mede a pulsação do volume sanguíneo, através dum sensor colocado no dedo, permitindo uma colheita de dados mais acessível e confortável para os participantes.

### 4.2. Colheita de sinais

A colheita de dados começou com a utilização do sensor *BVP* conectado ao *Hub* de 8 canais *biosignalsplux*. O processo de colheita dos dados começou com a configuração do Kit *biosignalsplux* na aplicação *OpenSignals*. Em seguida, o sensor *BVP* foi ligado ao dedo indicador direito do participante, permitindo o início da aquisição de dados através da aplicação *OpenSignals*. Os sinais foram adquiridos durante 2 minutos e armazenados em arquivos de texto (.txt).

### 4.3. Modelação de música através de bio-sinais

De modo a modelar a música através dos sinais fisiológicos adquiridos, foi elaborado um código em *Python*. Cada etapa do código será descrita nos subcapítulos que se seguem.

#### 4.3.1. Processamento dos sinais adquiridos

Para ser possível a modelação de música através de bio-sinais, foi necessário começar por processar os sinais fisiológicos adquiridos. Assim, código *Python* elaborado começou por ler os arquivos de texto que continham os sinais e através da função *find\_peaks*, foram identificados os picos no sinal de *BVP*, que correspondem aos batimentos cardíacos. Deste modo, foi possível calcular o tempo, em segundos, entre cada batimento cardíaco detetado. A média correspondente a esses tempos foi também calculada e convertida para batimentos por minuto (*BPM*), ao dividir 60 pelo tempo médio, em segundos.

Desta forma, obteve-se uma estimativa do ritmo cardíaco do indivíduo analisado.

### 4.3.2. Processamento dos BPMs da Música

De modo a ser possível a modelação de música através de bio-sinais, também foi necessário fazer o processamento das músicas.

Começou-se por fazer uma seleção de músicas tendo em conta dois fatores: músicas com BPMs entre 60-100 (faixa de BPMs normais a um ser humano saudável em repouso) [31] e as preferências musicais dos adolescentes (com base em inquéritos abordados no capítulo 5.), para melhorar a experiência do usuário.

Com as músicas selecionadas, criou-se uma 'Jukebox', uma lista de tuplos onde cada tuplo contém o nome de uma música e o caminho para o arquivo de áudio correspondente, no formato .wav. Em seguida utilizou-se a função *get\_tempos*, que iterou sobre cada tuplo da 'Jukebox', para calcular os BPMs das diferentes músicas listadas. A função *get\_tempos* recorre à função *music\_tempo* que utiliza a biblioteca *librosa* para calcular os BPMs da música fornecida.

Com os BPMs das músicas calculados, verificou-se se as músicas escolhidas possuíam BPMs entre 60-100. As que não cumpriam este requisito foram retiradas da 'Jukebox'.

### 4.3.3. Ajuste do Tempo da Música

Com os BPMs do sinal adquirido calculados, o próximo passo foi comparar esse valor com os tempos das músicas da 'Jukebox' e encontrar a música cujos BPMs estavam mais próximos dos do sinal adquirido, através da função *closest\_song*.

Em seguida, a música encontrada foi modelada para ser tocada com os BPMs do sinal adquirido, tornando o ritmo cardíaco mais perceptível na música. Para isto foi necessário calcular a velocidade de reprodução necessária para ajustar o BPM da música ao BPM médio do sinal. A velocidade de reprodução da música foi multiplicada pela razão entre os BPMs do sinal e os BPMs da música.

Também foi criado um metrónomo<sup>2</sup> de modo a marcar o ritmo dos BPMs do sinal, tornando a compreensão do ritmo cardíaco na música mais perceptível.

Assim, a música ajustada ao bio-sinal recolhido é reproduzida juntamente com um metrónomo sincronizado com o BPM médio do sinal, proporcionando uma experiência auditiva que reflete fielmente o ritmo cardíaco do participante.

## 4.4. Criação de experiências apelativas

Para que a música modelada por bio-sinais seja utilizada de forma cativante no ensino, é essencial que seja apresentada de uma forma que incentive o público a participar e a aprender. Com isso em vista, e tendo por base o código descrito no capítulo anterior, foram desenvolvidas três experiências distintas: "What Do I Sound Like?", "Our Song" e "Hearts in Sync". Cada uma projetada para tornar a modelação de música através de bio-sinais apelativa ao público jovem.

---

<sup>2</sup> Aparelho que produz um batimento constante de modo a indicar o ritmo musical

#### Nota:

No âmbito da procura por diferentes perspetivas sobre a ligação entre biosinais, música e arte digital, estabeleceu-se contacto com o artista Rudolfo Quintas, com o intuito de explorar a possibilidade de colaboração para o desenvolvimento conjunto de uma experiência no âmbito deste projeto. No entanto, devido a constrangimentos de calendário a colaboração não chegou a concretizar-se.

Ainda assim, este contacto revelou-se relevante, não só por confirmar o interesse e pertinência do tema também no meio artístico, mas também por demonstrar o esforço em articular ciência e arte através de colaborações externas, deixando aberta a possibilidade de futuras parcerias nesta área.

#### 4.4.1. What Do I Sound Like?

A experiência "*What Do I Sound Like?*" permite que o participante descubra *a música que é tocada pelo seu coração*. Esta experiência utiliza na sua totalidade o código descrito na subsecção anterior para calcular a música cujo BPM mais se aproxima do BPM do participante. A música escolhida é ajustada para corresponder exatamente ao ritmo cardíaco do participante e a reprodução ajustada é acompanhada por um metrónomo sincronizado.

A transformação dos dados fisiológicos abstratos numa experiência auditiva personalizada, permite ao participante uma melhor compreensão de conceitos como frequência cardíaca, variabilidade dos batimentos e a maneira como estes podem ser alterados consoante determinados estímulos. Isto serve como um ponto de partida para discussões sobre a importância da saúde cardiovascular, e como fatores como stress, dieta e exercício físico podem influenciar o ritmo cardíaco.

Para explorar estas interações, o participante é incentivado a realizar diversas atividades, como a **alterar a respiração**, de modo a perceber a sua influência na redução ou aumento do ritmo cardíaco. Durante a experiência, é explicado ao participante a importância da respiração na gestão de stress. Também lhe é sugerido que salte repetitivamente durante um minuto, de modo a perceber de que maneira o **exercício físico** consegue alterar o seu ritmo cardíaco e a sua importância na manutenção da saúde cardiovascular. O participante é também incentivado a convidar os colegas a participar e a comparar as diferentes músicas atribuídas a cada um. Isto incita uma introspeção sobre as a influencia das **diferentes fisiologias** nos ritmos cardíacos. Em seguimento disto, é lhes explicado como as diferenças de género e de condição física influenciam os ritmos cardíacos.

#### 4.4.2. Our song

"*Our Song*" é uma experiência que têm como objetivo encontrar *a música tocada pelos corações de duas pessoas*. A ideia é que duas pessoas possam criar juntas uma música, através dos seus sinais fisiológicos. Os participantes ficam com uma recordação memorável da sua conexão orgânica uns com os outros, tornando a fisiologia e a engenharia biomédica temas mais cativantes.

Esta é uma experiência projetada para dois participantes, pelo que, ao invés de um ficheiro de texto apenas, são lidos dois. Assim, nesta experiência são calculados os BPMs dos dois participantes e em seguida é feita a média dos seus batimentos. A função *closest\_song* é utilizada para encontrar a música

que mais se aproxima dessa média. A música encontrada é ajustada para corresponder à média dos BPMs e é reproduzida juntamente com um metrônomo sincronizado com a média dos BPMs.

#### 4.4.3. Hearts in Sync

A experiência "Hearts in Sync" também envolve dois participantes, mas foca-se em demonstrar a sincronização dos seus ritmos cardíacos. Nesta experiência, o grau de sincronização entre os dois participantes é medido, e a música é tocada com uma velocidade proporcional à dessincronização entre os ritmos cardíacos. Quanto mais dessincronizados estiverem, mais distorcida será a música, tornando evidente a falta de sincronia de uma maneira auditiva.

Nesta experiência são lidos dois ficheiros de texto e adquiridos os seus BPMs, e tal como na experiência anterior, é calculada a média dos BPMs dos participantes e encontrada a música com os BPMs mais semelhantes a essa média. No entanto, é também calculada a diferença entre os BPMs dos dois participantes e utilizada como fator multiplicativo da velocidade de reprodução da música. Assim, a música selecionada é ajustada para ser reproduzida com uma velocidade que reflete o grau de dessincronização. A distorção na velocidade da música proporciona um feedback auditivo direto sobre a sincronização dos ritmos cardíacos.

*“Imagine-se duas melodias independentes que são a vida de duas pessoas. Imagine-se que as pessoas caminham pela rua, ambas a trautear a sua própria melodia, e, quando se aproximam, à medida que se aproximam, percebem que as notas que a outra trauteia encaixam no meio das notas da sua própria música, criando uma outra melodia, mais complexa. Nem todas as notas caem no meio umas das outras; nos intervalos, algumas coincidem, mas tocam em harmonia.*

*Digamos que uma trauteia a tônica e outra a quinta, a terceira, ou mesmo uma segunda. Imagine-se o espanto dessas duas pessoas ao perceberem a melodia que nasce do casamento das suas duas músicas, a riqueza que se gera ao cruzarem-se na rue de l'Abreuvoir.”*

*Nem todas as Baleias Voam, Afonso Cruz*

## 5. Validação e resultados

No elaborar das experiências foram utilizados para testes participantes não representativos do público a que este projeto se destina. Assim, de modo a validar o seu funcionamento e apelo, com o público-alvo certo, este projeto foi apresentado aos alunos do ensino secundário durante o evento Expo FCT, demonstrado na Figura 10. A participação no evento permitiu não só apresentar as experiências desenvolvidas, como também recolher feedback valioso para a sua validação e posterior melhoria.



Figura 10- Apresentação do projeto aos alunos do secundário na Expo FCT

### 5.1. Metodologia de Validação

Durante o evento, foi aplicada uma metodologia de validação mista, combinando observação direta da interação dos participantes com as experiências e as suas reações e feedback natural, com a recolha estruturada de feedback através de inquéritos. Para além das experiências elaboradas, também foi apresentada uma experiência de controlo, que consistia na versão das experiências com som sintetizado. O objetivo foi avaliar a preferência do grupo-alvo face à sonificação sintetizada comum nos estudos atuais, em comparação com as experiências musicais personalizadas propostas neste projeto. Este inquérito era anónimo, de resposta individual, e incluía perguntas fechadas (escalas de Likert<sup>3</sup> e escolha múltipla) e abertas, com a seguinte estrutura:

#### 1. Perfil do participante

- Idade
- Género
- Participaste na experiência: (Sozinho / Com amigo(s) / Com namorado(a) / Em grupo)

---

<sup>3</sup> A escala *Likert* ou escala de *Likert* é um tipo de escala de resposta psicométrica usada habitualmente em questionários, e é a escala mais usada em pesquisas de opinião.

## 2. Envolvimento e Interesse

- Como classificas o apelo deste projeto em geral?  
(Escala de 1 a 5: 1 = nada apelativa, 5 = muito apelativa)
- Como classificas o apelo desta experiência?  
(Escala de 1 a 5: 1 = nada apelativa, 5 = muito apelativa)
- Comparativamente com a experiência anterior [com som sintetizado] qual consideraste mais apelativa?  
(Escolha múltipla: Experiência com música conhecida/ Experiência com Som sintetizado/Ambas igualmente apelativas)
- Sentiste que aprendeste algo novo sobre o teu corpo ou fisiologia?  
(Escolha múltipla: Sim / Não)

## 3. Contexto musical

- Que géneros musicais costumavas ouvir?  
(Escolha múltipla + opção “outros”)
- A música usada nas experiências foi semelhante aos teus gostos?  
(Escolha múltipla: Sim / Não / Mais ou menos)
- Consideras o uso de músicas do teu gosto importantes no apelo das experiências?  
(Escolha múltipla: Sim / Não / Mais ou menos)

## 4. Recomendação

- Recomendarias esta experiência a um amigo ou familiar?  
(Escolha múltipla: Sim / Não)

## 5. Sugestões e Melhorias

- Tens alguma sugestão para melhorar a experiência?  
(Resposta aberta)

## 5.2. Resultados dos Inquéritos

### 5.2.1. Resultados dos Inquéritos em geral

No total, **100 estudantes do ensino secundário** participaram nesta demonstração. De acordo com os resultados dos inquéritos, **87% dos participantes** consideraram este projeto "**muito apelativo**" (nível 5), **10% classificaram-na como "apelativo "** (nível 4), e apenas **3%** indicaram-no como “neutro” (nível 3) ou “pouco apelativo” (nível 2), como é destacado no gráfico exemplificado na figura

11. Quanto à aprendizagem, os **95% dos participantes** revelaram ter ficado com **melhores conhecimentos** sobre o efeito da respiração e exercício físico no ritmo cardíaco e níveis de stress. Entre os que mais se envolveram, destaca-se o facto de **75% dos participantes** terem convidado outros amigos para se juntarem às experiências, validando o carácter interessante e apelativo deste projeto.

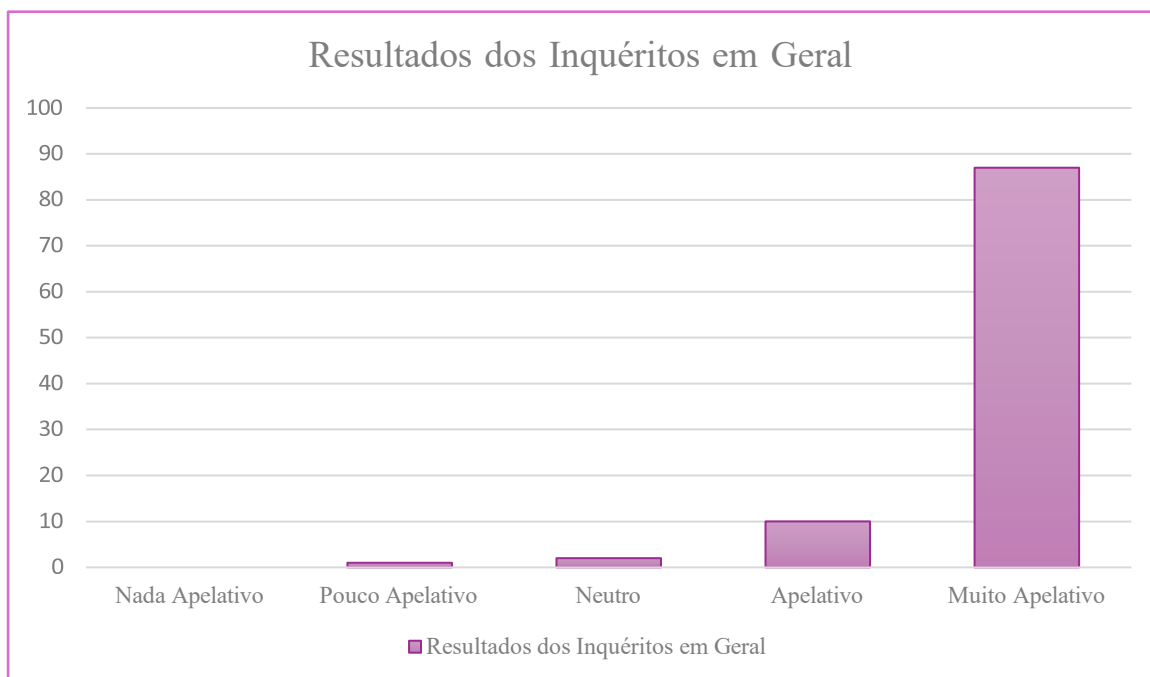


Figura 11- Resultado dos Inquéritos em Geral

## 5.2.2. Resultados dos inquéritos por experiência

### a) What Do I Sound Like?

Esta experiência foi considerada “**muito apelativa**” (nível 5) por **86% dos participantes**, como se pode denotar no gráfico da figura 12. Destes participantes, muitos (especialmente as raparigas mais tímidas) descreveram informalmente a experiência como "fofa" e "personalizada", destacando o seu caráter envolvente.

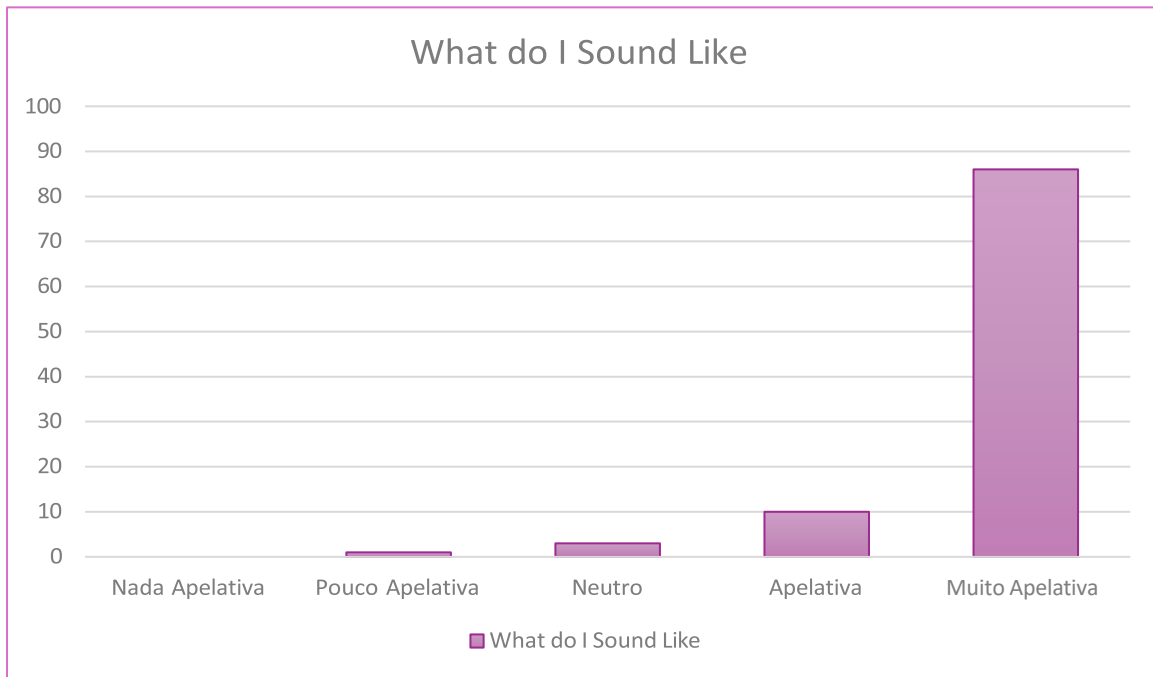


Figura 12- Resultado dos Inquéritos sobre a Experiência "What do I Sound Like"

#### b) Our Song

Esta experiência foi particularmente popular entre os casais, sendo que **100% deles** indicaram que acharam a experiência "**muito apelativa**" (nível 5) ou "**apelativa**" (nível 4). Para além de casais, **93%** dos participantes que participaram com amigos também descreveram a experiência como "**muito apelativa**" (nível 5) ou "**apelativa**" (nível 4), como demonstrado no gráfico da figura 13. Sendo que **80%** de todos os participantes mencionaram que voltariam a experimentar, voltando a destacar informalmente o carácter "fofo" e de "conexão" da experiência.

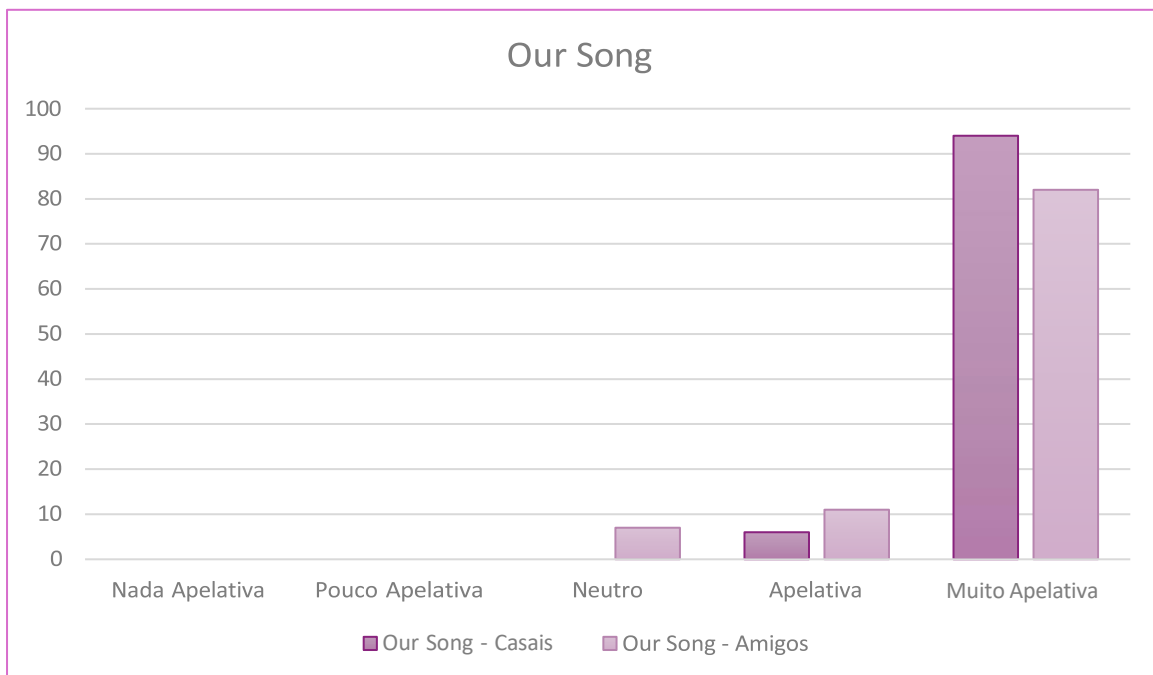


Figura 13- Resultado dos Inquéritos sobre a Experiência "Our Song"

### c) Hearts in Sync

A experiência "Hearts in Sync", foi especialmente apreciada por grupos de amigos mais extrovertidos, tendo **77% dos participantes** considerado a experiência "muito apelativa" (nível 5), ou “**apelativa**” (nível 4), devido à forma como a música se distorcia consoante a dessincronização dos batimentos. Este aspeto foi particularmente destacado pelos participantes mais sociais, que brincaram entre si sobre quem estaria "mais nervoso" ou "apaixonado", conforme o feedback dos seus batimentos cardíacos. O gráfico da figura 14 sustenta esta estatística.

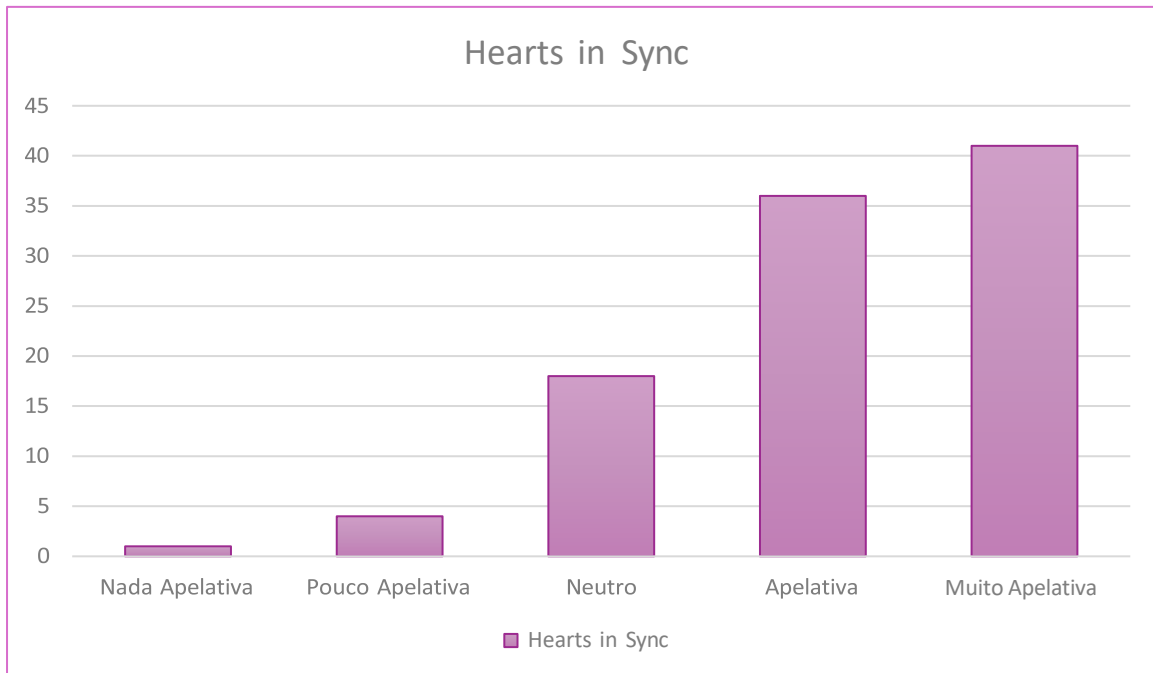


Figura 14- Resultado dos Inquéritos sobre a Experiência “Hearts in Sync”

### 5.2.3. Comparação com som sintetizado

Após a realização das experiências principais com músicas conhecidas, os participantes foram incentivados a ouvir os seus biossinais transformados em som sintetizado. Quando questionados sobre qual das abordagens consideravam mais apelativa, **88%** dos participantes referiu preferir a abordagem com músicas adaptadas aos seus gostos musicais. **5%** referiu que ambas as experiências foram igualmente apelativas e **7%** referiu preferir a versão do som sintetizado. Nas motivações destes 7% estavam uma abordagem mais fiel à ciência musical, uma vez que todos os participantes que demonstraram maior interesse nesta versão tinham formação musical. Já os 88% não referiram ter qualquer proximidade a formação musical durante pelo menos mais de 2 anos e justificaram a sua escolha com base na estética auditiva, facilidade de compreensão e carácter divertido e relacional das experiências, em contraste com a versão menos apelativa auditivamente e mais “abstrata” e técnica.

#### 5.2.4. Análise de Preferências Musicais

Para melhorar ainda mais a experiência, os participantes foram inquiridos sobre as suas preferências musicais. Neste questionário, os participantes referiram ouvir uma variedade de géneros musicais, como hip hop português (Plutónio, Van Zee), indie português (Os Quatro e Meia, Capitão Fausto), pop americano (Olivia Rodrigo, Taylor Swift, Coldplay, Harry Styles), e hip hop americano e inglês (Drake, Kendrick Lamar).

Sendo que **65% dos participantes** referiram que a seleção de músicas escolhida para as experiências se enquadrava nos seus gostos musicais e **100% dos participantes** destacaram a importância da música se enquadrar nos géneros que apreciam, o que confirma a eficácia da abordagem de seleção musical baseada nas preferências identificadas. Deste modo, com base nas respostas recolhidas, foi possível ajustar a lista de músicas utilizadas neste projeto para melhor se adequar aos gostos musicais dos adolescentes, resultando numa maior identificação com a experiência e consequentemente maior engajamento.

#### 5.2.5. Sugestões de Melhorias

Quando questionados sobre possíveis melhorias, **50% dos participantes** fizeram sugestões, tendo apenas dois aspetos sido referidos pelos participantes. **40%** referiu que gostariam de ver mais **elementos visuais**, como gráficos do sinal cardíaco, sendo que as explicações dos seus significados foram mencionadas como úteis para uma melhor compreensão visual dos batimentos cardíacos. Adicionalmente, **10% dos participantes**, que tinham maior interesse em programação, fisiologia e música pediram **explicações mais detalhadas** sobre o funcionamento do código e sobre a ligação entre os biosinais e a música gerada. Estes participantes mostraram-se mais interessados numa abordagem mais científica e menos centrada na estética e na emoção e indicaram que a experiência poderia ser mais apelativa se incluísse elementos mais complexos, como explicações sobre o processo de deteção e conversão dos batimentos em música. No entanto, os outros **90%** referiram que o nível que complexidade foi **adequado**.

#### 5.2.6. Observações qualitativas (não incluídas no inquérito):

Durante o evento, registou-se por observação direta que muitos participantes regressavam para testar novamente as experiências, chamavam amigos ou namorados para experimentarem também eles as experiências e demonstraram entusiasmo tanto verbal como corporal, validando, mais uma vez, o carácter apelativo e interessante deste projeto.

#### 5.2.7. Considerações Finais

Com base nos inquéritos e feedback recolhido, confirmou-se que as experiências desenvolvidas são não só apelativas, como também educacionais, permitindo aos participantes uma melhor compreensão do seu corpo, bem como das potencialidades da Engenharia Biomédica.

As sugestões de melhorias apresentadas foram utilizadas para melhorar este projeto tendo sido posteriormente alargada a lista de músicas usada para melhor representar os gostos musicais dos adolescentes, também foram acrescentados gráficos dos sinais cardíacos para uma melhor compreensão visual do funcionamento do corpo pelos participantes.

## 6. Trabalhos Futuros

Apesar de algumas melhorias terem sido implementadas após a validação com os estudantes, ainda ficaram algumas limitações e oportunidades de investigação por explorar.

Um dos caminhos futuros passa por ampliar a imersividade das experiências, integrando não apenas o som, mas também **componentes visuais**, de modo a criar **exposições mais monumentais** como as de *Rafael Lozano-Hemmer*. Para isto, é fulcral adicionar mais camadas a este projeto, como a implementação do **processamento e sonificação em tempo real**, de modo a existir um feedback mais imediato às alterações fisiológicas dos participantes, potenciando uma melhor consciência sobre o próprio corpo. A utilização de **mais bioassinais** às experiências futuras também é um fator importante a considerar, visto não só adicionar uma maior complexidade e precisão ao feedback recolhido, como também proporcionar novas possibilidades de experiências.

Através disto seria possível criar, por exemplo, uma experiência mais monumental, no âmbito da autorregulação e bem-estar, ao ser produzida uma sala equipada com ecrãs desde o chão até ao teto. Nestes ecrãs seriam projetados vídeos de elementos da natureza, como chuva ou vento nas folhas das árvores, sendo o som ouvido correspondente ao vídeo. As imagens e sons da natureza conferem um ambiente de relaxamento, em que o participante é convidado a explorar caminhos para a autorregulação. Para isto, os participantes modulam o volume sonoro e a velocidade da chuva e do vento, através de sinais como o *ECG*, respiração e *EDA*, que conferem medidas sobre o estado de stress ou relaxamento do corpo.

Outro exemplo de expansão futura, também no âmbito do bem-estar e autoconhecimento, seria a criação de uma aula de meditação, em que os sinais de *EDA* dos participantes fossem adquiridos de modo a modelar o som de fundo da aula. Deste modo os participantes ganham uma melhor consciência sobre os seus estados emocionais, conduzindo a uma experiência meditativa mais profunda, com o objetivo de diminuir o volume do som de fundo o máximo possível e atingir estados de maior tranquilidade.

Outra linha de exploração futura é a criação de exposições num âmbito mais lúdico. Entre as ideias ponderadas para este campo está a criação de uma parede que os participantes podem pintar e desenhar, sendo que os seus sinais musculares, extraídos dos movimentos com o pincel, modelam a música ambiente. Outra possibilidade neste campo seria a criação de jogos musicais em que contrações musculares de determinada intensidade desencadeiam saltos ou movimentos de personagens, com expressividade sonora.

De modo a produzir uma experiência mais completa e utilizar diversos bioassinais ao mesmo tempo, poderia ser criada uma pintura dinâmica contemporânea do corpo do participante enquanto entidade fisiológica, cujas cores, formas e sons se alterariam em função dos seus estados internos.

Para a concretização destas ideias importa destacar a relevância de futuras colaborações interdisciplinares. A execução de muitas destas propostas exige a cooperação entre áreas distintas, como ciência da computação, design sonoro, artes visuais e psicologia. A colaboração com artistas e criadores multimédia permitiria expandir a dimensão estética e experiencial das instalações, tornando a sonificação de bioassinais mais apelativa e acessível ao público. Assim, os próximos passos deverão não só superar limitações técnicas, mas também reforçar a componente estética e imersiva, abordando a lacuna identificada na literatura, onde a sonificação é muitas vezes descrita como demasiado sintetizada.

## 7. Conclusão

A presente investigação partiu de uma questão central: Como a personalização da música baseada em biossinais pode ser usada para ensinar conceitos de fisiologia e melhorar a percepção dos utilizadores sobre o funcionamento do seu próprio corpo? Num contexto educativo marcado pela ascensão tecnológica, pela inteligência artificial capaz de replicar tarefas tradicionalmente ensinadas na escola e pela crescente desmotivação dos alunos, tornou-se evidente a necessidade de criar novas formas de ensino que privilegiem a criatividade, a emoção e a participação ativa dos estudantes.

O *BioSoundScape* surgiu como uma resposta a esta lacuna, ao aliar a ciência, arte e educação na criação de uma ferramenta pedagógica inovadora, que ensina os participantes não só sobre o funcionamento do corpo humano em geral, mas também sobre a sua própria fisiologia, promovendo o autoconhecimento e consequentemente a autorregulação dos participantes.

Neste âmbito, os objetivos definidos para este projeto foram cumpridos. Foi conseguida a utilização de biossinais para modelar músicas (Objetivo 1), permitindo a criação de experiências apelativas que incentivaram a participação e a aprendizagem (Objetivo 2). Foram encontradas técnicas eficazes de comunicação de ciência e de transmissão de conhecimentos educacionais de forma lúdica, através da criação de experiências apelativas, utilização de músicas dentro dos gostos dos participantes e explicações acessíveis. (Objetivo 3). Por fim, confirmou-se que conceitos de fisiologia, como frequência cardíaca, variabilidade dos batimentos, efeitos da respiração e do exercício, podem ser ensinados de forma clara e envolvente a partir destas experiências (Objetivo 4).

Outra dos principais objetivos deste trabalho consistiu em preencher a lacuna identificada no estado da arte, onde muitos estudos privilegiaram a fidelidade científica em detrimento da dimensão estética e engajamento do público. A comparação das experiências desenvolvidas neste projeto com a versão controlo (com som sintetizado), revelou que a maioria dos adolescentes preferiu uma abordagem mais musical e próxima aos seus géneros musicais em detrimento de um som sintetizado, privilegiando a componente estética em falta nos estudos analisados e validando a importância de uma sonificação apelativa para o sucesso pedagógico.

Em síntese, este projeto demonstrou que a personalização da música com base em biossinais não é apenas uma experiência estética, mas um caminho viável para reinventar a forma como se comunica ciência. Num mundo em que a escola compete com estímulos digitais constantes e em que a inteligência artificial reproduz cada vez mais capacidades humanas, iniciativas que unem arte, ciência e tecnologia revelam-se fundamentais para motivar, ensinar e despertar a curiosidade dos mais jovens.

## Bibliografia

- [1] K. Muthami, J. M. Mwanja, and S. K. Cheloti, "Social Media as a Determinant of Students' Dropout Rates in Secondary Schools in Kenya," *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, vol. 4, no. 3, pp. 1–15, May 2023, doi: 10.37745/bjmas.2022.0183.
- [2] S. Moon, S. L. Carpenter, A. K. Hansen, L. Bushong, and J. A. Bianchini, "Examining the effects of undergraduate STEM teacher recruitment and teacher education programs on preservice secondary science and mathematics teacher readiness and teacher performance assessment (edTPA) scores," *Sch Sci Math*, vol. 121, no. 8, pp. 452–465, Dec. 2021, doi: 10.1111/SSM.12498.
- [3] L. H. Barrow, "Elementary science education library resources in graduate and undergraduate teacher education programs of new England," *J Res Sci Teach*, vol. 22, no. 6, pp. 477–483, 1985, doi: 10.1002/TEA.3660220602.
- [4] N. Sadvakassova, Z. Karmanova, V. Bobrova, N. Sadvakassova, Z. Karmanova, and V. Bobrova, "Retracted: Pedagogical Conditions for Managing Stressful States of Preschool Children with Special Educational Needs(Mind, Brain, and Education, (2022))," *Mind, Brain, and Education*, vol. 17, no. 4, p. 405, Nov. 2023, doi: 10.1111/MBE.12345.
- [5] S. L. Carpenter, V. Meier, S. Moon, A. D. Spina, and J. A. Bianchini, "Preservice secondary science and mathematics teachers' readiness to teach multilingual learners: An investigation across four teacher education programs," *Sch Sci Math*, vol. 125, no. 3, pp. 232–246, Jun. 2025, doi: 10.1111/SSM.12690.
- [6] "Most Likely to Succeed: Preparing Our Kids for the Innovation Era - Tony Wagner, Ted Dintersmith - Google Livros." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=WFkjBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&ots=g6NTZSx2Q0&sig=CPE9n2aDJB8nlbA0zN5MZqgH3tU&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=WFkjBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&ots=g6NTZSx2Q0&sig=CPE9n2aDJB8nlbA0zN5MZqgH3tU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [7] D. M. Nurbaeva, A. E. Abylkassymova, Z. M. Nurmukhamedova, and B. Erzhenbek, "Retracted: The Role of Educational Programs in the Development of Secondary Education (on the Example of Training Mathematics Teacher)," *Mind, Brain, and Education*, vol. 17, no. 4, pp. 406–406, Nov. 2023, doi: 10.1111/MBE.12349.
- [8] Z. Mailybayeva *et al.*, "Retracted: Features of the Development of Future Teachers-Psychologists' Ability to a Narrative," *Mind, Brain, and Education*, vol. 17, no. 4, p. 404, Nov. 2023, doi: 10.1111/MBE.12343.
- [9] "Biosignal - an overview | ScienceDirect Topics." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/biosignal>
- [10] "Biosignal - Wikipedia." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Biosignal>
- [11] "Introduction to Biosignals: The Language of the Human Body." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.nexstem.ai/blogs/introduction-to-biosignals-the-language-of-the-human-body>
- [12] "Electrocardiography - Wikipedia." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrocardiography>
- [13] "Conquering the ECG - Cardiology Explained - NCBI Bookshelf." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK2214/>
- [14] "Normal ECG signal with his different features | Download Scientific Diagram." Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Normal-ECG-signal-with-his-different-features\\_fig1\\_299575422](https://www.researchgate.net/figure/Normal-ECG-signal-with-his-different-features_fig1_299575422)

- [15] “biosignal acquisition tool-kit for advanced research applications Electrocardiography (ECG) Sensor User Manual,” 2025. [Online]. Available: <https://www.pluxbiosignals.com>
- [16] “Blood Volume Pulse (BVP) Sensor: A complete tour – Support PLUX Biosignals official.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://support.pluxbiosignals.com/knowledge-base/blood-volume-pulse-bvp-sensor-a-complete-tour/>
- [17] S. Samadi *et al.*, “Modeling Blood Volume Pulse Signal Using Exercise Intensity,” *2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, BHI 2019 - Proceedings*, May 2019, doi: 10.1109/BHI.2019.8834662.
- [18] M. U. Khan, S. Aziz, N. Hirachan, C. Joseph, J. Li, and R. Fernandez-Rojas, “Experimental Exploration of Multilevel Human Pain Assessment Using Blood Volume Pulse (BVP) Signals,” *Sensors* 2023, *Vol. 23, Page 3980*, vol. 23, no. 8, p. 3980, Apr. 2023, doi: 10.3390/S23083980.
- [19] M. Malik *et al.*, “Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use,” *Circulation*, vol. 93, no. 5, pp. 1043–1065, Mar. 1996, doi: 10.1161/01.CIR.93.5.1043.
- [20] D. L. Frank, L. Khorshid, J. F. Kiffer, C. S. Moravec, and M. G. McKee, “Biofeedback in medicine: who, when, why and how?,” *Ment Health Fam Med*, vol. 7, no. 2, p. 85, Jun. 2010, Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2939454/>
- [21] O. M. Giggins, U. M. C. Persson, and B. Caulfield, “Biofeedback in rehabilitation,” *J Neuroeng Rehabil*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, Jun. 2013, doi: 10.1186/1743-0003-10-60/FIGURES/1.
- [22] K. Tahiroğlu, H. Drayson, and C. Erkut, “AN INTERACTIVE BIO-MUSIC IMPROVISATION SYSTEM.” [Online]. Available: <http://www.mindmedia.nl/english/biotrace.php>
- [23] “Sonification - Wikipedia.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sonification>
- [24] “Data Sonification for Beginners | Music Library Emerging Technologies and Services.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://mlaetsc.hcommons.org/2023/01/18/data-sonification-for-beginners/>
- [25] C. Flego, “REsound the UNseen,” BCS Learning & Development, Aug. 2019. doi: 10.14236/ewic/resound19.31.
- [26] M. Weber and M. Kuhn, “Kontraktion: Sonification of metagestures with electromyographic signals,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Oct. 2016, pp. 132–138. doi: 10.1145/2986416.2986421.
- [27] W. E. J. Knight and N. S. Rickard, “Relaxing Music Prevents Stress-Induced Increases in Subjective Anxiety, Systolic Blood Pressure, and Heart Rate in Healthy Males and Females,” *J Music Ther*, vol. 38, no. 4, pp. 254–272, Dec. 2001, doi: 10.1093/JMT/38.4.254.
- [28] A. Linnemann, B. Ditzen, J. Strahler, J. M. Doerr, and U. M. Nater, “Music listening as a means of stress reduction in daily life,” *Psychoneuroendocrinology*, vol. 60, pp. 82–90, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.PSYNEUEN.2015.06.008.
- [29] M. V. Thoma, R. La Marca, R. Brönnimann, L. Finkel, U. Ehlert, and U. M. Nater, “The Effect of Music on the Human Stress Response,” *PLoS One*, vol. 8, no. 8, p. e70156, Aug. 2013, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0070156.
- [30] I. Bergstrom, S. Seinfeld, J. Arroyo-Palacios, M. Slater, and M. V. Sanchez-Vives, “Using music as a signal for biofeedback,” *International Journal of Psychophysiology*, vol. 93, no. 1, pp. 140–149, 2014, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2013.04.013.

- [31] B. Arslan *et al.*, “From biological signals to music.” [Online]. Available: <https://hal.science/hal-00524797v1>
- [32] M. Ortiz, N. Coghlan, J. Jaimovich, and B. Knapp, “Biosignal-driven Art: Beyond biofeedback.” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:NSdiagram.png>
- [33] A. Tanaka, F. Visi, B. Di Donato, M. Klang, and M. Zbyszyński, “An End-to-End Musical Instrument System That Translates Electromyogram Biosignals to Synthesized Sound,” *Computer Music Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 64–84, Jun. 2023, doi: 10.1162/comj\_a\_00672.
- [34] A. Brouse *et al.*, “An instrument of sound and visual creation driven by biological signals.” [Online]. Available: [www.interface.net](http://www.interface.net).
- [35] J. N. Kather, T. Hermann, Y. Bukschat, T. Kramer, L. R. Schad, and F. G. Zöllner, “Polyphonic sonification of electrocardiography signals for diagnosis of cardiac pathologies,” *Sci Rep*, vol. 7, Mar. 2017, doi: 10.1038/srep44549.
- [36] L. Kessous, C. Jacquemin, and J.-J. Filatriau, “REAL-TIME SONIFICATION OF PHYSIOLOGICAL DATA IN AN ARTISTIC PERFORMANCE CONTEXT.” [Online]. Available: <http://cnmat.berkeley.edu/downloads>
- [37] G. Lopez, “InSPIRe @ Redlands Unheard Sounds: A Manual for the Sonification of Emotional States in an Artistic Space Recommended Citation.” [Online]. Available: [https://inspire.redlands.edu/cas\\_honors](https://inspire.redlands.edu/cas_honors)
- [38] “Atelier Lozano-Hemmer.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.lozano-hemmer.com/>
- [39] “On the occasion of Art Basel in Miami Beach 2022 Superblue and BMW i present Rafael Lozano-Hemmer: ‘Pulse Topology’. 3,000 lightbulbs to create an immersive chorus of heartbeats.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.press.bmwgroup.com/portugal/article/detail/T0405062PT/on-the-occasion-of-art-basel-in-miami-beach-2022-superblue-and-bmw-i-present-rafael-lozano-hemmer:-%E2%80%9Cpulse-topology%E2%80%9D-3-000-lightbulbs-to-create-an-immersive-chorus-of-heartbeats?language=pt>
- [40] “Xth Sense – Marco Donnarumma.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://marcodonnarumma.com/works/xth-sense/>
- [41] “Thursday 17th of October, Marco Donnarumma presents Xth Sense - Music Hackspace.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://musichackspace.org/thursday-17th-of-october-marco-donnarumma-presents-xth-sense/>
- [42] “Eunoia — Lisa Park.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.thelisapark.com/work/eunoia>
- [43] “Lisa Park’s Eunoia II | Artist Manipulates 48 Pools of Water with Her Mind | Vice’s The Creators Project : r/interestingasfuck.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: [https://www.reddit.com/r/interestingasfuck/comments/2n1319/lisa\\_parks\\_eunoia\\_ii\\_artist\\_manipulates\\_48\\_pools/](https://www.reddit.com/r/interestingasfuck/comments/2n1319/lisa_parks_eunoia_ii_artist_manipulates_48_pools/)
- [44] “Prof Atau Tanaka | Goldsmiths, University of London.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.gold.ac.uk/computing/people/tanaka-atau/>
- [45] “Atau Tanaka | Spotify.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://open.spotify.com/intl-pt/artist/1f6dDEEDFRHUmPqnEY0yHU>
- [46] “Studio Rudolfo Quintas.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.rudolfoquintas.com/>
- [47] “CAAА mergulha no desconhecido com experiência imersiva de Rudolfo Quintas.” Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.fpguimaraes.pt/caaa-mergulha-no-desconhecido-com-experiencia-imersiva-de-rudolfo-quintas/>