

**Trabalho de Diplomação em Engenharia Física I**  
**Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS**

**Desenvolvimento de instrumentos musicais  
sinestésicos e sua aplicação para análise de dados**

Projeto de Desenvolvimento

Esse projeto foi desenvolvido baseado nas recomendações da ABNT NBR16502, "Gestão da Pesquisa, do Desenvolvimento e da Inovação (PDI) — Diretrizes Para Elaboração de Projetos de PDI"

**Jan Luc Santos Tavares**  
**Orientador: Prof. Dr. Rafael Pezzi**

# Índice

---

- Motivação
  - Instrumentos Musicais Sinestésicos
  - Análise de dados
  - Acessibilidade e Arte
- Objetivos
  - Objetivo Geral
  - Objetivos específicos
  - Perspectivas futuras
- Estado da Arte
- Metodologia
  - Propostas para a reproducao do som
- Cronograma
- Referências

---

## Motivação

A apresentação de dados científicos utiliza por padrão representações visuais de grandezas físicas na forma de valores numéricos e gráficos. Este projeto visa explorar um novo canal cognitivo, a audição. Como sinestesia é um fenômeno no qual o estímulo a um sentido leva a experiências sensoriais em sentidos diferentes, tais como a sentir o gosto com o olfato ou a visão com o tato, por exemplo [1], definimos aqui os

**Instrumentos Musicais Sinestésicos (IMS):** como ferramentas capazes de representar grandezas físicas diversas em formas sonoras.

Os IMS irão explorar uma nova via cognitiva para percepção e interpretação de dados ambientais: a audição. Esses instrumentos se tornarão uma nova ferramenta para *data science*, ao mesmo tempo em que auxiliam no acesso de deficientes visuais à informação e promovem também uma mescla entre ciência e arte.

## Análise de dados

Atualmente no mundo científico e tecnológico existe o desafio de trabalhar com dados de grande complexidade e quantidade, de forma que é necessário explorar novas formas para interpretação desses dados. Os instrumentos musicais sinestésicos podem ser uma nova dimensão para curadoria e análise de dados pois sua proposta é fazer com que dados (que somos capazes de sentir, ver ou cheirar) obtidos por sensores sejam ouvidos. Essa abordagem tem potencial para permitir, inclusive, a audição de parâmetros que não podemos sentir como dados sobre radiação ultravioleta ou mesmo variações no preço do ouro, por exemplo.

Os IMS complementarão os métodos tradicionais de representação de dados e poderão trazer consciência ambiental a um novo sentido.

## **Acessibilidade e Arte**

Os IMS também proporcionarão novas vias cognitivas para percepção e interpretação de dados às pessoas com deficiências visuais, aumentando sua participação em iniciativas de ciência cidadã e de dados. Pois dessa forma, as pessoas com deficiências visuais poderão utilizar a audição para interpretar os dados e mesmo pessoas capazes de visualizar dados poderão explorar de formas lúdicas e inovadoras esses dados. Além das perspectivas em data science e acessibilidade, os IMS enriquecerão o conjunto de ferramentas disponíveis para a expressão artística.

Quem se beneficiará do projeto:

- Pessoas com deficiência visual que poderão acessar informações antes inacessíveis,
- Cientistas de dados que explorarão novas vias cognitivas para percepção e interpretação,
- Artistas que explorarão novas formas de usar dados para arte.

---

## Objetivos

### Objetivo Geral

O projeto tem como objetivo a obtenção de um protótipo de software capaz de demonstrar o potencial da aplicação de instrumentos musicais sinestésicos e iniciar a exploração da sua capacidade para a análise de dados científicos.

### Objetivos específicos

Deseja-se realizar essa prototipação dos IMS através da execução de amostras de sons e variar seus parâmetros (tais como amplitude e frequência) a partir de dados ambientais (referentes a temperatura, luminosidade, umidade relativa do ar e pressão) de forma que seja possível comparar através da audição os parâmetros coletados em períodos e locais com características diferentes.

Para realizar a experimentação da sonificação através de amostras de som precisamos ter acesso a um banco de dados contendo essas amostras (que podemos chamar de “banco de áudios”). Por isso, o desenvolvimento de um banco de dados de amostras de som apresenta-se como um objetivo intermediário.

Deveremos realizar uma busca e coleta de dados publicamente acessíveis, como, por exemplo, as estações meteorológicas do INMET [2]. A variação dos valores dos dados obtidos por estações meteorológicas deverá implicar em variação perceptível na execução dos sons. Todos esses dados mencionados variam no tempo, ou seja, podem ser representados como uma função dependente do tempo. Por esse motivo, faremos uma análise que relaciona os parâmetros através da variação linear no eixo das abcissas (que terão a mesma dimensão, de tempo) pois o som deve ser executado e esse, obrigatoriamente, será uma função do tempo (poderíamos realizar essa análise correlacionando o tempo do som com qualquer dimensão das abcissas da mesma maneira, mas manteremos as observações a seguir com essa perspectiva em mente). Ou seja, daqui em diante falaremos de dados assumindo que são valores que variam no tempo, isso ficará mais claro no detalhamento da metodologia.

Em suma:

\* *Software no qual se insere um arquivo contendo dados e seleciona-se uma das abordagens de sonificação. Esse software deve ser capaz de ilustrar o potencial dos IMS, portanto deverá apresentar diversas abordagens.*

\* *Documentação esclarecedora a respeito dos termos e conceitos envolvidos no processo de sonificação, de forma que seja realmente possível compreender o seu mecanismo e o software se torne usável de forma consciente, além de expansível a outras abordagens.*

## **Perspectivas Futuras**

Depois de desenvolvidos os primeiros protótipos e modelos básicos dos Instrumentos Musicais Sinestésicos, os objetivos *posteriores* (fora do escopo da execução do trabalho de diplomação) são desenvolver a execução de dados em tempo real, além dos históricos, de medidas meteorológicas. Uma dessas aplicações desenvolve a ideia de paisagens sonoras, os *soundscales*, o componente do ambiente acústico que pode ser percebido auditivamente pelo ser humano [3]. Com essa proposta, dados georreferenciados poderão alimentar os IMS permitindo uma experiência de soundscape transensorial, resultando em um conceito secundário chamado Soundscales Sinestésicos. Configurações adequadas nos permitirão experimentar os Soundscales Sinestésicos e obter informação sobre o ambiente sem estar no local, visualizar gráficos ou ouvir palavras sobre o local.

Entre as possibilidades futuras também estão estações meteorológicas que executam a condição atual das medidas em tempo real e a expressão artística usando dados históricos de qualquer natureza, dados em tempo real ou instrumentos musicais padrão.

Para embasar a nossa exploração na área de acessibilidade, buscaremos nos aprofundar nas demandas, interesses e necessidades de pessoas com deficiências visuais. Obteremos essas informações entrando em contato com artigos, pesquisadores e referências locais, mas um fator muito importante é entrar em contato direto com pessoas com deficiência visual, realizaremos essa tarefa buscando entidades como a Associação de Cegos do Rio Grande do Sul - ACERGS (<https://acergs.org.br/>) e a Secretaria Municipal de Acessibilidade e Inclusão Social – SMACIS ([http://www2.portoalegre.rs.gov.br/smacis/default.php?p\\_secao=25](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/smacis/default.php?p_secao=25)).

---

## Estado da Arte

Por abordar um tema que abrange física, *data science* e engenharia de áudio até música e psicologia, a abordagem que os Instrumentos Musicais Sinestésicos evocam nas diferentes áreas são muito diferentes, repletas de jargões específicos de cada disciplina essas abordagens tornam a compreensão desse tema, que é naturalmente interdisciplinar, bastante difícil. Felizmente existem grupos como a International Community for Auditory Display (ICAD, que em tradução simples significa comunidade internacional para representação auditiva) que celebra anualmente a International Conference for Auditory Display e reúne pesquisadores de diversas áreas para discutirem a a representação auditiva [4]. Numa tentativa de alicerçar a discussão sobre esse tópico, foi criado o “*The Sonification Handbook*”, um amplo material introdutório disponibilizado abertamente para reprodução e download:

“We decided to publish this book as an OpenAccess book because auditory display is still a small but growing community, and the easy access and sharing of information and ideas is of high importance. Free availability of publication and material lowers the barrier to enter the field and also matches the spirit of the ICAD community.” [5]

O *handbook* define e indica trabalhos realizados sobre diversos termos, incluindo exemplos de áudio.

Entre eles:

**Sonificação** (cap. 1): o termo mais amplo, foi definido como a técnica de desenvolver sons como resposta a dados e interações. Existem vários métodos para realizar isso, e vários deles são discutidos mais a fundo no *handbook*.

**Audificação** (cap. 12): tradução direta dos dados em forma de onda para som. Ou seja, tomam-se os dados unidimensionais ou bidimensionais (que comumente seriam representados em um gráfico cartesiano) e atribuem-se a esses dados variações em pressão do ar. De forma que os dados se tornem diretamente audíveis.

**Ícones auditivos** (cap. 13): Os equivalentes aos ícones utilizados nos computadores, são sons que remetem diretamente ao que eles tratam, como um latido de cachorro remetendo a cachorro.

**Earcons auditivos** (cap. 14): Mensagens sintéticas abstratas que podem ser utilizadas em combinações estruturadas para criar mensagens auditivas.

Enquanto existe uma comunidade organizando e pautando diversos assuntos da representação auditiva de dados, existem exemplos mais operacionais, o exemplo a seguir trata de uma empresa que chegou, inclusive, a produzir sons a partir de dados meteorológicos.

A Mesoscale Environmental Simulations and Operations (MESO - <http://www.meso.com/>) é uma empresa que trabalha no desenvolvimento e aplicação de modelos geofísicos e meteorológicos para pesquisa e aplicações em tempo-real. A MESO trabalha com o *Mesoscale Atmospheric Simulation System* (MASS, sistema de simulação atmosférica de mesoescala), que cria simulações detalhadas do tempo baseada no terreno, condições iniciais e outros fatores. Portanto, a empresa se vale de uma gama de ferramentas de visualização para interpretar os dados. Por esse motivo, a equipe da empresa decidiu investir em formas alternativas de interpretação de dados, e em abril de 2003 concluíram a primeira série de sonificações de tempestades e furacões num projeto chamado *Atmospherics/Weather Works*. O projeto tinha três objetivos principais: a criação de um software para a sonificação baseada em dados meteorológicos, a apresentação de performances ao vivo e gravadas e a criação de um website para apresentação das obras [6]. Esse projeto foi considerado muito adequado a sonificação por retratar mudanças complexas que ocorrem com o tempo, de acordo com as recomendações indicadas no *Sonification Report*, desenvolvido pela ICAD em 1997. [7]

Já é possível citar alguns projetos com considerável semelhança ao *Atmospherics/Weather Works* e aos Instrumentos Musicais Sinestésicos como o estudo de caso em sonificação espacializada usando dados meteorológicos realizado em parceria entre o *Bregman Electronic Music Studio* do Dartmouth College e o laboratório de acústica da Universidade de Helsinque [8] e o *WeatherPlayer* na Universidade de Brighton que registrava dados ambientais do campus e realizava o streaming em tempo real via internet [9].

Com o presente trabalho exploraremos as possibilidades de interpretação de dados climáticos utilizando dados medidos ao invés de simulações. Com uma abordagem de desenvolvimento aberta e livre, incentivaremos o estudo e acesso às técnicas de sonificação e buscaremos conectar essas atividades com o estímulo à conscientização ambiental e desenvolvimento de ciência cidadã e inclusiva.

---

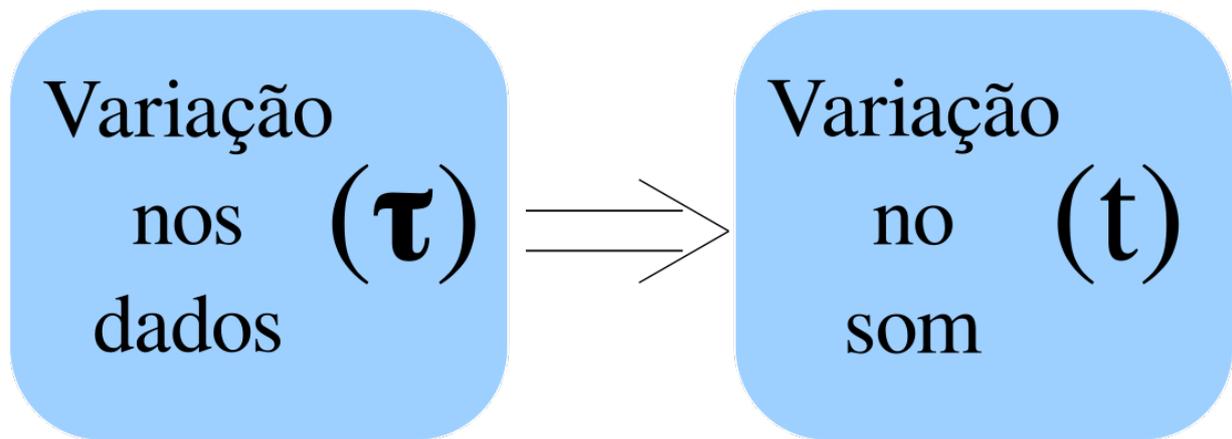
## Metodologia

Para a elaboração dos IMS será realizado o desenvolvimento de software em linguagem de programação Python, podendo ser complementado pelo software "Pure Data" [10]. A seleção de possíveis amostras de áudio para execução terá um certo senso estético e será desenvolvida através da criação e obtenção de amostras de áudio que permitam a cópia e distribuição das mesmas (áudio em domínio público ou que adota licenças permissivas).

Quando obtidas amostras de áudio e iniciado o desenvolvimento do banco de áudios poderemos variar alguns parâmetros do áudio (como frequência, amplitude, etc.). Faremos essa variação no áudio utilizando os dados ambientais para determinar essa variação. Ou seja, queremos que as alterações nos dados provoque alterações no som. Cada uma dessas formas de variar o áudio será uma técnica de sonificação diferente, que podemos chamar de **tradução**. Proporemos algumas formas de tradução e as compararemos. Como parte da metodologia, a documentação do projeto será realizada em repositório online e será atribuído ao código e à documentação licenças permissivas, tais como GPL e Creative Commons, de forma a permitir e incentivar a adoção e prosseguimento do trabalho desenvolvido.

### **Propostas para reprodução dos sons (variações provocadas nas amostras de áudio)**

Podemos realizar a execução de sons a partir dos dados de diversas formas, e é essa exploração a essência do trabalho. Por esse motivo, não existe uma resposta definitiva à pergunta "qual a melhor maneira de selecionar o parâmetro para execução do som a partir dos dados?" nem para a pergunta "qual o parâmetro do som a ser variado?". Obviamente, essas perguntas não possuem respostas, pois elas não tem respostas nem para suas análogas da **visualização** de dados, que é bem mais consolidada. Indicaremos a seguir algumas propostas de transformações que poderão ser realizadas com os dados. Nessas abordagens definimos um período de tempo que vamos analisar desses dados (período em " $\tau$ ") e relacionamos, então, com um período tempo de execução do som (período em " $t$ "). Chamaremos esses tempos de " $\tau$ " e " $t$ " (respectivamente o tempo do dado e o tempo do som):



De forma que " $\tau = \alpha t$ ", basta variar  $\alpha$  que teremos um período de execução do som diferente. A primeira proposta de **tradução** dos dados é a **audificação** (vide “Estado da Arte”). Para as demais sonificações consideraremos que os dados são uma função  $F(\tau)$  e que usaremos uma amostra de som, que chamaremos de  $S(t)$ , essa amostra poderia ser desde um som de uma só frequência constante até uma orquestra executando um concerto, por exemplo.

### Variação da amostra usando os extremos dos dados

**Variação da amplitude do som,  $A(t)$ :** A abordagem mais simples, na qual tomamos uma amostra de som qualquer e variamos sua amplitude de acordo com o máximo e mínimo, de forma que o dado de maior valor seja representado pela amplitude máxima do som e o dado de menor valor representado pelo silêncio ou por uma amplitude mínima qualquer. O som executado será o produto da amostra pela amplitude.

$$A(t) = \frac{F(\alpha t) - \min[F]}{\max[F] - \min[F]}$$

**Variação da frequência do som:** Ao executar a amostra do som teremos a informação da frequência do som sendo executado (ou da decomposição da frequência, que discutiremos mais adiante), dessa forma podemos executar esse som com uma frequência mais alta ou mais baixa. Obtemos uma relação linear ao adotarmos uma frequência mínima e uma máxima e utilizarmos uma equação bem semelhante a da variação em amplitude:

$$\text{freq}(t) = f_{\min} + f_{\max} \left( \frac{F(\alpha t) - \min[F]}{\max[F] - \min[F]} \right)$$

**Varição do andamento:** Para variação do andamento do áudio (agora falamos em andamento, o *tempo* da música, o *passo*) podemos definir um *loop* de áudio,  $L(t)$ , que fica sendo executado de forma a compor  $S(t)$ . Consideremos que  $T$  (maiúsculo) seja o tempo total do loop, então  $L(t) = \text{amostra}$ , caso  $0 < t < T$  e  $L(t) = 0$  para os demais casos. Dessa forma

$$S(t) = L(t) + L(t - T) + \dots + L(t - NT)$$

(essencialmente um *loop* que começa atrás do outro). Dizemos, então, que  $S(t) = S(k)$ , daí basta utilizar uma equação idêntica a da variação da frequência:

$$k = t + t \left( \frac{F(\alpha t) - \min[F]}{\max[F] - \min[F]} \right)$$

### Varição da amostra usando a média dos dados

Podemos realizar as transformações propostas também através da média e do desvio padrão. Iniciamos calculando a média e estabelecendo um valor **base** para a amplitude, a frequência ou o andamento (dependendo de qual parâmetro variaremos). Esse valor base para os parâmetros será atingido quando o dado coincidir com a média. Estabelecemos, então, uma variação definida desse parâmetro (por exemplo: 10% da amplitude, 100Hz na frequência, 50 BPM no andamento). Essa variação, VAR, será atingida quando o dado estiver um desvio padrão distante da média. Ou seja:

$$\text{Base} + \text{VAR} \left( \frac{F(\alpha t) - \overline{F(t)}}{S} \right)$$

$\overline{F(t)}$ : Média dos valores de  $F(t)$

$S$ : Desvio padrão

Além da simples **audificação** (vide “Estado da Arte”), essas propostas de variação de parâmetros servem como base para estudos iniciais dos Instrumentos Musicais Sinestésicos, futuramente podemos incluir diversos outros parâmetros comumente utilizados no processamento de áudio, tais como phaser, compressão, reverberação, etc. Esses parâmetros podem tornar a adaptação do som mais interessante, mas servirão para uma adaptação futura do trabalho.

Para trabalhar de forma adequada com as amostras de áudio e alterar ou manter certas propriedades da amostra (como, por exemplo, alterar o andamento sem alterar as frequências ou o inverso), é necessário um processamento que vale-se da análise de Fourier, ferramenta que estará presente em diversos momentos do desenvolvimento do projeto.

## Cronograma

Tarefa	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
Revisão de literatura e estudo de caso de outros software, para listar e selecionar métodos e técnicas de sonificação.	X				
Criação de banco de áudios	X				
Implementação experimental de técnicas de sonificação.		X	X		
Exposição de gravações desenvolvidas e coleta de <i>feedback</i> sobre capacidade de interpretação dos dados e sensações subjetivas provocadas.			X		
Finalização do software com foco na clareza do funcionamento e na <i>user experience</i> .				X	X
Produção de registro sobre os métodos e técnicas adotados (explicações, tutoriais, imagens, em páginas da web).	X		X	X	X

---

## Referências

1. Kenneth S. Suslick; “Synesthesia in Science and Technology: More than Making the Unseen Visible” - Disponível em:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3606019/>. Julho de 2017.
- 2."Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática", disponível em:  
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>.  
Acesso em maio de 2017.
3. Bryan C. Pijanowski, Luis J. Villanueva-Rivera, Sarah L. Dumyahn, Almo Farina, Bernie L. Krause, Brian M. Napoletano, Stuart H. Gage, Nadia Pieretti; “Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape”. *BioScience* 2011; 61 (3): 203-216.  
doi: 10.1525/bio.2011.61.3.6
4. International Community for Auditory Display – Disponível em:  
<http://www.icad.org/index.html>. Julho de 2017.
5. Thomas Hermann, Andy Hunt, John G. Neuhoff (Eds.); “The Sonification Handbook”. Logos Verlag, Berlin, Alemanha, 2011.
6. Andrea Polli; “Atmospherics/Weather Works : A Spatialized Meteorological Data Sonification Project”. Leonardo, Volume 38, Number 1, February 2005, pp. 31-36.  
Disponível em: <http://muse.jhu.edu/article/178421/pdf> Julho de 2017.
7. Gregory Kramer, Bruce Walker, Terri Bonebright, Perry Cook, John H. Flowers, Nadine Miner, John Neuhoff; “Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda”. Faculty Publications, Department of Psychology. 444. Disponível em:  
<http://digitalcommons.unl.edu/psychfacpub/444/> ou  
<http://www.icad.org/websiteV2.0/References/nsf.html>. Julho de 2017.
8. Edward Childs, Ville Pulkki; “Using Multi-Channel Spatialization in Sonification: A Case Study With Meteorological Data”. Proceedings of the 2003 International Conference on Auditory Display, Boston, United States, July, 2003. Disponível em:  
<http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2003/paper/47%20Childs.pdf>.  
Julho 2017.

9. Owain Rich, “WeatherPlayer” Originalmente em <http://www.weatherplayer.com/>, página indisponível. Acessível em: <http://web.archive.org/web/20040615053220/http://www.weatherplayer.com:80/pages/how/about.html>

10. Página oficial do Pure Data: <https://puredata.info/> acesso em maio de 2017.