

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA – ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA FÍSICA

PROTOTIPAÇÃO DOS INSTRUMENTOS
MUSICAIS SINESTÉSICOS E SUA APLICAÇÃO
PARA ANÁLISE DE DADOS

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA II
JAN LUC SANTOS TAVARES

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Glória, e meu pai, Milton, bem como a meus irmãos por me incutirem o amor ao saber e às pessoas. Agradeço à Bianca Lazzaretti, que fez o que pôde durante seu estudo igualmente intenso para tornar o meu processo mais agradável e pelo apoio emocional, que ainda estamos aprendendo a dar um ao outro.

Agradeço ao Prof. Rafael Pezzi, quem, no seu papel de professor da universidade, me orienta academicamente há anos e quem, apresentando-se com o papel de quem tem a ensinar, já me contribuiu com conhecimentos desde fotografia, música e administração de sistemas Linux até “enrolamento adequado de fios”. Que bom que há algo de física por trás disso tudo pra que tenhamos justificativa.

Agradeço ao Prof. Marco Idiart que, além de compor a minha banca do TDEF I, ensinou-me com excelência os fundamentos de programação e identificou-me, naquele momento, como “proto-hacker”. Agradeço ao Prof. Leonardo Brunnet por compor minha banca do TDEF I e dar estímulo tão grande às ideias diferentes. Agradeço ao Prof. Cristiano Krug que participou no cumprimento de todos os procedimentos e que sempre aparece magicamente nos momentos mais oportunos, uma pessoa que parece enxergar de forma semelhante a minha e, por estar olhando há mais tempo, expressa sugestões que eu concordo e acato alegremente.

Ao João, principalmente por me recomendar a interface Spyder e por trocar figurinhas de Python comigo. A Marina, que caminhou muito próximo de mim nesses passos finais da graduação. Ao Leonardo, que foi a única pessoa literalmente ao meu lado durante a apresentação do TDEF I.

Gostaria de agradecer também a todas as pessoas próximas durante a graduação, mas aqui torna-se um espaço impróprio porque a quantidade e o sentimento comportam-se somente no coração, vocês também ajudaram-me a chegar até aqui. Detive-me, comentando somente sobre o presente trabalho.

Correspondances¹

La Nature est un temple où de vivants piliers
Laisent parfois sortir de confuses paroles;
L'homme y passe à travers des forêts de symboles
Qui l'observent avec des regards familiers.

Comme de longs échos qui de loin se confondent
Dans une ténébreuse et profonde unité,
Vaste comme la nuit et comme la clarté,
Les parfums, les couleurs et les sons se répondent.

Il est des parfums frais comme des chairs d'enfants,
Doux comme les hautbois, verts comme les prairies,
— Et d'autres, corrompus, riches et triomphants,

Ayant l'expansion des choses infinies,
Comme l'ambre, le musc, le benjoin et l'encens,
Qui chantent les transports de l'esprit et des sens.

— **Charles Baudelaire**

¹ *Correspondances* é um poema do livro *Les Fleurs du Mal*, obra em domínio público disponível para download no projeto Gutenberg <http://www.gutenberg.org/ebooks/author/1947>

Visualize também na página do projeto sobre o livro: <https://fleursdumal.org/poem/103>

RESUMO

Fundamentando-se no crescimento sem precedentes da obtenção e armazenamento de dados, enxerga-se a importância da *data science*, que tem no dia-a-dia cada vez mais desafios. Apresentam-se como possível ferramenta para o *data scientist* os Instrumentos Musicais Sinestésicos (IMS). Baseado no conceito de sinestesia, no qual um estímulo sensorial desencadeia alguma experiência sensorial não relacionada, os IMS pretendem transformar dados ambientais que são comumente sentidos como temperatura, umidade e pressão, em som. Dessa forma, esses dados ambientais podem ser interpretados em uma nova dimensão sensorial que não a visão, realiza-se um tipo de sinestesia sintética.

O trabalho apresenta um projeto que tem como objetivo a obtenção de um protótipo de software que seja a prova de conceito dos Instrumentos Musicais Sinestésicos. Deseja-se realizar essa prototipação dos IMS através da obtenção de sons 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. A produção de som a partir de alguma informação chamamos de “sonificação”.

Enxergando os desafios de um trabalho que envolve-se com diversas áreas do conhecimento, tenta-se estabelecer uma linguagem comum para que se tenha um entendimento na comunicação entre as áreas como acústica, psicofísica, estatística e computação. Além disso, para promover o envolvimento entre a academia e a sociedade bem como uma (lenta) interação e dissolução das diversas “facções científicas”, a metodologia fundamenta-se nas práticas da Ciência Aberta, com o software sendo livre e desenvolvido com a licença GPLv3, com a criação de um caderno de laboratório aberto e com a utilização de dados publicamente disponíveis.

O software foi aplicado para a realização da sonificação de dados meteorológicos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET. Também foram desenvolvidos algoritmos de ajuste dos dados para melhor representação sonora. Estes algoritmos realizam a média horária anual e realizam as médias com ajuste a partir dos horários de nascer e pôr do sol. Obtiveram-se sonificações de diversos dias, bem como as médias anuais e médias com ajuste para duas estações meteorológicas da Amazônia, duas da Caatinga e três cidades subtropicais. Como esperado, os dados mostraram-se periódicos com período de aproximadamente um dia.

A partir do trabalho realizado poderá ser realizada a implementação de sintetizador para executar as sonificações, poderão ser implementadas outras técnicas de sonificação, pode-se implementar a união do software de sonificação com projetos de ciência cidadã sonificando dados ambientais e podem-se realizar instalações artísticas com sonificações a partir de dados.

ABSTRACT

Based on the unprecedented growth on data gathering and storage, we see an increasing relevance of data science, an area of knowledge that engages us in an ever challenging routine. We present as a possible new tool to the data scientist the Synesthetic Musical Instruments (SMI). Based on the concept of synesthesia, on which a sensory stimulus provokes an unrelated sensory experience, the SMI intend to transform environmental data that we usually feel like temperature, humidity, and pressure, in sound. Thus, the environmental data can be interpreted in a new sensory dimension which is not vision, creating a form of synthetic synesthesia.

The present work introduces a project that intends to prototype a software to be a proof of concept of the Synesthetic Musical Instruments. We will do so by obtaining sound out of environmental data (like temperature, luminosity, humidity and pressure) in such a way that it's possible to compare data collected in different times or locations by hearing the sound. Creation of sound from information is called "sonification".

By seeing the challenges of a work that encompass many areas of knowledge, we try to establish a common language so we can have an understanding in areas like acoustics, psychophysics, statistics and computer science. Moreover, to promote an engagement between the academia and society as well as a (slow) dissolution of the many "scientific entourages", the methodology employed is based on the practices of Open Science by developing software licensed by GPLv3, by creating an open laboratory workbook and by using publicly available data.

We wrote the software for meteorological data sonification from the meteorological stations of the "Instituto Nacional de Meteorologia", INMET as well as algorithms to better sonify the data. These algorithms calculate the hourly annual average and calculate the averages with an adjustment based on the times of the sunset and sunrise. We obtained sonifications for several days, and also the annual averages and the adjusted averages for two stations at Amazon (the rainforest), two at Caatinga and three at subtropical cities. As expected, the data is mostly periodic with periods of approximately one day.

Starting from the developments of this work there is the possibility to create a synthesizer to play the sonifications, there could be implemented other methods of sonification, one could implement the merge of this software with citizen science projects by playing environmental data, and there could even be an artistic installation about sonificating out of data.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 Sinestesia.....	7
1.2 Sinestesia sintética.....	8
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Data Science.....	10
2.2 Os Instrumentos Musicais Sinestésicos.....	11
2.3 Objetivos específicos do projeto.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 O desafio da inter/transdisciplinaridade.....	13
3.2 Diferenças entre informação visual e auditiva.....	15
3.3 Som.....	16
3.3.1 Estrutura fina e a Transformada de Fourier.....	17
3.3.2 Como escutamos?.....	17
3.4 - Sonificação por mapeamento de parâmetros e audificação.....	19
4. METODOLOGIA.....	21
4.1 Ciência Aberta.....	21
4.1.1 Dados Abertos.....	21
4.1.2 Caderno de laboratório aberto.....	27
4.1.3 Software livre para ciência.....	28
4.2 Sonificação.....	29
4.2.1 Sonificação de um dia.....	35
4.2.2 Sonificação da média anual.....	36
4.2.3 Ciclo circadiano e o ajuste de crepúsculo.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1 Softwares.....	38
5.1.1 Programa de audificação.....	38
5.1.2 Programa de cálculo da média anual.....	39
5.1.3 Ajuste de crepúsculo.....	41
5.1.4 Programa auxiliar.....	41
5.2 Sonificações realizadas.....	41
5.2.1 Sonificações de dias.....	42
5.2.2 Sonificações das médias anuais.....	42
5.2.3 Sonificações dos ajustes de crepúsculo.....	43
5.2.4 Sonificações a partir de outros dados.....	43
6. CONCLUSÕES.....	48
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	50
7.1 – Avaliação das sonificações dos Instrumentos Musicais Sinestésicos.....	50
7.2 – Sintetizador: Implementação dos mecanismos de sonificação em teclado.....	50
7.3 – Integração com projetos de ciência cidadã.....	51
8. REFERÊNCIAS.....	52
APÊNDICE A – Código do software “audificacao.py”.....	54
APÊNDICE B - Código do software “media_anual2.py”.....	61
APÊNDICE C - Código do software “gerenciaArquivos.py”.....	64
APÊNDICE D - Gráficos das sonificações de medidas de temperatura publicadas no caderno de laboratório.....	67

1 INTRODUÇÃO

Dados são pedaços de informação que, coletivamente, formam o pilar da tomada de decisão atual por por pessoas e entidades governamentais e privadas. Atualmente, dados estão por trás do protocolo e práticas médicas, dados influenciam estratégias e movem os instrumentos do capital financeiro. Dados informam sobre o nosso universo, dados nos falam sobre as mudanças climáticas da Terra. Há pouco tempo tínhamos livros contendo o equivalente a alguns kilobytes de dados, um pouco mais recentemente haviam computadores com a capacidade de armazenamento de megabytes. Hoje em dia lidamos com dados em quantidades colossais, com transferências da ordem de gigabytes a terabytes e armazéns que hospedam petabytes [1].

Com dados empilhando-se em taxas estonteantes e tendo uma complexidade cada vez maior, é necessário explorar novas formas para interpretação desses dados. A apresentação de dados é feita em geral através de representações visuais na forma de valores numéricos e gráficos. Este projeto visa explorar uma nova via cognitiva para percepção e interpretação de dados ambientais: a audição.

Com o potencial desenvolvimento de uma nova ferramenta para *data science*, o projeto coloca-se como etapa inicial para fundamentação de uma exploração mais ampla, que pode também auxiliar o acesso de pessoas com deficiência visual à informação e promover novos caminhos para uma mescla entre ciência e arte. Dando atenção especial para dados ambientais, o presente trabalho busca em um primeiro momento apresentar uma possibilidade de promover interesse e consciência sobre mudanças climáticas através de formas engajantes de interagir com os dados.

Desejamos realizar a representação dos dados (percebidos em um sentido, como dados ambientais de temperatura, umidade, luminosidade ou não, como preço do ouro) para som audível. O fenômeno de cruzamento de sentidos físicos é conhecido como sinestesia, por isso este trabalho promove uma forma de sinestesia sintética.

1.1 Sinestesia

Costumamos acreditar que vemos com nossos olhos, tocamos com nossas peles, ouvimos com nossos ouvidos. Essencialmente, pensamos em nossas sensações como uma combinação entre um tipo predominante de estímulo, um sensor e a interpretação resultante. Esse tipo de pensamento leva-nos a esquecer a interdependência entre os sentidos. Ainda assim, nos valem da percepção de outros sentidos para complementar as informações, são vários os exemplos que mostram isso.

Utilizamos informação visual para determinar a localização de uma fonte sonora, utilizamos o olfato para ter uma experiência gustativa mais completa, etc. Ao pensar nisso, percebemos que as experiências são uma combinação intrincada de sensações com o processamento feito pelo cérebro [2].

Na linguagem, um certo grau de correlação entre sensações de naturezas diferentes é comum, na maioria das vezes por questões culturais ou justificadas. Costumamos dizer que vermelho é uma cor quente e azul é uma cor fria, pessoas podem ter uma discussão acalorada, um café de torra escura é mais "afiado", a Mona Lisa tem um sorriso "sem sal", às vezes sou uma pessoa seca, eu vejo o que você está dizendo.

Sinestetas são pessoas que trazem algumas dessas frases para o sentido literal, pessoas que experienciam sinestesia. A sinestesia é um fenômeno no qual o estímulo a um sentido leva a experiências sensoriais em sentidos diferentes, tais como a sentir um gosto a partir de um cheiro, visualizar cores a partir de sons, ou seja, algumas pessoas são realmente capazes de "ver o que você está dizendo". As pessoas com essa condição costumam ter essas experiências pela vida toda, de forma repetida, se uma nota de violino hoje é roxa, daqui a um mês a nota ainda soará roxa.

Atualmente o estudo da sinestesia tem tido interesse crescente, pois pode nos dar dicas sobre a consciência, o funcionamento do cérebro, relações entre o subjetivo e o objetivo, fundamentos neurais das metáforas e relações entre raciocínio e emoção. A palavra sinestesia vem do grego syn (unido) e aesthesis (sensação), significando "sensação junta" e compartilhando a mesma raiz com anestesia (sem sensação) [3].

1.2 Sinestesia sintética

Sensações como calor e frio, claro e escuro e experiências como "está chovendo", "é um dia seco", etc., costumamos sentir ou perceber estando fisicamente presentes em um ambiente. A conectividade trazida pela adoção ubíqua dos computadores trouxe consigo a capacidade de obtenção e transmissão de dados sem precedentes, de forma que conseguimos representar diversas informações em tempo real e ter experiência de eventos à distância, como por exemplo visualizar câmeras instaladas em ruas de seu bairro através da internet. Apesar disso, os computadores comuns são capazes essencialmente de executar sons e exibir imagens, a exibição de dados de maneira visual é a prática mais comumente adotada nos dispositivos.

Estaremos buscando, além das aplicações práticas, aproveitar de forma mais completa as capacidades dos computadores atuais. Os dados de entrada podem ser de qualquer natureza e dimensão (desde que sejam dados que possam ser inseridos e processados por computadores). Na

prática não há a necessidade de trabalhar com dados ambientais, o fazemos para trazer mais significado para a experiência desde o início dessa exploração.

Pensando nos dados ambientais, podemos promover atividades de conscientização ambiental e trazer a experiência de exibição de dados para a audição. Devido ao fato de diversos desses dados, baseados em medidas físicas, são sensíveis pelos seres humanos, fazemos a interpretação de que promove-se, assim, uma experiência de sinestesia sintética.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo veremos os objetivos do projeto executado como Trabalho de Diplomação em Engenharia Física. Para fazer uma contextualização e justificativa realiza-se, nas seções a seguir, o que podemos chamar de uma abordagem "*top-down*". Elenca-se a conexão do trabalho com uma perspectiva da agenda científica e tecnológica global através da exposição da ascensão da *data science*. Posteriormente vemos a noção dos Instrumentos Musicais Sinestésicos e concluímos então com os objetivos mais pontuais do projeto, fazendo uma exposição de itens mais palpáveis.

2.1 Data Science

Termo que passou a ser empregado a partir da década de 70 e nos últimos anos ganhou grande projeção devido à sua importância na tomada de decisões, *data science* significa "ciência de dados".

Um termo que não está muito bem definido, *data science* está mais relacionado com práticas e abordagens do que um estudo específico. Tentativas de definir um *data scientist* (um cientista de dados) fazem com que vários adeptos das suas práticas e técnicas sejam deixados de fora. Em essência, um *data scientist* é uma pessoa que tenta extrair *insights* a partir de dados que ainda não foram trabalhados [4]. Vejamos alguns exemplos de como o trabalho com esses dados é relevante.

Há tempo escuto uma história, que parece muito anedótica, sobre um pai que, revoltado, foi a uma loja da Target (uma loja departamento dos EUA) reclamar por terem enviado para sua filha adolescente propaganda de produtos para gestantes. Dias depois o gerente da loja liga para a casa deste senhor para desculpar-se novamente mas fica sabendo do relato de que a menina estava, de fato, grávida. Essa história é ilustrativa quando falamos sobre o poder da *data science*. Na corrida por clientes, esse tipo de loja como a Target (que sempre armazena - e compra - muitos dados sobre as pessoas), sabe que pessoas em épocas de mudanças podem mudar também seus hábitos de compra então perceberam que devem ser as primeiras a atrair as clientes grávidas. A partir de diversas correlações, consegue estimar uma probabilidade de que alguém esteja nessa situação [5].

O site de namoro OkCupid faz diversas questões para seus usuários dizendo que o seu objetivo é encontrar um par adequado. Com essas questões conseguiu correlacionar diversos hábitos com gostos e práticas aparentemente não relacionados. Concluiu, por exemplo, que gostar do sabor da cerveja faz com que seja mais provável que uma pessoa ache normal ter relações sexuais em um primeiro encontro [6].

O Facebook é uma grande mina de dados. Dados globais de moradia dos usuários mostraram padrões de migração coordenada atuais, um estudo mostrou quais os parâmetros que fazem com que as pessoas migrem em massa de uma cidade para outra. A maior quantidade das ocorrências desse tipo de migração ocorre em países com as maiores taxas de urbanização [7].

Esses exemplos mostram como trabalhar com quantidades massivas de dados traz diversos tipos diferentes de conclusões e mostra o que está em jogo quando se trata de interpretação, curadoria e obtenção de dados. O projeto desenvolvido vem inserir-se na exploração de mais um elemento para a caixa de ferramentas do cientista de dados.

2.2 Os Instrumentos Musicais Sinestésicos

Com o desenvolvimento do presente trabalho, torna-se possível a exploração inicial dos Instrumentos Musicais Sinestésicos (IMS).

Esses instrumentos buscam trazer para a audição a capacidade de perceber dados ambientais, trazendo a conscientização ambiental para um novo sentido. Esses instrumentos são tanto uma nova ferramenta para os cientistas de dados quanto para expressão artística [8].

Ferramentas capazes de representar grandezas físicas diversas em formas sonoras, os IMS serão instrumentos que tem os dados dessas grandezas como entrada que juntamente com um dispositivo de controle (teclas, teclado midi, etc.) enviam parâmetros para o algoritmo de sonificação que então salva um arquivo de música ou executa diretamente o som em caixas de som.

Vemos, na figura 1, um diagrama ilustrando o funcionamento geral dos instrumentos musicais sinestésicos. O presente trabalho entra no núcleo dos IMS, fazendo a obtenção e

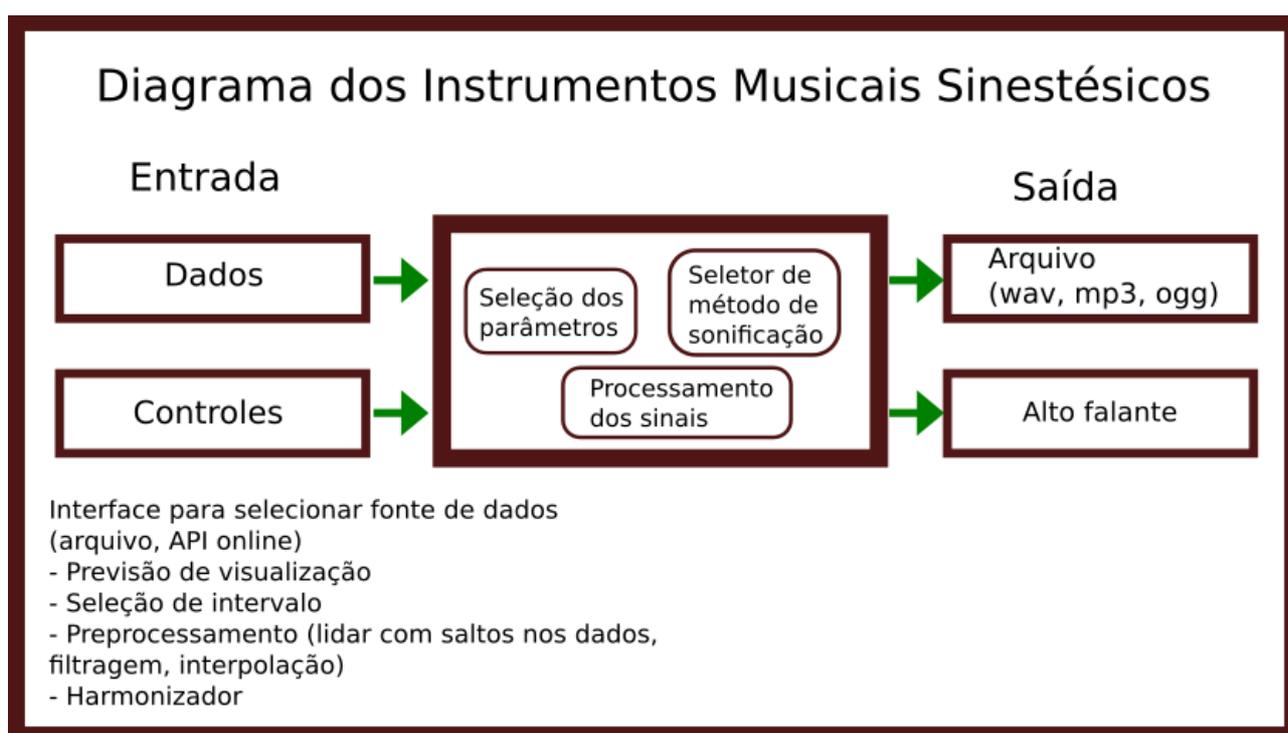


Figura 1: imagem baseada no esquema dos IMS da página http://lief.if.ufrgs.br/~pezzi/synesthetic_musical_instruments/#/9

preprocessamento dos dados, aplicando o método de sonificação desenvolvido, processando os sinais e salvando um arquivo de áudio MP3.

Vejamos então especificamente como o trabalho pretende ser o início da exploração dos IMS, mostrando suas potencialidades e fazendo algumas aplicações.

2.3 Objetivos específicos do projeto

* Obtenção de 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 e iniciar a exploração da sua capacidade para a análise de dados científicos. Funcionalidades: seleção da fonte dos dados, seleção do tempo de duração da sonificação, seleção do tipo de sonificação empregado.

* Criação de “banco de áudios” para que os parâmetros do áudio possam ser alterados dependendo do tipo de técnica de representação auditiva adotada, pois para realizar a experimentação da sonificação através de amostras de som precisamos ter acesso a um banco de dados contendo essas amostras.

* Criação de banco de dados suficientemente abrangente para que se realizem comparações das medidas e sonificações, pois os sons são gerados a partir de dados.

* Desenvolvimento de 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.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O desafio da inter/transdisciplinaridade

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 [9].



Figura 2: círculo representando a transdisciplinaridade da sonificação e das representações auditivas: O círculo exterior apresenta as transformações durante o uso/desenvolvimento e o círculo interno apresenta algumas das áreas envolvidas. A listagem não é completa, mas somente para ilustração. Traduzido e adaptado da imagem no "The Sonification Handbook", Cap. 1, pg. 2

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 auditiva². Numa tentativa de alicerçar a discussão

² Saiba mais sobre a International Community for Auditory Display em <http://www.icad.org/index.html>. Acesso jul. 2017.

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.” [10]

O *Handbook* esclarece e define diversos assuntos, tentando unificar um pouco a linguagem base para realização dos trabalhos afins e proporcionando um início mais rápido na exploração dessa temática. Devido ao seu prestígio e sua característica de englobar vários assuntos frente a esse tema, vários dos conceitos e definições abordados nas seções a seguir serão obtidos do Sonification Handbook. Cabe definir alguns conceitos gerais que precisaremos para continuar a nossa exploração.

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. Durante o decorrer do texto, menciona-se *representação auditiva*, que pode ser entendido como um sinônimo.

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. Muitas vezes esses dados tem uma dimensão sendo o tempo e é necessário apenas realizar uma aceleração ou desaceleração no tempo (caso o dado represente um fenômeno periódico com período de 0,04Hz, a velocidade com que ele acontece deve ser acelerada para que ele torne-se audível, por exemplo).

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.

Nas seções a seguir vamos mencionar semelhanças e diferenças entre a exibição de informações visuais e auditivas. Falaremos de alguns conceitos sobre o som, complementando o entendimento sobre sua forma com a ideia de estrutura fina, envelope e espectrograma e explorando

a maneira como escutamos o som. Ao fim do capítulo, exploraremos mais a fundo o conceito de audificação e de *sonificação por mapeamento de parâmetros*.

3.2 Diferenças entre informação visual e auditiva

É comum que, ao iniciar a exploração de sonificações, as pessoas envolvidas com o desenvolvimento e análise das sonificações e representações auditivas associem as propriedades da representação com as propriedades das representações visuais. Interpretações e expectativas das representações auditivas devem ser diferentes das que temos para as representações visuais, as quais estamos, em geral, mais familiarizados. As capacidades de processamento e percepção auditiva têm algumas semelhanças, mas são fundamentalmente diferentes das capacidades visuais.

Vamos discutir brevemente alguns dos aspectos da percepção auditiva que devem ser levados em consideração ao avaliar as representações. Como estamos falando em termos gerais, sem abordar alguma representação auditiva, tenha em mente que as sugestões e observações são para casos comuns e haverão diversas exceções.

Um aspecto muito diferente do som em relação a uma imagem é a sua natureza transiente, que faz com que não possamos percorrer arbitrariamente por todo o conjunto exibido e não possamos fazer avaliações muito rápidas sobre mínimos globais, por exemplo. Por isso em muitos casos o ouvinte (a pessoa que está escutando a representação auditiva) deve ser capaz de executar quantas vezes for necessária a representação, pausar, retroceder e avançar.

O funcionamento da memória para eventos auditivos é algo mais sutil, mas que deve ser levado em consideração. Se uma sonificação é muito extensa, é provável que eventos no início da representação já sejam degradados na memória e torne impossível uma comparação confiável com outras partes do áudio. Recomenda-se evitar que se excedam cerca de 12 segundos, mas acelerar um áudio repleto de informações complexas pode prejudicar a capacidade de percepção dos padrões. Aqui encontramos um compromisso entre três fatores: complexidade das sonificações criadas, memória e percepção [11].

Existem diferenças na forma com que a atenção é empregada em som ou imagem, de forma que devemos pensar cuidadosamente no número de estímulos sonoros diferentes que serão manipulados (intensidade, frequência, *pan*, etc.). Em estágios exploratórios de representações auditivas é preferível manter-se com poucos tipos de parâmetros sendo manipulados.

Essa é uma das razões pelas quais, no presente trabalho, consideramos melhor realizar uma exploração tratando com poucas dimensões de dados e som e sem misturar técnicas diversas de sonificação. Dessa forma teremos um amadurecimento mais consistente da técnica desenvolvida.

3.3 Som

Conceitos do comuns e aparentemente simples costumam ser os mais difíceis de definir-se. Tema de cursos de física básica, a **onda sonora** é muitas vezes definida genericamente como qualquer onda mecânica longitudinal [12]. Em suma, uma onda mecânica é uma onda que precisa de um meio pra se propagar, as longitudinais são as em que a perturbação do meio ocorre na direção da propagação da onda.

Outra definição de **som** é a própria sensação auditiva provocada pelas ondas sonoras. Os seres humanos costumam ouvir ondas mecânicas longitudinais que se propagam no **ar** entre frequências de aproximadamente 20Hz e 20000Hz. Por esse motivo, chamamos de *infrasom* os sons abaixo de 20Hz e *ultrassom* os sons acima de 20Khz. Submarinos, por exemplo, utilizam ondas sonoras dentro do mar para identificar obstáculos e outras embarcações dentro do mar, técnicos utilizam aparelhos que utilizam ultrassom para realizar imageamento identificando tecidos mais duros ou moles em animais, abalos sísmicos são vibrações na crosta terrestre, estes exemplos não podem ser ouvidos, mas ampliam o que podemos entender por som. Temos aqui uma boa visualização do que é o som, tenhamos em mente que nossa definição é suficiente para o entendimento e discussão do que segue mas não é uma definição última do que é **som**. Portanto, a partir daqui, exceto quando citado explicitamente, consideraremos som apenas as vibrações no ar na temperatura ambiente, entre 20Hz e 20kHz [13].

Quando um objeto vibra ele toca as moléculas de ar que estão imediatamente ao redor dele e as empurra, provocando um aumento da densidade do ar naquela pequena região no entorno do objeto, em seguida se afasta, provocando um decréscimo da densidade nessa região. Essa condensação e rarefação do ar se propaga se afastando do objeto no que chamamos de frente de onda. Podemos descrever o som em termos da variação da pressão ou densidade do ar provocada pela onda. A variação de pressão no ar pode ser escrita como uma função dependente do espaço (x) e do tempo (t). Podemos também fixar um ponto definido e analisar a variação da pressão unicamente com o tempo $P(t)$.

Tendo isso em mente, analisemos agora alguns conceitos importantes para compreender o tipo de sonificação que criamos. Veremos o que é a estrutura fina e como ela, juntamente com o envelope, compõe o som que ouvimos e como a Transformada de Fourier nos permite entender de maneira muito imediata algumas características do som sem precisar ter um ouvido treinado. Veremos também um pouco como funciona a audição humana e o que é a sonificação por mapeamento de parâmetros.

3.3.1 Estrutura fina e a Transformada de Fourier

Imagine que temos um sinal senoidal de 110Hz que surge e se esvai rapidamente, ouve-se um lá. O timbre do som é determinado somente pelo formato senoidal da onda, que teve sua amplitude aumentada e diminuída com o decorrer do tempo. Por esse motivo, pode ser feita uma decomposição desse som nessa onda rápida que carrega a informação do timbre e na onda mais devagar que carrega a informação da amplitude do som. O procedimento matemático para descobrir esses fatores (pois a onda original é o produto dessas duas funções) foi apresentado inicialmente pelo matemático David Hilbert e chamamos essa onda que varia rapidamente de **estrutura fina** e a que varia mais lentamente e muda a amplitude do som de **envelope** [14].

Outra forma de decompor os sons em componentes mais simples é a chamada **Transformada de Fourier**, que permite que descubramos a composição do som em termos de somas de senóides³. Um dos usos da Transformada de Fourier é feito nos gráficos apresentados no capítulo 5 (resultados), onde vemos o espectro do som (a intensidade de cada senóide de frequência diferente presente no som gerado), com o espectro conseguimos entender melhor algumas características do timbre do som. Se você não está familiarizado com a noção de Série de Fourier e Transformada de Fourier, verifique o texto a respeito no apêndice.

3.3.2 Como escutamos?

Entendendo algumas propriedades físicas do som, que são propriedades de funções e de ondas, ainda não estamos entendendo como essa onda passa a fazer sentido para nós. Iniciamos agora uma breve jornada à esse incrível aparato de audição, um sistema de transdução que permite que estímulos físicos tornem-se sensações. Paremos no início do sistema nervoso, que é quando o que percebemos torna-se sinal elétrico e, então, as coisas ficam mais complexas. Afinal, não queremos nos espargir em questões ainda mais profundas como o funcionamento do cérebro e a noção de consciência. Entenda que em termos de anatomia, as coisas podem soar muito simplificadas ou grosseiras, saiba que o objetivo de nossa viagem é ter um entendimento geral dos fenômenos fundamentais na transdução.

Abaixo temos uma imagem⁴ de como o sistema auditivo periférico é constituído.

³ Para as pessoas que não estão familiarizadas com o conceito de Série e Transformada de Fourier, escrevi um pequeno texto disponível em http://lief.if.ufrgs.br/~janluc/tdef/2018/01/02/explicacoes_fourier.html

⁴ Imagem de Mike.lifeguard, obtida de Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_of_the_Human_Ear_pt.svg

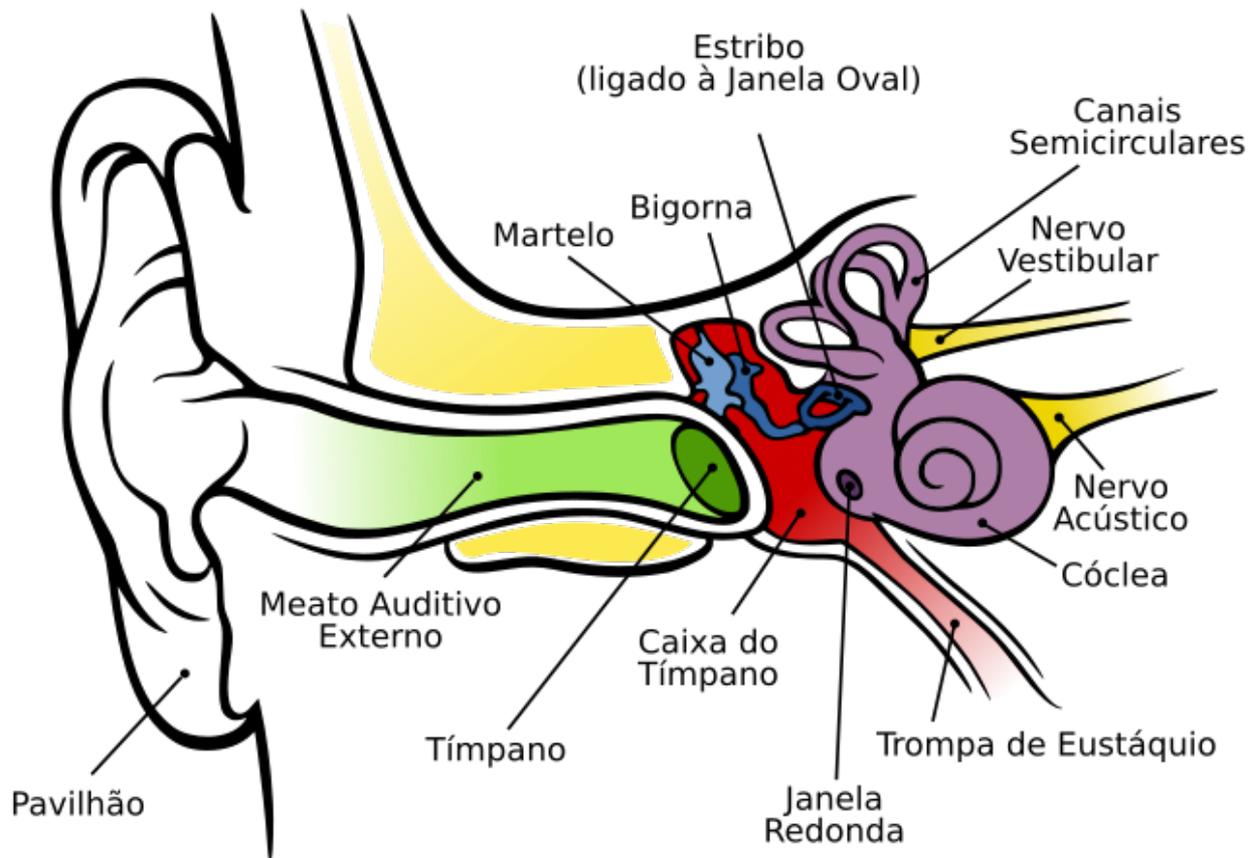


Figura 3: A imagem mostra o aparelho auditivo humano.

Nossa viagem acompanhando o som inicia-se no **pavilhão**: Protuberância curva e cartilaginosa que utilizamos essencialmente para escorar nossos óculos. Muito importante em alguns mamíferos como os cães e morcegos, é uma parte menos importante para os humanos. Apesar disso, o pavilhão provoca algumas alterações espectrais, que chamamos de filtragem do sinal, permitindo que identifiquemos a localização da origem do som. A abertura no pavilhão leva ao início do **meato auditivo externo**, um canal encurvado com cerca de 2,5cm que termina no tímpano. O tímpano, por sua vez, é uma membrana, o último local onde a onda sonora é transmitida pelo ar pois a variação de pressão do ar provoca a vibração do tímpano. Podemos pensar no pavilhão e no meato como uma cavidade aberta em uma ponta (exatamente o que são), assim como um tubo de flauta. Devido à ressonância do meato, somos mais sensíveis às frequências aproximadamente entre 1 e 6 kHz.

Chegamos à região intermediária do sistema auditivo, passando o tímpano, a onda sonora viaja como vibração pelo martelo, batendo na bigorna e vibrando o estribo, são os menores ossos do corpo humano. Essa região é cheia de ar. A Trompa de Eustáquio conecta essa região ao fundo da garganta, de forma que quando engolimos e bocejamos conseguimos equilibrar a pressão que há

antes e depois do tímpano. O sistema da região intermediária serve para que o som que faz vibrar o tímpano, transmitido pelo ar, seja transmitido da maneira mais eficiente possível para a cóclea, pois ela é preenchida com água, por isso a janela oval tem uma área menor que o tímpano. Para as pessoas mais familiarizadas com os conceitos de física básica, podemos dizer que esse processo é uma espécie de **casamento de impedâncias**, aumentando a pressão em cerca de 20 a 30 vezes a pressão no tímpano.

Ao passar pela janela oval, entramos finalmente na cóclea. É aqui que a transdução de fato ocorre. É aqui que deixaremos de ser uma vibração e transformaremos em um sinal elétrico.

A cóclea é parecida com uma pequena minhoca enrolada de cerca de 3,5cm. Dentro dela há uma membrana, a **membrana basilar**, que na entrada, logo após a janela oval, é estreita e rígida mas vai tornando-se cada vez mais larga e flácida. De uma maneira um tanto engenhosa, a membrana basilar é conectada a células com cílios repletas de potássio e conectadas ao nervo auditivo. Cerca de 3500 dessas células são responsáveis por detectar a vibração da membrana, outras cerca de 12000 são responsáveis por alterar a rigidez da membrana. Ao moverem-se os cílios, essas células repletas de potássio agem como um sensor de movimento, liberando um sinal elétrico que passa a viajar pelo nervo auditivo e chega ao cérebro. A magia da cóclea, no entanto, está no fato de a membrana possuir uma rigidez variável ao longo de sua extensão. Como uma corda de violão, essa membrana vibra de acordo com a frequência aplicada nela, mas em toda a sua extensão ela está "afinada" para diferentes frequências (pois sua tensão varia). É assim que realizamos uma **separação espectral** do som [13].

Assim, o som é convertido em sinais elétricos para que, então, o cérebro entenda um alarme, um latido, o cantar dos pássaros ou uma declaração de amor.

3.4 - Sonificação por mapeamento de parâmetros e audificação

Mapeamento de parâmetros nesse contexto representa a sonificação através do mapeamento de dimensões dos dados para dimensões no áudio. Podemos pensar que alguma característica do áudio (que denominamos dimensão) é influenciada como uma *função* de alguma dimensão do dado (essa dimensão é, muitas vezes, um valor numérico, mas pode ser um conjunto de dados qualquer), então teremos algo como uma função que varia dentro desse parâmetro do áudio influenciada pela variação no dado.

Para pensarmos em termos mais concretos, podemos citar o parâmetro amplitude do som, este parâmetro pode variar de acordo com uma relação qualquer atrelada à variação de, por exemplo, número de habitantes no município. Digamos agora que vamos percorrer uma lista que contenha dados para 12 municípios, escolhermos arbitrariamente que cada município vai

corresponder a 0,5s então geraremos um som de 6s cuja amplitude varia 12 vezes. O tipo de dado de entrada pode ser também qualitativo ou discreto do tipo liga/desliga com um limiar que ativa um alarme discreto: usando o mesmo exemplo pode-se ter som quando o número de habitantes ultrapassa 1 milhão e silêncio nos outros casos.

Em geral esse tipo de sonificação geralmente emprega um modo de interação passivo, onde o ouvinte não influencia diretamente no som (como quando ouvimos um trovão) diferentemente do ativo, quando o ouvinte é agente na construção do som (como quando o ouvinte tensiona a corda de um baixo e puxa-a). Uma das formas de aumentar a capacidade de compreensão das sonificações com interação passiva é permitir que o ouvinte repita os áudios a seu interesse.

Um caso especial do mapeamento de parâmetros é a **audificação**. Na audificação, dados numéricos não monotônicos (isto é, não só crescentes ou decrescentes), geralmente periódicos, são convertidos para valores de pressão (como mencionamos ao falar sobre o conceito de som). Fazemos essa conversão através da aplicação de tensão em caixas de som. Geralmente audificam-se dados que variam no tempo e, nesse caso, costuma ser necessária uma alteração no tempo (pois se um dado tem período de 1Hz não escutaremos e precisamos acelerá-lo entre 20 e 20000 vezes, o mesmo vale para dados acima de 20 kHz, que precisamos desacelerar) [15].

4. METODOLOGIA

4.1 Ciência Aberta

A Ciência Aberta é um movimento para tornar a pesquisa, dados e disseminação científica mais acessível a todos os níveis da sociedade. Surge das mudanças na capacidade de produção de conhecimento e disseminação da informação, que vem desestabilizando as estruturas de organização (e, saliento, controle intencional de fluxo) do conhecimento vigente. Enxerga-se, através da ótica da Ciência Aberta, que há uma discrepância entre a capacidade e necessidade de socialização do conhecimento e da cultura, de um lado, e a privatização e cerceamento da propriedade intelectual, do outro. Além disso, podemos até pensar que há um pleonasmo quando falamos "ciência aberta", pois várias das práticas e posturas que o movimento da Ciência Aberta busca introduzir vão somente de encontro a impedimentos do pleno funcionamento da ciência [16].

Entendida como um processo contextualizado dentro de um movimento, há uma proposta de metodologia característica da Ciência Aberta. O presente trabalho busca adotá-las, por compartilhar do entendimento que, para que tenha-se uma ciência mais saudável, é necessário um esforço para que possa-se trabalhar colaborativamente na atualidade.

Portanto, nesse trabalho, foram usados dados abertos das estações meteorológicas do INMET, fez-se um registro das atividades em um caderno de laboratório aberto contendo relatos e tarefas atualizadas e o software desenvolvido é disponibilizado como software livre e usa, em sua estrutura, ferramentas livres. Veremos nas seções a seguir como essas práticas foram implementadas.

4.1.1 Dados Abertos

Juntamente com o desenvolvimento e popularização da internet surgiram iniciativas para tornar publicamente acessíveis livros, artigos, dados e outras publicações. Essas iniciativas eram movidas pelas novas capacidades da informação digital, mas distinguiam-se em alguns detalhes e motivações. Depois de um certo amadurecimento do movimento pelo conhecimento aberto, realizou-se uma conferência em dezembro de 2007 em Sebastopol, na Califórnia, para discutir dados abertos governamentais. O encontro culminou na formulação de 8 princípios que foram adotados de forma mais ampla como princípios para os dados abertos. A tabela abaixo (figura 4) sumariza os princípios [17].

Os 8 Princípios dos dados abertos	
Completo	Todos os dados públicos devem ser disponibilizados. Dados públicos são aqueles que não estão sujeitos a restrições de privacidade, segurança ou privilégios de acesso.
Primários	Os dados devem ser coletados na fonte, com o maior nível de detalhamento possível, e não de forma agregada ou modificada.
Oportunidade	Sua disponibilidade deve ser feita tão rapidamente quanto necessário para preservar o valor dos dados.
Acessibilidade	Os dados devem estar disponíveis para a mais ampla gama de usuários e as mais diversas finalidades.
Processável por máquinas	Os dados devem ser razoavelmente estruturados, de modo a permitir o processamento automatizado.
Não-discriminatório	Os dados devem estar disponíveis para qualquer pessoa, sem necessidade de registro.
Não-proprietário	Os dados devem estar disponíveis em um formato sobre o qual nenhuma entidade tem o controle exclusivo.
Licença livre	Os dados não estão sujeitos a quaisquer direitos de autor, patentes, marcas comerciais ou regulamento secreto. Podem ser permitidas uma razoável privacidade e restrições de privilégio e segurança.

Fonte: OPEN Data Government Working Group, 2007

Figura 4: Os oito princípios dos dados abertos. Imagem por Jorge Machado, do capítulo 9 do livro "Ciência aberta, questões abertas" p. 213.

Para realizar a sonificação pretendida, buscou-se dados meteorológicos do INMET, que disponibiliza os dados em uma plataforma online aberta.

De acordo com a NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET:

"Os dados coletados pelas EMAs serão enviados automaticamente para a sede do INMET em Brasília, de hora em hora, onde são efetuadas as validações (através de um sistema de qualidade) e disponibilizados em tempo real a todos usuários, de forma aberta e gratuita para toda a sociedade no portal do INMET http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php." [18].

Ou seja, os dados obtidos aproximam-se dos princípios dos dados abertos. Apesar disso, para o download desses dados é necessário preencher um *captcha* para dificultar o acesso por sistemas automatizados de obtenção dos dados. Além disso, foram encontrados dados somente para os últimos 365 dias, de forma que fica mais difícil ter um histórico mais longo das medidas.

Os dados baixados são organizados numa tabela de números separados por vírgula com um cabeçalho informando o tipo de medida realizada. O cabeçalho tem a seguinte estrutura:

```
"codigo_estacao,data,hora,temp_inst,temp_max,temp_min,umid_inst,umid_max,umid_min,pto_orvalho_inst,pto_orvalho_max,pto_orvalho_min,pressao,pressao_max,pressao_min,vento_direcao,vento_vel, vento_rajada,radiacao,precipitacao"
```

Cada nome do tipo de dado é bastante explicativo, são dados medidos de hora em hora e seguem a ordem dos dias, mas as horas não são listadas em ordem, alguns dados não constam em certas horas, constando apenas o código "////". Existem saltos nas medidas, ou seja, várias horas não aparecem na lista.

No programa de obtenção dos dados é, então, realizada uma interpolação linear entre os pontos com medidas. Dessa forma, horários em que não são realizadas certas medidas ou horários que não estão presentes são substituídos por pontos que ligam uma medida à próxima. No capítulo de resultados discutiremos com mais detalhe o funcionamento dos programas.

Para comparar as características dos dados ambientais ao realizar as sonificações, foram obtidos dados do último ano de duas estações da Caatinga, duas da Amazônia e três de grandes cidades subtropicais.

Observou-se que alguns downloads de dados de estações meteorológicas apresentavam problemas, como a estação Mina Palito, que fica na Amazônia na Floresta Nacional do Xamanxim mas apresenta uma lacuna de 4 meses de dados. Outras estações ficam onde o sol se põe depois da meia-noite (evitaram-se essas estações pois o algoritmo de ajuste de crepúsculo precisa do horário que o sol se põe para cada dia). Então os dados de estações obtidas que satisfaziam os critérios de usabilidade dos dados, foram salvos junto ao repositório do software na pasta "data", pois eram poucos kilobytes de dados.

Sete estações foram selecionadas. Duas da Amazônia: Apui e Humaitá. Duas na Caatinga: Apodi e Patos. E três cidades: São Paulo, Florianópolis e Porto Alegre.⁵

Informações sobre os arquivos e as estações (confira na figura 10 as localizações geográficas):

⁵ Estas estações automatizadas do INMET tem seus dados publicamente acessíveis na página <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>.

Estações da Amazônia	
Arquivo	Apui.dat
Descrição	Estação em uma cidade na Amazônia.
Código da estação dado pelo INMET	Apui-A113
Início do funcionamento da estação	19/07/2008
Latitude	-7.205475°
Longitude	-59.888561°
Altitude	157 metros
Período dos dados	19/12/2016 a 17/12/2017
Arquivo	Humaita.dat
Descrição	Estação na Amazônia.
Código da estação dado pelo INMET	Humaitá-A112
Início do funcionamento da estação	25/04/2008
Latitude-7.552520°	-7.552520°
Longitude	-63.071343°
Altitude	54 metros
Período dos dados	07/12/16 a 06/12/17

Estações da Caatinga	
Arquivo	Apodi.dat
Descrição	Estação na região da Caatinga.
Código da estação dado pelo INMET	Apodi-A340
Início do funcionamento da estação	14/11/2007
Latitude	-5.626559°
Longitude	-37.814991°
Altitude	131 metros
Período dos dados	07/12/16 a 06/12/17
Arquivo	Patos.dat
Descrição	Estação na região da Caatinga.
Código da estação dado pelo INMET	Patos-A321
Início do funcionamento da estação	21/07/2007
Latitude-7.552520°	-7.079836°
Longitude	-37.272817°

Altitude	264 metros
Período dos dados	08/12/16 a 06/12/17

Estações em cidades subtropicais

Arquivo	SaoPaulo.dat
Descrição	Estação que fica numa região urbana no norte da cidade de São Paulo.
Código da estação dado pelo INMET	São Paulo (Mirante de Santana)-A701
Início do funcionamento da estação	25/07/2006
Latitude	-23.496294°
Longitude	-46.620088°
Altitude	786 metros
Período dos dados	12/11/2016 a 10/11/2017
Arquivo	Florianopolis.dat
Descrição	Estação na capital catarinense.
Código da estação dado pelo INMET	Florianópolis-São José-A806
Início do funcionamento da estação	22/01/2003
Latitude-7.552520°	-27.602530°
Longitude	-48.620096°
Altitude	5 metros
Período dos dados	12/11/2016 a 10/11/2017
Arquivo	PortoAlegre.dat
Descrição	Estação na capital gaúcha.
Código da estação dado pelo INMET	Porto Alegre-A801
Início do funcionamento da estação	18/09/2000
Latitude-7.552520°	-30.053536°
Longitude	-51.174766°
Altitude	41 metros
Período dos dados	12/11/2016 a 11/11/2017



Figura 5: Imagem mostrando o posicionamento de cada estação meteorológica selecionada no país. As numerações indicam (1) Apui, (2) Humaitá. (3) Apodi, (4) Patos, (5) São Paulo, (6) Florianópolis e (7) Porto Alegre. Mapa obtido do OpenStreetMap – www.openstreetmap.org.

As sonificações empregadas não utilizam áudios gravados para mapeamento de parâmetros, pois criam o som inteiramente a partir de critérios previamente estabelecidos e dos dados inseridos. Apesar disso, futuramente pode-se ter interesse em estabelecer algum tipo de sonificação que utilize gravações. Por esse motivo ainda sim foi criado um pequeno banco de áudios para que essa exploração se inicie, mas não foi uma tarefa prioritária.

Também foram salvos no repositório do software na pasta "Banco_de_audios". A descrição de cada arquivo segue na tabela abaixo:

Arquivo	Sample Rate (Hz)	Número de pontos	Duração (s)	Descrição
400Hz_sine.wav	11520	960	0,084	Som senoidal curto de 400Hz. Obtido da

				Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Filmaudiodemo_400Hz_Sine_Wave.wav Domínio público pela simplicidade do som.
Bach_Prelude_from_Cello_Suite_in_G.wav	44100	823296	18,67	Início da Cello Suite de Bach, obtido da Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bach_Prelude_from_Cello_Suite_in_G.wav Domínio público pela antiguidade da obra.
Mozart_piano_sonata_K332_excerpt.wav	44100	430080	9,75	Recorte da Sonata para Piano K332 de Mozart, obtido da Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mozart_piano_sonata_K332_excerpt.wav. Domínio público pela antiguidade da obra.

4.1.2 Caderno de laboratório aberto

Durante as etapas de desenvolvimento do projeto, foi realizado o registro das atividades em um caderno de laboratório aberto. Entre junho de 2017 e janeiro de 2018 foram realizadas diversas publicações contendo resoluções sobre o trabalho, tarefas futuras, estado atual do desenvolvimento. A exibição dos resultados e audições do material obtido também foram realizadas através dessa página. O caderno encontra-se publicamente acessível numa página web hospedada num servidor disponível aos alunos do Instituto de Física da UFRGS.⁶

Além de guia para o trabalho realizado, essa documentação vale-se de uma linguagem informal e serve como referência para a consolidação de uma documentação futura, pois registra de maneira simples as atividades realizadas, sem que essa atividade seja uma tarefa que demande muito tempo.

Outra vantagem do caderno de laboratório é que, por ser acessível online, foi possível compartilhar informações de maneira muito simples para que se pudesse buscar ajuda, orientação e colaboração, dando, inclusive, uma visibilidade maior ao trabalho. Além dos aspectos mencionados, a página oferece a vantagem de exibir o passo-a-passo "cru" do desenvolvimento do projeto de forma aberta e sujeita eventualmente ao escrutínio público.

4.1.3 Software livre para ciência

O desenvolvimento científico está baseado na ideia das publicações e precisa desse mecanismo para que funcione. A partir do momento em que softwares começaram a ser utilizados é

⁶Confira a página do caderno de laboratório aberto no endereço <http://lief.if.ufrgs.br/~janluc/>

natural que publiquem-se os softwares, de forma que seja possível fazê-los passar pelo mesmo processo que o resto da publicação. Apesar disso, muitas pessoas não chegam facilmente à essas conclusões e é necessário realizar um esforço para que os softwares sejam tratados como parte importante nas publicações. Utilizar uma licença clara, atribuir o crédito aos autores e disponibilizar os códigos são elementos indispensáveis para que se faça ciência⁷.

O software desenvolvido é licenciado sob os termos da GPLv3.⁸ Isso significa que foi adotada uma licença permissiva compatível com as noções de software livre, são programas que, em suma, garantem as seguintes 4 liberdades:

Uso do software para qualquer propósito,

Liberdade para modificar o software para que se adeque as necessidades próprias,

Liberdade para compreender o software e compartilhá-lo,

Liberdade para compartilhar as modificações realizadas.

A documentação e desenvolvimento do software foi realizado utilizando o sistema de versionamento GIT. O GIT é um sistema que facilita que o software desenvolvido seja publicado e disponibilizado para download de maneira bastante dinâmica e instantânea, além de gerenciar as versões dos arquivos mantendo um histórico e permitindo que várias pessoas possam contribuir simultaneamente com o desenvolvimento do software.

Como um software livre, o desenvolvimento colaborativo é possível e encorajado, o desenvolvimento desse software se deu a partir do código inicial escrito pelo professor Rafael Pezzi.⁹

O código utilizava a linguagem Python2¹⁰ (a versão de 2010 da linguagem Python) e a biblioteca Audiolab, uma biblioteca para Python2 para criar áudio a partir de vetores de Python. O ambiente computacional para desenvolvimento utilizado era o Ipython Notebook¹¹, que permite um desenvolvimento interativo através do navegador de internet.

7 Por esses motivos foi criado o “Science Code Manifesto”, o resultado de um movimento em prol de “boas práticas” com as publicações científicas. Visite <http://sciencecodemanifesto.org/>.

8 Para entender mais sobre a GPL, visite o texto A Quick Guide to GPLv3 escrito por Brett Smith no endereço <https://www.gnu.org/licenses/quick-guide-gplv3.html>.

9 A documentação do programa desenvolvido encontra-se disponível no repositório do projeto no servidor do CTA no endereço <https://git.cta.if.ufrgs.br/emm/SMI>. O último *commit* realizado pelo Prof. Rafael Pezzi é visualizado em <https://git.cta.if.ufrgs.br/emm/SMI/tree/3d3acc0db82bc8a5384293b10371118eb364d3dd>.

10 As informações sobre as versões de Python foram encontradas na página oficial de download <https://www.python.org/downloads/>.

11 Atualmente o projeto do “Ipython Notebook” chama-se “The Jupyter Notebook”. Conheça o projeto na página <https://ipython.org/notebook.html>.

Python é uma linguagem mantida pela Python Software Foundation, uma organização sem fins lucrativos que organiza os lançamentos de novas versões da linguagem. É uma linguagem de programação livre¹², compatível com o desenvolvimento de programas com GPL. Como parte da metodologia, tenta-se, inclusive, seguir o "Zen Python". O "Zen Python" é uma norma informal que determina algumas práticas recomendadas, usuários de Python podem lê-lo digitando o comando "import this"¹³.

No desenvolvimento do projeto, decidiu-se escrever uma versão em script do programa com o mesmo algoritmo de sonificação (exceto por algumas correções), usando Python3 (a versão mais atual do Python, de 2016) e bibliotecas para geração de áudio compatível com Python3. O desenvolvimento do programa foi facilitado pela utilização do ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Spyder¹⁴, uma IDE livre que dá várias funcionalidades para o desenvolvimento do software. Por esse motivo, o cabeçalho do programa sempre faz um teste para verificar se a execução do programa está sendo feita através do terminal ou através do Spyder, pois alguns procedimentos são sutilmente diferentes (como encontrar a localização de arquivos, por exemplo).

Todo o desenvolvimento e testes foram realizados num computador rodando o sistema operacional Debian 9 versão de 64 bits. Apesar disso, espera-se que funcione em qualquer computador com Python3 e as bibliotecas necessárias instaladas.

4.2 Sonificação

Como mencionamos na revisão bibliográfica, devido à vários fatores como as capacidades de memorização e atenção às informações auditivas, preferiu-se empregar apenas uma técnica de sonificação. Dessa forma, a exploração pode aprofundar-se mais com uma técnica e ter um protótipo que passe por todo um ciclo de desenvolvimento antes que acrescentasse outra técnica de sonificação.

A técnica empregada é uma técnica de sonificação que combina o mapeamento de parâmetros (mais genérico) com a audificação. Veremos, no capítulo de resultados, mais detalhe de como o programa funciona, concentremo-nos somente no método de funcionamento da audificação neste primeiro momento.

É importante termos em mente o conceito de "taxa de amostragem".

Taxa de amostragem ou (sample rate): O som é um sinal contínuo. Sinais contínuos podem ser entendidos como sinais que variam no tempo e que têm uma quantidade infinita de pontos. É

12 A licença e sua compatibilidade são apresentadas na página "History and License" da documentação do Python <https://docs.python.org/3/license.html>.

13 O Zen do Python pode também ser visto na proposta de melhoria do Python número 20, feita por Tim Peters em agosto de 2004. <https://www.python.org/dev/peps/pep-0020/>.

14 "Spyder – Documentation" <https://pythonhosted.org/spyder/>

impossível trabalhar numericamente com uma quantidade infinita de pontos. Por esse motivo é realizada uma amostragem do sinal, recolhendo-se uma certa quantidade de pontos por segundo.

De maneira mais formal, dizemos que amostragem é o processo no qual uma sequência discreta é obtida a partir de uma função contínua [19].

A quantidade de pontos medida por segundo determina quão "fina" é essa amostragem e é comumente expressa Hz. Uma taxa de amostragem que coleta 1000 pontos por segundo é uma taxa de 1kHz. Vamos obter os dados e criar uma lista de pontos para ser executada a uma certa taxa, isso quer dizer que se queremos um som de dois segundos a uma taxa de 1kHz, precisaremos determinar 2000 pontos na nossa lista. Por padrão a taxa de amostragem usada no programa desenvolvido é 48kHz, por ser um padrão comumente adotado para áudio. Vemos na figura 6 um exemplo ilustrativo de como uma curva poderia ser obtida e transformada em uma lista de valores discretos.

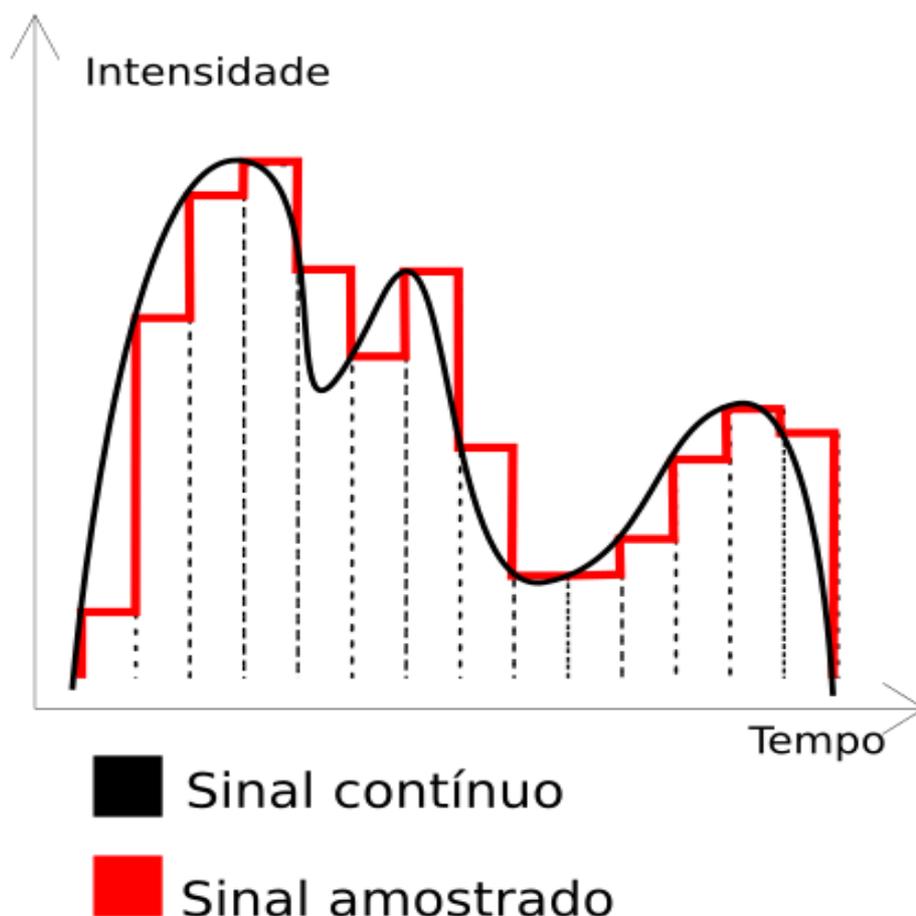


Figura 6: Exemplo de sinal contínuo e sinal amostrado. Perceba que o intervalo de tempo entre uma amostragem e a outra é constante. As linhas pontilhadas indicam o instante em que o sinal foi medido.

Para realizar a sonificação, seleciona-se a duração e a frequência resultante de interesse no som, ou seja, o som terá a frequência que escolhermos previamente. Seleciona-se também a taxa de amostragem (sample rate).

Em seguida, abrem-se os dados bidimensionais (com o tempo sendo a abcissa - observe que apesar disso poderíamos ter qualquer tipo de função de duas dimensões) no programa. Imaginemos que temos agora uma tabela com a listagem das medidas ambientais de entrada (por exemplo a temperatura de um determinado intervalo de tempo). Em um primeiro momento, queremos realizar o equivalente a uma audificação - conversão do valor numérico do dado diretamente para um valor proporcional em variação de pressão do ar.

Temos, então, os dados do período de interesse em uma tabela com um certo número de entradas (por exemplo, 30 pontos). Esses dados descrevem uma curva, visualizamos isso ao graficá-los em relação ao tempo. Essa curva pode ser convertida diretamente de maneira proporcional em pressão do ar, mas não queremos parar por aí, desejamos repetir essa curva várias vezes de forma que o som resultante tenha a frequência selecionada. Para que essa repetição não apresente saltos bruscos, usamos o que chamamos de "harmonizador linear": subtraímos do conjunto de dados uma reta que liga o início ao fim do conjunto de dados, dessa forma eles se conectam suavemente entre o começo e o fim.

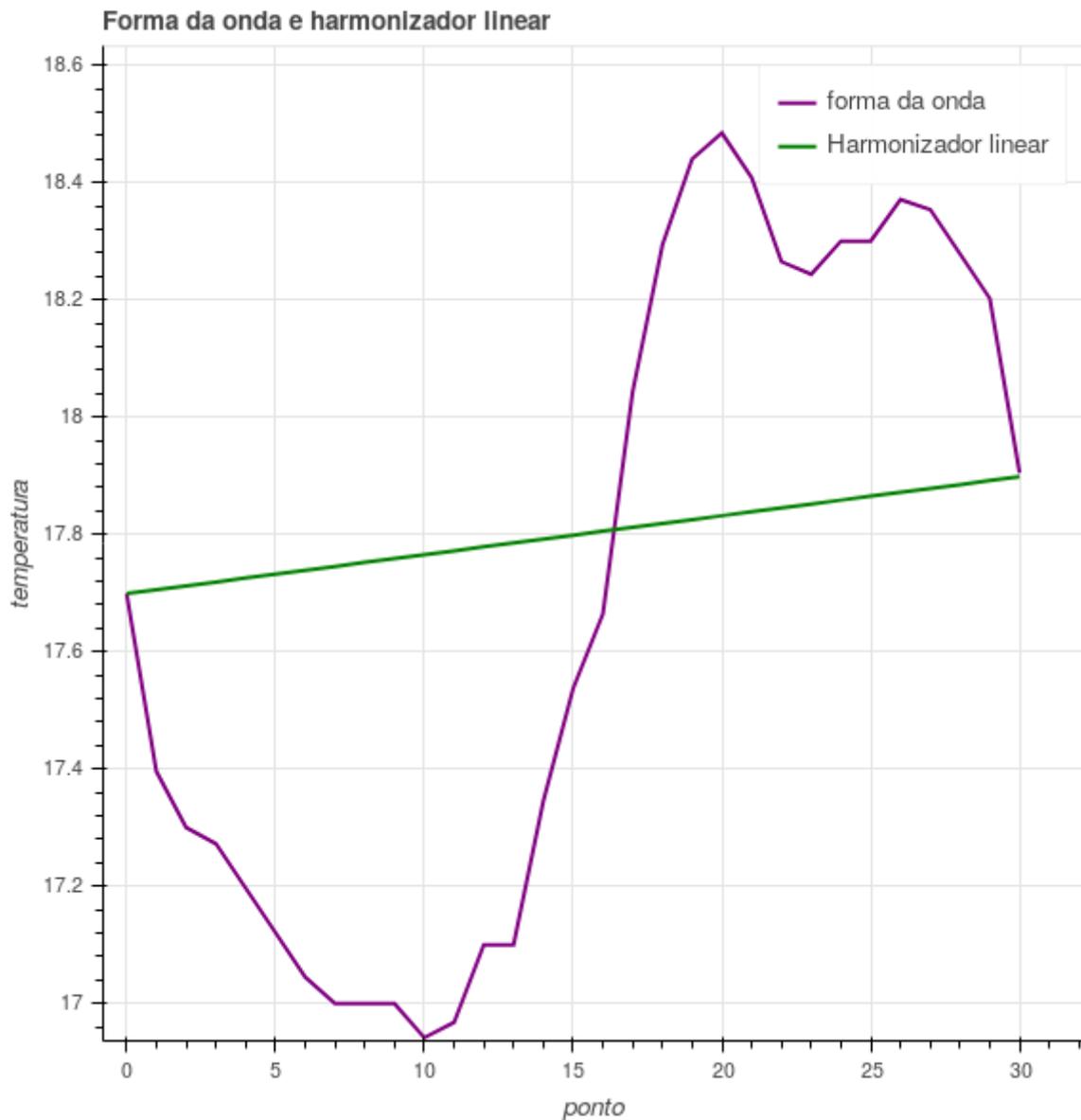


Figura 7: A imagem mostra um exemplo de dados de temperatura – a unidade da temperatura é Celcius, mas não é de relevância nesse momento – nesse exemplo temos a variação de temperatura do dia 13 de novembro de 2016 em São Paulo. Note que com o "harmonizador linear" o início e o fim dos dados obterão os valores zero e os outros valores serão subtraídos mantendo o aspecto geral da curva. O início dessa curva apresenta a temperatura à meia-noite, o tempo cresce para a direita a cada ponto, que representa um acréscimo de 24/30 horas.

Para que a concatenação dos dados resulte na frequência desejada os dados devem ser reproduzidos por um período bem definido (determinado pela frequência). Como vimos na definição de taxa de amostragem, para que os dados sejam reproduzidos por um período de tempo específico eles devem possuir o número certo de pontos (para exemplificar novamente podemos pensar que temos uma taxa de amostragem - hipotética, pois é muito baixa - de 100Hz e queremos um som de 20Hz e duração de 2 segundos. Dessa forma, temos que repetir 5 pontos quarenta vezes,

pois 5 pontos são equivalentes a um som de 0,05s de período, que repetido 40 vezes soma 2s). Por isso, fazemos um cálculo simples para saber quantos pontos devem haver em uma repetição:

sample_rate / frequência

=

número de pontos necessários para que o intervalo a ser representado tenha o período de interesse.

Com esse número, realizamos então uma interpolação dos dados de forma a obter exatamente a quantidade de dados necessárias para a reprodução naquele período de tempo. Ou seja, nossa tabela tinha, por exemplo, 100 pontos, mas precisamos de 120, então fazemos uma curva com o mesmo "formato", porém com 120 pontos (o contrário também ocorre, caso precisássemos de 80 pontos, poderíamos diminuir a quantidade de pontos, mas perdemos um pouco de detalhe).

O próximo passo é realizar a concatenação dos dados o número de vezes necessário para que o som tenha a duração esperada. Com isso, fazemos uma normalização para que o computador receba sempre valores entre -1 e 1 (que fisicamente representam um valor mínimo de tensão e máximo de tensão aplicado em uma caixa de som). Podemos observar na figura 8 que a curva inserida como dados de entrada serve para determinar a estrutura fina do som, pois escolhemos a frequência de antemão, percebe-se que as ondas têm o mesmo formato dos dados inseridos (os da figura 7) porém são repetidos diversas vezes e não existem descontinuidades.

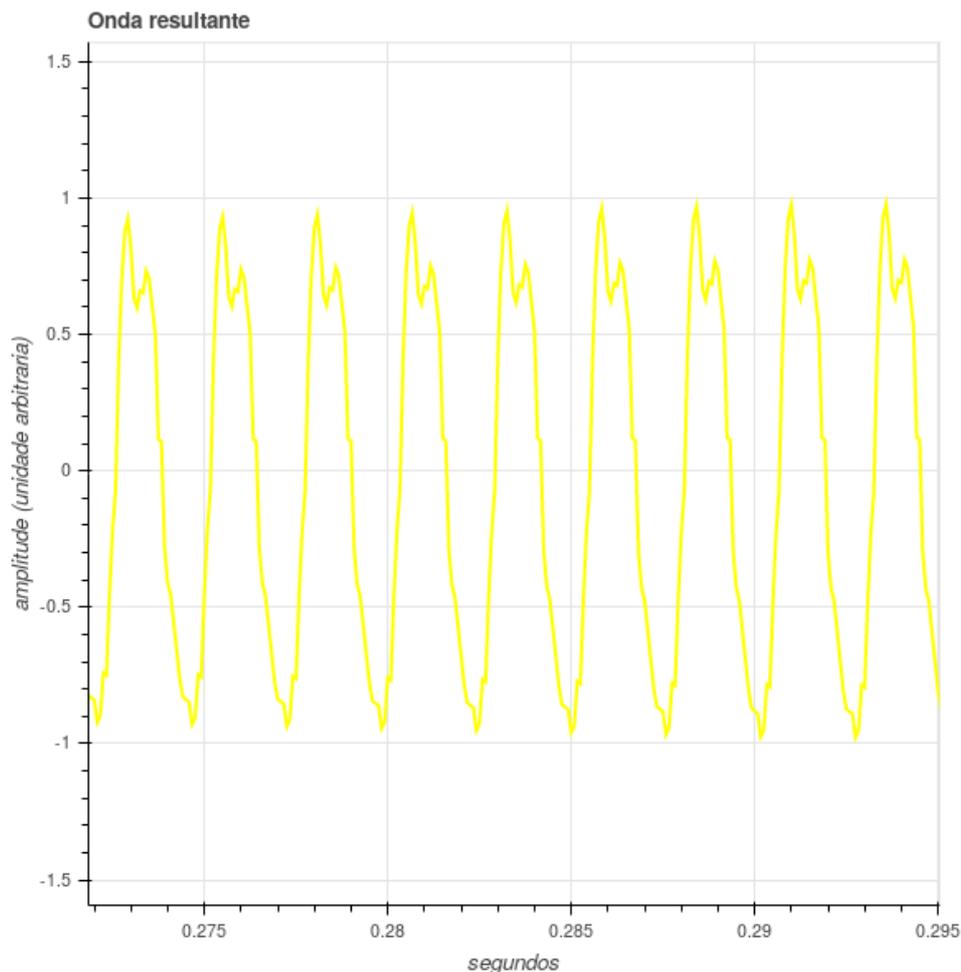


Figura 8: Na imagem vemos a mesma curva da temperatura do dia 13 de novembro de 2016 na cidade de São Paulo concatenada diversas vezes e com valores entre -1 e 1. Percebe-se na imagem que cada período tem duração de aproximadamente 0,0025s, correspondente a uma frequência de cerca de 400Hz.

O som resultante dessa etapa tem amplitude constante e costuma ser bastante desagradável. Para tornar a audição mais agradável (e possibilitar outras interpretações), fazemos agora o mapeamento proporcional da amplitude do som para o valor do dado. Ou seja, pegamos a mesma curva, obtida a partir dos dados como na figura 7, e construímos um envelope para o som com a duração total do áudio. Então os dados determinam essencialmente a forma da estrutura fina e do envelope. Dessa forma, o som começa abruptamente, pois o envelope não inicia de zero, mas passa pelo zero (pois o valor é normalizado entre zero e 1). Para que o áudio começasse menos bruscamente decidiu-se iniciar, por padrão, com o mínimo do envelope (o início é transladado para o final), mas essa é uma opção que pode ser selecionada no programa. O resultado desse processo pode ser visualizado na figura 9.

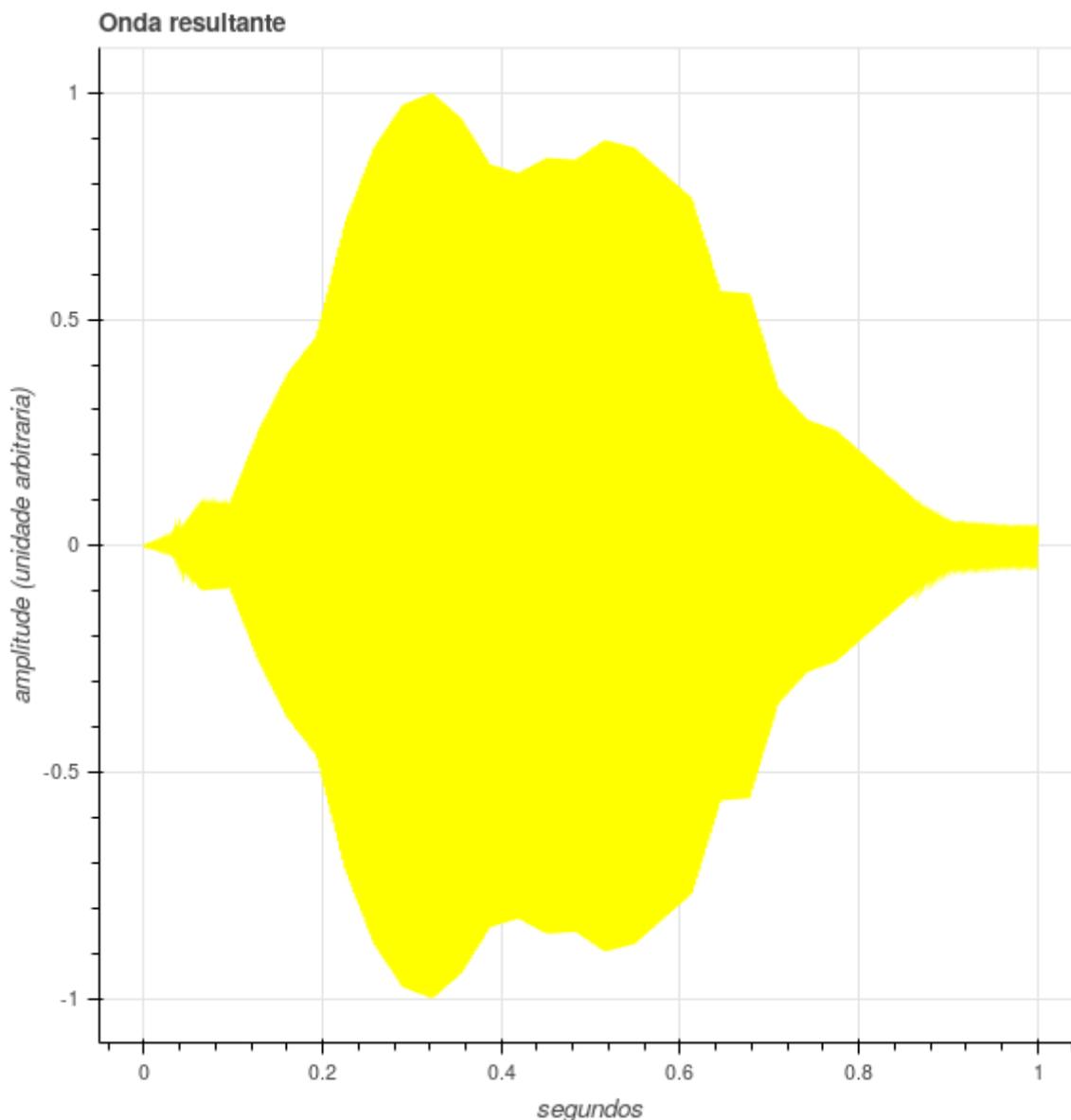


Figura 9: Onda final da sonificação dos dados de temperatura de São Paulo no dia 13 de novembro de 2016. Esse gráfico apresenta a duração completa do som, mostrando a variação da amplitude causada pelo envelope. Este é o mesmo gráfico da imagem 8, porém afastado para visualizarmos de zero a um segundo.

4.2.1 Sonificação de um dia

Com essa técnica de sonificação foi possível realizar a sonificação de diversos dias das sete estações meteorológicas selecionadas. Para efetuá-la, basta selecionar o dia de interesse no início da sonificação.

Foi feita a verificação de diversos dias durante o desenvolvimento do software para testar a estabilidade do funcionamento do programa e identificar medidas de interesse que fossem ilustrativas. Decidiu-se fazer a sonificação de dias devido à suposição de que certos dados ambientais variariam com um período de um dia, de forma que se obteriam uma curva de um período cíclico.

4.2.2 Sonificação da média anual

Verificados que certos dados realmente apresentam uma variação representativa em um dia, fez-se o cálculo da média horária de um ano. Ou seja, obtivemos um dia médio, de acordo com o horário.

Para realizar essa média criou-se uma lista na qual havia a entrada de uma janela de tempo, ou seja, entre meia-noite 23:59 há uma quantidade (selecionável) de janelas (por exemplo a "janela 1" entre 00:00 e 00:15, a "janela 2" entre 00:15 e 00:30... a "janela n-1" entre 23:30 e 23:45 e a "janela n" entre 23:45 e 23:59:59), então cada dia de medidas é percorrido de forma a inserir-se o valor da medida na janela para somar com os demais valores. Ao fim, divide-se cada janela pela quantidade de valores somados, obtendo um valor da média anual que apresenta a média do valor do dado para cada hora do dia.

Verificou-se a média anual para cada uma das estações selecionadas. Nota-se que, devido às variações que ocorrem com o decorrer do ano (ilustradas pelas estações que marcam quatro períodos no ano), os dados podem ser mais influenciados pela quantidade de sol num determinado dia do que pela hora do dia. O próximo passo, então, era fazer o "ajuste de crepúsculo".

4.2.3 Ciclo circadiano e o ajuste de crepúsculo

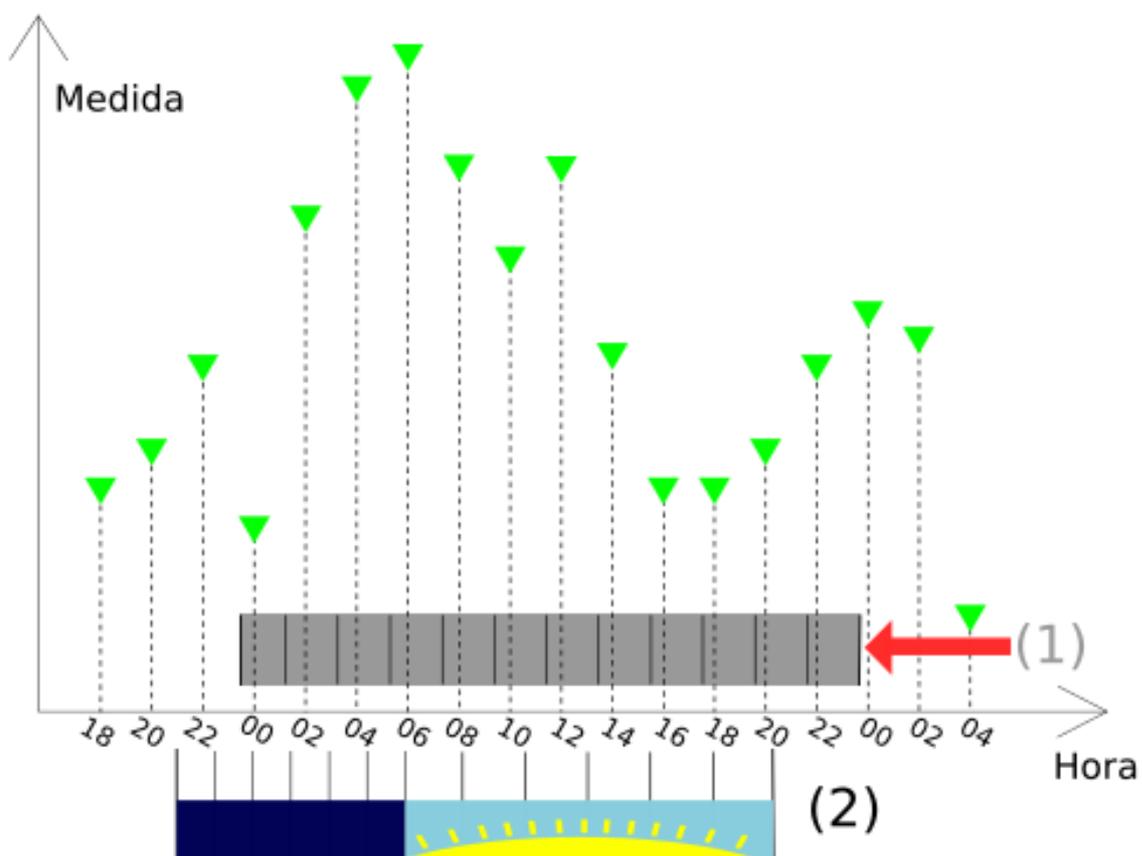
Os ciclos circadianos são os ciclos que acontecem em seres vivos e têm a duração de aproximadamente 24 horas. A palavra circadiano vem do latim e é uma combinação de "circa" (aproximadamente) e "diem" (dia). Esses ciclos mostram que há algum tipo de "relógio biológico", pois não precisam de informações sobre o horário para que ocorram [20].

Com inspiração na noção de ciclo circadiano, pensou-se em fazer o "ajuste de crepúsculo". Pensou-se que o ciclo de certos parâmetros ambientais segue um ritmo menos conectado ao horário do dia do que ao nascer e pôr do sol, que tem horários e durações que variam ao longo do ano sendo também de "cerca de um dia" (se compararmos dois nasceres do sol consecutivos com as 24h vemos que não encaixa perfeitamente devido à variação da posição aparente do Sol).

A ideia, nesse caso, é calcular a média anual, mas ao invés de fazer uma média dos horários de um dia, fazer uma média em relação ao nascer e pôr do sol. Essencialmente cada período (com luz ou sem luz do Sol) é dividido em um número de intervalos e é feita a média desses intervalos (por exemplo, se uma noite de inverno durou 13h, essas 13h são divididas entre os 25 intervalos, depois se uma certa noite durou 10h, essas dez horas são divididas igualmente entre os mesmos 25 intervalos).

Para realizar esse ajuste é feito o cálculo do instante de nascer do sol e pôr do sol (e depois entre esse pôr do sol e o próximo nascer) para um determinado dia, divide-se esse intervalo de tempo no número de janelas selecionado e somam-se as medidas daqueles instantes. Repete-se o procedimento para todos os dias a serem somados.

Com esse ajuste espera-se obter uma curva e, conseqüentemente, um som ainda mais característicos do local da estação meteorológica caso a medida siga de alguma forma uma influência devido ao nascer e pôr do sol. Na figura 10 podemos ver um exemplo hipotético de algumas medidas realizadas ao longo dos dias, vemos a posição de cada “vetor” ao longo do dia, cada caixinha representa uma janela nas quais as medidas englobadas por ela serão inseridas.



(1) Janelas representando as janelas da média horária anual.

(2) Janelas representando as janelas do ajuste de crepúsculo.

Figura 10: Nesta figura vemos a ilustração de dias com 12 janelas. As janelas da média horária anual são igualmente espaçadas, pois elas dependem da hora, esse dia começa um pouco antes da meia noite. Vemos nas janelas do ajuste de crepúsculo que o horário de pôr do sol foi calculado entre 20 e 22 horas para esse dia hipotético, com o nascer do sol quase às 6h. Percebe-se que metade das janelas no ajuste de crepúsculo são para a noite e a outra metade são para as horas iluminadas pelo sol, como entendemos com a ilustração abaixo das janelas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Softwares

Cabe lembrar que a versão mais atual de cada programa encontra-se no repositório do projeto¹⁵. Os códigos tratados no presente trabalho podem ser encontrados no apêndice.

5.1.1 Programa de audificação

Nome do arquivo: audificacao.py

O software desenvolvido é capaz de realizar a sonificação explicada no capítulo 4. Por ser baseado na audificação, manteve o nome de "audificacao.py". O script pode ser executado a partir do terminal ou através da interface Spyder.

Para saber sobre sua utilização, basta utilizar o comando "--ajuda". No terminal, o comando a ser executado na pasta raiz do projeto é:

```
$ python3 ./audificacao.py --ajuda
```

A resposta será a seguinte:

```
"Boas-vindas ao protótipo dos Instrumentos Musicais Sinestésicos.  
#####"
```

Os comandos disponíveis são:

```
--dia DD/MM/AAAA
```

```
-d DD/MM/AAAA
```

Determina o dia de medidas a ser sonificado.

```
--segundos _segundos_
```

```
-s _segundos_
```

Informa o tempo em _segundos_ do audio resultante.

```
--nota _indice-acustico_
```

```
-n _indice-acustico_
```

Informa, de G3 a B4, o _índice-acústico_ para determinar a frequência.

```
-e _estacao_
```

Informa o nome do arquivo que contém os dados que deseja-se audificar.

```
--ano
```

```
-a
```

Para utilizar a media anual de um dia (não precisa ser seguido por nenhum parametro).

15 O repositório do projeto encontra-se em <https://git.cta.if.ufrgs.br/emm/SMI>.

--sem-min-env

Para fazer com que o áudio gerado não inicie do mínimo do envelope (não precisa especificar nenhum parâmetro).

--graficos-interativos

-gi

Exibe os gráficos em uma página HTML interativa. Gera um arquivo muito mais pesado.

--crep

-c

Realiza sonificação a partir de dados anuais obtidos do ajuste de crepúsculo.

-t __tipo__

Indica o tipo de medida de interesse para sonificação.

Pode ser: temp_inst, pressao ou umid_inst

Caso algum dos parametros nao seja definido, o padrão será escolhido."

Com o texto de ajuda, as funcionalidades do programa ficam bastante evidentes. Os parâmetros que são executados por padrão, são (na versão mais recente do programa):

Parâmetro executado por padrão:
Dia 13/11/16 (sem nenhum motivo especial)
2s de duração (pois é preferível que o áudio seja curto)
G4 (uma nota bastante audível que já foi usada em diversas sonificações durante os testes)
Estação de Porto Alegre (arquivo "PortoAlegre.dat")
Tipo de dado é "temp_inst" (a temperatura medida naquele instante pela estação meteorológica).

Por padrão, é desativada:

Funcionalidades desativadas por padrão:
Realização de sonificação dos dados a partir do ajuste de crepúsculo (que simplesmente seleciona como dado de entrada o arquivo resultante do programa de ajuste de crepúsculo)
Sonificação a partir da média anual (que também apenas seleciona o arquivo da media anual como entrada)
Gráficos interativos (gerando, por padrão, um arquivo .png que é muito menor que o arquivo .html gerado, porém sem a capacidade de executar zoom, seleção de regiões específicas do gráfico, etc.).

Uma opção que foi selecionada por padrão, mas pode ser desativada com o comando "--sem-min-env" é o início da sonificação a partir do mínimo do envelope.

5.1.2 Programa de cálculo da média anual

Nome do arquivo: media_ano2.py

O nome do arquivo é "media_ano2" porque anteriormente vinha-se desenvolvendo o "media_ano", porém havia um erro que repetia-se independentemente das alterações realizadas no código. Os dados da média, quando sonificados, terminavam sempre com uma reta, o que era muito estranho e claramente não representava a média. Por esse motivo, resolveu-se fazer um programa com a mesma funcionalidade porém com um algoritmo muito mais robusto. O erro que ocorria permaneceu ocorrendo e verificou-se que o erro era um detalhe na interpolação do programa principal (que realiza essa interpolação para que o som tenha a frequência escolhida). Por possuir um algoritmo mais robusto, esse programa tornou-se o padrão.

O comando "python3 ./media_ano2.py --ajuda" tem como resposta:

"Programa capaz de realizar a média horária anual das medidas de entrada.

você deve selecionar uma estacao para realizar a media anual, caso contrário Porto Alegre será selecionada.

Exemplo:

```
media_ano2.py PortoAlegre
```

Os comandos extra disponíveis são:

-t `_tipo_`

Seleciona o tipo de dado para fazer a média.

Exemplo 'temp_inst', 'hora', 'umid_inst', 'pressao' (deve vir depois do nome da estação)"

Por padrão a grade tem 24 entradas, ou seja, o dia é dividido em 24 intervalos iguais, assim como é feito com os dados do INMET. Para alterar a quantidade de entradas da grade o código deve ser modificado (não é uma funcionalidade que espera-se que seja alterada). O programa salva um arquivo também na pasta "data" com o nome "media_{nome_da_estação}_ano_{tipo_de_dado}.dat" (no qual "nome_da_estação" é o nome que foi dado para o arquivo de dados de entrada e "tipo_de_dado" é um dos tipos de dado utilizados pelas estações do INMET). Esse arquivo contém 24 valores, que representam a média anual para cada intervalo do dia.

A diferença desse programa para o antigo, o "media_ano.py" é que o programa antigo não cria janelas com um número selecionável, ele toma os valores fornecidos pela estação meteorológica em ordem e faz a média. É um programa muito mais suscetível a erros caso algum dado esteja faltando ou esteja com o horário da medida um pouco diferente (e não exatamente o horário esperado, o que pode ocorrer para uma quantidade grande de dados por erros de "arredondamento").

5.1.3 Ajuste de crepúsculo

Arquivo: crepusculo.py

O comando de ajuda exibe uma mensagem semelhante à mensagem do programa que realiza a média anual, porém mostra que deve-se informar, juntamente com o nome da estação, a latitude e longitude da mesma, mostrando o exemplo:

```
"python3 ./crepusculo.py PortoAlegre --lat -30.053536 --lon -51.174766"
```

O programa tem um funcionamento semelhante ao da média anual, mas utiliza para início e fim dos intervalos a informação de nascer e pôr do sol para a estação meteorológica selecionada. Os cálculos são realizados utilizando a biblioteca "Ephem"¹⁶, uma biblioteca para Python3 que serve para calcular diversas informações astronômicas. Esses cálculos são realizados a partir das informações de latitude e longitude, então estão sujeitos à informação dada pelo usuário.

5.1.4 Programa auxiliar

Para tornar o código mais legível, desenvolveu-se um programa auxiliar para abrir os arquivos de dados e lê-los, organizar as datas das medidas em ordem cronológica, fazer um recorte dos dados para o período de interesse, etc. Esse programa encontra-se dentro da pasta "lib" no repositório e chama-se "gerenciaArquivos.py". O código desse programa encontra-se também disponível entre os apêndices.

5.2 Sonificações realizadas

Foram realizadas diversas sonificações que podem ser conferidas online na página do caderno de laboratório. No Apêndice D podemos ver os gráficos de 21 sonificações que foram publicadas no caderno de laboratório, nas próximas seções falaremos dos gráficos que mostram as características gerais da exibição visual e são de grande importância para as conclusões chegadas (as seções 5.2.1 a 5.2.3 falam somente dos gráficos que constam no Apêndice D). Gráficos como os exibidos são gerados automaticamente pelo software de sonificação, bem como as próprias sonificações. Foram registradas sete sonificações de dias¹⁷, sete das médias anuais¹⁸ (uma para cada estação meteorológica) e sete sonificações das estações com ajuste de crepúsculo¹⁹.

16 Confira a página oficial da biblioteca Ephem <http://rhodesmill.org/pyephem/>.

17 As 7 sonificações de dias foram publicadas dia 13 de dezembro de 2017 no endereço http://lief.if.ufrgs.br/~janluc/tdef/2017/12/13/audicao_online.html.

18 As médias anuais foram publicadas dia 20 de dezembro de 2017 no endereço http://lief.if.ufrgs.br/~janluc/tdef/2017/12/20/audicao_online3.html.

As figuras a seguir apresentam os gráficos das sonificações, cada sonificação é apresentada através de 4 gráficos, observe que o tempo da medida no primeiro gráfico está em unidades arbitrárias indicado por “u.a.”. O texto acima dos gráficos apresenta a informação da estação medida, o tipo de sonificação, a nota, duração e tipo de dado usado. No primeiro gráfico, da esquerda para a direita, vemos os dados importados (medidas de temperatura em Celsius, por exemplo) junto do harmonizador linear utilizado. No segundo gráfico, vemos o envelope transladado para que inicie do mínimo. No terceiro gráfico há a onda final que é convertida em som. Perceba que o gráfico da onda final é preenchido, pois tem uma frequência muito alta para que as linhas apareçam no gráfico, note também que o segundo e o terceiro gráficos têm unidade de segundos, que representa a duração do áudio gerado. O último gráfico apresenta o espectro de frequências obtido através do cálculo da Transformada de Fourier.

5.2.1 Sonificações de dias

No primeiro gráfico da figura 17 do apêndice D, vemos a medida de temperatura da estação meteorológica de Porto Alegre no dia 5 de maio de 2017 e o harmonizador linear utilizado, essa sonificação foi realizada na nota D4. Na figura 20 vemos gráficos do dia 05 de setembro de 2017, nesse dia a temperatura manteve-se decrescente ao longo do dia.

As sonificações de dias, disponíveis para conferência online, realizadas são mostradas na tabela a seguir (dados das medidas de temperatura).

Estação	Dia	Nota	Duração	Figura
Porto Alegre	05/05/2017	D4	3s	17
Porto Alegre	05/05/2017	E4	3s	18
Porto Alegre	05/05/2017	G4	3s	19
Porto Alegre	05/09/2017	G4	3s	20
São Paulo	05/01/2017	G4	3s	21
São Paulo	05/04/2017	G4	3s	22
São Paulo	05/05/2017	G4	3s	23

5.2.2 Sonificações das médias anuais

Para cada estação de coleta de dados foi feito o download de aproximadamente um ano de dados (como o INMET não fornece exatamente 365 dias, há uma pequena variação em alguns conjuntos de dados). A partir disso, pôde-se somar os dias, preservando os horários e dividir pelo número total de dias. Ou seja, se temos um conjunto de dois dias e em um dia às 16:25h fez 28 °C e

19 As sonificações com ajuste de crepúsculo foram publicadas dia 18 de dezembro de 2017 no endereço http://lief.if.ufrgs.br/~janluc/tdef/2017/12/18/audicao_online2.html.

no dia seguinte às 16:25h fez 24 °C, serão somados os dias e no ponto que acolhe o horário das 16:25h resultará o valor de 26 °C.

Note que a divisão ocorre em forma de intervalos de tempo arbitrários. Nas sonificações das figuras 24 a 30, o dia foi dividido em 25 seções (e não em 24 como estamos acostumados) - como as medidas do INMET são realizadas de hora em hora, qualquer valor maior que 24 não deverá fazer diferença na média (valores menores também não fariam, apenas tornariam a amostragem mais “grosseira” do que a realizada pelo INMET).

5.2.3 Sonificações dos ajustes de crepúsculo

Chamamos de “ajuste de crepúsculo” o cálculo da média dos dados de acordo com o horário de nascer e pôr do sol. Somam-se os dias de acordo com o tempo que passou desde que o sol nasceu até se pôr e o tempo que passou desde que se pôs até nascer. Assim, obtemos curvas diferentes da média dos dados que variam com a hora. Cada dia é “esticado” ou comprimido para caber entre o nascer e pôr do sol. Os gráficos referentes a essas sonificações estão no apêndice D, nas figuras 31 a 37.

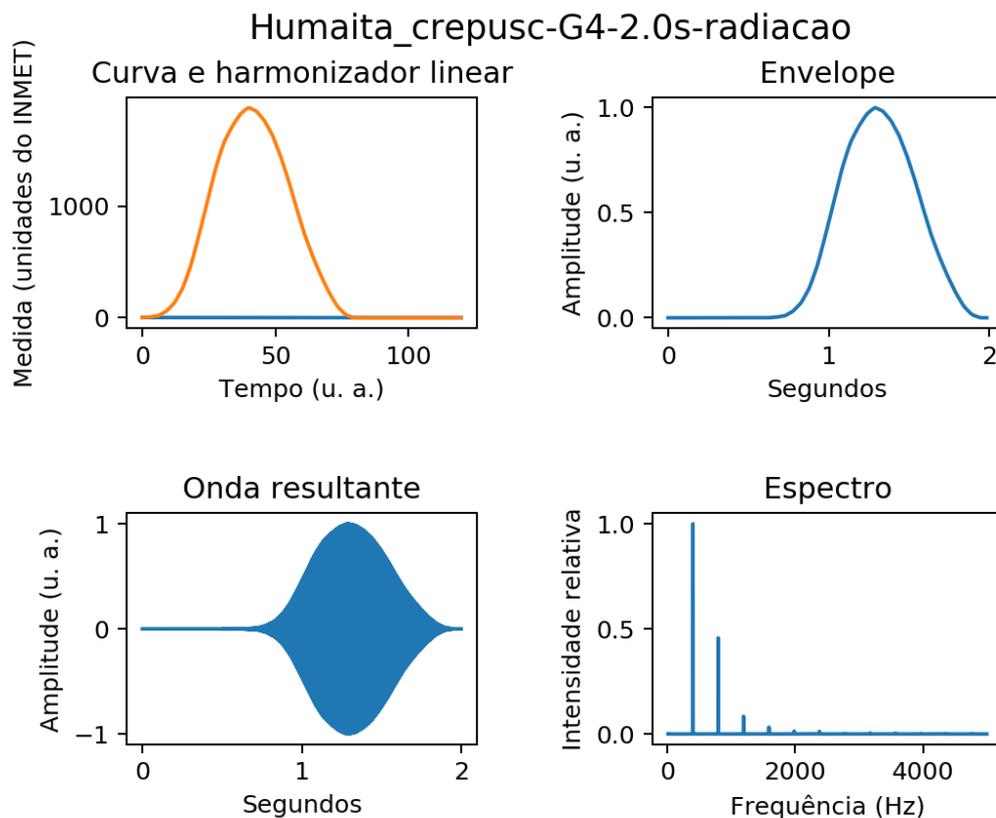


Figura 11: A figura mostra os gráficos referentes às medidas anuais de radiação da estação Humaitá, que fica na Amazônia. Essas medidas são corrigidas pelo ajuste de crepúsculo. No gráfico do envelope nota-se que elevação da curva foi transladada para o final, pois essa sonificação foi construída com opção de iniciar o envelope a partir do mínimo.

5.2.4 Sonificações a partir de outros dados

Nas abordagens vistas nas seções 5.3.1 a 5.3.3 vimos apenas gráficos e sonificações resultantes a partir de dados de temperatura, a medida “temp_inst” fornecida pelas estações meteorológicas. Poderíamos realizar o mesmo com a velocidade do vento, a umidade, a pressão, radiação, etc. Algumas análises são triviais, como o ajuste de crepúsculo (que vemos na figura 11) e média anual (como na figura 12) para a medida de radiação.

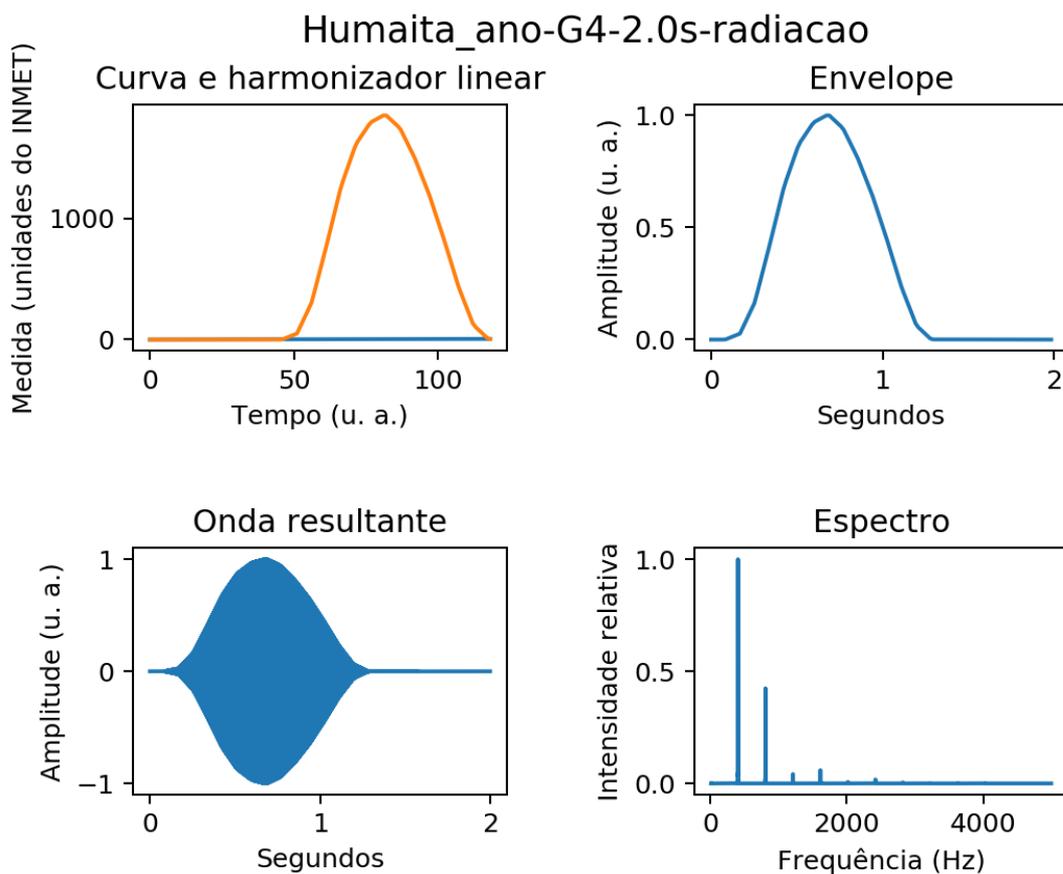


Figura 12: A figura mostra os gráficos referentes à sonificação da média horária anual de radiação da estação Humaitá, que fica na Amazônia. Perceba que essa curva é mais alargada que a curva da figura 11.

Outras mostram-se mais instáveis do que a medida de temperatura, como a medida de pressão (que, ao olharmos os dias de medidas, vemos que elas são bem menos “comportadas”). Mas que apresentam médias bem definidas. Vejamos, nas figuras 13 a 16, gráficos das médias (média anual e ajuste de crepúsculo) para Florianópolis e Patos.

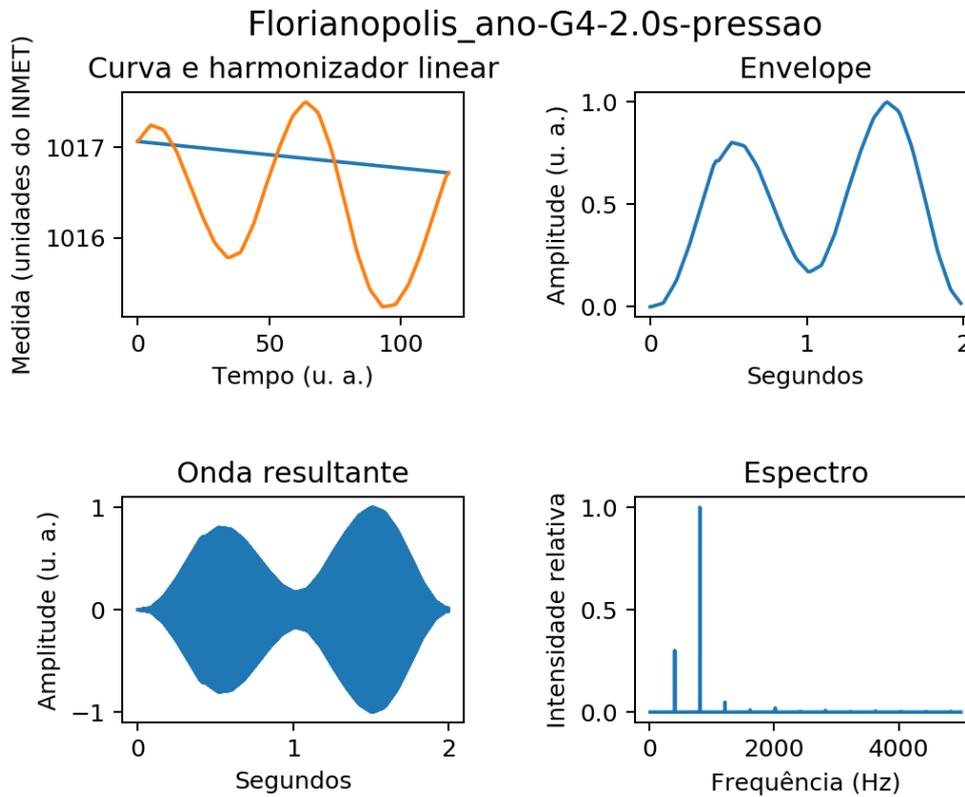


Figura 13: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da pressão de Florianópolis.

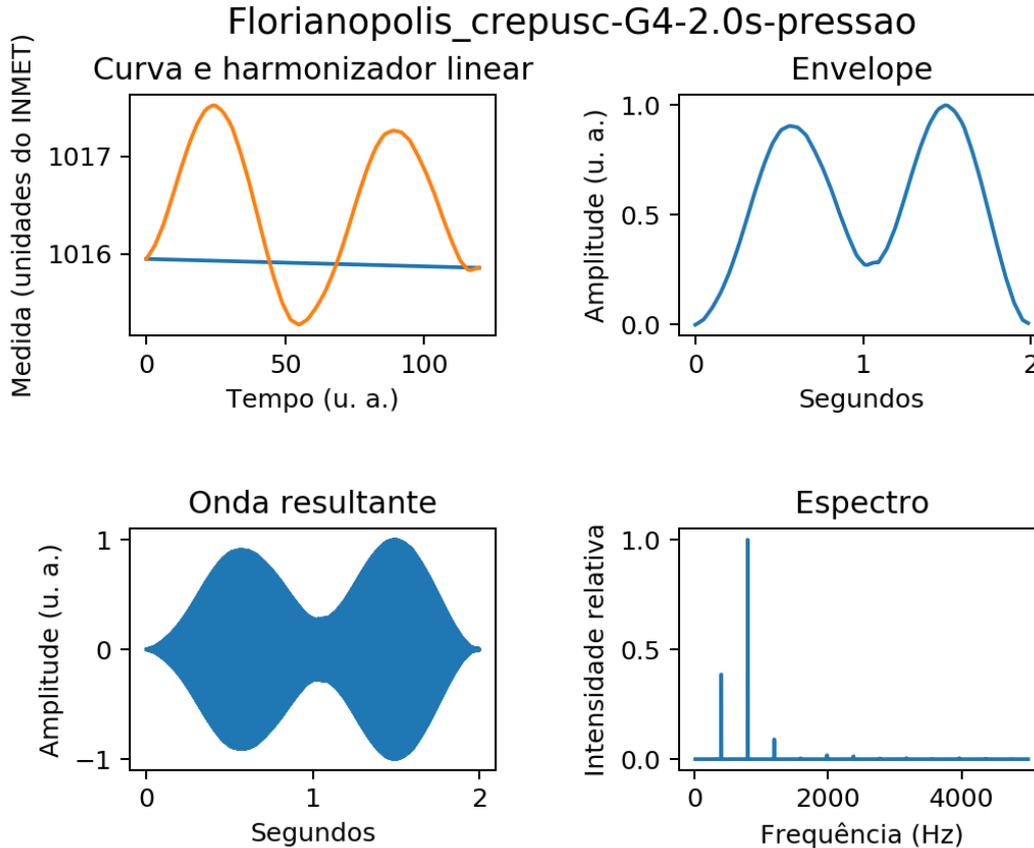


Figura 14: Gráficos referentes à sonificação da média anual com ajuste de crepúsculo da pressão de Florianópolis.

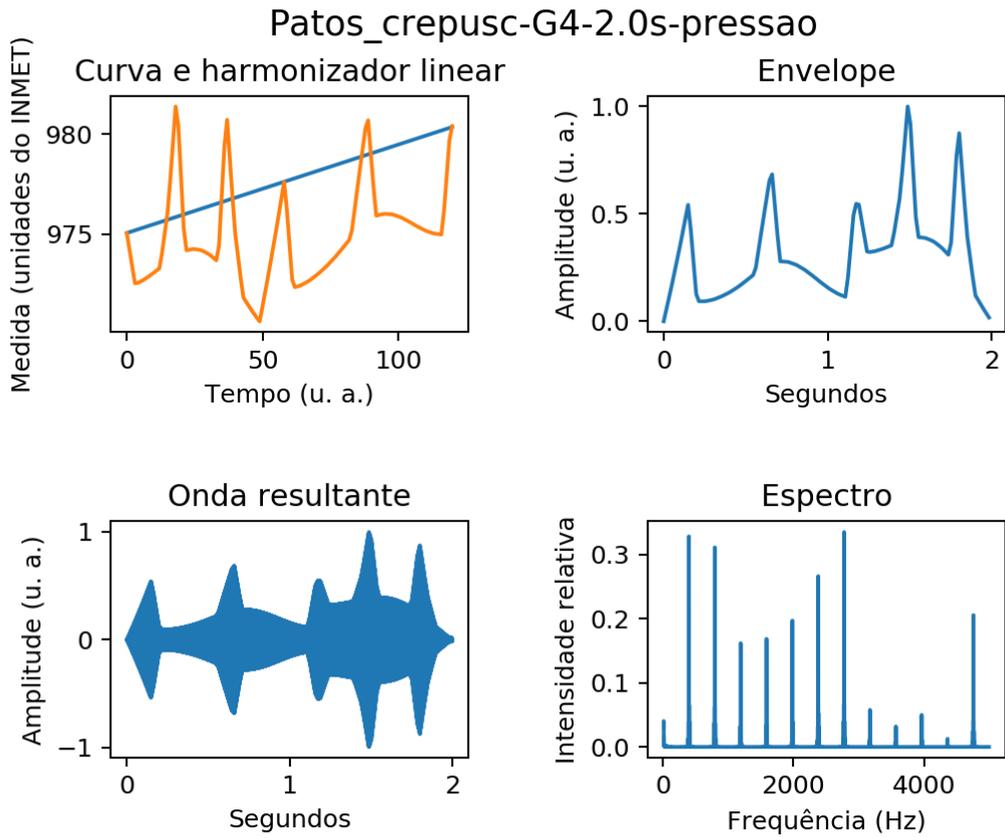


Figura 15: Gráficos referentes à sonificação da média anual com ajuste de crepúsculo da pressão de Patos.

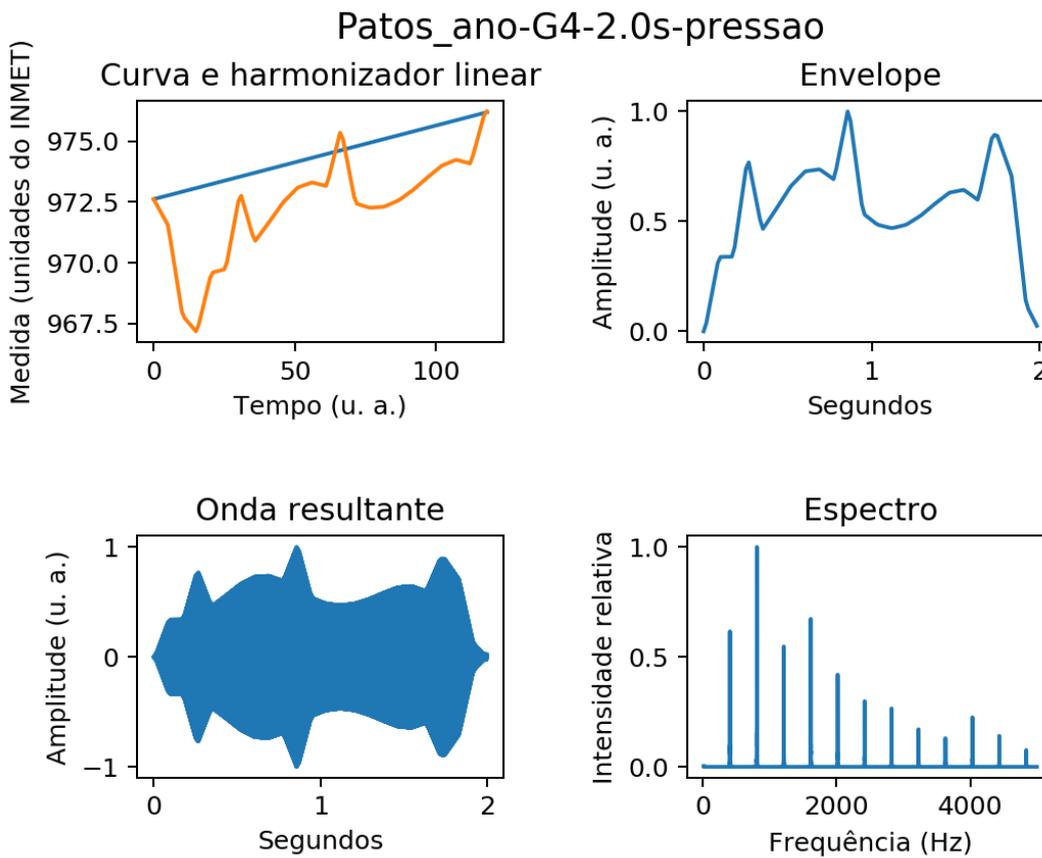


Figura 16: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da pressão de Patos.

6. CONCLUSÕES

Nota-se que em vários casos os áudios são muito semelhantes. É natural que, para fazer interpretações mais profundas, deve-se haver uma exposição mais longa às sonificações para que o ouvinte possa habituar-se a esse tipo de representação de dados. Por esse motivo, é interessante que crie-se, futuramente, a possibilidade de habituação aos dados com uma plataforma mais robusta de obtenção dos dados e sonificação ainda mais “automática”. Felizmente, o presente trabalho dá as ferramentas iniciais para que a exploração das potencialidades dos Instrumentos Musicais Sinestésicos seja continuada através da exibição dos resultados a um público mais amplo. Porém, é necessário que se realize um esforço especificamente para a exposição das sonificações através de algum aparelho ou técnica adequada. Esse aparelho ou técnica podem ser obtidos com uma certa facilidade devido ao fato de o software ser publicamente acessível e documentado.

Apesar de os dados do INMET serem publicamente acessíveis “para toda a sociedade”, existe a necessidade de preenchimento de um “captcha”, o que dificulta a realização de obtenção automatizada desses dados e isso deverá ser algo a ser trabalhado no desenvolvimento da exibição dos dados através do som.

Com as sonificações realizadas, pôde-se verificar que muitos dados realmente seguem ciclos de “aproximadamente um dia”, como se supôs inicialmente (verificado para temperatura, pressão, umidade e radiação) e percebe-se que o ajuste de crepúsculo não resulta em diferença significativa na sonificação das médias de temperatura. Apesar disso, percebe-se que as temperaturas têm um comportamento diferente na região da Caatinga do que na Amazônia e nas cidades, porém em uma primeira análise, não se pode dizer muito a respeito do som executado para fazer essas comparações (o que dá o *insight* ainda são os gráficos).

Um dos efeitos do ajuste de crepúsculo pode ser claramente visualizado nas figuras 11 e 12, da sonificação realizada com os dados da radiação, pois apesar de ser “trivial” (pois durante o período iluminado do dia há muita radiação e no período escuro há pouquíssima), percebe-se que com o ajuste de crepúsculo a curva fica mais estreita, como esperado. Observa-se também, com o ajuste de crepúsculo, que algum fenômeno foi revelado a partir dos dados de medidas de pressão da estação Patos (figura 16) que apresentaram diversos picos que podem ser visualizados e ouvidos. A interpretação a respeito do significado desses picos foge das intenções que temos aqui, mas podemos verificar que são picos que dependem do tempo de presença do Sol (ou são algum erro inesperado no tratamento dos dados).

Os dados selecionados apresentaram diferenças, às vezes sutis, entre os três grupos selecionados (Caatinga, Amazônia e cidades) e semelhanças entre si, fato que colaborou bastante para a comparação dos efeitos das sonificações.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 – Avaliação das sonificações dos Instrumentos Musicais Sinestésicos

Uma avaliação séria das sonificações geradas por si só exigem uma situação bastante controlada, com um estabelecimento de metodologia apropriada sobre como esses estímulos serão apresentados para os sujeitos, quais dados serão obtidos dessas exposições e quais processos estatísticos serão empregados na avaliação desses dados.

No *The Sonification Handbook* são apresentados alguns testes para avaliação das sonificações, entre eles, apresentam-se entre os mais adequados para esse tipo de sonificação os seguintes [11].

Testes de discriminação: É importante determinar se as pessoas conseguem discriminar entre os sons selecionados e mensurar os limites em que esses sons são distinguíveis. Nesse tipo de teste os participantes escutam sequencialmente dois estímulos (A e B) que são seguidos por um terceiro estímulo (X). Pergunta-se aos participantes se o som X é A, B ou nenhum dos dois.

Teste de identificação: Servem para verificar a capacidade de reconhecer e classificar os estímulos sonoros, em geral apresenta-se como resultado o percentual de pessoas que conseguiram identificar certo estímulo. Nesse tipo de teste os participantes escutam o áudio e respondem perguntas de forma escrita ou selecionam as respostas a partir de uma lista, muitas vezes permite-se que o participante execute diversas vezes o som.

Gradação de atributos: Determinam-se os atributos a serem graduados de acordo com a sonificação realizada e com o interesse de aplicação, como o volume percebido, o quão agradável é o som, etc. (os atributos devem ser bem definidos e compreendidos pelos participantes) então os participantes escolhem em uma escala para que se estabeleçam valores de cada atributo para cada som.

7.2 – Sintetizador: Implementação dos mecanismos de sonificação em teclado

Outro trabalho muito bem definido seria o desenvolvimento de um sintetizador que executa os sons gerados pela sonificação. Com esse sintetizador deve-se poder escolher uma estação, um tipo de dado e alguns parâmetros e então executar as sonificações para diversas notas diferentes em teclas diferentes. É ainda mais interessante que o sintetizador obtenha os dados atualizados diretamente pela internet e que seja possível selecionar diversos parâmetros em algum tipo de painel de controle. Deve se tornar um produto bastante robusto e simples de usar.

7.3 – Integração com projetos de ciência cidadã

Para dar mais visibilidade a ambos os projetos, pode-se realizar uma aplicação a projetos de ciência cidadã como o projeto das Estações Meteorológicas Modulares²⁰ e desenvolver um projeto como o WeatherPlayer²¹, que registrava dados ambientais do campus da Universidade de Brighton e realizava o streaming em tempo real pela internet ou como o estudo de caso de sonificação espacial, da parceria entre o Dartmouth College e a Universidade de Helsinki [21].

20 Conheça o projeto das Estações Meteorológicas Modulares na wiki de documentação do projeto <http://cta.if.ufrgs.br/projects/estacao-meteorologica-modular/wiki/Wiki>.

21 Owain Rich publicou a página “WeatherPlayer” originalmente em <http://www.weatherplayer.com/>, mas ela já não encontra-se acessível nesse endereço. Entrei uma cópia dessa página acessível no Web Archive em: <http://web.archive.org/web/20040615053220/http://www.weatherplayer.com:80/pages/how/about.html>

8. REFERÊNCIAS

- [1] GITELMAN, Lisa; JACKSON, Virginia. Introduction. In: GITELMAN, Lisa (Ed.). **“Raw data” is an oxymoron**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2013. p. 1-14.
- [2] CYTOWIC, R.E. **Synesthesia: A Union of the Senses**. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2002.
- [3] PHILLIPS, Melissa L. **What is Synesthesia?** Disponível em : <https://faculty.washington.edu/chudler/syne.html>>. Acesso em 11 jan. 2018
- [4] GRUS, Joel. **Data Science from Scratch**. Sebastopol, California: O’Reilly, 2015.
- [5] DUHIGG, Charles. **How Companies Learn Your Secrets**. Nova Iorque: The New York Times Magazine, 16 fev. 2012. Disponível em: <http://www.nytimes.com/2012/02/19/magazine/shopping-habits.html>>. Acesso em 20 dez. 2017.
- [6] RUDDER, Christian. **The Best Questions For A First Date**. 19 abr. 2011. Disponível em: <https://theblog.okcupid.com/the-best-questions-for-a-first-date-dba6adaa9df2>>. Acesso em: 15 jan 2018. Blog: OkCupid.
- [7] HOFLEITNER, Aude. **Coordinated Migration**. Facebook Data Science, 17 dez. 2013. Disponível em: <https://www.facebook.com/notes/facebook-data-science/coordinated-migration/10151930946453859>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- [8] PEZZI, Rafael P. **Synesthetic Musical Instruments**. 2017. Disponível em: http://lief.if.ufrgs.br/~pezzi/synesthetic_musical_instruments/>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- [9] HERRMANN, Thomas; HUNT, Andy; NEUHOFF, John G. Introduction. In: John G. HERRMANN, Thomas; HUNT, Andy; NEUHOFF, John G. (Eds.). **The Sonification Handbook**. Berlim: Logos Verlag, 2011. p. 1-7.
- [10] HERRMANN, Thomas; HUNT, Andy; NEUHOFF, John G. (Eds.). **The Sonification Handbook**. Berlim: Logos Verlag, 2011. p. i.
- [11] BONEBRIGHT, Terri L.; FLOWERS, John H. Evaluation of Auditory Display. In: John G. HERRMANN, Thomas; HUNT, Andy; NEUHOFF, John G. (Eds.). **The Sonification Handbook**. Berlim: Logos Verlag, 2011. p 111-145.
- [12] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica**. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [13] PLACK, Christopher J. **The sense of Hearing: Second Edition**. Nova Iorque: Psychology Press, 2014.
- [14] SMITH, Zachary M.; DELGUTLE, Bertrand; OXENHAM, Andrew J. Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. **Nature**, v. 416, n. 6876, p. 87-90, 7 mar. 2002.

Disponível em: < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2268248/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

[15] WALKER, Bruce; NEES, Michael A. Theory of Sonification. In: John G. HERRMANN, Thomas; HUNT, Andy; NEUHOFF, John G. (Eds.). **The Sonification Handbook**. Berlim: Logos Verlag, 2011. p. 9-39.

[16] ALBAGLI, Sarita. Ciência Aberta em Questão. In: ALBAGLI, Sarita; MACIEL, Maria L.; ABDO, Alexandre H. (Orgs.). **Ciência aberta, questões abertas**. Rio de Janeiro: UNIRIO, 2015. p. 9-26.

[17] MACHADO, Jorge. Dados abertos e ciência aberta. In: ALBAGLI, Sarita; MACIEL, Maria L.; ABDO, Alexandre H. (Orgs.). **Ciência aberta, questões abertas**. Rio de Janeiro: UNIRIO, 2015. p. 201-228.

[18] MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instituto Nacional de Meteorologia. **Nota Técnica n. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET - Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em 11 jan. 2018. p. 3

[19] TOHYAMA, Mikio. **Waveform Analysis of Sound**. Tóquio: Springer Japan, 2015.

[20] VITATERNA, Martha H.; TAKAHASHI, Joseph S.; TUREK, Fred W. Overview of circadian rhythms. **Alcohol Research and Health**. v. 25, n. 2, p. 85–93, 2001. Disponível em: <<https://pubs.niaaa.nih.gov/publications/arh25-2/85-93.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

[21] CHILDS, Edward; PULKKI, Ville. Using Multi-Channel Spatialization in Sonification: A Case Study With Meteorological Data. **Proceedings of the 2003 International Conference on Auditory Display**. Boston, EUA. July, 2003. Disponível em: <<http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2003/paper/47%20Childs.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

APÊNDICE A – Código do software “audificacao.py”

```
# trecho para funcionar no spyder:
import sys
if len(sys.argv[0]) < 1:
    import os
    home = os.path.expanduser("~")
    os.chdir(str(home + "/doGit/SMI/"))
    print("Parece que você não está executando o código a partir de uma shell convencional.")

import numpy as np
import lib.gerenciaArquivos as ga

# Detalhes do input e output

# Padrões:
inicia_do_minimo = True
consolidados = False
crepusculo=False
bokeh_graficos = False
nota = "G4"
estacao = 'PortoAlegre'
tipo="temp_inst"
sample_duration = 2.0 # seconds
sample_rate = 48000 # Hz
# Ano, mes, dia, hora, minuto, segundo
sel_Start = [2016, 11, 13,00,00,00] # Inicio do periodo de interesse
sel_End = [2016, 11, 13,23,59,59] # Fim do periodo de interesse
dia="nao-definido"

#####
##### Aceitando input do usuário no terminal #####
#####

if "--ajuda" in sys.argv:
    print("Boas-vindas ao protótipo dos Instrumentos Musicais
Sinestésicos.\n#####\n")
    print("Os comandos disponíveis são:\n")
    print("--dia DD/MM/AAAA\n-d DD/MM/AAAA\n    Determina o dia de medidas a ser
sonificado.\n")
    print("--segundos _segundos_\n-s _segundos_\n    Informa o tempo em _segundos_ do
audio resultante.\n")
    print("--nota _indice-acustico_\n-n _indice-acustico_\n    Informa, de G3 a B4, o _índice-
acústico_ para determinar a frequência.\n")
    print("-e _estacao_ \n    Informa o nome do arquivo que contém os dados que deseja-se
audificar.\n")
```

```

    print("--ano \n-a \n    Para utilizar a media anual de um dia (não precisa ser seguido por
nenhum parametro).\n")
    print("--sem-min-env \n    Para fazer com que o áudio gerado não inicie do mínimo do
envelope (não precisa especificar nenhum parâmetro).\n")
    print("--graficos-interativos \n-gi \n    Exibe os gráficos em uma página HTML interativa.
Gera um arquivo muito mais pesado.\n")
    print("--crep \n -c \n    Realiza sonificacao a partir de dados anuais obtidos do ajuste de
crepusculo.z\n")
    print("-t __tipo__ \n    Indica o tipo de medida de interesse para sonificacao.\nPode ser:
temp_inst, pressao ou umid_inst\n")
    print("\n\nCaso algum dos parametros nao seja definido, o padrão será escolhido.\n")
    sys.exit(0)

if "--sem-min-env" in sys.argv:
    inicia_do_minimo = False
if "--ano" in sys.argv) or ("-a" in sys.argv):
    consolidados = True
if "--crep" in sys.argv) or ("-c" in sys.argv):
    crepusculo = True
if "--nota" in sys.argv):
    nota = sys.argv[sys.argv.index("--nota") + 1]
elif "-n" in sys.argv:
    nota = sys.argv[sys.argv.index("-n") + 1]
if "-e" in sys.argv):
    estacao = sys.argv[sys.argv.index("-e") + 1]
if "--data" in sys.argv:
    dia = sys.argv[sys.argv.index("--data") + 1]
if "-d" in sys.argv:
    dia = sys.argv[sys.argv.index("-d") + 1]
if "-t" in sys.argv:
    tipo = sys.argv[sys.argv.index("-t") + 1]
if ("-d" in sys.argv) or ("--dia" in sys.argv):
    sel_Start[0] = int(dia[-4:])
    sel_Start[1] = int(dia[3:-5])
    sel_Start[2] = int(dia[:2])
    sel_End[0] = sel_Start[0]
    sel_End[1] = sel_Start[1]
    sel_End[2] = sel_Start[2]

if "--duracao" in sys.argv:
    sample_duration = float(sys.argv[sys.argv.index("--duracao") + 1])
if "-s" in sys.argv:
    sample_duration = float(sys.argv[sys.argv.index("-s") + 1])
if "--graficos-interativos" in sys.argv) or ("-gi" in sys.argv):
    bokeh_graficos = True

input_data = './data/{}.dat'.format(estacao)
local_resultados = "./Sonificacoes_e_graficos/"

```

```

out_filename = "{}-{}_{ }-{}-{}s-{}".format(estacao,sel_Start[0],sel_Start[1], sel_Start[2], nota,
sample_duration,tipo)

#####
##### Propriedades do audio de saida #####
##### Duracao, samplerate e nome #####
#####

## afinacao
key = { 'G2':98.00,
'G3':195.99,
'A3':220.00,
'B3':246.94,
'C4': 261.63,
'D4': 293.66,
'E4': 329.63,
'F4': 349.23,
'G4': 392.00,
'A4': 440.00,
'B4': 493.88
}

freq = key[nota]

#####
##### Obtendo os dados da estacao #####
#####

if consolidados:
    estacao = estacao + "_ano"
    temp = ga.abre1d("./data/media_{ }_{ }.dat".format(estacao, tipo))
    data = np.arange(len(temp))
    out_filename = "{}-{}-{}s-{}".format(estacao, nota, sample_duration, tipo)
elif crepusculo:
    temp = ga.abre1d("./data/ajuste_crepusculo_{ }_ano_{ }.dat".format(estacao, tipo))
    data = np.arange(len(temp))
    out_filename = "{}_crepusc-{}-{}s-{}".format(estacao, nota, sample_duration, tipo)
else:
    data, temp = ga.obtem_inmet(input_data, tipo)
    data, temp = ga.recortaDatas(data, temp, sel_Start, sel_End)

# Normalização e harmonização

#####
##### Operando nos dados para que eles fiquem do tamanho certo #####
#####

snd_data = temp
pontos_dia = sample_rate / freq #Quantidade de pontos que um dia deve ter para que possua a frequencia
desejada com a samplerate definida.

def normaliza(dados):
    ""
    Toma a array dados e retorna uma array que tem a mesma forma mas valores entre -1 e 1.

```

```

'''
normalizado = (dados*2)/(max(dados)-min(dados))
normalizado = normalizado - min(normalizado) - 1
return normalizado

# Interpolacao dos dados para o numero de pontos desejado. Pois queremos que snd_data seja do tamanho de
pontos_dia.

fator_de_interpolacao = 1.0*len(snd_data)/pontos_dia # Determina se a quantidade de pontos no periodo deve
aumentar ou diminuir.

# o codigo np.arange(0,len(snd_data),fator_de_interpolacao)
# cria um array contendo uma quantidade de pontos equivalente a "pontos_dia", mas que termina em
len(snd_data).
# A linha a seguir simplesmente faz com que snd_data permaneça com a mesma "forma" mas com o numero de
pontos desejados:

if fator_de_interpolacao < 1.0:
    novo_eixo_x = np.arange(0,len(snd_data)-1+fator_de_interpolacao,fator_de_interpolacao)
else:
    novo_eixo_x = np.arange(0,len(snd_data),fator_de_interpolacao)

snd_data = np.interp(novo_eixo_x, range(len(snd_data)), snd_data)

print ("Numero de pontos necessarios para esta frequencia: {}".format(pontos_dia))
print ("Numero de pontos obtidos na interpolacao: {}".format(len(snd_data)))

# Harmonizador linear: Cria linha reta que liga o primeiro ao ultimo valor dos dados.

lin_harmonizer=np.arange(len(snd_data)) / len(snd_data)*( snd_data[-1] - snd_data[0] ) + snd_data[0]

antes_do_lin_harm = snd_data

snd_data = snd_data - lin_harmonizer

snd_data = normaliza(snd_data)

#####
##### Concatenando a estrutura fina para #####
##### que ela tenha a duracao desejada #####
#####

estrutura_fina = []

numero_de_repeticoes = int(sample_duration*sample_rate/len(snd_data))
for concat in range(numero_de_repeticoes):
    estrutura_fina = np.concatenate([estrutura_fina,snd_data])

# Criando envelope

fator_de_interpolacao2 = 1.0*len(snd_data)/len(estrutura_fina)

envelope = (snd_data + 1)/2. # queremos que o envelope inicie no zero e va ate 1, mas mantenha a forma de
snd_data

```

```

# Fazendo o envelope iniciar do mínimo:
# O que o código a seguir faz é um "slicing" localizando o ponto no qual o envelope tem o mínimo e
reorganizando a lista.
# É menos elegante encontrar o mínimo e concatenar elementos de np.array do que de listas simples.
if inicia_do_minimo:
    envelope = np.concatenate( (envelope[np.argmin(envelope):], envelope[:np.argmin(envelope)]), axis=0)

envelope_small = envelope # Salva variavel com valor do envelope para realizar plot com arquivo resultante
menor.
envelope = np.interp(np.arange(0,len(envelope),fator_de_interpolacao2), range(len(envelope)), envelope) #
envelope é do tamanho da estrutura fina e da forma de snd_data
onda_final = envelope*estrutura_fina

#####
##### Calculando o espectro de frequencias #####
#####
fft = np.fft.rfft(onda_final)
intensidades = fft*(np.conj(fft))
intensidades = intensidades.real
freqs = np.fft.fftfreq(len(onda_final), 1/sample_rate)
### normalizando as intensidades ###
intensidades = np.sqrt(intensidades)
intensidades = intensidades/(max(intensidades))
pontos_no_espectro=np.where(np.logical_and(freqs>=5000, freqs<=5010))
if len(pontos_no_espectro[0])>0:
    pontos_no_espectro=pontos_no_espectro[0][0] # escolhe o menor número que resulta em uma frequencia maior
que 5000
#Diminuindo a quantidade de pontos para melhorar a visualização do gráfico e fazer mais sentido.
freqs = np.interp(np.arange(0,pontos_no_espectro),range(len(freqs[:int(len(freqs)/2 + 1)])),
freqs[:int(len(freqs)/2 + 1)]) # Só queremos a parte positiva.
intensidades = np.interp(np.arange(0,pontos_no_espectro), range(len(intensidades)), intensidades)

#####
##### Gerando arquivos de audio #####
#####

import soundfile as sf
sf.write('{}{}.wav'.format(local_resultados,out_filename), onda_final, sample_rate)
sf.write('{}{}-Efinal.wav'.format(local_resultados,out_filename), estrutura_fina, sample_rate)

#####
##### Graficando as formas resultantes #####
#####

if bokeh_graficos:
    from bokeh.plotting import figure, output_file, show
    from bokeh.layouts import column

    output_file("{}{}-graficos.html".format(local_resultados, out_filename), title="Graficos resultantes",
mode="inline")
    TOOLS="pan,hover,crosshair,wheel_zoom,box_zoom,undo,redo,reset,save"

    p = figure(title="Forma da onda e harmonizador linear", x_axis_label='ponto', y_axis_label="temperatura")

```

```

    p.line(np.arange(0,len(antes_do_lin_harm),1),antes_do_lin_harm, legend = "forma da onda", line_width=2,
line_color = 'purple')
    p.line(np.arange(0,len(lin_harmonizer),1),lin_harmonizer, legend = "Harmonizador linear", line_width=2,
line_color = 'green')

    q = figure(title="forma da onda harmonizada e normalizada", x_axis_label='ponto', y_axis_label="valor
correspondente")
    q.line(np.arange(0,len(snd_data),1),snd_data, legend = "forma da onda com numero de pontos esperado",
line_width=2, line_color = 'blue')

    r = figure(title="Envelope", x_axis_label='segundos', y_axis_label="amplitude (unidade arbitraria)")
    r.line(np.arange(0, sample_duration/sample_duration/len(envelope_small)),envelope_small, legend = "Forma
do envelope", line_width=2, line_color = 'cyan')

    s = figure(title="Onda resultante", x_axis_label='segundos', y_axis_label="amplitude (unidade arbitraria)")
    s.line(np.arange(0,len(onda_final),1)/sample_rate,onda_final, line_width=2, line_color = 'yellow')

    t = figure(title="Espectro de frequencias", x_axis_label='freq (Hz)', y_axis_label="intensidade relativa",
tools=TOOLS)
    t.line(freqs, intensidades, line_width=2, line_color = 'orange')

    show(column(p, q,r,s,t))
else:
    import matplotlib.pyplot as plt
    # Boa referencia: https://matplotlib.org/api/pyplot_summary.html
    fig = plt.figure()
    fig.suptitle("{}".format(out_filename), fontsize=14)
    plt.subplots_adjust(wspace = .5,hspace = 0.8)
    fig.add_subplot(221)
    plt.title("Curva e harmonizador linear")
    plt.xlabel("Tempo (u. a.)")
    plt.ylabel('Medida (unidades do INMET)')
    plt.plot(np.arange(0,len(lin_harmonizer),1),lin_harmonizer)
    plt.plot(np.arange(0,len(antes_do_lin_harm),1),antes_do_lin_harm)

    fig.add_subplot(222)
    plt.title("Envelope")
    plt.xlabel('Segundos')
    plt.ylabel('Amplitude (u. a.)')
    plt.plot(np.arange(0, sample_duration/sample_duration/len(envelope_small)),envelope_small)

# fig.add_subplot(222)
# plt.title("Onda normalizada e harmonizada")
# plt.xlabel('ponto x')
# plt.ylabel('valor f(x)')
# plt.plot(np.arange(0,len(snd_data),1),snd_data)

    fig.add_subplot(223)
    plt.title("Onda resultante")
    plt.xlabel('Segundos')
    plt.ylabel('Amplitude (u. a.)')
    plt.plot(np.arange(0,len(onda_final),1)/sample_rate,onda_final)

    fig.add_subplot(224)

```

```
plt.title("Espectro")
plt.xlabel('Frequência (Hz)')
plt.ylabel('Intensidade relativa')
plt.plot(freqs[18:], intensidades[18:]) # Grafica somente o que é audível.

fig.savefig("{}{}.png".format(local_resultados, out_filename), dpi=180)
```

APÊNDICE B - Código do software “media_anual2.py”

```
# trecho para funcionar no spyder
import sys
if len(sys.argv[0]) < 1:
    import os
    home = os.path.expanduser("~")
    os.chdir(str(home + "/doGit/SMI/media_anual/"))
    print("Parece que você não está executando o código a partir de uma shell convencional.")

# Trecho para funcionar como script:
import os
cwd = os.getcwd()
sys.path.append(cwd + '/../lib/')

import gerenciaArquivos as ga
import numpy as np
import matplotlib.dates as mdates
import datetime as datetime

##### Mensagem de ajuda #####
#####
if "--ajuda" in sys.argv:
    print("\nPrograma capaz de realizar a média horária anual das medidas de entrada.\n")
    print("você deve selecionar uma estacao para realizar a media anual, caso contrário Porto Alegre
será selecionada.\n    Exemplo:\n media_ano2.py PortoAlegre\n")
    print("Os comandos extra disponíveis são:\n")
    print("-t _tipo_\n    Seleciona o tipo de dado para fazer a média.\n    Exemplos: 'temp_inst',
'hora', 'umid_inst', 'pressao' (deve vir depois do nome da estação)")
    sys.exit(0)

##### Dados de entrada e saida #####
#####

tipo="temp_inst"
if "-t" in sys.argv:
    tipo = sys.argv[sys.argv.index("-t") + 1]

try:
    nome_dados = sys.argv[1]
    print(sys.argv[1], " selecionado")
except:
    nome_dados = 'PortoAlegre'

grade= 24
```

```

input_data = '../data/{}.dat'.format(nome_dados)
output_data = "../data/media_{}_ano_{}.dat".format(nome_dados, tipo)

##### Obtem os dados de todo o periodo do arquivo: #####

data, medida = ga.obtem_inmet(input_data, tipo, interp=75)

##### Realiza a soma para o ano todo: #####

# Informa algumas coisas:
print("primeiro instante de medida:")
print(mdates.num2date(data[0]).strftime('%d/%m/%Y-%H:%M:%S'))
print("Último instante de medida:")
print(mdates.num2date(data[-1]).strftime('%d/%m/%Y-%H:%M:%S'))
dias = int(data[-1] - data[0])
print("Número de dias completos: {}".format(dias))

teste1 = datetime.datetime(2016,12,29,13,59,30)
teste1 = mdates.date2num(teste1)
print(mdates.num2date(teste1).strftime('%d/%m/%Y-%H:%M:%S'))

nasceu = data[0]

valores = np.zeros(grade)

for i in range(dias):
    print("ja foram {} dias".format(i))
    se_pos = nasceu + 1.
    delta_t = (se_pos - nasceu)/grade
    print("delta_t: {}".format(delta_t))
    for j in range(grade):
        # vamos por partes:
        tamanho_da_janela = len(medida[(nasceu + delta_t*j <= data) & (data < nasceu +
delta_t*(j+1))]) #quantidade de elementos entre nasceu + j*delta_t e nasceu+(j+1)delta_t
        if tamanho_da_janela > 0:
            janela = medida[(nasceu + delta_t*j <= data) & (data < nasceu + delta_t*(j+1))] #
Valores que estao dentro da janela
            incremento_para_esse_dia = sum( janela )/ tamanho_da_janela #temos que dividir
pelo tamanho da janela para poder manter a media.
            valores[j] += incremento_para_esse_dia
        nasceu = se_pos

valores1 = valores/dias
##### gravando arquivo de saida #####

ga.salva1d(output_data, valores1)

```

APÊNDICE C - Código do software “gerenciaArquivos.py”

```
import numpy as np
import matplotlib.dates as mdates
import datetime as datetime

#
def bytedate2num(fmt):
    """
    workaround pra poder usar o strptime2num de um arquivo de texto.
    """
    def converter(b):
        return mdates.strptime2num(fmt)(b.decode('ascii'))
    return converter

date_converter = bytedate2num("%Y%m%d%H%M%S")

def obterDados(endereco, medida):
    """
    Obtem dados das estacoes meteorologicas que estao organizados de forma especifica
    """

    # Salva dados como simples vetores
    data, temp, u_ar, u_solo, pressao, lum = np.loadtxt(endereco, unpack=True, converters={ 0:
date_converter})

    # Mostra informacao
    print ("Data range (full set): "+str(mdates.num2date(data[0]).strftime('%Y-%m-%d %H:%M:
%S'))+" to "+str(mdates.num2date(data[len(data)-1]).strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')) )
    print ("With "+str(len(data))+" samples\n")

    if medida == "temp_inst":
        return (data, temp)
    else:
        return (data, temp, u_ar, u_solo, pressao, lum)

def obter_inmet(endereco, medida, interp=None):
    """
    endereco = caminho do arquivo fonte
    medida = nome do tipo de medida que deseja-se obter como resposta (veja cabeçalho dos dados
do INMET).
    interp (opcional) = "hora" ou "False" informa o intervalo de tempo para realizar a interpolação.
O padrão é minuto-a-minuto.
    interp pode ser um "int" informando a quantidade de pontos que deseja-se em um dia. Ex: 1000
fará o dia ter mil pontos.
    Retorna interpolação dos dados como se fossem realizadas medidas minuto a minuto a partir da
medida inicial até a final.
```

```

'''

dic = {'temp_inst': 3, 'hora':2, 'umid_inst':6, 'pto_orvalho_inst':9, 'pressao':12, 'vento_vel':16,
'vento_rajada':17, 'radiacao':18, 'precipitacao':19} # dicionario que servirá para indicar
diretamente a coluna a partir do nome do dado.
datas = []
valores = []
arq = open(endereco) # Abre o arquivo para leitura.
for line in arq:
    li=line.strip() # Remove os sinais de quebra de linha e outros caracteres especiais
    if ((not li.startswith("#") )and (not li.startswith("c") )): #Ignora linhas com comentarios ou
com nome das medidas.
        li = li.split(",") # separa essas linhas pelas virgulas.
        if li[dic[medida]] != "////": # ignora os momentos em que nao há medida.
            datas.append(mdates.strptime2num('%d/%m/%Y-%H')(li[1] + "-" + li[2]))
            valores.append(float(li[dic[medida]]))
arq.close()

# Ordenando as datas e as temperaturas:
idx = np.argsort(datas) # cria uma lista que contem os indices que ordenam as datas
datas = np.array(datas)[idx]
valores = np.array(valores)[idx]

dias = datas[-1] - datas[0]
#Mostrando algumas informações:
print ("Data range (conjunto todo): "+str(mdates.num2date(datas[0]).strftime('%d/%m/%Y-
%H'))+" até "+str(mdates.num2date(datas[-1]).strftime('%d/%m/%Y-%H')) )
print ("Com {} pontos e {:.0f} dias. \n".format(len(datas),dias))
print ("Para ter 24 pontos por dia, seriam necessários {} pontos.\n".format(dias*24))

# Realizando interpolacao:
if interp=="hora":
    pontos_necessarios = dias*24
    print("Realizada interpolacao de hora em hora")
elif interp==False:
    pontos_necessarios = dias
    print("Foram obtidos os dados sem realizar interpolação. \n")
elif type(interp) == int:
    pontos_necessarios = dias*interp
else:
    pontos_necessarios = dias*24*60
    print("Realizada Interpolação de minuto a minuto...\n")

datas = np.interp(np.arange(0,len(datas), len(datas)/pontos_necessarios), range(len(datas)),
datas)
valores = np.interp(np.arange(0,len(valores), len(valores)/pontos_necessarios),
range(len(valores)), valores)
return datas, valores

def recortaDatas(datas, valores, sel_Start, sel_End):

```

```

if type(sel_Start) == list:
    sel_Start = datetime.datetime(sel_Start[0], sel_Start[1], sel_Start[2], sel_Start[3],
sel_Start[4], sel_Start[5])
    sel_End =
datetime.datetime(sel_End[0],sel_End[1],sel_End[2],sel_End[3],sel_End[4],sel_End[5])
    sel_Start = mdates.date2num(sel_Start)
    sel_End = mdates.date2num(sel_End)

selec_datas = []; selec_valores = []
for j in enumerate(datas): # Segue a lista "data" em ordem
    if sel_Start <= j[1] <= sel_End:
        selec_datas.append(datas[j[0]])
        selec_valores.append(valores[j[0]])
    print ("Intervalo selecionado:\n{} -> {}".format(mdates.num2date(selec_datas[0]).strftime('%d/
%m/%Y-%H:%M:%S'), mdates.num2date(selec_datas[-1]).strftime('%d/%m/%Y-%H:%M:%S')))
    print ("Contendo {} pontos.".format(len(selec_datas)))

return selec_datas, np.array(selec_valores)

def salva1d(endereco, valores):
    arq = open(endereco, mode = 'w')
    for valor in valores:
        arq.write("{} \n".format(valor))
    arq.close()
    print("Arquivo salvo")

def abre1d(endereco):
    arq = open(endereco)
    medidas = []
    for line in arq:
        li=line.strip() # Remove os sinais de quebra de linha e outros caracteres especiais
        if ((not li.startswith("#") )and (not li.startswith("d") )): #Ignora linhas com comentarios ou
com nome das medidas.
            li = li.split(",") # separa essas linhas pelas virgulas.
            medidas.append(float(li[0]))
    return np.array(medidas)

```

APÊNDICE D - Gráficos das sonificações de medidas de temperatura publicadas no caderno de laboratório

Chamamos de **curva** a função formada pela variação da medida com o tempo (note que no gráfico que apresenta o tempo há a legenda de “u.a.”, denotando “unidades arbitrárias”, querendo dizer que a unidade dessa medida não importa). Todos os gráficos a seguir são com a medida de temperatura.

O **harmonizador linear** serve para que a curva comece e termine com a mesma amplitude, para podermos repeti-la sem ficar dando pulos. É uma reta que subtraímos da curva.

A **onda resultante** é o que a gente escuta e é resultante da repetição da curva harmonizada o número de vezes por segundo necessário para executar a nota escolhida.

O **espectro** é uma decomposição do som nas frequências de senos que formam ele.

Sabemos os parâmetros de cada representação pelo título acima dos gráficos que informa “local-data-nota-duração”, exemplo: “PortoAlegre-2017_9_5-G4-3.0s” é referente à estação “PortoAlegre”, do dia 5 de setembro de 2017, nota G4 com duração de três segundos.

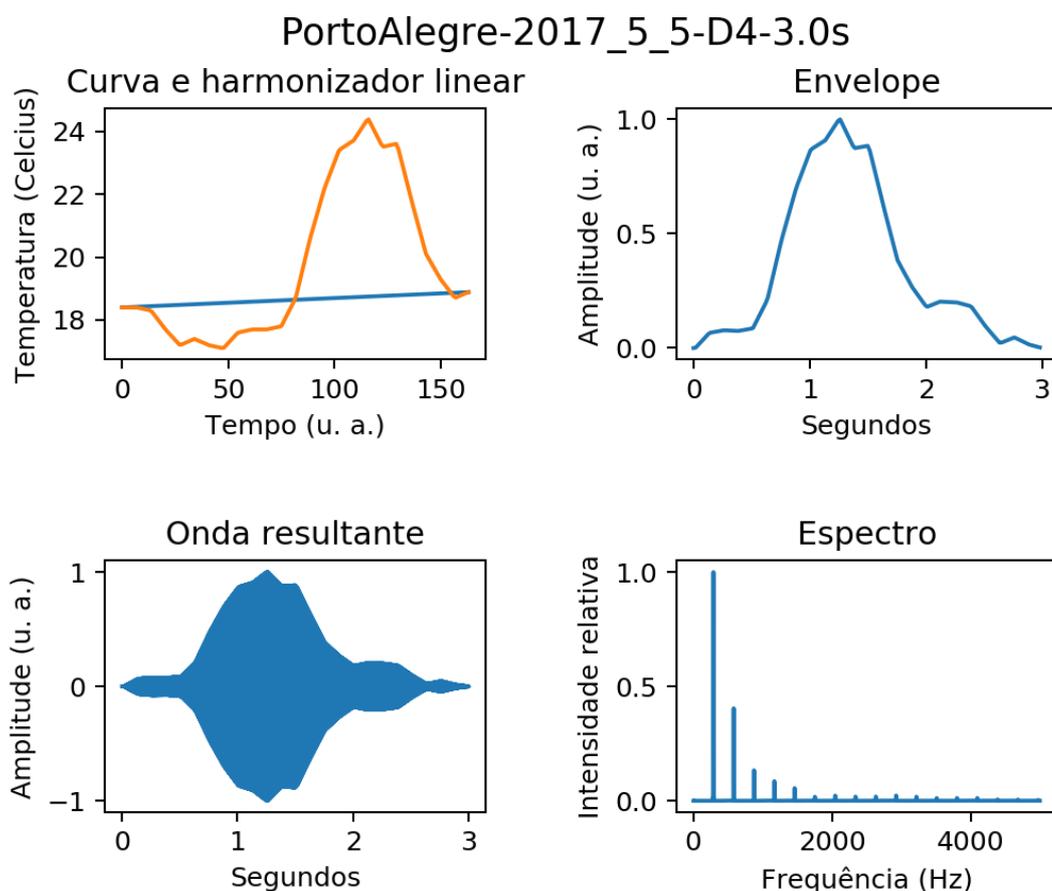


Figura 17: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em Porto Alegre no dia 05/05/2017, nota D4.

1. Sonificações de dias

As figuras 17 a 23 apresentam diversos dias de medidas de temperatura em Porto Alegre e São Paulo.

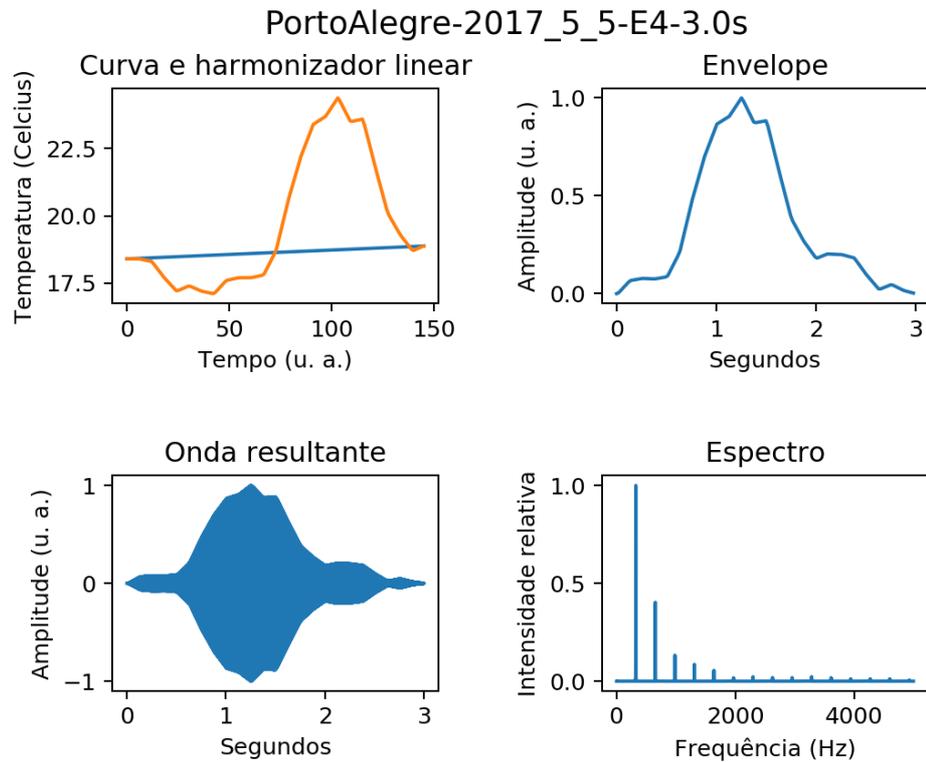


Figura 18: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em Porto Alegre no dia 05/05/2017, nota E4.

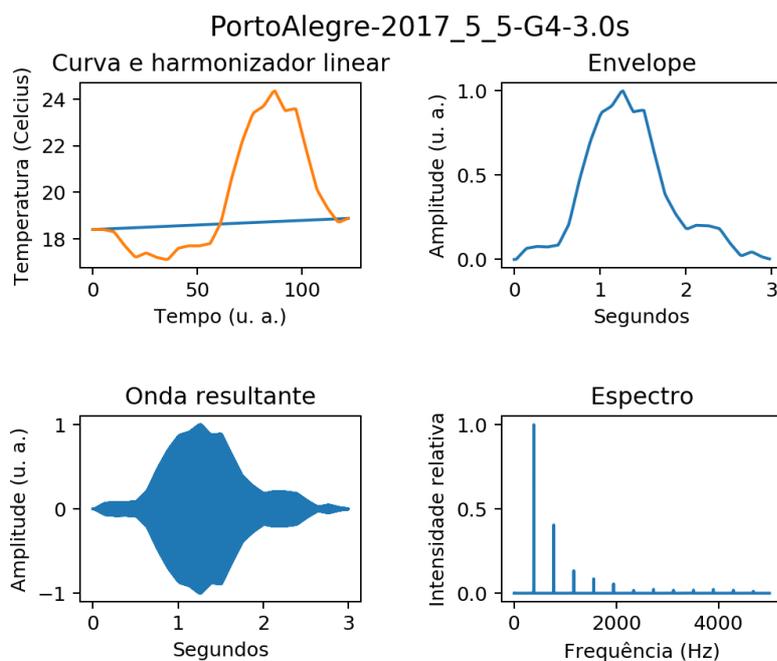


Figura 19: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em Porto Alegre no dia 05/05/2017, nota G4.

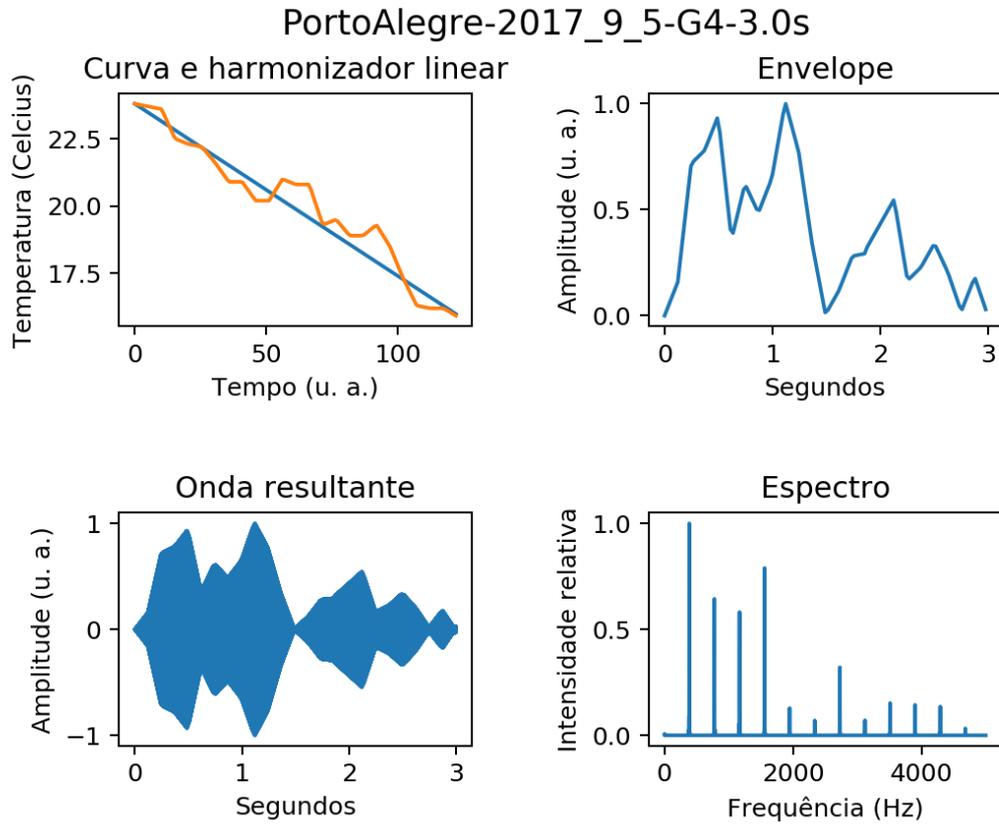


Figura 20: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em Porto Alegre no dia 05/09/2017, nota G4. Esse dia mostra a queda linear da temperatura.

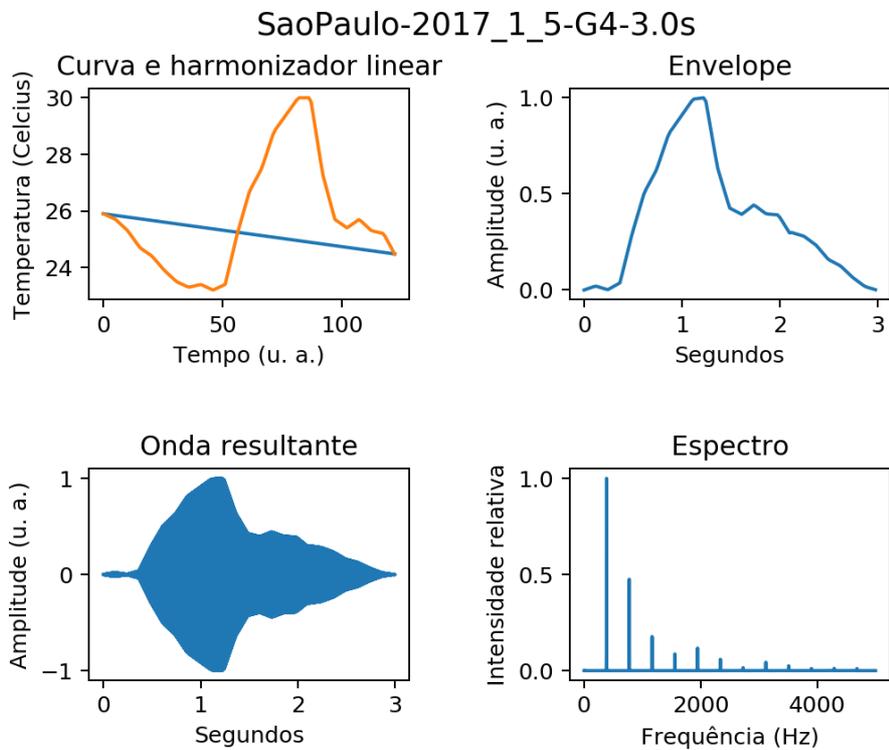


Figura 21: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em São Paulo no dia 05/01/2017, nota G4.

SaoPaulo-2017_4_5-G4-3.0s

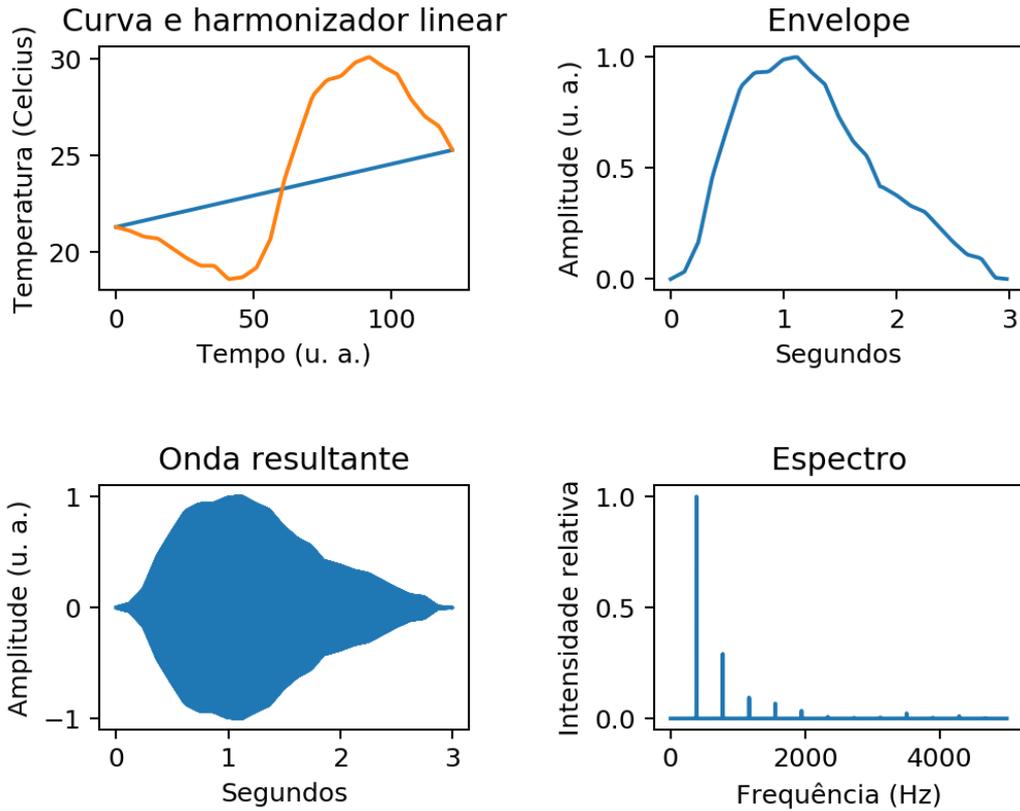


Figura 22: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em São Paulo no dia 05/04/2017, nota G4.

SaoPaulo-2017_5_5-G4-3.0s

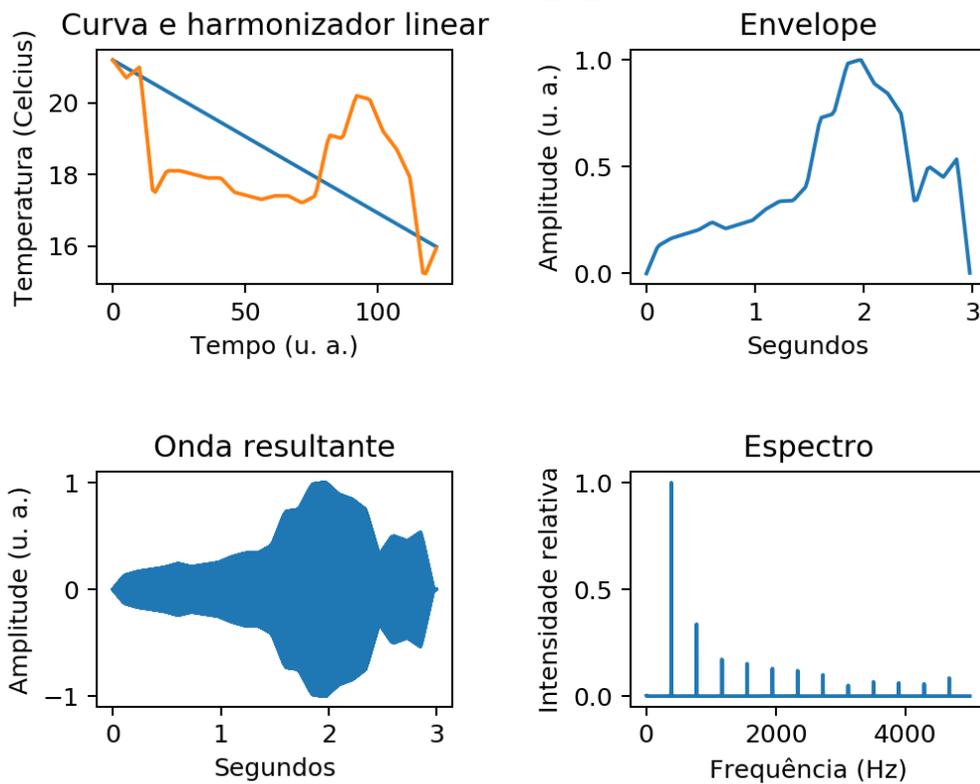


Figura 23: Gráficos referentes a sonificação da medida de temperatura em São Paulo no dia 05/05/2017, nota G4.

2. Sonificações de média anual

As figuras 24 a 30 apresentam as médias anuais horárias para as sete estações.

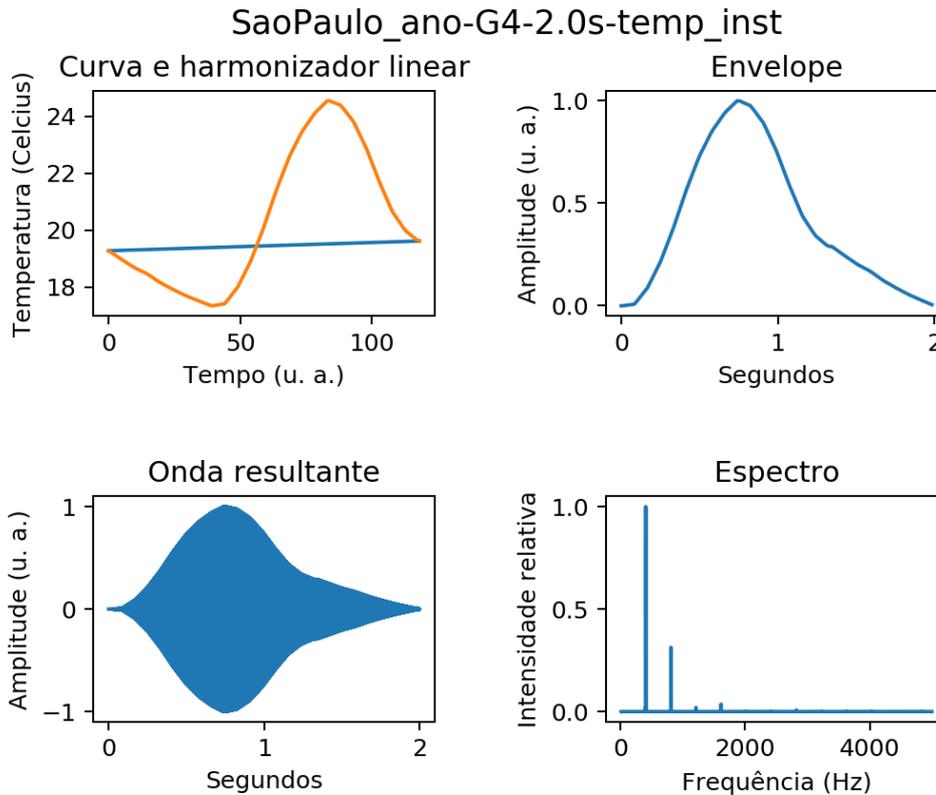


Figura 24: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação São Paulo (cidade).

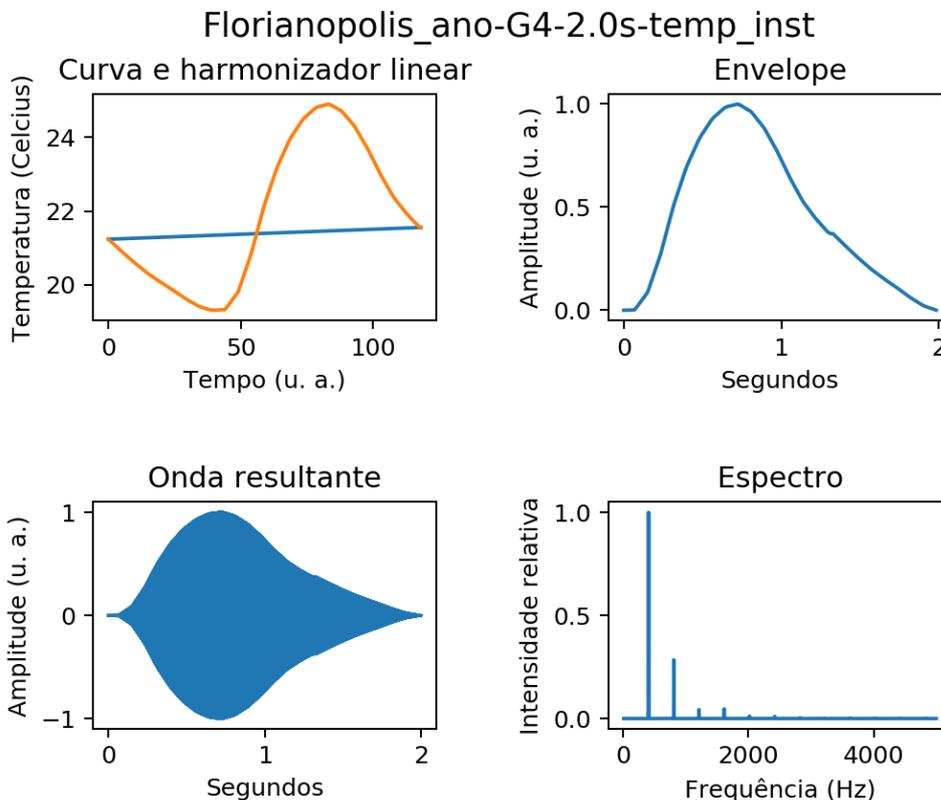


Figura 25: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação Florianópolis (cidade).

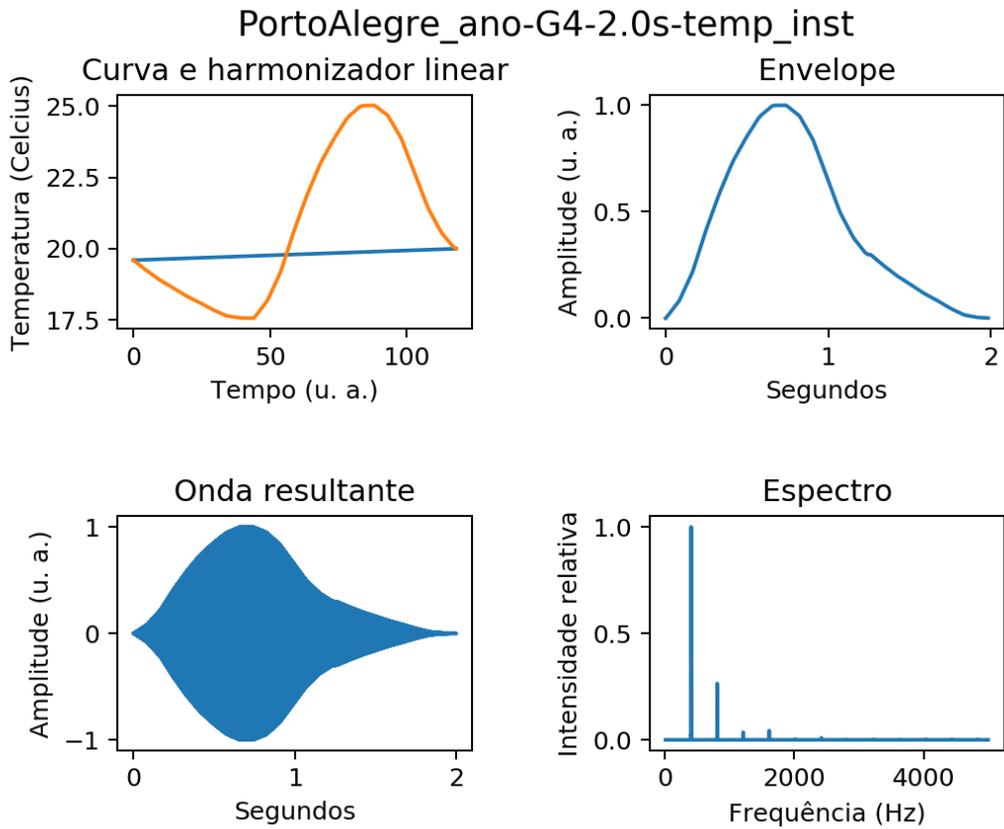


Figura 26: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação Porto Alegre (cidade).

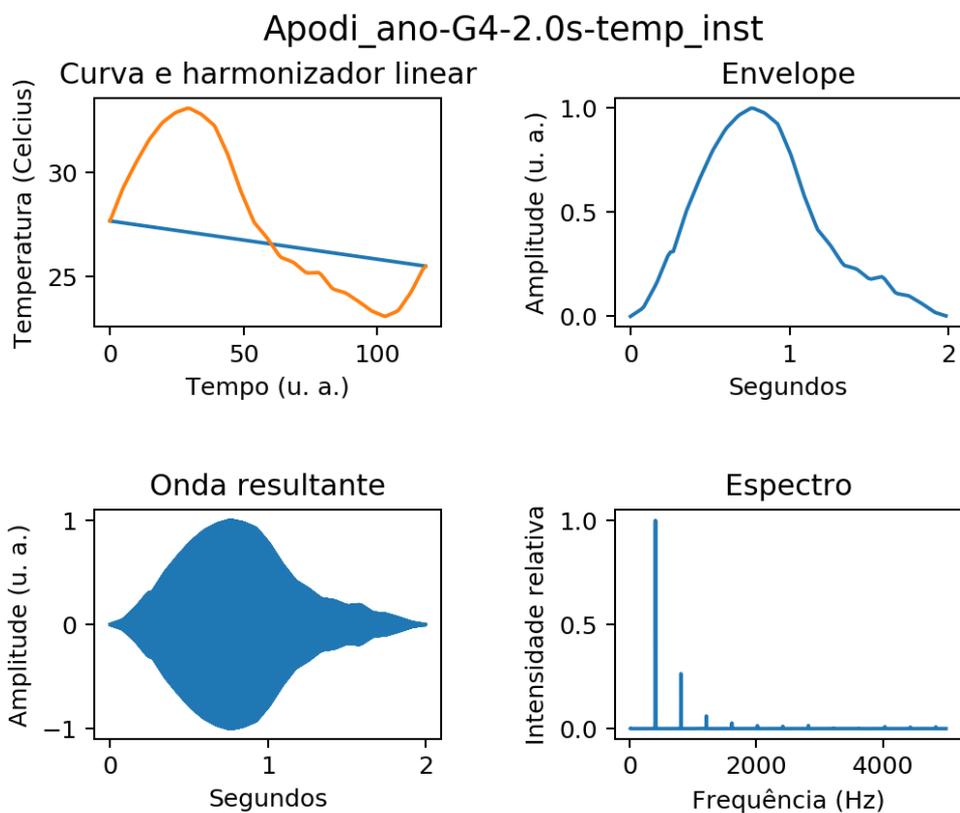


Figura 27: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação Apodi (Caatinga).

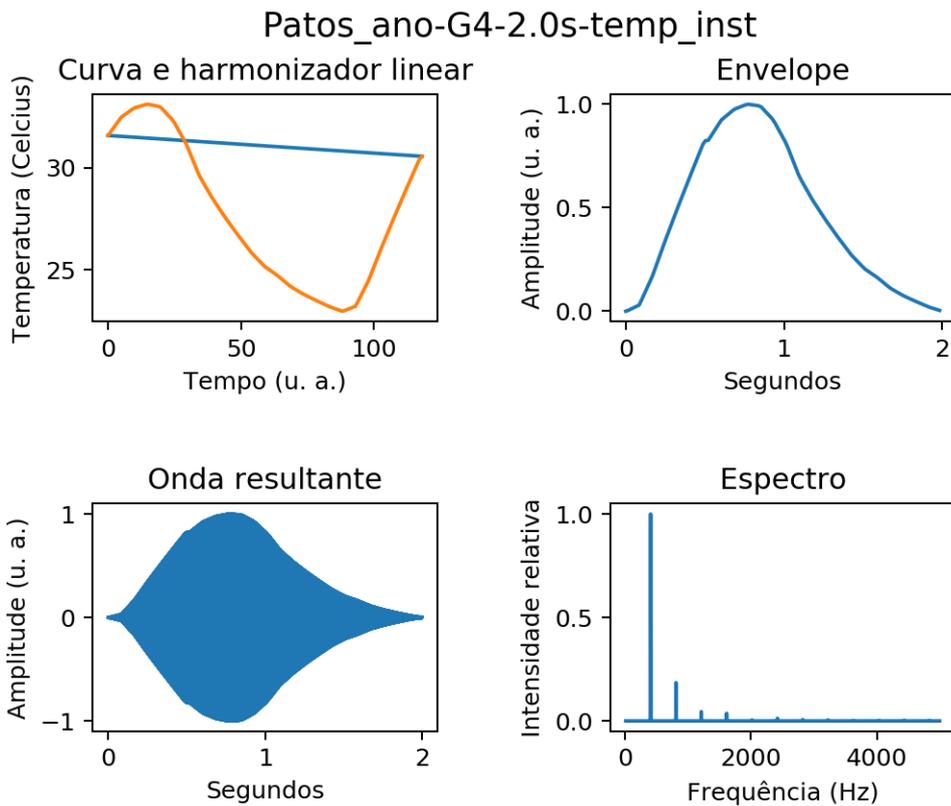


Figura 28: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação Patos (Caatinga).

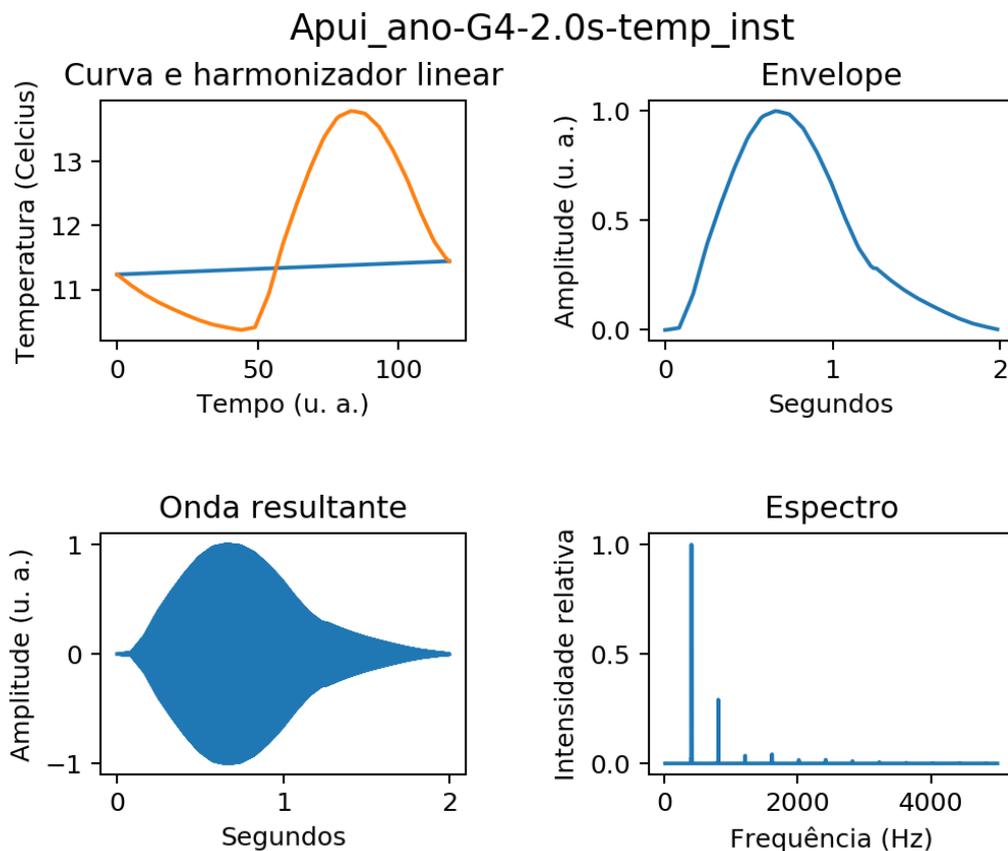


Figura 29: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação Apui (Amazônia).

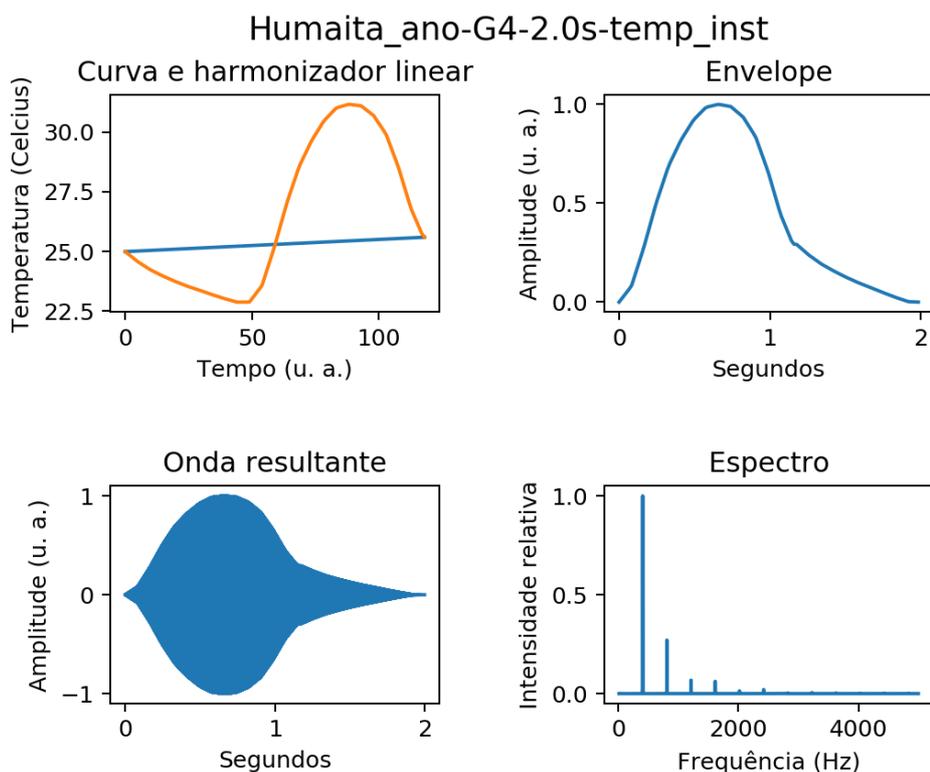


Figura 30: Gráficos referentes à sonificação da média anual horária da temperatura da estação Humaitá (Amazônia).

2. Sonificações com ajuste de crepúsculo

As figuras 31 a 37 apresentam as sonificações das sete estações com ajuste de crepúsculo.

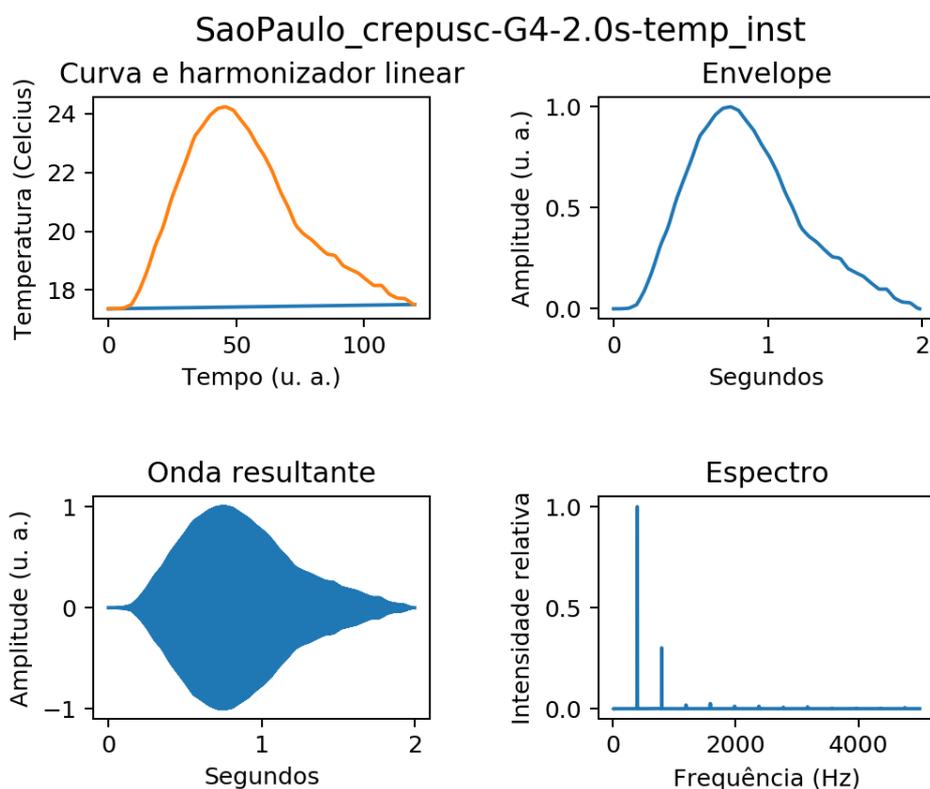


Figura 31: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação São Paulo (cidade) com o ajuste de crepúsculo.

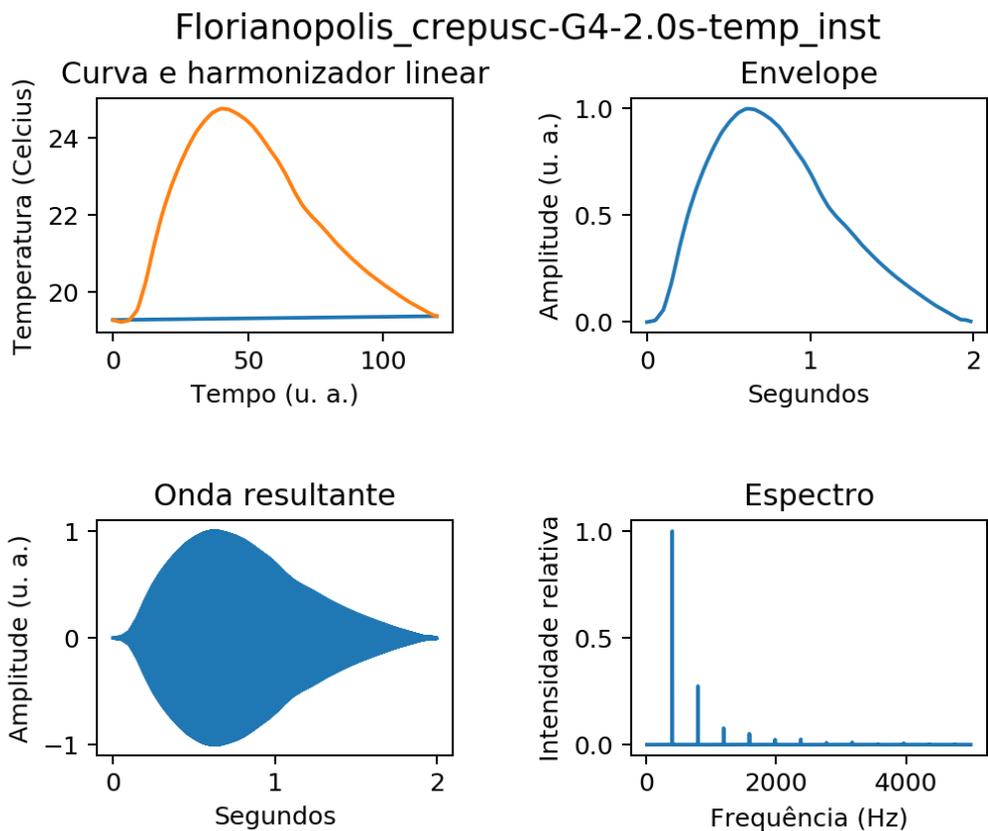


Figura 32: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação Florianópolis (cidade) com o ajuste de crepúsculo.

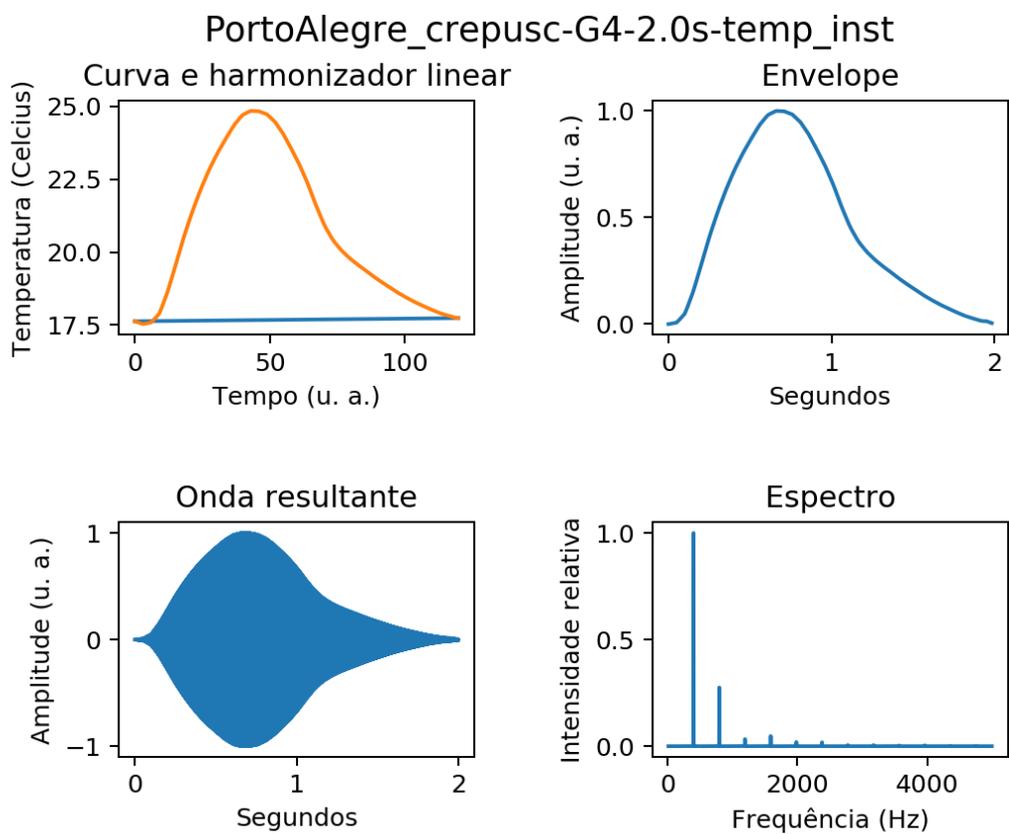


Figura 33: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação Porto Alegre (cidade) com o ajuste de crepúsculo.

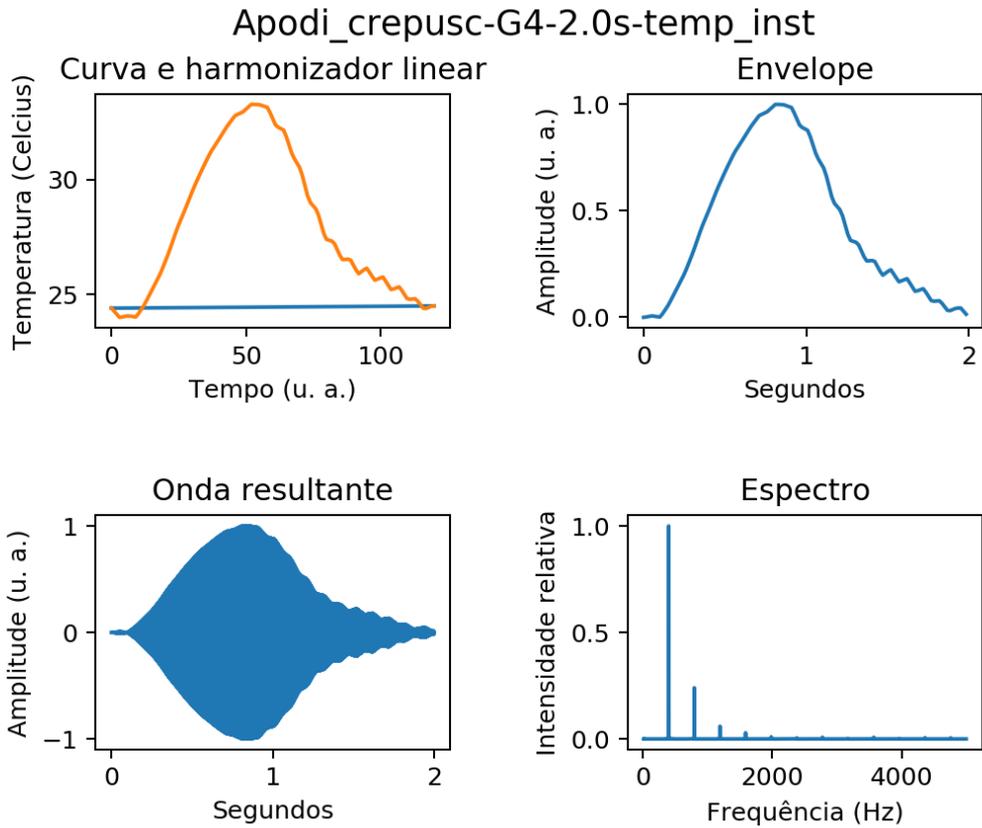


Figura 34: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação Apodi (Caatinga) com o ajuste de crepúsculo.

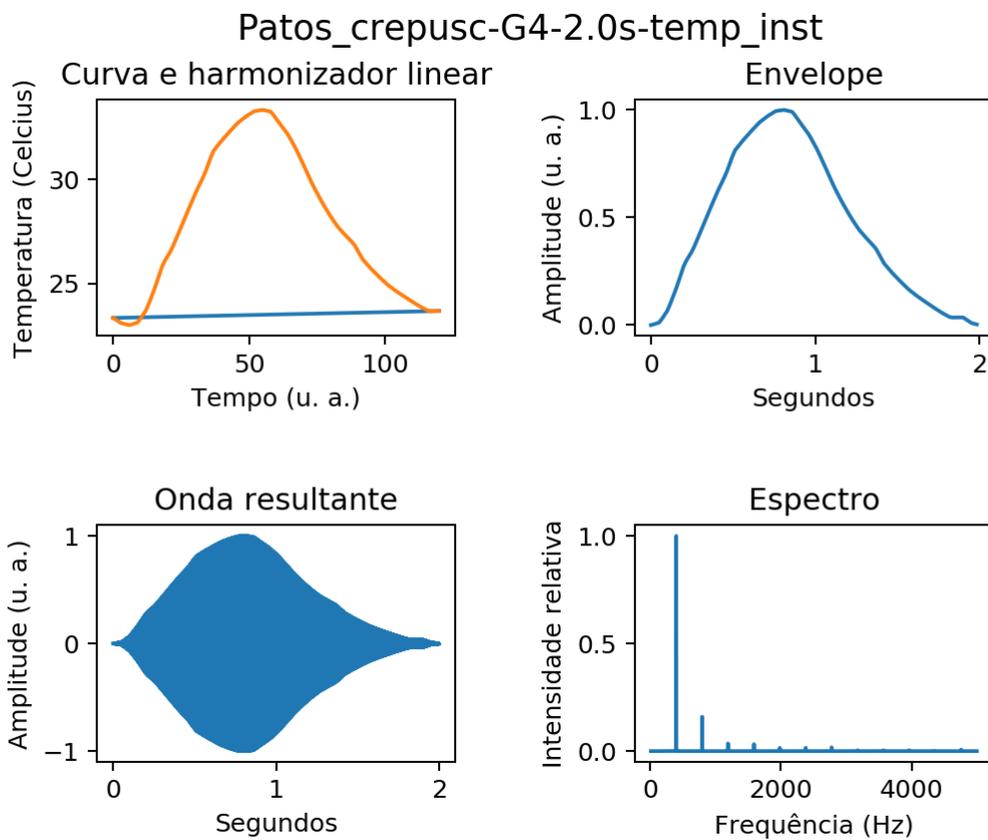


Figura 35: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação Patos (Caatinga) com o ajuste de crepúsculo.

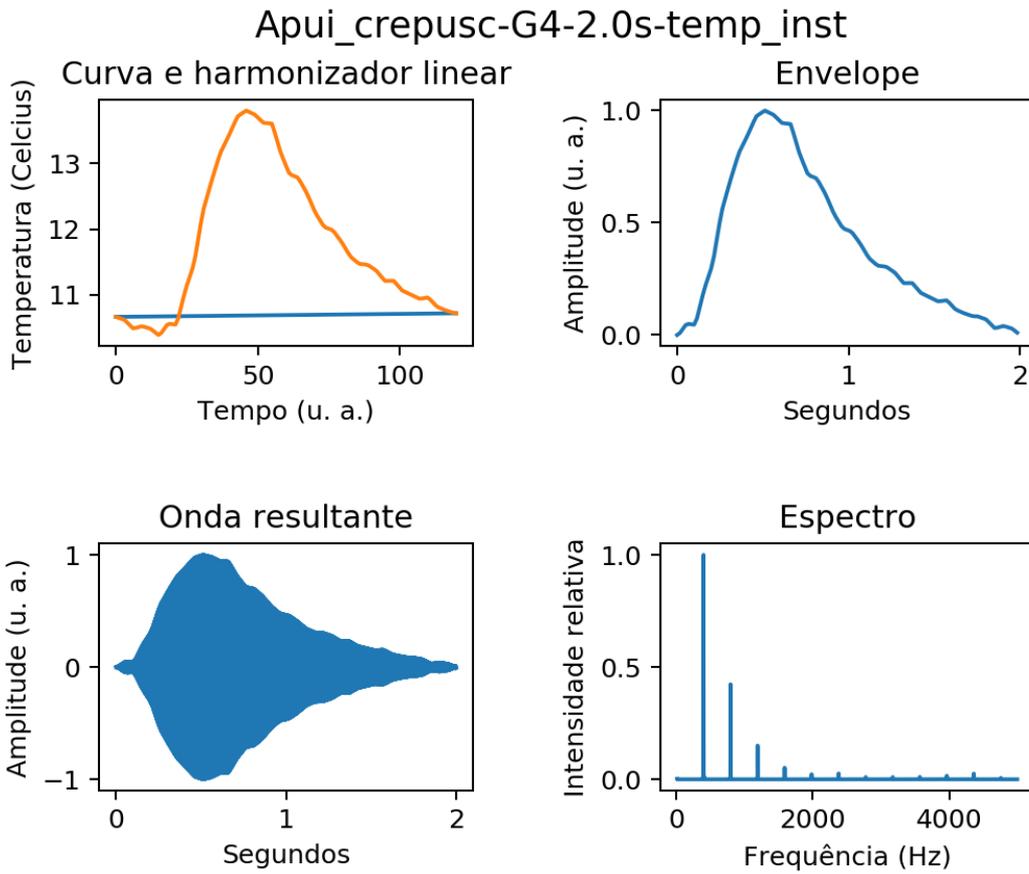


Figura 36: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação Apui (Amazônia) com o ajuste de crepúsculo.

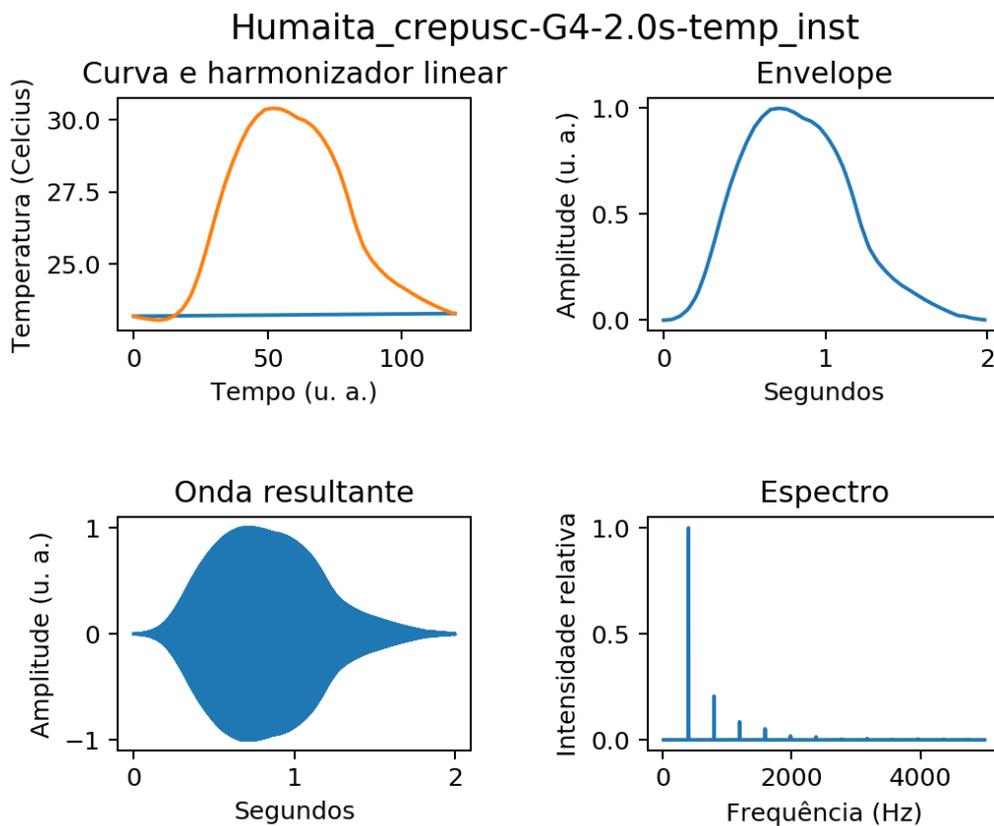


Figura 37: Gráficos referentes à sonificação da temperatura da estação Humaitá (Amazônia) com o ajuste de crepúsculo.