

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1074

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA SONIFICAÇÃO DE  
MICROSCOPIA DE VARREDURA POR SONDA**

**Tiago Abreu Freitas**

DATA DA DEFESA: 02/08/2018

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA SONIFICAÇÃO DE  
MICROSCOPIA DE VARREDURA POR SONDA**

Tiago Abreu Freitas

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ado Jorio de Vasconcelos

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2018


**"Implementação de Sistema para Sonificação de  
Microscopia de Varredura por Sonda"**

**Tiago Abreu Freitas**


Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


Aprovada em 02 de agosto de 2018.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ado Jorio de Vasconcelos**  
**Física (UFMG) - Orientador**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Hani Camille Yehia**  
**DELT (UFMG)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Bernardo Ruegger Almeida Neves**  
**Física (UFMG)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Henrique Padovani Velloso**  
**Escola de Música (UFMG)**

# Resumo

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de instrumentação científica em microscopia de varredura por sonda, um campo de vasta aplicação e versatilidade que permite explorar propriedades superficiais nos níveis atômico e molecular, oferecendo ainda a possibilidade de avaliar novos métodos e técnicas de controle. Propomos acrescentar uma nova metodologia de avaliação da técnica de microscopia de força atômica, utilizando sonificação de dados de tal forma que informações sobre os dados disponíveis e o processo físico sejam incluídas em um retorno auditivo para o usuário.

Normalmente, sistemas de microscopia de varredura por sonda fornecem informações para o usuário com imagens que representam as propriedades da superfície. Neste trabalho, foi implementado um sistema de sonificação de dados em tempo real que fornecesse informações que não são bem capturadas pelo olho humano. Baseado em uma placa Raspberry Pi 3B+ e algoritmos Python, o sistema proposto gera parâmetros com base em uma varredura da sonda para sonificação que foi testado utilizando MIDI (Musical Instrument Digital Interface), como padrão para reprodução sonora dos dados de varredura convertidos.

Com os resultados obtidos, pôde-se constatar que a aquisição de dados e a conversão sonora em tempo de varredura através do sistema proposto é viável, o que abre a possibilidade de aplicações mais avançadas, que permitam extrair informações mais detalhadas do processo de varredura através do som. Finalmente, este trabalho possibilita a implementação de soluções que proporcionem explorar a capacidade auditiva de portadores de deficiência visual nos trabalhos que fazem uso desta tecnologia, de forma a agregar mais informação e detalhes ao processo.



# Abstract

The present work aims at the development of scientific instrumentation in scanning probe microscopy (SPM), a field of wide application and versatility that allows to explore surface properties at the atomic and molecular levels, offering the possibility of prospect new methods and control techniques. We propose to add a new methodology for the evaluation of the atomic force microscopy technique, using sonification of data in such a way that information on the available data and the physical process are included in an auditory feedback to the user.

Typically, SPM systems provide information to the user with images that represent surface properties. In this work, a real-time data-sounding system was implemented that provided information that is not well captured by the human eye. Based on a Raspberry Pi 3B + board and Python algorithms, the proposed system generates parameters based on an SPM sweep for sonification that was tested using the MIDI (Musical Instrument Digital Interface) as the standard for sound reproduction of the converted sweep data.

With the results obtained, it was possible to verify that the acquisition of data and the sound conversion in scanning time through the proposed system is feasible, which opens the possibility of more advanced applications, allowing to extract more detailed information of the scanning process via sound. Finally, this work allows the implementation of solutions that allow to explore the auditory capacity of people with visual impairment in the works that make use of this technology, in order to add more information and details to the process.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me sustentado durante todos os dias da minha vida e ter me dado o discernimento para tomar as decisões corretas nos momentos mais importantes.

Aos meus pais pelos ensinamentos, em especial à minha mãe, que sempre me incentivou a seguir em frente, pelas palavras de afeto e ânimo nos momentos em que mais precisava.

Meu especial agradecimento à minha esposa Karla pelo amor, carinho e compreensão durante toda a caminhada. Por me incentivar e apoiar nos momentos mais difíceis, quando muitas vezes pensei em desistir sempre me motivou a continuar.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Ado Jorio pelos ensinamentos, paciência, apoio e orientação durante toda a caminhada.

Aos professores e colegas do LABNS pelas orientações, conselhos e acolhimento durante toda a jornada.

Aos meus amigos e familiares.

# Sumário

Lista de Abreviaturas . . . . .	ix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.2.1 Objetivo Geral . . . . .	4
1.2.2 Objetivo Específico . . . . .	4
1.3 Principais Contribuições deste Trabalho . . . . .	5
1.4 Publicações . . . . .	5
1.5 Organização do texto . . . . .	5
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>7</b>
2.1 Microscopia de varredura por sonda . . . . .	7
2.1.1 Microscopia de força atômica AFM . . . . .	9
2.1.2 Tuning Fork AFM . . . . .	12
2.2 Princípios básicos de aquisição de dados em SPM . . . . .	13
2.2.1 Amostragem de Dados . . . . .	13
2.2.2 Efeito do sistema de retroalimentação . . . . .	14
2.3 Princípios de Processamento Digital de Sinais . . . . .	16
2.3.1 Perda de sinal, taxa de amostragem, Teorema de Nyquist-Shannon	18
2.3.2 Decimação . . . . .	19
2.4 <i>Single Board Computer (SBC)</i> . . . . .	20
2.4.1 Plataforma Raspberry Pi 3 Model B . . . . .	22
<b>3 Revisão Bibliográfica</b>	<b>24</b>
3.1 Sonificação Interativa para exploração de moléculas simples . . . . .	25
3.2 Ferramenta educacional para nanofísica usando renderização multissen-	
sorial . . . . .	26
3.3 Interação multissensorial com um fenômeno nanoescala: a curva de força	27
<b>4 Metodologia</b>	<b>29</b>

4.1	Validação da aquisição do sinal de varredura . . . . .	31
4.1.1	Aquisição de sinal utilizando um padrão de AFM como amostra . . . . .	35
4.1.2	Aquisição de sinal de amostra de grafeno . . . . .	37
4.2	Desenvolvimento do hardware para condicionamento do sinal . . . . .	41
4.3	Desenvolvimento do algoritmo para sonificação dos dados de varredura . . . . .	49
4.4	Questionário para avaliação do retorno sonora . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>54</b>
5.1	Teste sonificação <i>off-line</i> de dados de varredura . . . . .	54
5.2	Teste sonificação <i>on-line</i> , com aquisição direta dos dados de varredura . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>61</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Carta de aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa – UFMG</b>	<b>67</b>
<b>B</b>	<b>Questionário aplicado para avaliação da retroalimentação sonora</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>Resultado do questionário aplicado</b>	<b>72</b>

# Lista de Figuras

1.1	Esquema que representa uma técnica de SPM para obtenção de imagem topográfica . . . . .	1
2.1	O diagrama de blocos do sistema de retroalimentação em microscópio de varredura por sonda . . . . .	8
2.2	O diagrama de blocos do sistema de feedback em microscópio de varredura de tunelamento . . . . .	9
2.3	Esquemático que representa o processo AFM para obtenção de imagem topográfica utilizando cantilever . . . . .	10
2.4	Regime operacional <i>contact mode</i> . . . . .	11
2.5	Regime operacional <i>non-contact mode</i> . . . . .	11
2.6	Regime operacional <i>tapping mode</i> . . . . .	12
2.7	Esquema de um sistema AFM baseado em um diapasão. . . . .	13
2.8	Esquema que representa a técnica <i>tuning fork AFM</i> . . . . .	13
2.9	Ilustração esquemática do processo de varredura. . . . .	14
2.10	Abordagens de amostragem SPM . . . . .	15
2.11	Efeitos de loop de retroalimentação típicos no controlador PI . . . . .	16
2.12	Estágios conversor Analógico-Digital . . . . .	17
2.13	Esquema de um filtro passa baixa real. . . . .	19
2.14	Processo de decimação . . . . .	19
2.15	A arquitetura de computadores de placa única . . . . .	20
2.16	Um modelo básico de sistema SoC . . . . .	21
2.17	Raspberry Pi 3 Model B . . . . .	22
3.1	Setup experimental <a href="#">Martini et al. (2004)</a> . . . . .	25
3.2	Setup experimental <a href="#">Marchi et al. (2005)</a> . . . . .	26
3.3	Setup experimental <a href="#">Marchi et al. (2005)</a> . . . . .	27
3.4	Setup experimental <a href="#">Marliere et al. (2004)</a> . . . . .	28
4.1	Vistas da cabeça de leitura <i>scanhead</i> construída no LabNS . . . . .	29
4.2	Sistema de varredura do LabNS . . . . .	30

4.3	Interface de conexões do R9 . . . . .	30
4.4	Conexão de baixa voltagem ( <i>low voltage</i> ) do R9 . . . . .	31
4.5	Padrão AFM MicroMasch TGZ02. . . . .	32
4.6	Sinal $dF$ em uma seção da varredura realizada no padrão,que corresponde a variação da frequência de ressonância da sonda em relação a um <i>set point</i> definido no sistema de controle SPM. . . . .	33
4.7	Sinal $Z$ em uma seção da varredura realizada no padrão de AFM,que corresponde a tensão aplicada no tubo piezo elétrico, responsável pelo deslocamento da sonda em relação a superfície da amostra. . . . .	33
4.8	Foto do dispositivo de aquisição de sinal NI USB-6009. . . . .	34
4.9	Conexões de leitura de sinal do NI USB-6009. . . . .	34
4.10	Diagrama para aquisição do sinal do R9 através da DAQ USB-6099 através do MATLAB. . . . .	35
4.11	Sinal $Z$ adquirido puro, a partir da varredura do padrão de AFM. . . . .	36
4.12	Detalhe do Sinal $Z$ adquirido puro mostrado na Figura 4.11, a partir da varredura do padrão de AFM. . . . .	36
4.13	Sinal $Z$ obtido a partir da filtragem do sinal $Z$ puro adquirido na varredura do padrão de AFM. . . . .	37
4.14	Imagem de AFM da amostra de grafeno utilizada para aquisição de sinal referente à varredura AFM. . . . .	38
4.15	Sessão da amostra de grafeno indicada por linha vertical . . . . .	38
4.16	Sessão da amostra de grafeno indicada por linha vertical . . . . .	39
4.17	Sinal $Z$ puro coletado da varredura da amostra de grafeno . . . . .	39
4.18	Sinal $Z$ puro coletado da varredura da amostra de grafeno . . . . .	40
4.19	Sinal $Z$ filtrado coletado da varredura da amostra de grafeno. . . . .	40
4.20	Sinal $Z$ filtrado coletado da varredura da amostra de grafeno . . . . .	40
4.21	Fluxograma do processo de sonificação do sinal gerado por um sistema AFM baseado em um diapasão. . . . .	41
4.22	Circuito <i>zero span</i> para condicionamento do sinal . . . . .	42
4.23	Circuito montado para condicionamento inicial do sinal . . . . .	43
4.24	Sinal condicionado pelo circuito proposto . . . . .	43
4.25	Conector Raspberry PI 3 GPIO com descrição do tipo de comunicação/função de cada pino. . . . .	44
4.26	Conversor ADC modelo ADS1115 . . . . .	45
4.27	Filtro Anti-aliasing . . . . .	46
4.28	Esquema da placa ADS1115 . . . . .	47
4.29	Sistema montado para condicionamento e processamento do sinal de varredura do sinal. . . . .	48

4.30	Representação esquemática do processo de varredura de um AFM e o processo de sonificação. . . . .	49
4.31	Estágios do processo de sonificação . . . . .	52
5.1	Imagens 3D da amostra de grafeno, com detalhes da topografia da superfície. . . . .	55
5.2	Gráficos comparativos entre topografia (a) e notas musicais (b). . . . .	55
5.3	Imagem do padrão de calibração do AFM obtido com a varredura do AFM. . . . .	58
5.4	Sinal de varredura topográfica do padrão de calibração AFM obtido com a varredura AFM. . . . .	59
5.5	Gráfico das notas musicais geradas em tempo real a partir dos dados adquiridos no processo de digitalização. . . . .	60

# Lista de Tabelas

2.1	Especificações do Raspberry Pi 3 Model B . . . . .	23
4.1	Características do padrão AFM . . . . .	32
4.2	Resumo das especificações do NI USB-6009 . . . . .	35
4.3	Configuração filtro <i>lowpass</i> . . . . .	37



# Lista de Abreviaturas

<b>AFM</b>	<i>Atomic Force Microscopy</i>
<b>ADC</b>	<i>Analog to Digital Converter</i>
<b>A/D</b>	<i>Analog to Digital</i>
<b>FPGA</b>	<i>Field Programmable Gate Array</i>
<b>FS</b>	<i>Feedback Systems</i>
<b>GPU</b>	<i>Graphics Processing Unit</i>
<b>IC</b>	<i>Integrated Circuit</i>
<b>I/O</b>	<i>Input-Output</i>
<b>MBS</b>	<i>Model-Based Sonification</i>
<b>MEMS</b>	<i>Microelectromechanical Systems</i>
<b>MFM</b>	<i>Magnetic Force Microscopy</i>
<b>MIDI</b>	<i>Musical Instrument Digital Interface</i>
<b>PLL</b>	<i>Phase Locked Loop</i>
<b>RAM</b>	<i>Random Access Memory</i>
<b>SBC</b>	<i>Single Board Computer</i>
<b>SNOM</b>	<i>Scanning Near-field Optical Microscopy</i>
<b>SoC</b>	<i>System on a Chip</i>
<b>SO</b>	<i>System Operation</i>
<b>SPM</b>	<i>Scanning Probe Microscopy</i>
<b>SNR</b>	<i>signal-to-noise ratio</i>
<b>STM</b>	<i>Scanning Tunneling Microscopy</i>
<b>TF</b>	<i>Tuning Fork</i>

# Lista de Algoritmos

1	Leitura do sinal de varredura e conversão em sinal sonoro. . . . .	51
2	Conversão do valor de tensão lido em um nota (frequência) equivalente .	52
3	Reprodução sonora da nota musical gerada. . . . .	52

# Capítulo 1

## Introdução

A microscopia de varredura por sonda (no inglês *Scanning Probe Microscopy, SPM*) é uma técnica de pesquisa em nanociência, que permite investigar a morfologia e as propriedades locais da superfície de amostras com resolução espacial inferior a um ângstrom (Eaton e West, 2010). As técnicas de SPM consistem em percorrer uma amostra com uma sonda, sendo que os dados obtidos durante a interação sonda-amostra são convertidos em imagens topográficas da superfície analisada (B. Bhushan, 2004), conforme representado na Figura 1.1.

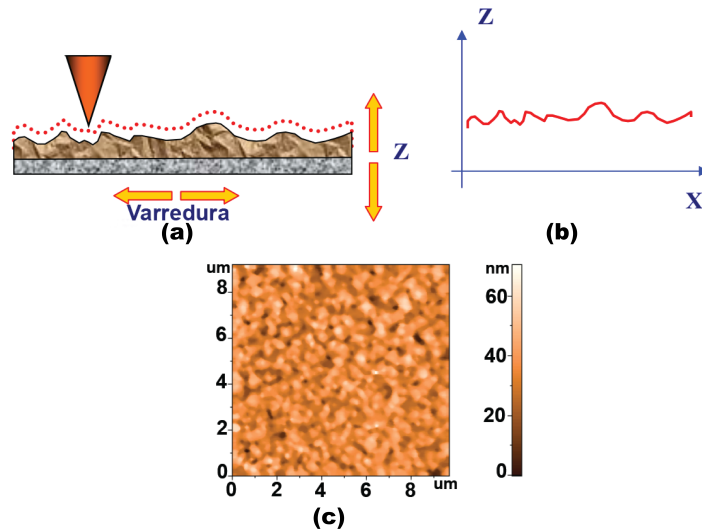


Figura 1.1: Esquemático que representa uma técnica de SPM para obtenção de imagem topográfica. A partir da interação da sonda com a superfície da amostra (a), o perfil topográfico de varredura é obtido (b) e a imagem formada é exibida para o usuário (c). Imagem adaptada de (B. Bhushan, 2004)

Os avanços recentes nas técnicas de SPM permitem coletar um grande conjunto de dados que, na maioria dos sistemas, são convertidos em imagens que contêm informações inerentes à amostra em análise. Atualmente, praticamente todas as pesquisas no

campo da física de superfície e tecnologias de filmes finos aplicam as técnicas de SPM nos estudos/caracterizações realizados (Mironov, 2004). Embora as técnicas de processamento de imagem computacional permitam que os pesquisadores obtenham, na grande maioria das vezes, características topográficas de seus conjuntos de dados que não podem ser visualizados diretamente, ainda há limitações na forma como melhor representar esses dados.

O campo de pesquisa de sonificação, um subconjunto do tema da exibição auditiva ("*auditory screening*"/"*auditory display*"), desenvolveu-se expressivamente ao longo dos últimos anos. Reúne interesses das áreas de mineração de dados, análise de dados exploratórios, interfaces homem-computador e computação musical.

A sonificação interativa pode ser definida como um sistema que faz uso do som dentro de um sistema fechado homem-computador, onde o sinal auditivo fornece informações sobre os dados analisados, bem como da própria interação, tornando-se dessa forma de grande utilidade para refinar a atividade/processo em questão (Hermann, 2002).

A sonificação apresenta informações utilizando áudio para que o usuário do sistema obtenha uma nova compreensão dos dados ou processos sob investigação, através da audição (Hermann e Hunt, 2005; Hermann, 2002). Além da aplicação ímpar de permitir que deficientes visuais realizem experimentos de SPM, a sonificação de dados tem o potencial de fornecer uma nova perspectiva para os pesquisadores quanto às características do material em análise (Martini et al., 2004). O ouvido humano é capaz de detectar variadas diferenças sonoras, respeitando-se limites de frequências audíveis, que podem representar mudanças sutis na característica da amostra.

Utilizando-se desta técnica, é possível aumentar a percepção quando a visão está saturada com outras informações inerentes ao processo. Dessa forma, a sonificação de dados surge como uma ferramenta que permite extrair informações mais detalhadas de uma amostra quando combinada com as técnicas de imageamento topográficos comumente utilizados em sistemas SPM.

## 1.1 Motivação

O sistema visual e o sistema auditivo possuem pontos complementares na percepção de dados. Enquanto as exibições visuais podem fornecer representações de locais selecionados em conjuntos de dados, identificar as regiões interessantes para análise em um conjunto de dados muito grande é desafiador. As estratégias visuais para atacar este problema incluem o aumento da área de exibição visual, aumentando a taxa de exibição de dados, codificando dados de maior interesse com cores mais brilhantes, etc.

Entretanto, essas estratégias são muitas vezes insuficientes, pois em uma exibição variável no tempo, um pixel pode facilmente ser ignorado. A varredura auditiva, por outro lado, pode ser mais adequada para detectar dados sutis ou transitórios, pois o sentido auditivo pode escanear todas as direções espaciais simultaneamente, sem se limitar a um único ponto focal, e pode detectar características de dados com duração temporal muito curtas mais intuitivamente (Roginska et al., 2006).

Outros benefícios do retorno sonoro podem ser identificados em combinação com o retorno visual. Sonificação pode ser utilizada para aumentar a dimensionalidade de uma visualização distribuindo algumas dimensões dos dados para atributos sonoros ou até mesmo para promover redundância para auxílio à confirmação visual. O comprometimento proveniente de interfaces multisensorias pode diminuir o tempo de aprendizado, reduzindo o cansaço visual. A adição de efeitos sonoros complementam e provêm realismo à aplicação. O papel das interfaces sonoras em alertar o usuário é extensamente usado em diversas aplicações como em relógios, agendas eletrônicas, celulares, equipamentos hospitalares e computadores. Como não é preciso olhar em uma direção particular para ouvir um alarme, estes sinais sonoros são apropriados para alertar os usuários de sistemas para algum evento importante, pois são de rápida detecção e de fácil localização.

Alguns experimentos já realizados, demonstram melhoria no desempenho da exploração dos dados em tarefas de análise de conjuntos de dados utilizando visualização conjuntamente com som (Martini et al., 2004; Worrall, 2015; Cherston et al., 2016). Estes experimentos comprovam o conceito de que a sonificação pode ser utilizada como um complemento à exibição visual dos dados, promovendo um aumento da quantidade de informações repassadas ao usuário; reduzindo a quantidade de informações que o usuário precisará distinguir visualmente.

Para o caso específico do SPM, Martini et al. (2004) apresentaram uma interface interativa audio-háptica para o controle de um microscópio de força atômica (no inglês, *Atomic Force Microscopy, AFM*), com o objetivo de explorar outras formas de interação visando auxiliar na análise experimental. Em um primeiro momento, o trabalho abordou diferentes níveis de sonificação dos dados brutos e sua conversão em sinal sonoro e, posteriormente, através da chamada Sonificação Baseada em Modelos (no inglês, *Model-Based Sonification, MBS*), proposta por (Hermann, 2002). Esta técnica consiste na utilização de variáveis para a interpretação da diferença de forças aplicadas a um elemento sensor (conhecido comumente como *cantilever*). Entretanto, Polotti (2008) questiona que não existe uma avaliação real do método de sonificação interativa proposta, pois o mesmo utiliza objetos virtuais na interação e um modelo sonoro parametrizado como display auditivo, o que, segundo o mesmo, não caracteriza uma sonificação/interação direta do dado adquirido.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é reportar a implementação de um sistema de extração de informação para a sonificação de dados obtidos a partir de varreduras feitas por AFM, para o desenvolvimento de novas metodologias de avaliação, bem como para fornecer informações em tempo real que permitirão ao usuário atuar na calibração e ajuste de sistemas de SPM.

### 1.2.2 Objetivo Específico

Para atingir o objetivo geral desse trabalho, foram estabelecidos objetivos específicos:

1. Estudo dos modos de operação até então utilizados para controle de um sistema SPM.
2. Avaliação, desenvolvimento e implementação de controle de retorno sonoro. Uma vez compreendido o sistema de controle do SPM escolhido para desenvolvimento do projeto, criar o modelo que representa o controle de retorno sonoro, baseando-se na análise dos dados gerados pelo controle existente.
3. Testes de viabilidade para controle de retorno sonoro da técnica AFM. Após criação do modelo de controle, realizar testes de sonificação *off-line*, com dados de varredura previamente adquiridos, para validar a viabilidade e pertinência do controle de retorno sonoro.
4. Realização de testes com usuário. Uma vez implementado o sistema de geração de parâmetros para sonificação, realizar testes experimentais com usuários de SPM, bem como usuários em potenciais para validar se o sistema acrescentou novas percepções ao sistema SPM. Aplicar um questionário ao usuário de forma a quantificar a percepção dos mesmos referente ao sistema proposto.
5. Definir uma plataforma que permita implementação da solução proposta a um baixo custo.
6. Implementar o sistema de sonificação em uma plataforma que conceda portabilidade para o sistema de sonificação, proporcionando mobilidade e adaptabilidade ao sistema.
7. Desenvolver um sistema de sonificação embarcado.

## 1.3 Principais Contribuições deste Trabalho

As principais contribuições do trabalho são:

- Implementação de um sistema de retorno sonoro complementar ao de retorno visual existente em sistemas SPM;
- Desenvolvimento de um circuito de condicionamento para adequação do sinal de varredura;
- Estudo e proposição de um modelo para tratamento do sinal, de forma que a sonificação do mesmo remeta ao processo de varredura SPM em tempo real;
- Nova abordagem de sonificação utilizando plataformas embarcadas para implementação de um modelo de sonificação;

## 1.4 Publicações

1. FREITAS, TIAGO; MIRANDA, HUDSON; RABELO, CASSIANO; Jorio, Ado. Implementação de sistema para sonificação de microscopia de força atômica. XXII Congresso Brasileiro de Automática 2018.
2. FREITAS, TIAGO; MIRANDA, HUDSON; RABELO, CASSIANO; Jorio, Ado. Instrumentation and Algorithms for the Sonification of Scanning Probe Microscopy Output. 3rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers INSCIT 2018.

O primeiro trabalho tem por objetivo acrescentar uma nova metodologia de avaliação da técnica de microscopia de força atômica, utilizando sonificação de tal forma que informações sobre os dados disponíveis e o processo físico sejam incluídas em um retorno auditivo para o usuário. No segundo trabalho foi implementado um sistema de sonificação de dados em tempo real que permite gerar parâmetros baseados em uma varredura SPM para sonificação.

## 1.5 Organização do texto

Para desenvolvimento deste trabalho, o texto foi estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica referente aos conceitos das técnicas de SPM, com uma abordagem mais detalhada sobre *Atomic Force Microscopy*, *AFM*, sendo discutidos também os princípios básicos referentes à aquisição de dados

em SPM. Serão abordados também alguns princípios de processamento digital de sinais e por último será feita uma rápida abordagem referente ao conceito de *Single Board Computer (SBC)*.

No capítulo 3 serão discutidos alguns trabalhos onde a retorno sonoro foi abordada com aplicação em sistemas de microscopia de varredura por sonda, com aplicação em estudos de nanomanipulação. Estes trabalhos reforçam a aplicabilidade de retorno sonoro em sistemas de microscopia de varredura.

No capítulo 4 será apresentada a metodologia utilizada para desenvolvimento do trabalho, com descrição das etapas iniciais de testes de aquisição para validação da viabilidade de desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo também será descrito o desenvolvimento do circuito, bem como o desenvolvimento do algoritmo que será utilizado para sonificação dos dados de varredura.

Os resultados obtidos em condições reais de aplicação do sistema proposto são apresentadas no capítulo 5, onde dados em tempo real de varredura foram adquiridos e sonificados. Ainda neste tópico, serão apresentados resultados referente ao teste aplicado a um determinado grupo de usuários que contribuiu para validar a importância do trabalho desenvolvido. Finalmente, no capítulo 6 são descritas as conclusões, e perspectivas de utilização do sistema proposto.



# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

A primeira sessão deste capítulo descreverá os conceitos teóricos da técnica de microscopia de varredura por sonda. Será descrita a microscopia de força atômica, apresentando os princípios que regem o funcionamento da técnica, sendo ao final abordado o *tunnig fork AFM* (Ruiter et al., 1998), técnica utilizada no sistema que serviu como base para desenvolvimento deste trabalho. A segunda seção aborda alguns conceitos sobre amostragem em sistemas de SPM; para uma melhor correlação entre o processo de varredura e a proposta deste trabalho. A terceira seção apresentará alguns conceitos e definições de processamento digital de sinal. A quarta e última seção aborda os fundamentos da plataforma utilizada para implementação do sistema proposto, descrevendo a sistema escolhido para este trabalho.

### 2.1 Microscopia de varredura por sonda

A técnica de SPM consiste em percorrer uma amostra com uma sonda, sendo que a partir da interação entre a amostra e a sonda, é possível formar imagens de diversas propriedades de amostras, com resolução que pode chegar abaixo do angstrom. Esse processo é realizado linha por linha, sendo que para cada linha é realizado um movimento de ida (*Forward*) e de volta (*Reverse*) no sentido definido para a varredura da amostra (Mironov, 2004). O diagrama esquemático de um sistema SPM pode ser visto na figura 2.1.

O sistema de retroalimentação, FS, atua de forma a manter constante o valor do parâmetro  $P$  igual ao valor  $P_0$ , que o usuário define previamente no sistema. Se a interação entre a amostra e a sonda altera, ocorre uma variação no valor do parâmetro  $P$ , fazendo com que o sistema de controle atue, aplicando um sinal em um transdutor piezoelétrico que controla a distância entre amostra e sonda. O transdutor usa o sinal  $\Delta P$  para corrigir a interação  $Z$  entre sonda e amostra, trazendo-o de volta ao valor

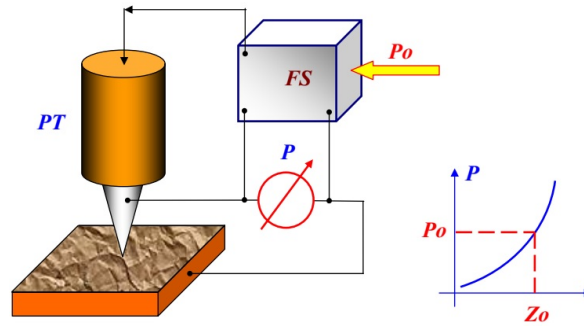


Figura 2.1: O diagrama de blocos do sistema de retroalimentação em microscópio de varredura por sonda, sendo  $P$  o valor medido resultante da interação da sonda com a amostra, que deve ser mantido constante em função de  $P_0$ , definido pelo usuário no sistema.  $Z_0$  corresponde a posição inicial da sonda em relação a amostra (distância vertical), que deve ser mantido constante. Figura extraída de (Mironov, 2004)

inicial  $Z_0$ , correspondendo a um sinal diferencial próximo de zero. Assim, é possível controlar a interação da sonda com a amostra com alta precisão.

Como exemplos, no caso da microscopia de força atômica (AFM), esta interação é gerada pela força de repulsão de Pauli ou de atração de Van der Waals entre a sonda e a superfície. No caso da microscopia de varredura por tunelamento (STM), a interação é medida pela corrente elétrica de tunelamento entre a sonda e a superfície. Geralmente a interação é muito sensível à distância entre a sonda e a superfície, de forma que a varredura carrega informação da sua topografia.

Em alguns microscópios de varredura por sonda existentes, a precisão no controle da distância atinge o valor de  $\sim 0,01 \text{ \AA}$  (Mironov, 2004). Durante o movimento da sonda ao longo da superfície da amostra, a interação da sonda com a amostra induz mudanças no parâmetro de interação  $P$ .

Durante a varredura, a sonda primeiro se move acima da amostra ao longo de uma determinada linha (varredura de linha), portanto, o valor do sinal alimentado para o transdutor, proporcional ao valor de altura na topografia de superfície, é gravado na memória do computador. Em seguida, a ponta volta ao ponto inicial e as etapas para a próxima linha de varredura e o processo se repetem novamente.

O sinal de retroalimentação gravado durante a varredura é processado pelo computador e, em seguida, a imagem da interação da sonda com a superfície  $Z = f(x, y)$  é demonstrada por meio de gráficos no computador.

Juntamente com a investigação da topografia da amostra, os microscópios de varredura por sonda permitem estudar várias propriedades de uma superfície: mecânica (AFM), elétrica (STM), magnética (MFM), óptica (SNOM) e muitas outras (Mironov, 2004).

Historicamente, o primeiro microscópio na família de microscópios de varredura

por sonda é o microscópio de varredura de tunelamento (no inglês *Scanning Tunneling Microscope, STM*), Figura 2.2. O princípio de funcionamento do STM é baseado no fenômeno de tunelamento de elétrons através de uma estreita barreira de potencial entre uma ponta de metal e uma amostra condutora em um campo elétrico externo. O STM é um sistema eletromecânico com uma retroalimentação negativa. Em um de seus modos de funcionamento, o sistema de retroalimentação FS, mantém o valor da corrente de tunelamento no nível constante ( $I_0$ ), selecionado pelo usuário. O controle do valor da corrente, e conseqüentemente da distância da ponta da amostra, é realizado movendo a ponta ao longo do eixo Z com a ajuda de um elemento piezoelétrico (Mironov, 2004).

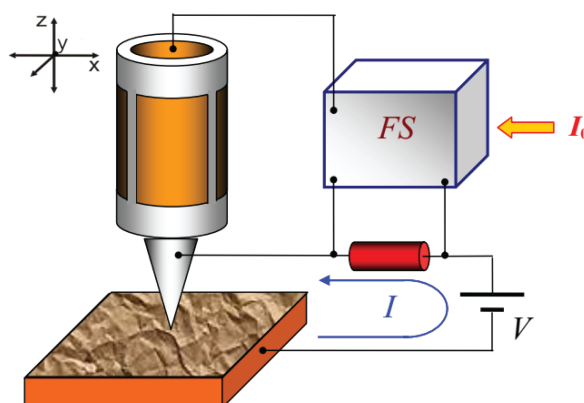


Figura 2.2: O diagrama de blocos do sistema de feedback em microscópio de varredura de tunelamento. Figura extraída de (Mironov, 2004)

Apesar do STM ter sido considerado um avanço fundamental para a pesquisa científica, ele era limitado a determinadas aplicações, porque funcionava apenas em amostras condutoras eletricamente. Apesar destes limites, o STM continua a ser uma técnica muito útil e é amplamente utilizado em física e ciência dos materiais para caracterização de estrutura eletrônica de metais e semicondutores, e em estudos fundamentais de efeitos eletrônicos em superfícies metálicas (Eaton e West, 2010). Tal cenário, levou os pesquisadores a pensar em um novo instrumento que seria capaz de produzir imagens de amostras variadas, sendo o primeiro microscópio de força atômica proposto em 1986.

### 2.1.1 Microscopia de força atômica AFM

Dentre as técnicas de SPM, a microscopia de força atômica (do inglês, *Atomic Force Microscopy, AFM*), destaca-se pela versatilidade e simplicidade de aplicação, em vários tipos de materiais (condutores, não-condutores, materiais biológicos, dentre outros). O AFM tornou-se uma ferramenta muito versátil na ciência de superfície, podendo ser aplicada em vários ambientes e faixas de temperatura (B. Bhushan, 2004).

Um microscópio de força atômica (AFM) permite, por exemplo, obter imagens que mostram degraus atômicos individuais numa amostra, ou ver a estrutura das moléculas. A forma como a técnica de AFM é aplicada proporciona um nível de interação da sonda com a superfície da amostra, regida pela força de repulsão de Pauli ou pela força de atração de Van der Waals, em que a ponta "sente" fisicamente a superfície da amostra, construindo um mapa do relevo da mesma.

A maior parte dos sistemas AFM comerciais consiste em uma ponta com um raio de alguns nanômetros que está localizada no final de um cantilever flexível. As dimensões do cantilever são definidas de forma a permitir se o mesmo seja capaz de se dobrar sob forças atômicas resultantes da interação Van der Waals ou repulsão Pauli quando a ponta interage com a amostra. O cantilever reflete um raio laser em um fotodiodo de quatro setores para medir a deflexão do feixe e, assim, a deformação do cantilever em contato com a superfície, com uma precisão de tipicamente  $0,1 \text{ nm}$  (Nicklaus, 2014). A deflexão é então usada como sinal de retroalimentação para o controle de varredura do imageamento topográfico da amostra, conforme pode ser visto na Figura 2.3. As características topográficas da amostra dobram o cantilever em  $\Delta Z$ , o que leva a uma deflexão do ponto no foto-diodo de quatro setores em  $\Delta D$ . Duas grandezas podem ser medidas pelo sistema óptico: a inclinação do cantilêver devido a forças atrativas ou repulsivas ( $F_Z$ ) e a torção do cantilever devido a componentes laterais ( $F_L$ ) das forças de interação da superfície da ponta. Se os valores de referência da fotocorrente nas seções fotodiodo forem designados como  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $I_{03}$ ,  $I_{04}$  e  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$  são os valores atuais após a mudança da posição do cantilever, então correntes diferenciais de várias seções do fotodiodo  $\Delta I_i = I_i - I_{0i}$  caracterizará o valor e a direção da inclinação ou torção do cantilever.

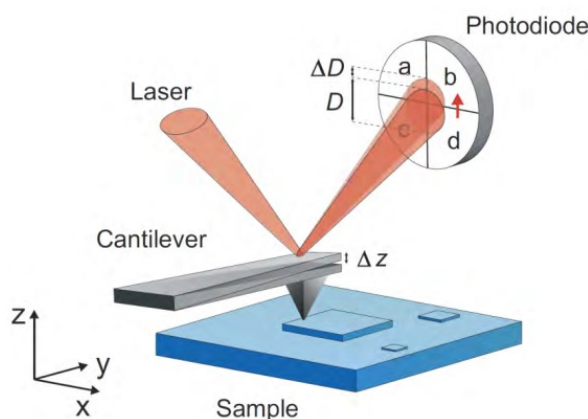


Figura 2.3: Esboço da geometria de deflexão do feixe em um sistema AFM. O sistema de controle compensa o movimento da ponta, variando a posição vertical da amostra em relação a ponta para percorrer a topografia. Figura extraída de (Nicklaus, 2014).

Os sistemas AFM, geralmente são associados a três modos de retroalimentação

(Eaton e West, 2010), modo contato (*contact mode*), modo não-contato (*non-contact mode*), e modo intermitente (*tapping mode*), também conhecido como modo batida:

- *contact mode* - Foi o primeiro modo desenvolvido para AFM. Conceitualmente é o modo mais simples, que serviu de base para desenvolvimento dos demais modos. A sonda é colocada em contato mecânico com a amostra, sendo que a interação entre as mesmas é baseada no princípio da repulsão de Pauli. Tal condição faz com que o cantilever se dobre para cima. Durante a varredura, o sistema AFM mantém a deflexão do cantilever constante para seguir a topografia, Figura 2.4.

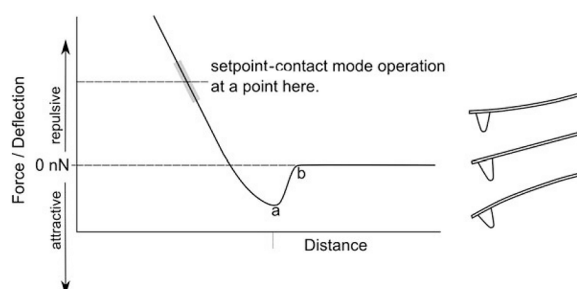


Figura 2.4: Regime operacional *contact mode*. Com uma pequena amplitude e um cantilever rígido, a interação ocorre dentro do regime repulsivo, por exemplo na região demarcada como *setpoint*, na imagem. Figura extraída de (Eaton e West, 2010)

- *non-contact mode* - Neste modo de operação, a ponta deve estar suficientemente próxima da superfície da amostra para atingir alta sensibilidade, sem passar no regime repulsivo usado para o modo de contato AFM. O AFM sem contato é, portanto, realizado no regime atrativo, baseado nas forças de atração de van der Waals, que predominam a alguns nanômetros acima da superfície, Figura 2.5.

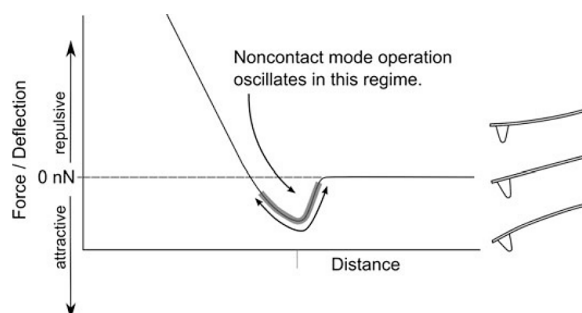


Figura 2.5: Regime operacional *non-contact mode*. Com uma pequena amplitude e um cantilever rígido, a sonda pode oscilar apenas dentro do regime atrativo. Figura extraída de (Eaton e West, 2010)

- *tapping mode* - Neste modo o sistema utiliza maior amplitudes de oscilação (10-80nm). Dessa forma a sonda toca a amostra em um determinado momento

durante o ciclo de oscilação, levando à redução da amplitude de oscilação, que é utilizado como parâmetro de feedback pelo AFM, Figura 2.6. Geralmente é mais estável, e apresenta melhores resultados em amostras macias.

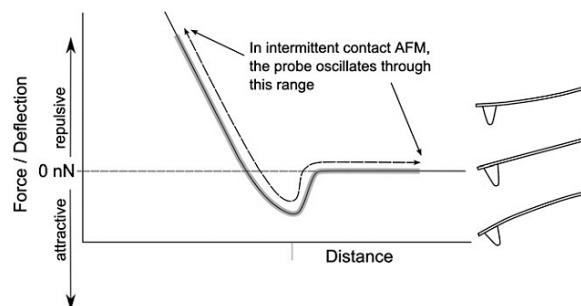


Figura 2.6: Regime operacional *tapping mode*. Neste modo, a oscilação da sonda AFM é grande o suficiente para passar do regime repulsivo, através do regime atrativo e completamente fora de contato em cada ciclo. Figura extraída de (Eaton e West, 2010)

### 2.1.2 Tuning Fork AFM

Como dito anteriormente, os microscópios AFM comerciais geralmente detectam as deflexões da sonda (devido a interações de sonda/amostra) por meio de detecção óptica. Existe um outro modo de operação para aplicação da técnica de AFM, conhecida como *tuning Fork (TF) AFM* (Ruiter et al., 1998). Em vez de usar um cantilever como braço de alavanca óptica para o laser de deflexão, um *tuning-fork* (diapasão) de quartzo é usado como dispositivo de medidas da interação das sondas AFM com a superfície, geralmente para varredura de modo sem contato. O diapasão está equipado com uma ponta bem fina, sendo excitado mecanicamente em sua frequência de ressonância de tipicamente 32 kHz por um piezo dither na ponta AFM.

Quando o TF oscila, o efeito piezoelétrico do cristal de quartzo gera um potencial elétrico entre os eletrodos das hastes que é proporcional à flexão das hastes do diapasão Nicklaus (2014). Na Figura 2.7, encontra-se ilustrado o esquemático básico do sistema AFM descrito.

A sonda pode ser oscilada verticalmente como um cantilever AFM, ou paralela a superfície no modo de força de cisalhamento, do inglês *shear-force*, onde o diapasão está orientado ortogonalmente em relação a amostra, Figura 2.8. A oscilação paralela no modo *shear-force*, mantém uma distância constante da amostra em relação a sonda ao longo do ciclo de oscilação, o que é vantajoso para algumas aplicações. Com a diminuição da distância da amostra em relação a sonda, a frequência de ressonância do diapasão diminui e pode ser usada como parâmetro de retroalimentação para o sistema AFM (Ruiter et al., 1998).

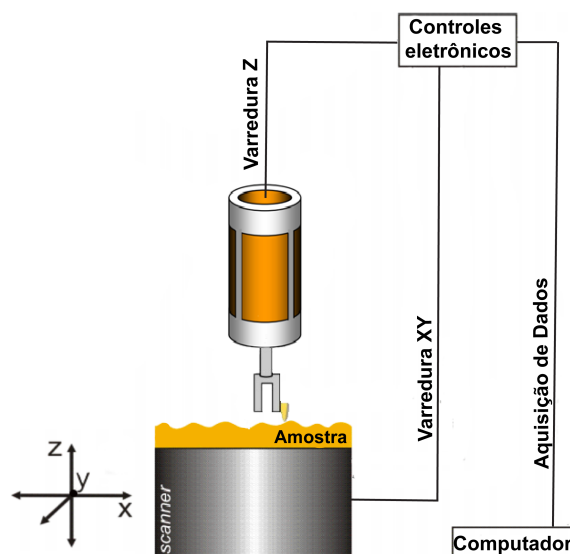


Figura 2.7: Esquemático de um sistema AFM baseado em um diapasão.

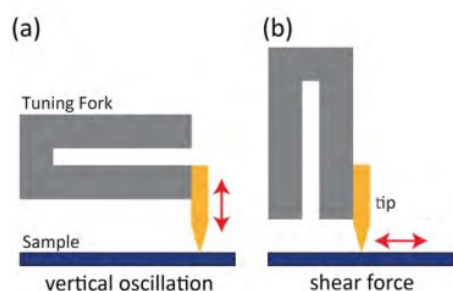


Figura 2.8: Esquema do modo de oscilação vertical (a) e modo *shear-force* (b) de uma *tuning fork* AFM. As setas indicam a direção de oscilação. Figura adaptada de (Nicklaus, 2014).

## 2.2 Princípios básicos de aquisição de dados em SPM

### 2.2.1 Amostragem de Dados

Para a maioria das técnicas de SPM, os dados são amostrados regularmente, formando uma matriz de pontos com a mesma distância entre os pontos na direção  $x$  e os mesmos na direção  $y$  (Mironov, 2004), conforme ilustrado na Figura 2.9.

Ao varrer uma superfície, a sonda executa um movimento contínuo, muitas vezes com velocidade constante na direção lateral. O processo de amostragem em si pode ser entendido como um filtro que pode distorcer os valores medidos. Não há uma maneira única de amostragem de dados em uma varredura SPM (Klapetek, 2013). A Figura 2.10

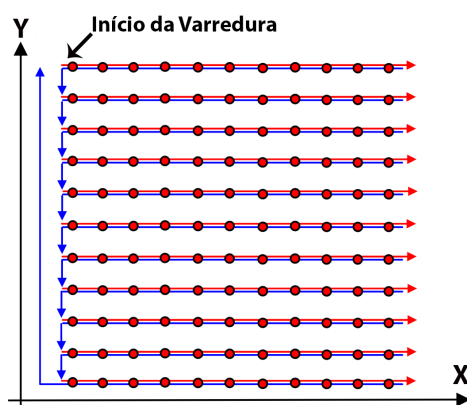


Figura 2.9: Ilustração esquemática do processo de varredura. A direção do movimento para frente é indicada por setas vermelhas. O movimento reverso é indicado por setas azuis. Cada ponto representa local de coleta de informação.

ilustra dois extremos (B e C) do que pode ser usado como um valor em um único pixel de um sinal adquirido 2.10 (A) no processo de varredura. Em 2.10 (B) considera-se uma média sobre o intervalo de amostragem (barra de erros nos pontos) em 2.10(C) como um valor instantâneo no ponto de aquisição. Como mostrado o perfil resultante pode diferir nos dois casos. A abordagem 2.10 (C) está mais relacionada com o entendimento sobre interpolação de dados, que diz respeito a construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados pontuais previamente conhecidos, sendo aplicada ao sinal de varredura. Por outro lado, o benefício da abordagem 2.10 (B) está no fato de reduzir, ou até mesmo eliminar a perda de algumas características nítidas no sinal que de outra forma seriam perdidas.

Do ponto de vista da eletrônica e do *software*, ambas as amostragens podem ser realizadas facilmente em SPM. O loop de retroalimentação lê os dados tão rapidamente que os valores são processados quase de maneira contínua, em comparação com a amostragem de imagens (Klapetek, 2013). Na prática, uma abordagem intermediária entre esses dois extremos, usando a média até certo ponto em um intervalo próximo da posição exata, é utilizada. O usuário, no entanto, não pode alterar o tratamento do sinal na maioria dos instrumentos SPM e, na verdade, na maioria dos casos, ele nem tem informação como a amostragem é realizada.

### 2.2.2 Efeito do sistema de retroalimentação

Mesmo que os princípios de detecção de interação possam ser diferentes entre as técnicas de SPM existentes (detecção de força por um cantilever e feixe de laser sendo os mais frequentes em AFM), há sempre um sistema de retroalimentação tentando preservar o valor de ajuste desejado medido na interação, ou seja, manter um valor de controle



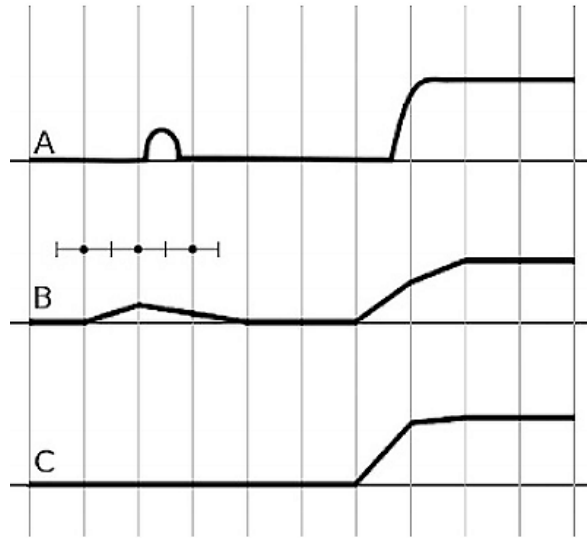


Figura 2.10: Em (A) dados "reais", (B) dados médios nas interseções de dados reais e linhas verticais, (C) dados obtidos apenas como valores nas interseções. Figura extraída de (Klapetek, 2013).

referente ao processo de varredura sempre constante. Como este é um componente ativo do SPM, com muitos parâmetros que podem ser variados, certamente terá influência importante na precisão dos dados medidos.

A implementação mais comum de um sistema de retroalimentação no SPM é via um controlador proporcional-integral-derivativo. Mesmo que isso possa ser realizado praticamente de forma analógica, atualmente é tipicamente um processo digital em execução em dispositivo de tempo real, como um chip FPGA ou um microcontrolador Klapetek (2013). Pode ser modelado pela Equação 2.1,

$$Z(t) = P(s(t) - s_{set}) + I \int_0^t (s(t - \tau) - s_{set}) d\tau + D \frac{\partial}{\partial t} (s(t) - s_{set}) \quad (2.1)$$

onde  $Z$  é a resposta (por exemplo, tensão do piezo no eixo  $Z$ ),  $s(t)$  é o sinal da interação medida durante a varredura,  $s_{set}$  é o valor desejado do sinal de interação (setpoint) e as constantes  $P$ ,  $I$  e  $D$ .

A constante  $P$  descreve a resposta imediata ao erro entre a interação e o valor  $d$ . A constante  $I$  é utilizada para minimizar a resposta ao ruído durante a varredura, bem como para condicionar o sistema a ajustar o valor de varredura ao valor do setpoint quando os mesmos estiverem ligeiramente defasados. Por último, a constante  $D$ , descreve a resposta à mudança no erro. Como os loops de realimentação digital são muito rápidos, em comparação com a dinâmica de outras partes do SPM, esse termo é frequentemente omitido (Klapetek, 2013). O efeito dos termos  $P$  e  $I$  na saída da retroalimentação encontra-se ilustrado na Figura 2.11. Valores maiores para o parâmetro  $P$

faz com que o sistema fique mais sensível ao erro entre o valor lido e o valor de setpoint, ocasionando variações mais abruptas no sinal de varredura, como pode ser visto na Figura 2.11(a). Para compensar essas variações o parâmetro I é utilizado de forma que o ajuste do valor lido com relação ao valor de setpoint seja mais direto. Valores elevados para parâmetro I podem ocasionar mais sensibilidade as variações ocasionando atraso na estabilização do sistema, como pode ser visto na Figura 2.11(b).

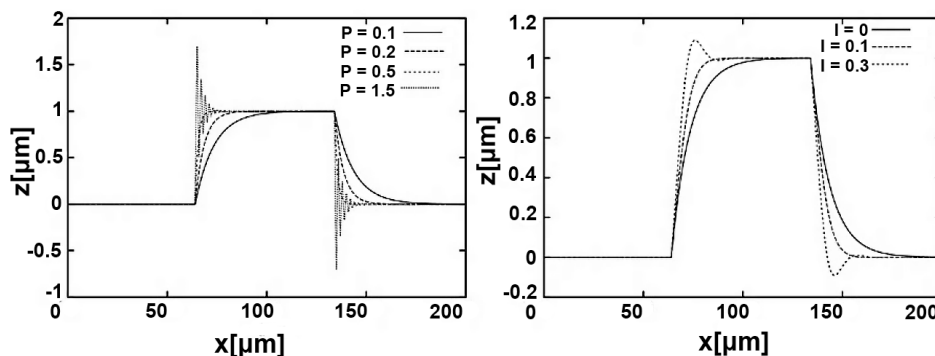


Figura 2.11: Efeitos de retroalimentação típicos no controlador PI: (a) termo proporcional (termo integral é zero), (b) termo integral (o termo proporcional é 0,1 para todas as curvas). Figura extraída de (Klapetek, 2013).

Como o ajuste da retroalimentação é às vezes difícil e introduz influência humana em medições, os fabricantes tendem a desenvolver métodos para fazer isso automaticamente em seus equipamentos. Do ponto de vista das medições quantitativas, isso pode ser contraditório. Se por um lado é bom suprimir o fator humano, por outro, se o usuário não sabe o que o ajuste de retroalimentação adaptativo faz durante a medição, ele dificilmente pode estimar sua influência nos resultados. O benefício dessa abordagem depende, portanto, de como a retroalimentação adaptativa é realizada e como é documentado pelo fabricante para uma melhor compreensão por parte do usuário.

## 2.3 Princípios de Processamento Digital de Sinais

Um sinal analógico é um processo físico que depende do tempo e pode ser modelado por uma função real sobre uma variável contínua  $t$  que representa o tempo (Proakis e Manolakis, 2013). Quando passamos um sinal através de um sistema, como na filtragem, dizemos que processamos o sinal. Neste caso, o processamento do sinal envolve a filtragem do ruído e interferência do sinal desejado (Alan V. Oppenheim, 2009).

Um sinal contínuo é convertido para um sinal discreto, para que o computador possa ser usado para analisar e realizar cálculos complexos que, de outra forma, seriam

muito difíceis de serem realizados. A área de processamento digital de sinal é baseada no sinal analógico discretizado.

Um sinal digital é definido como uma função que mapeia um subconjunto sequencial dos valores em um conjunto finito de símbolos (valores discretos). Um sinal analógico pode ser digitalizado por um processo de amostragem, que aproxima valores do sinal analógico tomados em intervalos igualmente espaçados no tempo cujo intervalo discreto de amostragem,  $T_s = 1/F_s$ , deve ser cuidadosamente escolhido para se assegurar uma melhor representação digital fidedigna do sinal analógico original (Proakis e Manolakis, 2013). Fica claro que quanto maior o número de amostras (maior taxa de amostragem) mais fiel se mostra a representação digital.

O passo seguinte ao processo de amostragem chama-se quantização e consiste em converter um sinal de valor contínuo, em um sinal (digital) de valor discreto em tempo discreto. O valor de cada amostra de sinal é representado por um valor selecionado de um conjunto finito de valores possíveis. A diferença entre a amostra não quantificada  $x(n)$  e a saída quantizada  $x_q(n)$  é chamado de erro de quantização. Ao final o sinal passa por um processo de codificação onde cada valor discreto  $x_q(n)$  é representado por uma sequência binária. (Proakis e Manolakis, 2013).

Os sistemas de conversão analógico-digital (ADCs) traduzem grandezas analógicas em um formato digital, utilizado no processamento de informação, computação, transmissão de dados e em sistemas de controle. Como parte do processo de conversão, as tensões e correntes são “normalizadas” em uma faixa de valores compatível com os valores atribuíveis a um determinado ADC, cujos valores binários representam os estágios lógicos de diferentes níveis de corrente (menos usado) ou de tensão (Proakis e Manolakis, 2013). As etapas do processo de conversão de um sinal analógico em digital encontra-se representada na Figura 2.12.

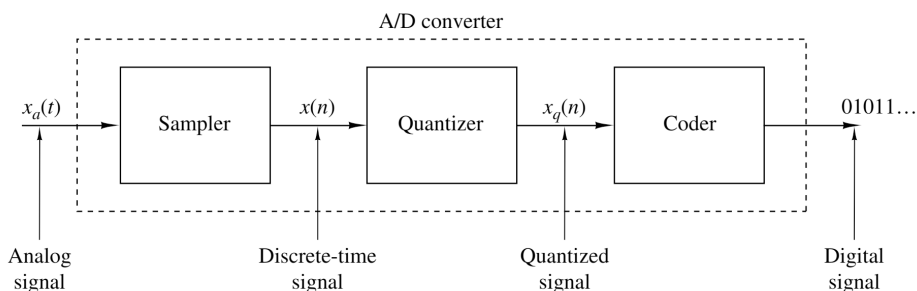


Figura 2.12: Estágios conversor Analógico-Digital. Figura extraída de (Proakis e Manolakis, 2013).

### 2.3.1 Perda de sinal, taxa de amostragem, Teorema de Nyquist-Shannon

O processo de quantização causa uma perda de informação em relação ao sinal analógico original: o valor de um certo  $x(n)$  não pode ser recuperado a partir do conhecimento da amostra  $x[n]$  correspondente. Há ainda outro tipo de informação que pode ser perdida no processo de amostragem, relacionada ao tamanho do intervalo de amostragem  $\Delta t$  (Proakis e Manolakis, 2013).

A frequência de amostragem, definida como  $F_s = 1/\Delta t$ , pode ser compreendida como o número de amostras tomadas do sinal analógico por unidade de tempo. O teorema de Nyquist-Shannon diz que uma condição suficiente para que uma função contínua possa ser reconstruída perfeitamente a partir de uma representação discreta de pontos igualmente espaçados é que não seja composta de frequências maiores do que  $F_x/2$ . Por outro lado, se uma função contínua possui em sua composição frequências maiores do que  $F_x/2$  e é amostrada com uma frequência de amostragem menor ou igual a  $F_s$ , então ocorre um processo chamado falseamento, no qual todas as componentes com frequências que excedem  $F_x/2$  são representadas como componentes com frequências mais baixas, causando distorção no sinal amostrado (Alan V. Oppenheim, 2009).

Assim, para evitar distorção, a amostragem a  $F_s$  de um sinal analógico contendo frequências maiores do que  $F_x/2$  deve ser precedida de uma etapa analógica de filtragem anteriormente à conversão A/D, ou seja, de remoção destas componentes, a fim de garantir que o sinal a ser amostrado satisfaça o critério de Nyquist-Shannon e que não ocorra falseamento. Nesse contexto, o filtro passa-baixa é denominado filtro "antifalseamento" (Proakis e Manolakis, 2013).

De modo geral, os filtros permitem a passagem de alguns componentes de frequências de um sinal e interrompem a passagem de outros. O Filtro Passa-Baixas (FPB) permite que as componentes de sinais a partir de  $0Hz$  até o limite de  $F_P$  sejam transmitidos à saída (Alan V. Oppenheim, 2009). A resposta em frequência real para o FPB é apresentada pela Figura 2.13.

O conhecimento das características do sinal a ser amostrado é de extrema importância para a especificação adequada do filtro. Os filtros se tornam mais complexos à medida que as curvas de atenuação se tornam mais abruptas, representada pela região de transição da Figura 2.13. Altas taxas de amostragem reduzem a necessidade de curvas de atenuação acentuadas, reduzindo a complexidade do filtro ao custo de se utilizar um ADC mais rápido e de se processar os dados a taxas mais altas.

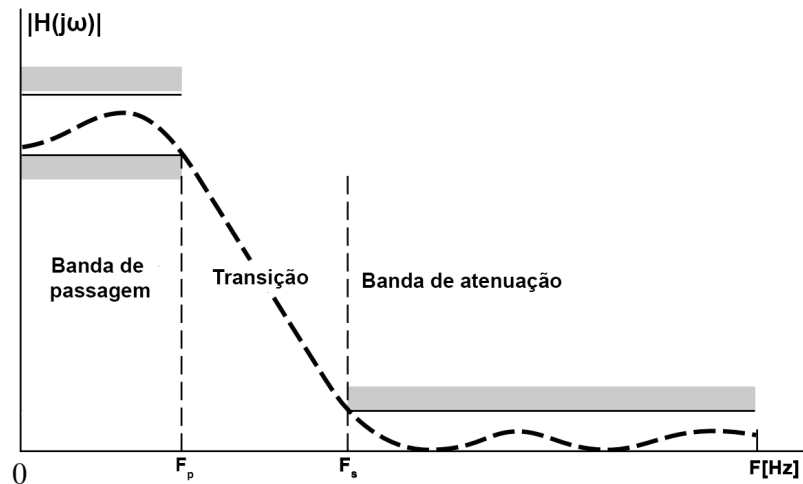


Figura 2.13: Esquema de um filtro passa baixa real. Figura adaptada de (Alan V. Oppenheim, 2009).

### 2.3.2 Decimação

Um dos grandes problemas da sobreamostragem (*oversampling*) é o aumento do número de dados gerados pelo sistema de digitalização. O excesso de dados produzidos pelo conversor A/D de forma desnecessária, implicará em um aumento da carga computacional necessária para processá-los. Uma forma simples de resolver este problema é reduzir a frequência de amostragem (*downsampling*) após o processamento, por um fator  $D$  inteiro, retornando a frequência de amostragem especificada inicialmente.

Suponhamos que o sinal  $x(n)$  seja reduzido por um fator inteiro  $D$ . O sinal é considerado diferente de zero no intervalo de frequência,  $|F_s| \leq Fx/2$ . Sabemos que, se reduzirmos a taxa de amostragem simplesmente selecionando cada valor  $D_{th}$  de  $x(n)$ , o sinal resultante será uma versão com falseamento de  $x(n)$ , com uma frequência de dobramento de  $Fx/2D$ . Para evitar o falseamento, devemos primeiro reduzir a largura de banda de  $x(n)$  para  $Fmax = Fx/2D$ . Então, podemos diminuir a amostra por  $D$  e, assim, evitar o falseamento (Proakis e Manolakis, 2013). O processo de decimação é ilustrado na Figura 2.14.

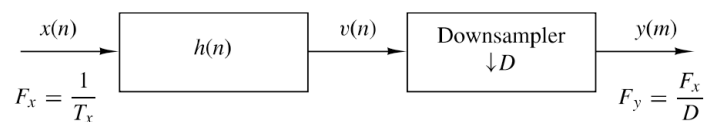


Figura 2.14: Processo de decimação. Figura extraída de (Proakis e Manolakis, 2013).

A definição formal de decimação é definida pela Equação 2.2, sendo que  $h[k]$  representa o filtro antifalseamento, normalmente um passa-baixa, aplicado para evitar o

efeito de falseamento, devido a redução da taxa de amostragem.

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k]x[nM - k] \quad (2.2)$$

## 2.4 *Single Board Computer (SBC)*

Um computador de placa única (no inglês *single board computer*, *SBC*) é um sistema computacional construído em torno de uma única placa de circuito impresso. Os blocos principais de arquitetura SCB são o núcleo do processador, bancos de memória, barramentos e periféricos. O barramento de dados interno é usado para conectar todos os blocos do sistema. Novas arquiteturas de processadores multicore acima de  $1GHz$  agora são características comuns das plataformas SBC. A arquitetura geral do computador de placa única é mostrada na Figura 2.15. Possui microprocessador(es), memória, entrada/saída(I/O) e outros recursos necessários para um computador funcional. Ao contrário de um computador pessoal, a maioria dos SBCs não possui slots de expansão para funções periféricas ou expansão. Como todos os componentes, como processador(s), RAM, GPU, etc., estão integrados em uma única placa, um SBC não pode ser atualizado (Pajankar, 2017).

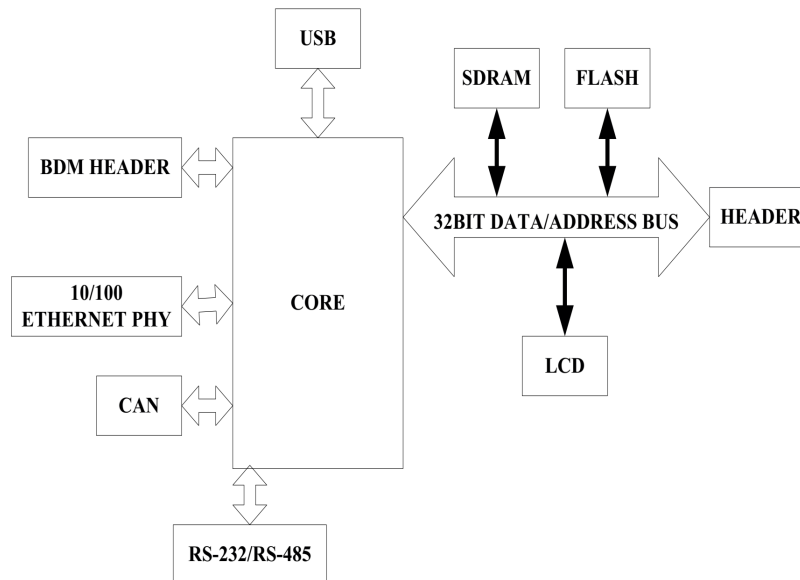


Figura 2.15: A a arquitetura de computadores de placa única. Figura extraída de (Mišković et al., 2014).

Com a evolução tecnológica na área de eletrônica e semicondutores, os preços da maioria dos SBCs são bastante acessíveis. Uma das características mais importantes dos SBCs é a relação custo-benefício. Com um preço em torno de US \$50 cada, é possí-

vel ter em mãos uma ferramenta de desenvolvimento adequada para novos aplicativos, depuração, teste, desenvolvimento de hardware e sistemas de automação.

Uma característica predominante do SBC é o sistema em um chip ( no inglês *System-on-a-Chip, SoC*), que trata-se um circuito integrado (IC) que possui todos os componentes de um computador, ou outro sistema eletrônico em um único chip (Flynn e Luk, 2011), cuja estrutura básica encontra-se ilustrada na Figura 2.16.

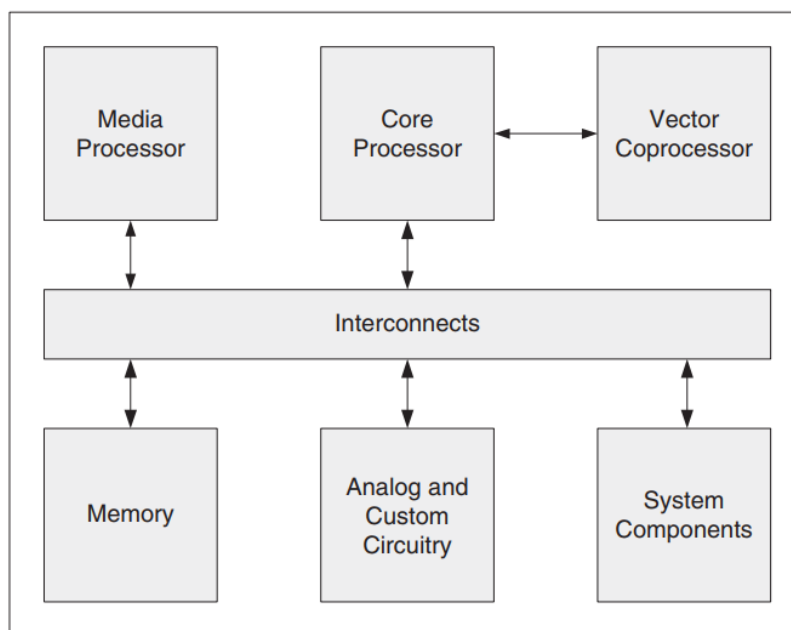


Figura 2.16: Um modelo básico de sistema SoC. Figura extraída de (Flynn e Luk, 2011).

SoCs são muito comuns em dispositivos eletrônicos móveis devido ao seu baixo consumo de energia e versatilidade. É tão poderoso quanto um computador comum e que pode executar um sistema operacional completo como o Linux. O avanço dos SoCs acessíveis permitiu que os desenvolvedores utilizassem linguagens de programação de alto nível para criar um sistema. Também foi possível desenvolver aplicativos na própria máquina, tornando o desafio de desenvolver sistemas embarcados muito mais fácil (Pajankar, 2017).

Baseado em fabricantes e designers, os SBCs são agrupados em famílias, modelos e gerações. Algumas famílias populares de SBC são (Pajankar, 2017):

- Raspberry Pi pela Fundação Raspberry Pi
- Banana Pi e Banana Pro
- Intel Edison e Galileo
- Cubieboard

- Beaglebone e Beagleboard

### 2.4.1 Plataforma Raspberry Pi 3 Model B

A placa Raspberry Pi é um computador completo de baixo custo, possuindo um microprocessador no lugar do microcontrolador, geralmente presentes neste tipo de placa, memória, entrada e saída. Mesmo sendo de tamanho reduzido, a placa pode ser conectada a um monitor, teclado e mouse normalmente, e fazer tudo o que se espera de um desktop comum. Dessa forma, é possível acessar a internet, reproduzir vídeos de alta definição, fazer planilhas, processamento de texto e executar jogos, uma vez que a plataforma é capaz de executar sistemas operacionais com ambientes gráficos conhecidos ([RaspberryPi, 2018](#)). O fato de ser um computador totalmente funcional (um SBC), torna a plataforma interessante para projetos mais robustos, caso haja necessidade de um SO e de memória RAM.

Aplicações que usam somente um microcontrolador geralmente são dedicadas, pois a lógica do desenvolvimento de sistemas embarcados preza economizar recursos como energia e espaço. Porém, os sistemas dedicados precisam ser ligados a computadores externos para serem programados, e o fato da Raspberry Pi ser um computador completo em si, elimina essa necessidade, a partir do momento que um SO é carregado na placa. Em uma placa Raspberry Pi pode haver várias aplicações salvas em um cartão SD, que seriam executadas conforme algum controle. Isso faria um sistema ter bem mais funcionalidades, além dos sistemas embarcados comuns ([RaspberryPi, 2018](#)).

Existem vários modelos de placas Raspberry Pi disponíveis no mercado. A maior diferença entre esses modelos são os preços e recursos disponíveis. O modelo mais recente disponível no momento do desenvolvimento do trabalho é o modelo Raspberry Pi 3 Modelo B (também conhecido como 3B), [Figura 2.17](#). As especificações do modelo podem ser conferidos na [Tabela 2.1](#).



Figura 2.17: Raspberry Pi 3 Model B. Figura extraída de ([Upton e Halfacree, 2014](#))



Tabela 2.1: Especificações do Raspberry Pi 3 Model B

Arquitetura	ARMv8
SoC	Broadcom BCM2837
CPU	1.2GHZ 64-bit quad-core ARM Cortex-A53
GPU	Broadcom VideoCore IV
RAM	1 GB (compartilhada com GPU)
USB	2.0 ports 4
Saída de Vídeo	HDMI rev 1.3 and Composite Video RCA jack
Armazenamento	Micro SDHC slot
Comunicação	10/100 Mbps Ethernet, Bluetooth, and WiFi
Alimentação	5V via MicroUSB
Consumo	800 mA (4W)

Além do mais, o Raspberry Pi tem a capacidade de interagir com o mundo exterior, por meio de sensores, atuadores, luzes e motores, podendo ser usado como controlador de vários projetos. Outras plataformas podem ser usadas para prototipagem de sistemas. Porém, usando Raspberry Pi, os projetos terão uma capacidade além daqueles desenvolvidos em outras placas de prototipagem, pois o fato de possuir mais memória RAM e a capacidade de ter um SO carregado, amplia os recursos de desenvolvimento da placa ([Pajankar, 2017](#)).

De acordo com [Halfacree e Upton \(2012\)](#), o Raspberry Pi é compatível com sistemas operacionais baseados em Linux, e o Raspbian é a distribuição Linux oficial do Raspberry Pi. Qualquer linguagem de programação que possua suporte para o processador ARMv6 pode ser utilizada no Raspberry Pi, tais como Python, C/C++, Java, Scratch e Ruby. Todas essas linguagens estão instaladas por padrão ([RaspberryPi, 2018](#)).

O recente desenvolvimento do minicomputador Raspberry Pi abriu grande potencial para a computação ser aplicada em um grande número de áreas. Devido às vantagens exclusivas do sistema Raspberry Pi, esta tecnologia é muito promissora para fornecer soluções para necessidades específicas de projetos que envolvem aquisição e processamento de dados. Isso inclui, mas não se limita a ferramentas educacionais, propósito inicial quando foi desenvolvida, especialmente o uso de GPIO (General Purpose Input / Output), que permite a aquisição automatizada de dados e a produção de sistemas de controle digital simples até complexos sistemas de automação ([Pajankar, 2015](#)).

# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

Desde a sua invenção no início da década de 80, a microscopia de varredura por sonda tem sido continuamente desenvolvida para se tornar uma ferramenta versátil e eficiente para pesquisadores, particularmente no campo da ciência e tecnologia de materiais. Trabalhos como de (Colton et al., 1997; Loos, 2005), compila as principais técnicas de SPM existentes, avanços obtidos bem como perspectivas. No trabalho de (Salapaka e Salapaka, 2008), são abordados avanços e desafios referentes a técnicas de controle com objetivo de melhorar a eficiência bem como a resolução de sistemas SPM. Flores e Toca-Herrera (2009), traz um estudo sobre a combinação de AFM com outras técnicas de análise de superfície, como microscopia óptica e técnicas fluorescência. Os autores consideram que essa combinação traz melhorias significativas ao processo de microscopia óptica, bem como confere novas aplicações à microscopia de força atômica.

Técnicas de SPM são aplicadas nas mais diversas áreas, com destaque para a nanomanipulação. Tem como objetivo a manipulação de átomos e moléculas em superfícies, para estudo e caracterização dos mais diversos tipos de materiais. Um dos trabalhos pioneiros dessa área foi o de Eigler e Schweizer (1990), que utilizou STM para posicionamento individual de átomos em uma superfície de níquel monocristalino. Nos trabalhos de (Sitti, 2001; Rubio-Sierra et al., 2005; Custance et al., 2009; Li et al., 2015), são relatadas aplicações de AFM em nanomanipulação, bem como resultados obtidos. A área de nanomanipulação dispõe de algumas soluções comerciais disponíveis no mercado, como por exemplo o *NanoManipulator DP-100/200* da 3rdTech (3rdTech, 2006), com retroalimentação de força, onde é possível sentir a interação da sonda com a superfície da amostra, bem como uma interface 3D para interação visual com a amostra em análise.

A seguir, serão discutidos três trabalhos relacionados ao objeto da pesquisa. O foco dos trabalhos consiste da aplicação de AFM à nanomanipulação; tratam da implementação de interfaces multissensoriais com o advento de retorno sonoro de forma a

complementar a retroalimentação de força e visual normalmente existente em interfaces de nanomanipulação.

### 3.1 Sonificação Interativa para exploração de moléculas simples

O artigo de [Martini et al. \(2004\)](#) apresenta uma interface interativa audio-háptica para o controle de um microscópio AFM (ver 3.1), com o objetivo de explorar outras formas de interação, visando auxiliar na análise experimental. O trabalho foi desenvolvido baseado em um sistema que utiliza cantilever para detecção da interação sonda-amostra durante o processo de varredura.

A proposta do projeto é realizar uma varredura topográfica para localização das moléculas na região da amostra, para então, através da manipulação através do *joystick*, o usuário poderia "escutar" quando uma molécula estaria ligada à ponta do cantilever e, então, realizar os experimentos/medições necessárias. A expectativa era que com o advento da sonificação fosse possível aumentar a eficiência do experimento.

Os dados do sensor utilizados são proporcionais à força aplicada a uma única molécula. Essas forças são medidas em tempo real usando a reflexão de um feixe de laser do cantilever. Foi apresentado um sistema que envolve uma exibição visual dos dados, um joystick de retroalimentação de força para navegar na amostra e fornecer uma retroalimentação tátil das forças, e uma exibição auditiva para monitorar os dados medidos enquanto a amostra é manipulada interativamente.

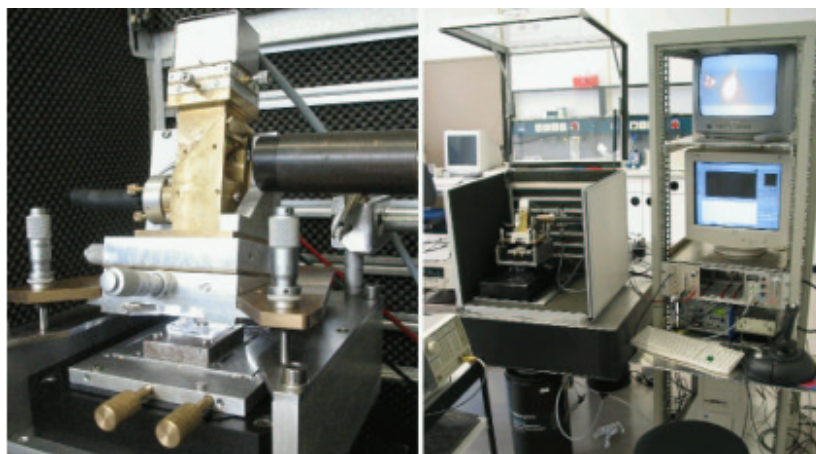


Figura 3.1: Figura extraída de: ([Martini et al., 2004](#))

Em um primeiro momento, o trabalho abordou diferentes níveis de sonificação dos dados brutos e sua conversão em sinal sonoro e, posteriormente, através da chamada Sonificação Baseada em Modelos ( no inglês, *Model-Based Sonification, MBS*), pro-

posta por (Hermann, 2002). Esta técnica consiste na utilização de variáveis para a interpretação da diferença de forças aplicadas ao *cantilever*.

Em sua análise, (Martini et al., 2004) concluiu ser difícil avaliar a nova técnica apenas com base em respostas sonoras, porque a operação interativa completa, será necessária para avaliar o processo. Entretanto, alega que as respostas sonoras obtidas dão a impressão de como o som pode auxiliar na análise de dados interativos.

## 3.2 Ferramenta educacional para nanofísica usando renderização multissensorial

O artigo de Marchi et al. (2005) apresenta avaliação de uma ferramenta educacional baseada em uma interface háptica, usada para ensinar fenômenos físicos em escala nanométrica, conforme Figura 3.2.

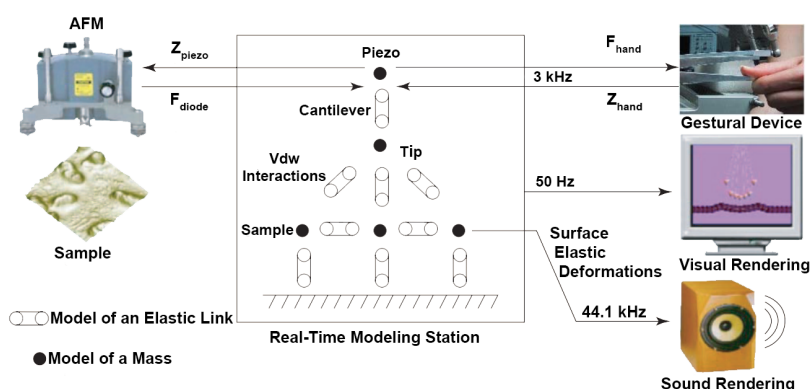


Figura 3.2: Figura extraída de: (Marchi et al., 2005)

O objetivo era que o aluno fosse imerso na nanociência através de uma estação de modelagem em tempo real equipada com um dispositivo de movimento modular, sendo a resposta visual e auditiva gerada de acordo com a dinâmica dos fenômenos.

A estação de modelagem em tempo real utilizada, baseada no trabalho de Marliere et al. (2004), assegura o suporte para a implementação de simulações multissensoriais visuais e auditivos.

Em um primeiro momento foram realizados testes em modelos virtuais de modo que os alunos se familiarizassem com os estímulos multimodais de um ambiente multissensorial voltado às nanomanipulações. Eles sentiam as forças envolvidas, viam a dinâmica da interação e ouviam o som que era capturado na camada atômica da superfície. Após o aprendizado inicial dos alunos, o AFM foi introduzido na cadeia instrumental para a experiência real de nano manipulação.

Por últimos os alunos desconectaram o AFM da plataforma e experimentaram outras interações semelhantes, trabalhando nos parâmetros do modelo de nanomanipulação virtual. Mudando a rigidez do cantilever, a elasticidade da superfície ou os limiares de interação que eles adquirem, alcançam informações através de sentimentos reais, em diferentes interações e seus efeitos, como o que acontece quando um cantilever macio é usado para explorar uma superfície macia ou muito rígida.

Para validação do sistema, o mesmo foi aplicado em um projeto educacional de MEMS (do inglês, *Microelectromechanical Systems*), onde o objetivo era encontrar uma maneira de caracterizar a reação das pernas de *Drosophilae* (uma espécie de inseto), a uma estimulação externa utilizando uma sonda AFM para interagir com o final da perna da mosca (Figura 3.3), de forma a adaptar e controlar, em tempo real, a interação da sonda, habilidades necessárias para nanomanipulação em projetos MEMS.

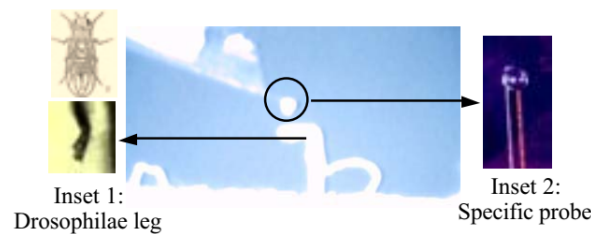


Figura 3.3: Figura extraída de: (Marchi et al., 2005)

Utilizando a plataforma multissensorial, a percepção às variações de força referente aos estímulos foi mais direto do que analisar as curvas de força do cantilever em detalhes, procedimento necessário em um sistema AFM clássico.

### 3.3 Interação multissensorial com um fenômeno nanoescala: a curva de força

O artigo de Marliere et al. (2004) apresenta uma interface multissensorial (ver, ouvir e sentir), que do ponto de vista cognitivo, aumentam a eficiência das interfaces reais. Com as interfaces comerciais de AFM básicas, o usuário fica restrito a movimentos cegos porque a operação de deslocamentos de objetos pode ser executado somente com tarefas automatizadas, sem obter qualquer ciclo de reação de retroalimentação, o que pode levar a danos na amostra ou na ponta, e consome certo tempo.

O interesse de implementar um controle de retroalimentação em tempo real, teve como foco evitar o processo de tentativa e erro, deslocamentos indesejados e varreduras longas para verificar o resultado da operação. Desta forma, o usuário seria capaz de usar o AFM, como um músico usaria seu instrumento, e interagiria fisicamente com a amostra, como com uma amostra em escala humana.



# Capítulo 4

## Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado um sistema de microscopia de varredura por sonda construído no Laboratório de Nano-espectroscopia (LabNS) da UFMG. Neste sistema, como nas configurações padrão do SPM, a sonda de varredura é anexada a um dispositivo, uma cabeça de varredura (*scanhead*), que é responsável por manter e controlar a posição da sonda na escala nanométrica usando atuadores piezoelétricos para movê-lo paralelamente à amostra (plano XY) e verticalmente (eixo Z) (Araujo, 2010). A cabeça de varredura também possui um picomotor, que fornece uma maior amplitude de movimento ao longo do eixo Z, para uma aproximação mais grosseira da sonda em relação à amostra, Figura 4.1. O sistema fabricado no laboratório pode ser visto na Figura 4.2.

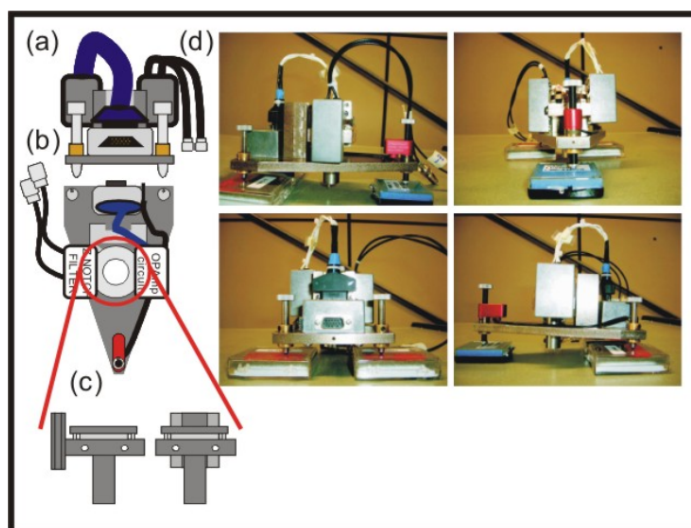


Figura 4.1: (a) Vista posterior da cabeça de leitura. (b) Vista superior da cabeça de varredura. (c) As vistas frontal e lateral da coluna com o "suporte de slides", "suporte principal" e o "protetor de piezo" unidos e (d) imagem real das vistas lateral, frontal e posterior da cabeça de leitura. Figura extraída de Araujo (2010).

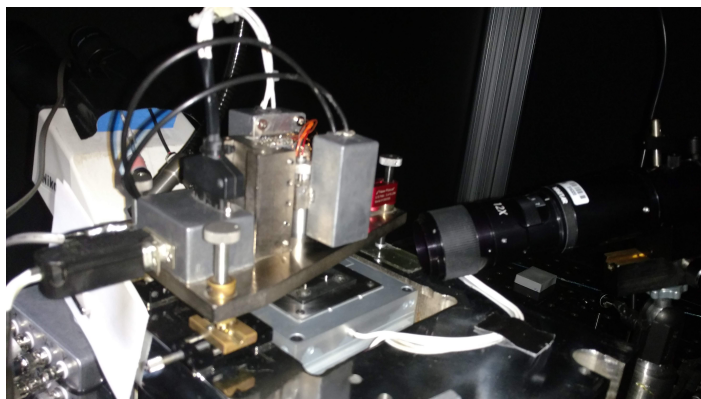


Figura 4.2: Vista real do sistema de varredura do LabNS, utilizado para desenvolvimento do trabalho.

A cabeça de varredura está conectada a um sistema de controle para SPM, fabricado pela RHK Technology (RHK, 2015), comercialmente conhecido como R9. Este equipamento fornece uma plataforma de controle totalmente integrada para todos os modos e técnicas do SPM. Todas as conexões entre os modos são feitas através de software no domínio digital, eliminando o emaranhado típico de cabos que degradam o sinal. Todos os componentes necessários para os modos de medição mais avançados, como amplificadores de alta tensão, amplificadores de bloqueio, PLLs (do inglês, *Phase Locked Loop*), circuitos de realimentação adicionais, geradores de pulsos e geradores de sinais e flaps digitais são incorporados dentro do R9 (RHK (2015)). As interfaces de conexões externas do equipamento encontram-se ilustradas na figura 4.3.

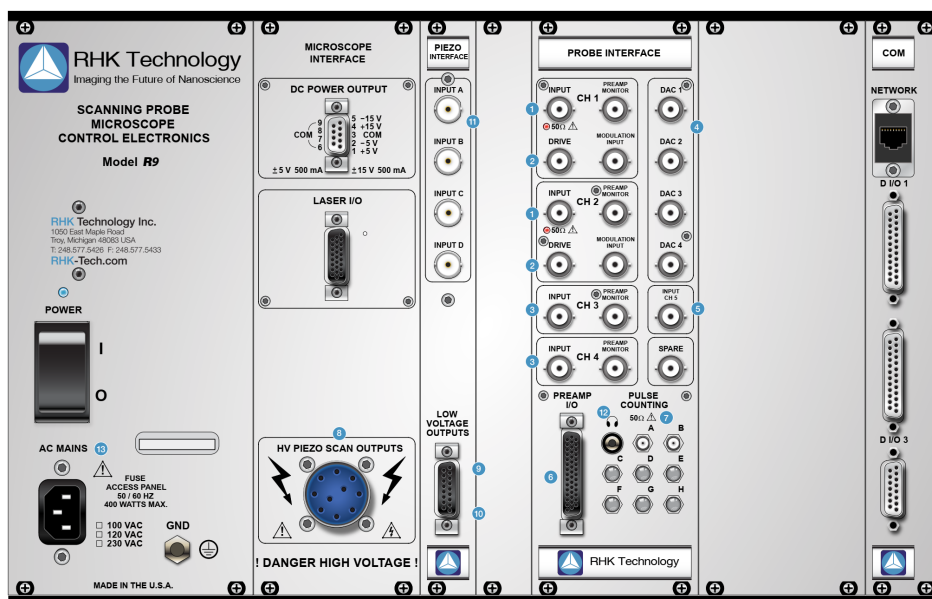


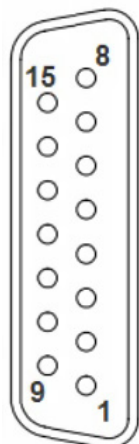
Figura 4.3: Interface de conexões do R9. Figura extraída de (RHK (2015)).



## 4.1 Validação da aquisição do sinal de varredura

Com objetivo de verificar a viabilidade de aquisição de dados, foi realizada a aquisição do sinal gerado pelo R9, referente à interação da sonda de AFM com uma amostra. A aquisição foi realizada através de uma porta de comunicação do sistema de controle, Figura 4.4, que libera sinais de baixa tensão inerentes ao processo de varredura.

**R9 Low Voltage Output  
15-pin connector female**



Pin	Signal Name	Connects to	Range	Bandwidth
1	-High Speed DAC2	HS DAC 8 Pin H	±2.5 V	100 MS/s
2	GND			
3	-High Speed DAC1	HS DAC 7 Pin G	±2.5 V	100 MS/s
4	GND			
5	Low Speed Output 4	HS DAC 6 Pin F	±10 V	200 kS/s
6	Low Speed Output 3	HS DAC 5 Pin E	±10 V	200 kS/s
7	Low Speed Output 2	HS DAC 3 Pin C	±10 V	200 kS/s
8	Low Speed Output 1	HS DAC 1 Pin A	±10 V	200 kS/s
9	+High Speed DAC2	HS DAC 8 Pin H	±2.5 V	100 MS/s
10	GND			
11	+High Speed DAC1	HS DAC 7 Pin G	±2.5 V	100 MS/s
12	GND			
13	GND			
14	GND			
15	GND			

Figura 4.4: Conexão de baixa voltagem (*low voltage*) do R9 utilizada para leitura do sinal de varredura da amostra referente ao eixo Z. Figura extraída de RHK (2015).

Para leitura em tempo real do deslocamento da sonda em relação ao eixo Z, poderíamos utilizar o pino 1 ou o pino 9, conforme informado no manual do fabricante do equipamento. Foi definida a utilização do pino 9, e conforme dados informados na Figura 4.4, o *range* do sinal varia de -2,5 V a 2,5 V.

Para realização da primeira aquisição do sinal, foi utilizado como amostra um padrão de AFM, modelo TGZ02, fabricado pela *MicroMasch*, que pode ser visto na Figura 4.5. O processo de varredura da amostra ocorreu da esquerda para a direita (sentido de ida), e de direita para a esquerda (sentido de volta).

As grades de calibração de silício do modelo utilizado compreendem uma matriz unidimensional de passos retangulares com um valor de altura calibrado. As grades são destinadas à calibração do eixo Z dos equipamentos de SPM.

O padrão apresenta as características descritas na Tabela 4.1.

Durante o processo de varredura, utilizando o padrão AFM descrito acima, foram coletados dois sinais gerados pelo R9, conforme descritos abaixo.

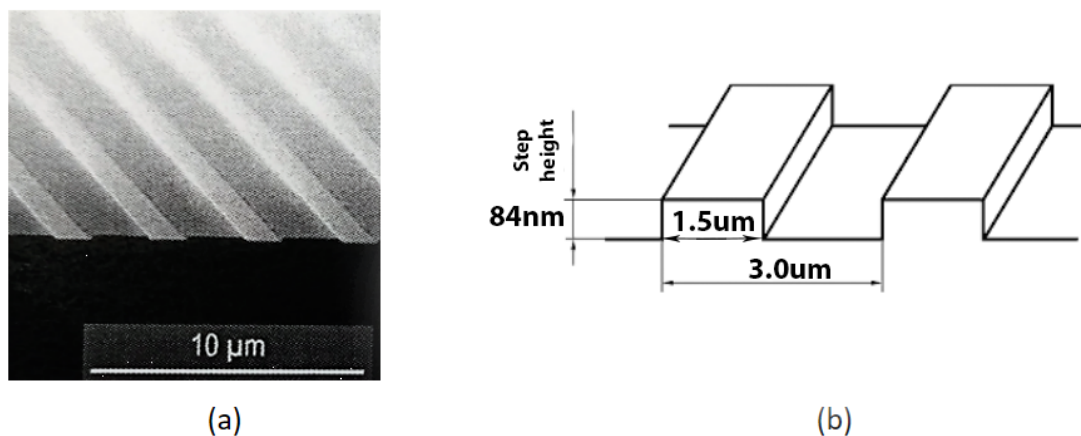


Figura 4.5: Em (a) uma imagem do padrão gerada por microscopia de varredura eletrônica. Em (b) as dimensões das grades do modelo. (Adaptado do manual do modelo MicroMasch TGZ02.)

Tabela 4.1: Características do padrão AFM

Características	Dimensão
Área ativa	$3 \times 3 \text{ mm}$
Altura do passo	$84 \text{ nm}$
Precisão	$1,5 \text{ nm}$

**dF** - Sinal correspondente à variação da frequência de ressonância da sonda em relação a um *set point* definido no sistema de controle SPM. Esse sinal varia em função da interação da sonda com a superfície da amostra, e o mesmo foi lido a partir da conexão de saída DAC 3, presente na interface de conexões do R9. Na Figura 4.6, podemos ver um exemplo do sinal referente à variação da frequência gerado pela interação da sonda em uma seção da amostra.

**Z** - Sinal correspondente à tensão aplicada no tubo piezo elétrico, responsável pelo deslocamento da sonda em relação à superfície da amostra. Esse sinal varia de acordo com a proximidade que se deseja manter da sonda em relação à amostra, e o mesmo foi lido a partir do pino 9 da conexão de baixa voltagem descrita anteriormente. Na Figura 4.7, podemos ver um exemplo do formato do sinal *Z* esperado gerado pela interação da sonda em uma seção da amostra, que deve corresponder à topografia da mesma.

Ambos os sinais foram coletados inicialmente com intuito de compreender melhor o funcionamento do sistema em tempo real, pois corresponde ao comportamento da sonda em relação à amostra durante o processo de varredura.

A princípio, sinal *Z* é o sinal de interesse para aquisição. Entretanto, o sinal *dF* foi

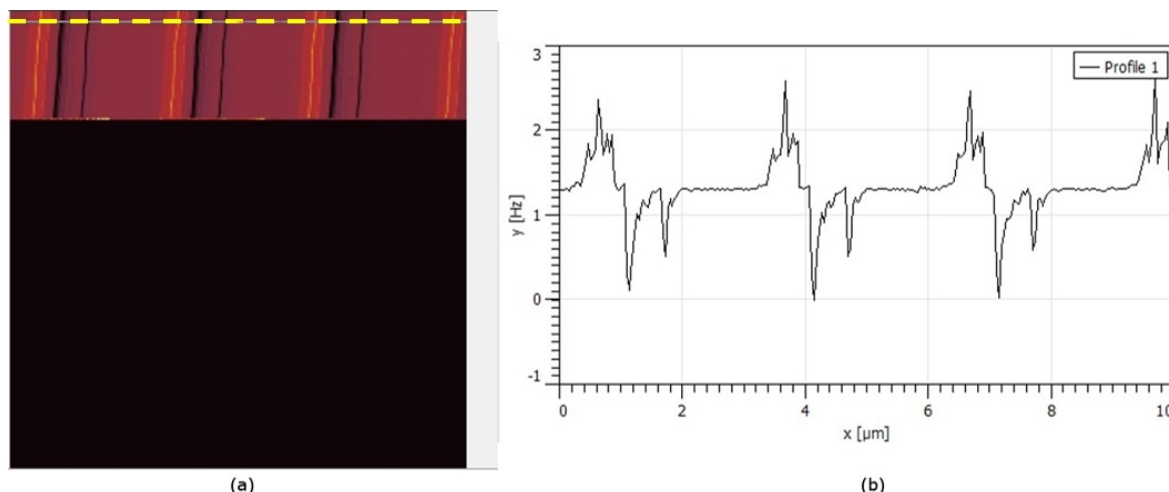


Figura 4.6: Sinal  $dF$  em uma seção da varredura realizada no padrão de AFM. Em (a) a seção da varredura da amostra selecionada (linha pontilhada). Em (b) o sinal correspondente da variação da frequência na seção demarcada.

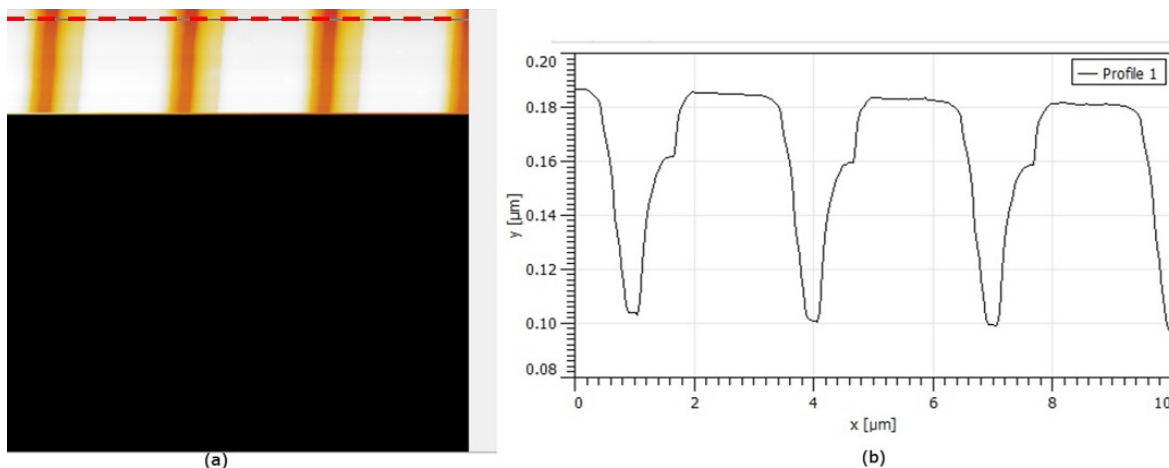


Figura 4.7: Sinal  $Z$  em uma seção da varredura realizada no padrão de AFM. Em (a) a seção da varredura da amostra selecionada (linha pontilhada). Em (b) a topografia na seção demarcada, que o sinal  $Z$  deve representar.

coletado com a intenção de se avaliar uma possível aplicação do mesmo no processo de sonificação, pois também possui informação do comportamento da sonda.

Para aquisição inicial dos sinais, foi utilizado um dispositivo de aquisição de dados por USB, da *National Instruments*, modelo USB-6009 [National \(2014\)](#), conforme pode ser visto na Figura 4.8.

O USB-6009 da *National Instruments* oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações como registro de dados simples, medições portáteis, e experimentos em laboratórios acadêmicos ([National, 2014](#)). Este dispositivo possui oito canais de entrada analógica,  $AI0$  a  $AI7$ , que podem ser utilizados para realizar a leitura de dados. As conexões encontram-se ilustradas na Figura 4.9.



Figura 4.8: Foto do dispositivo de aquisição de sinal NI USB-6009.

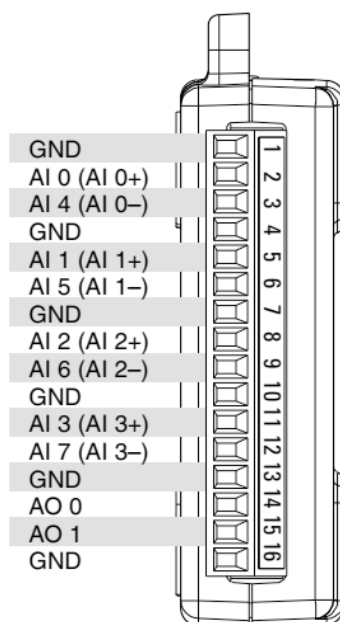


Figura 4.9: Conexões de leitura de sinal do NI USB-6009. Figura extraída de [National \(2014\)](#).

Na tabela 4.2, temos as especificações mais relevantes do equipamento, que foram levadas em consideração para a aquisição inicial do sinal.

O dispositivo foi interligado ao software *MATLAB*, (MATrix LABoratory), através de uma interface que foi desenvolvida para a aquisição inicial do sinal. O diagrama da interface pode ser visto na Figura 4.10.

O USB-6009 foi configurado com as seguintes especificações:

**Sample Rate** - A taxa de amostragem foi definida com valor máximo permitido pelo dispositivo, no caso 48k amostras/s (48 mil amostras por segundo), de forma a se obter a maior quantidade de dados gerados pelo sinal.

Tabela 4.2: Resumo das especificações do NI USB-6009

Características	Especificação
Resolução	14bits
Taxa de amostragem	48kS/s
Throughput (todos os canais)	48kS/s
Faixa máxima de tensão	$-10V_a + 10V$
Exatidão na faixa máxima de tensão	138mV
Faixa mínima de tensão	$-1V_a + 1V$
Exatidão na faixa mínima de tensão	7mV

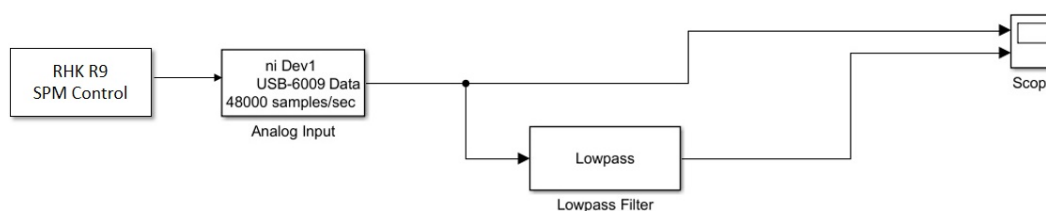


Figura 4.10: Diagrama para aquisição do sinal do R9 através da DAQ USB-6009, cujo sinal é enviado para interface de aquisição desenvolvida no *software* MATLAB.

**Input Range** - Para aquisição do sinal  $Z$ , a faixa de tensão de entrada foi definida de  $-2,5$  V a  $+2,5$  V, que é a faixa de tensão de saída gerada pelo R9, que corresponde à tensão aplicada no tubo piezo elétrico, responsável pelo deslocamento vertical da sonda em relação à superfície da amostra. Dentro dessa faixa, o valor de  $+2,5$  V corresponde a sonda totalmente retraída, afastada então da amostra. O valor de  $-2,5$  V corresponde a sonda totalmente estendida em direção a amostra.

#### 4.1.1 Aquisição de sinal utilizando um padrão de AFM como amostra

O sinal foi adquirido em duas condições, durante a varredura do padrão. Na primeira condição, o sinal foi adquirido puro, da forma como foi gerado pelo R9. Um exemplo desse sinal pode ser visto na Figura 4.11, que corresponde ao sinal  $Z$ .

As inclinações percebidas no sinal correspondem à inclinação que existe entre amostra e sonda, pois em condições reais não é possível garantir que ambas estejam totalmente planas, uma em relação a outra. Durante o processo de varredura pelo sistema de controle do R9, é possível configurar, via *software*, a correção dessa inclinação nos dados coletados, não afetando assim sinal de varredura topográfica final gerado pelo sistema.

A rampa de subida contida no sinal corresponde ao sentido de varredura de ida (*Forward*), ou seja, a sonda se desloca a partir de uma posição inicial da linha até o

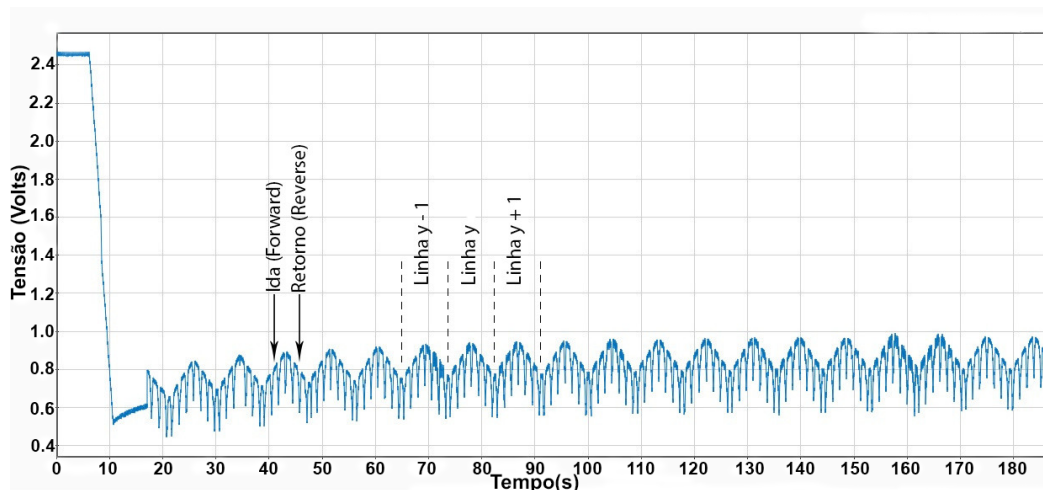


Figura 4.11: Sinal  $Z$  adquirido puro, a partir da varredura do padrão de AFM.

final da mesma. A rampa de descida corresponde ao sentido de varredura de retorno (*Reverse*), ou seja, a sonda se desloca do final da linha até sua posição inicial. Os limites inicial e final da linha correspondem à área de varredura definida pelo usuário.

O sinal adquirido apresenta ruídos oriundos do processo de varredura em si, e devido a interferências externas (conexões, cabos, etc.), conforme pode ser verificado no *zoom* da Figura 4.12.

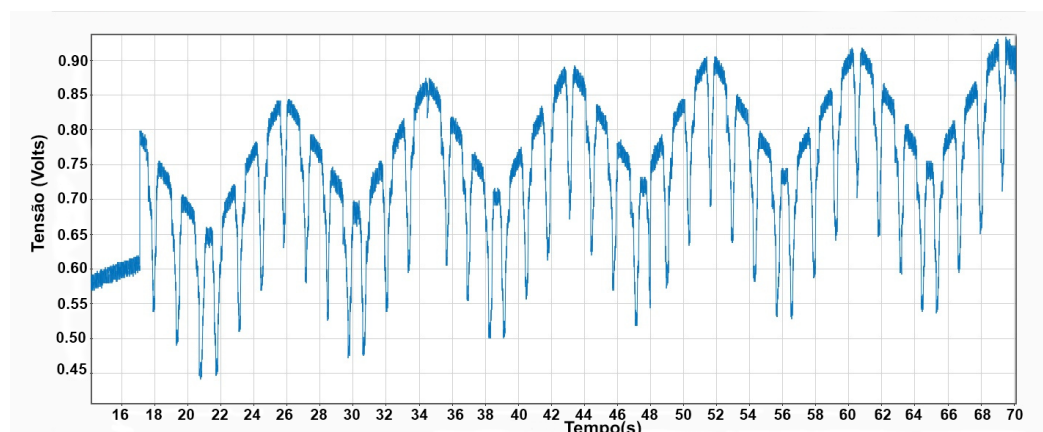


Figura 4.12: Detalhe do Sinal  $Z$  adquirido puro mostrado na Figura 4.11, a partir da varredura do padrão de AFM.

Para verificar se o sinal correspondia à topografia da amostra e validar a aquisição, optou-se pela utilização de um filtro digital *lowpass*, de forma a eliminar ruído presente no sinal amostrado. Detalhes da configuração do filtro aplicado podem ser vistos na Tabela 4.3.

O sinal obtido com o filtro aplicado pode ser visto na Figura 4.13.

Com a aplicação do filtro foi possível obter um sinal com menos ruído que se assemelha à convolução da topologia da sonda e amostra utilizada para aquisição do

Tabela 4.3: Configuração filtro *lowpass*

Características	Especificação
Tipo do Filtro	IIR
Ordem do filtro	5
Passband Frequency	75 Hz
Passband ripple	1
Atenuação	86.04 dB
Taxa de amostragem	48000

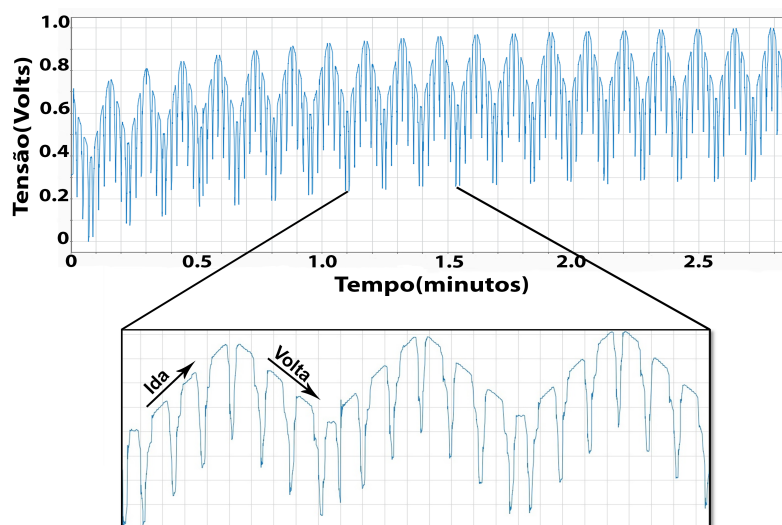


Figura 4.13: Sinal Z obtido a partir da filtragem do sinal Z puro adquirido na varredura do padrão de AFM.

sinal.

#### 4.1.2 Aquisição de sinal de amostra de grafeno

Após coletado o sinal gerado pelo AFM realizado no padrão adotado, foi coletado o sinal de uma varredura AFM em uma amostra que não apresenta características bem definidas como o padrão de AFM, para assim termos como analisar sinais gerados em condições reais de aplicação da técnica de SPM. Para essa nova aquisição foi utilizada uma amostra de grafeno, conforme pode ser visto da Figura 4.14, gerada por AFM.

Para essa nova aquisição foram alterados alguns parâmetros da DAQ USB-6009 para aquisição dos sinais. Nessa nova coleta optou-se por realizar a coleta dos dois sinais (dF e Z) ao mesmo tempo, utilizando duas entradas analógicas do equipamento (AI0 e AI1), de forma a avaliar e validar a aquisição simultânea dos sinais.

Para essa nova configuração precisou-se alterar a taxa de amostragem do equipamento, que antes havia sido configurado com uma taxa 48 kS/s, para 24 kS/s pelo fato

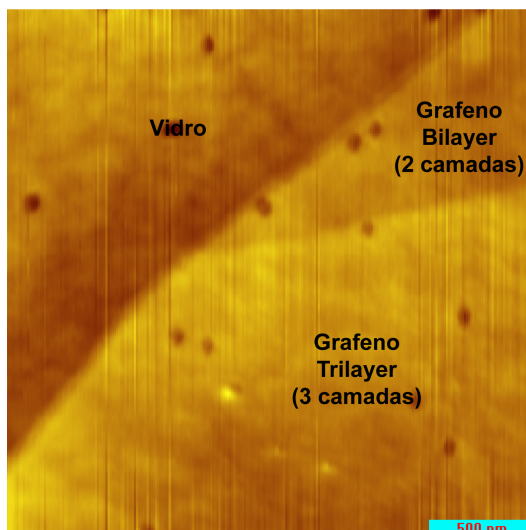


Figura 4.14: Imagem de AFM da amostra de grafeno utilizada para aquisição de sinal referente à varredura AFM.

de agora o equipamento precisar amostrar dois sinais ao mesmo tempo, trabalhando assim com o valor máximo de amostragem em cada entrada do equipamento.

Para a amostra em questão, foi realizada aquisição dos mesmos sinais (sinal  $dF$  e sinal  $Z$ ) adquiridos anteriormente utilizando, o padrão AFM como amostra. Na Figura 4.15, temos uma perspectiva tridimensional da amostra, Figura 4.14, onde é possível identificar os desníveis presentes na mesma, bem como o sentido da varredura realizada.

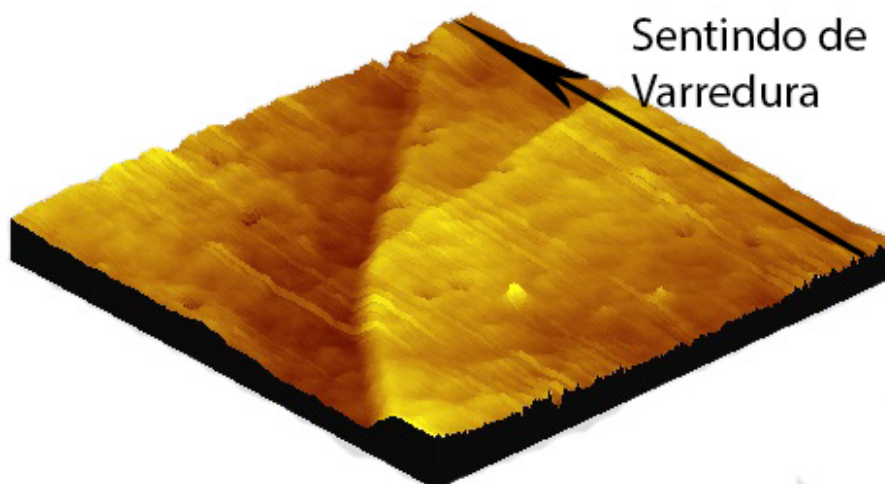


Figura 4.15: Imagem da amostra de grafeno obtida por AFM, fornecida pelo sistema RHK. Perspectiva da amostra em 3D, com o sentido de varredura de ida indicado.

Na Figura 4.16, temos em (a) demarcada uma área da amostra (retângulo azul), que representam a região da amostra cujo sinal de varredura foi coletado para condicionamento sonoro futuro, o onde foram demarcadas três sessões, cujas topografias



apresentam as características que podem ser vistas em (b), formada pela varredura de ida (*Forward*). Os sinais  $Z$  coletados deverão apresentar características semelhantes aos mesmos.

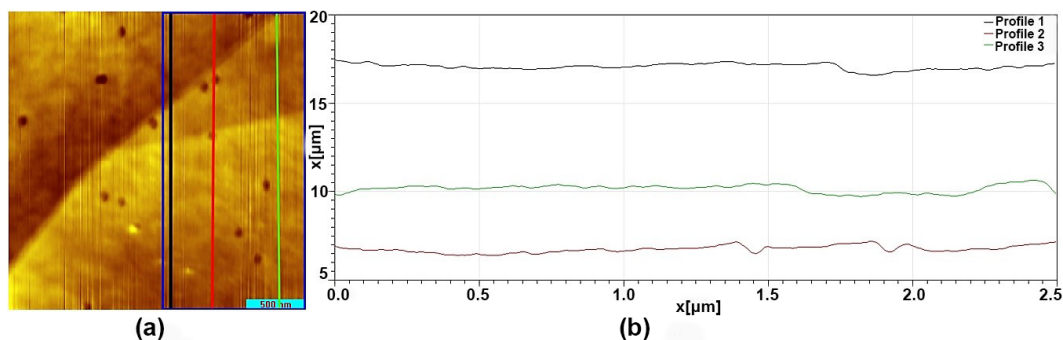


Figura 4.16: Amostra de grafeno. em (a) demarcada uma área da amostra (retângulo azul) que representam a região da amostra cujo sinal de varredura foi coletado, onde foram demarcadas três sessões, cujas topografias apresentam as características que podem ser vistas em (b), formada pela varredura de ida (*Forward*).

As características do sinal  $Z$  coletado da amostra de grafeno podem ser observadas nas Figuras 4.17 e 4.18. Conforme descrito anteriormente, as inclinações presentes no sinal correspondem a condições reais de varredura, onde a amostra e plano de varredura da sonda não estão totalmente alinhados um em relação a outro.

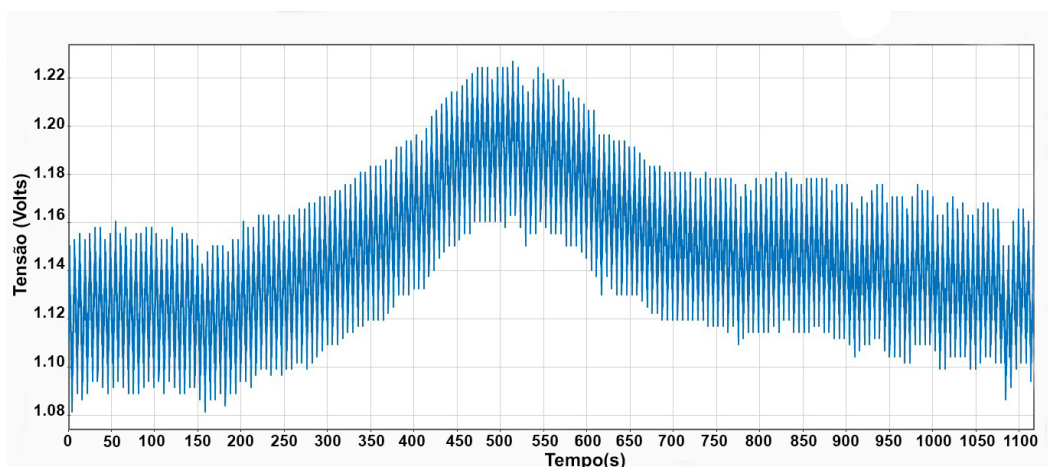


Figura 4.17: Sinal  $Z$  puro coletado da varredura da amostra de grafeno

O sinal  $Z$  passou por um filtro passa-baixa (*lowpass*), para que fosse possível verificar se o sinal coletado apresentava características similares ao sinal apresentado na Figura 4.16. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 4.19 e 4.20.

Realizada a coleta dos sinais gerados pela interação da sonda com amostras diferentes, pode-se verificar que os sinais coletados descrevem de forma aceitável o comportamento da sonda durante o processo de varredura. Validada a aquisição dos dados,

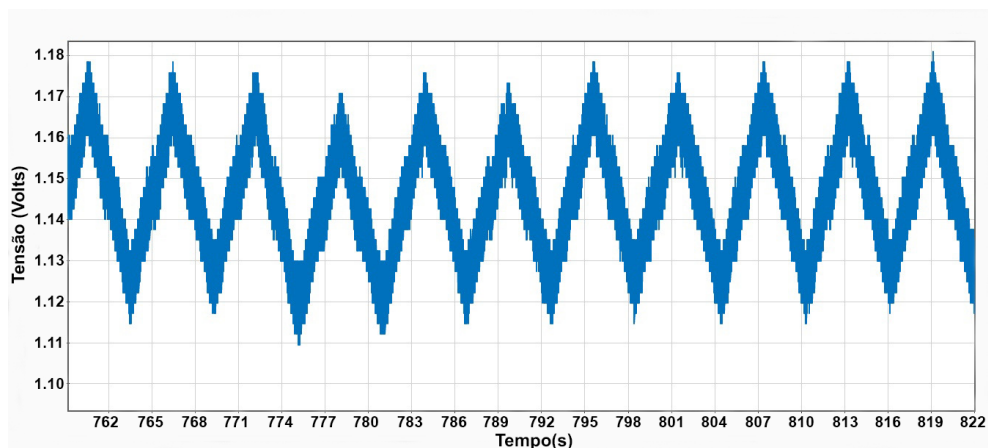


Figura 4.18: Sinal  $Z$  puro coletado da varredura da amostra de grafeno. Foi aplicado um *zoom* em uma parte do sinal original para visualizar maiores detalhes do mesmo.

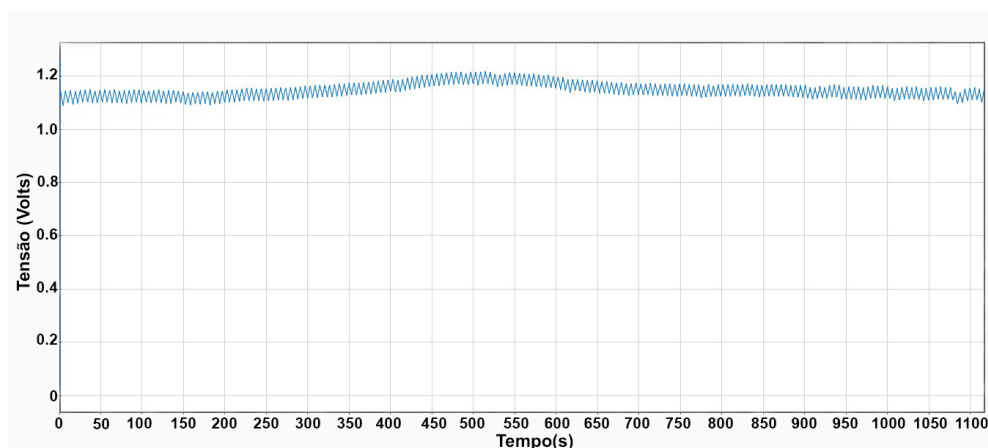


Figura 4.19: Sinal  $Z$  filtrado coletado da varredura da amostra de grafeno.

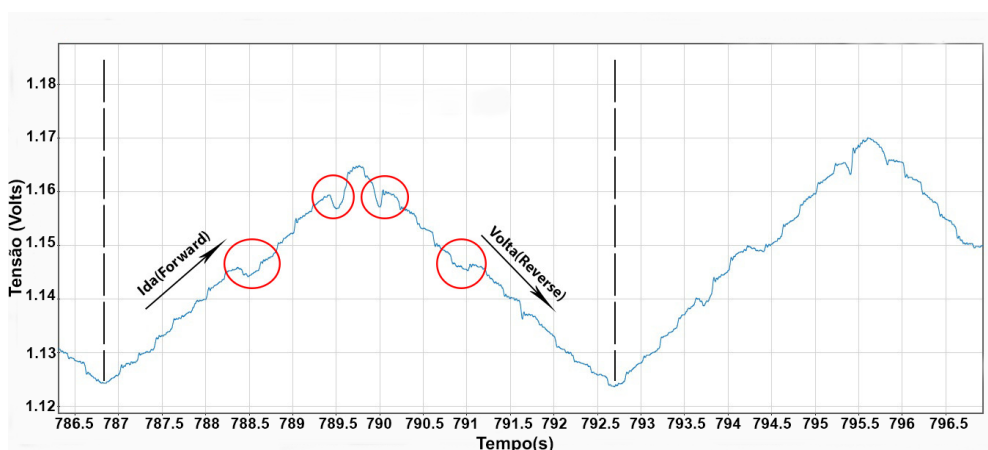


Figura 4.20: Sinal  $Z$  filtrado coletado da varredura da amostra de grafeno. Foi aplicado um *zoom* em uma parte do sinal original, com destaque para o "Profile 2" apresentado na Figura 4.16, para visualizar maiores detalhes do mesmo.

o próximo passo foi o desenvolvimento de um circuito para condicionamento do sinal lido do R9, uma vez que o intuito do projeto é desenvolver um sistema de sonificação embarcado.

## 4.2 Desenvolvimento do hardware para condicionamento do sinal

Uma vez validada a viabilidade de aquisição do sinal de varredura externamente ao sistema de controle SPM, o próximo passo foi realizar um estudo de como condicionar o sinal de varredura para uma faixa compatível com o conversor analógico digital adotado para desenvolvimento deste trabalho, de forma que o sinal medido possa ser utilizado para sonificações mais sofisticadas. As etapas do processo encontram-se ilustradas na Figura 4.21.

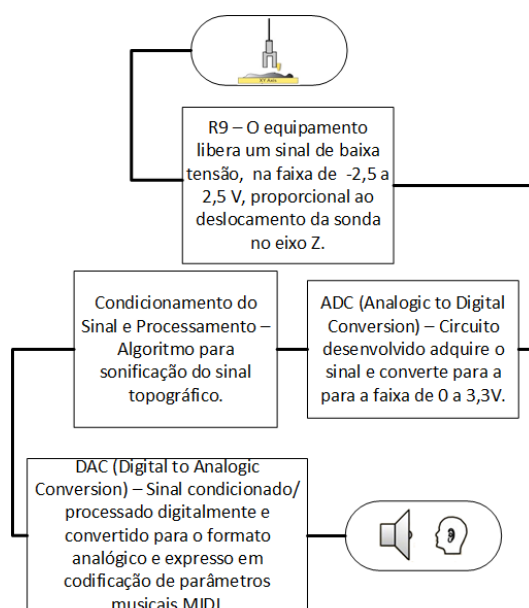


Figura 4.21: Fluxograma dos estágios de condicionamento do sinal gerado por um sistema de microscopia de varredura por sonda.

Realizados alguns estudos para implementação do circuito, optou-se por utilizar o circuito conhecido como *zero span*/ circuito de *offset* dc. O circuito *zero span* é frequentemente usado nos circuitos de instrumentos de medição (Liptak, 2003). Este circuito ajusta a inclinação e o ponto zero do sinal, sendo que, a inclinação é a correlação entre entrada e saída. Uma função de transferência de amplificador operacional linear, aplicado ao ajuste da tensão da varredura, pode ser limitada à equação da reta (Mancini

e Carter, 2002), conforme Eq.4.1.

$$y = \pm mx \pm b \quad (4.1)$$

Para conversão do sinal, a faixa desejada para o sinal adquirido é de  $V_{out}=0$  V para  $V_{in}=-2,5$  V e  $V_{out}=3,3$  V para  $V_{in}=2,5$  V. Dessa forma temos  $m = 0.6$  e  $b = 1.5$ .

Para a equação encontrada, o circuito proposto para condicionamento do sinal, pode ser visto na Figura 4.22.

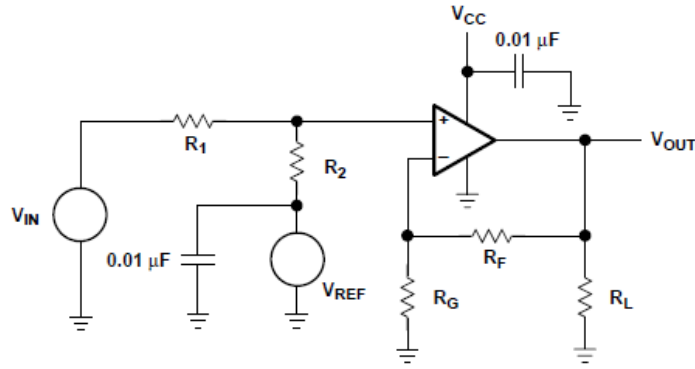


Figura 4.22: Circuito proposto para condicionamento do sinal de varredura aquisitado.

Para calcular os valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_F$  e  $R_G$ , podemos fazer uso das seguintes equações:

$$m = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \left( \frac{R_f + R_g}{R_g} \right) \quad (4.2)$$

$$b = V_{ref} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left( \frac{R_f + R_g}{R_g} \right) \quad (4.3)$$

Após a manipulação algébrica, encontramos  $R_2 = 1.32R_1$  e  $R_F = 0.05R_G$ .

Realizado os cálculos, foi montado o circuito, conforme Figura 4.23, para realização de testes de aquisição do sinal e validação do condicionamento do mesmo para a faixa desejada. A Equação 4.4 representa o modelo matemático que descreve este circuito.

$$V_{out} = 1.02 \times \left( \frac{2.3V_{in} + 5}{3.3} \right) \quad (4.4)$$

Foi escolhido o amplificador operacional LM7321 Texas (2008), para montagem do circuito, pois o mesmo apresenta característica trilho-a-trilho. Em amplificadores deste tipo, tanto a entrada quanto a saída podem trabalhar com sinais muito próximos do valor da alimentação do mesmo (Mancini e Carter, 2002), característica ideal para aplicações em que a faixa de tensão de alimentação é baixa. Este regime de trabalho

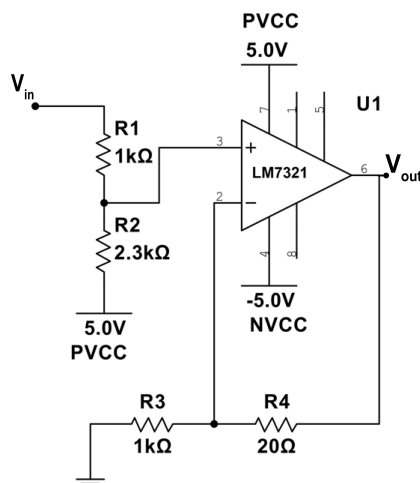


Figura 4.23: Circuito montado para condicionamento inicial do sinal.

é ideal quando pensamos em embarcar o sistema de sonificação, e o alcance dinâmico completo é necessário na saída, para dessa forma evitar perdas do sinal aquisitado.

Após montagem da placa de circuito impresso, foi aplicado um sinal a partir de um gerado de função, cuja frequência era de 100 Hz, e a amplitude do sinal variava de -2,5 V a 2,5 V, mesma faixa de variação do sinal de saída do R9 correspondente ao sinal Z da varredura, para validar se o circuito realizaria o ajuste do sinal como desejado. Conforme pode ser constatado no gráfico das Figura 4.24, o circuito ajustou o sinal para a faixa de 0 V a 3,3V , como desejado.

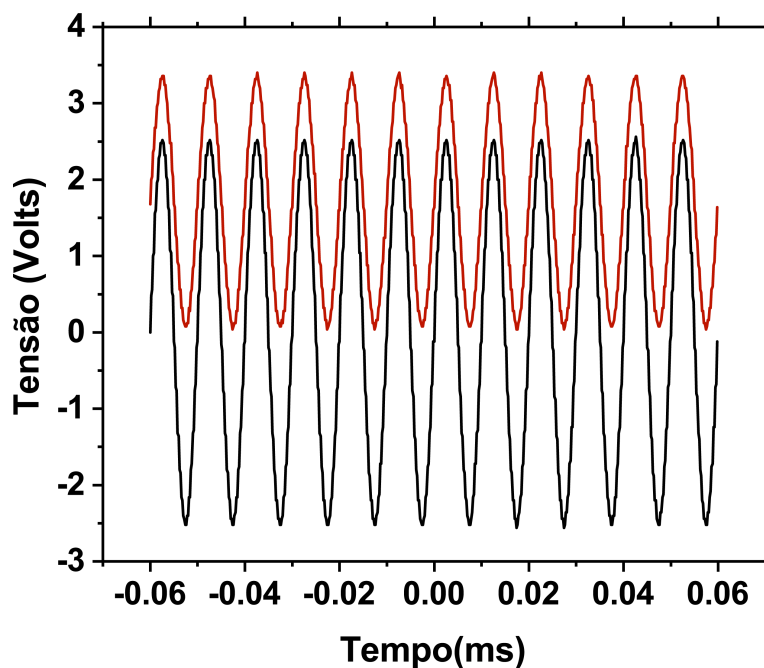


Figura 4.24: Condicionamento do sinal pelo circuito proposto. O sinal senoidal de -2,5 V a 2,5 V corresponde a entrada, e o de 0 a 3,3 V à saída.

Para processamento do sinal condicionado pelo circuito proposto, optou pela utilização da placa Raspberry Pi 3 (Halfacree e Upton, 2012), que possui as características conforme descritas no item 2.4.1. A placa possui um conector GPIO (do inglês *General Purpose Input/Output*) de 40 pinos padronizado. São basicamente portas programáveis de entrada e saída de dados utilizadas para prover uma interface entre os periféricos e os microcontroladores/microprocessadores. Na Figura 4.25, encontra-se ilustrado o conector bem como a funcionalidade de cada pino.

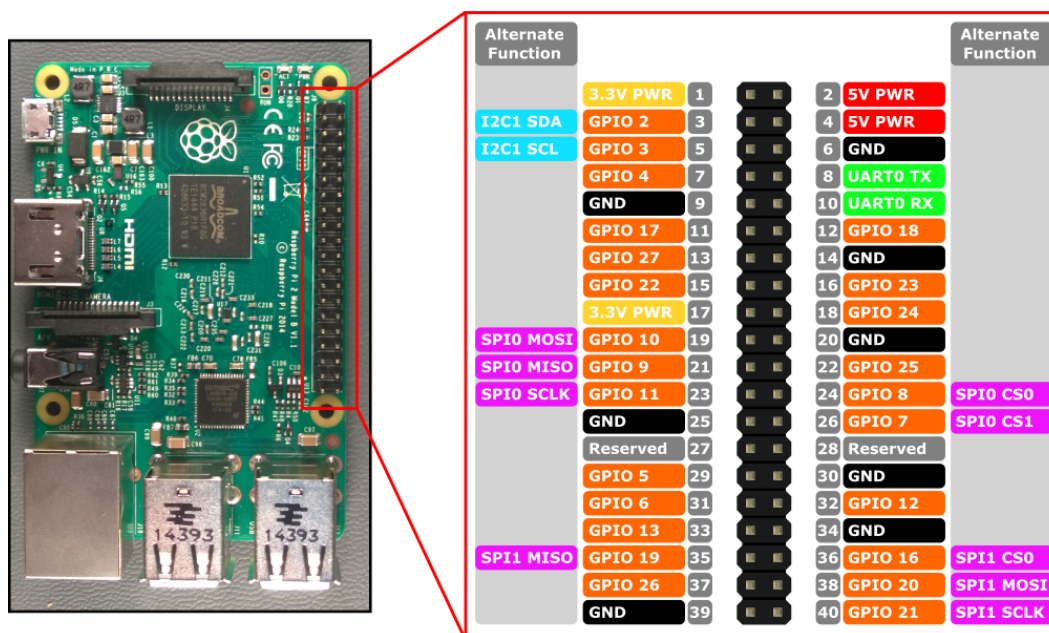


Figura 4.25: Conector Raspberry PI 3 GPIO com descrição do tipo de comunicação/função de cada pino.

O sinal condicionado pelo circuito proposto precisou ser convertido do formato analógico para o digital. Como o Raspberry Pi não possui um conversor ADC nativamente, para realizar esse procedimento foi utilizado um conversor ADC externo ligado ao conector GPIO. O conversor escolhido para utilização no projeto foi o ADS1115 (Texas, 2009), da Texas Instruments, implementado em uma placa conforme pode ser visto na Figura 4.26. O diagrama do circuito da placa do conversor encontra-se ilustrado na Figura 4.28. É um conversor analógico/digital (ADCs) delta-sigma ( $\Delta\Sigma$ ), de baixa potência e precisão com 16 bits de resolução, cujos dados são transferidos através de uma interface serial compatível com  $I^2C$  (Instruments, 2015), que opera a partir de uma única fonte de alimentação, variando de 2,0 V a 5,5 V, com capacidade de conversões a taxas de até 860 amostras por segundo (SPS) (Texas, 2009). O barramento  $I^2C$  é um barramento muito popular e poderoso usado para comunicação entre um mestre (ou múltiplos mestres) e um único ou vários dispositivos escravos. Na configuração adotada o Raspberry se comporta como mestre e o conversor ADC utilizado como escravo.

Uma característica importante do ADC é a resolução, que é o menor intervalo do sinal analógico que o ADC é capaz de detectar. A resolução é dada por :

$$res = \frac{V_{REF+} - V_{REF-}}{2^n - 1} \quad (4.5)$$

onde  $V_{REF+}$  é o maior valor lido pelo ADC,  $V_{REF-}$  é o menor valor lido pelo ADC e  $n$  é o número de bits do ADC.

Considerando que a faixa do sinal de saída do circuito proposto varia de 0 V a 3,3 V, e que a resolução do ADC é de 16 bits, a resolução do conversor é de  $50.35\mu V$ . Dessa forma o sistema será capaz de detectar as menores variações de sinal referente à varredura do sistema, que de acordo com os parâmetros definidos no sistema de controle do R9, para cada 1Hz que varia no dF, corresponde a 6mV de tensão de saída.

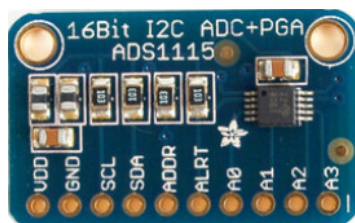


Figura 4.26: Conversor ADC modelo ADS1115.

Os conversores analógico-digitais (ADCs) Delta-sigma ( $\Delta\Sigma$ ) são baseados no princípio de sobreamostragem. O sinal de entrada de um ADC  $\Delta\Sigma$  é amostrado em alta frequência (frequência do modulador) e, subsequentemente, filtrado e decimado no domínio digital para produzir um resultado de conversão na respectiva taxa de dados de saída. A relação entre a frequência do modulador e a taxa de dados de saída é denominada taxa de sobreamostragem (OSR, oversampling ratio). Ao aumentar o OSR e, assim, reduzir a taxa de dados de saída, o desempenho de ruído do ADC pode ser otimizado. Em outras palavras, o ruído de entrada referenciado cai quando se reduz a taxa de dados de saída porque mais amostras do modulador interno são média para produzir um resultado de conversão. Aumentar o ganho também reduz o ruído enviado pela entrada, o que é particularmente útil ao medir sinais de baixo nível.

A frequência na qual o sinal de entrada é amostrado é chamada de frequência de amostragem ou frequência do modulador ( $f_{MOD}$ ). O ADS1115 possui um oscilador interno de 1 MHz que é dividido por um fator de 4 para gerar  $f_{MOD}$  a 250 kHz (Texas, 2009).

Um filtro anti-aliasing foi utilizado para evitar um "falseamento" do sinal durante a conversão analógico-digital. O filtro foi projetado para que o sistema adquira sinais de até 100Hz, dessa maneira, nessa faixa de frequência o sinal não pode sofrer atenuação. Outro requisito importante é a resolução de 16 bits do conversor AD, com isso qualquer

sinal acima da metade da frequência de amostragem deve ser atenuado em  $-98.08dB$ , conforme relação sinal-ruído (SNR), dado pela Equação 4.6, onde  $N$  corresponde ao número de bits do ADC.

$$SNR = 6.02N + 1.76dB \quad (4.6)$$

Filtros analógicos podem ser construídos a partir de resistores, indutores e capacitores (passivos) ou utilizando amplificadores operacionais combinados com resistores e capacitores (ativos). Com base nesses requisitos o filtro foi projetado utilizando o software FilterPro da Texas Instrument. Nas opções foram introduzidos os seguintes parâmetros:

1. filtro passa-baixa butterworth Sallen-Key;
2. ganho 0dB na banda de passagem;
3. atenuação de -98.08dB na banda de rejeição;
4. Faixa de frequência de passagem 0-100 Hz;
5. frequência da banda de atenuação definida de  $100 \text{ Hz} - \frac{F_s}{2}$ ;

O símbolo  $F_s$  expressa a frequência de amostragem do conversor AD, que no caso do conversor utilizado corresponde a frequência  $F_{MOD}$  do ADS1115. Dessa forma a frequência de amostragem do sistema é de 250 kHz. Desse modo, a frequência de banda de rejeição (corte) foi definida como 125 kHz. A Figura 4.27 exibe o modelo do filtro proposto pelo FilterPro. Para implementação do filtro, foi utilizado o amplificador operacional LM7321.

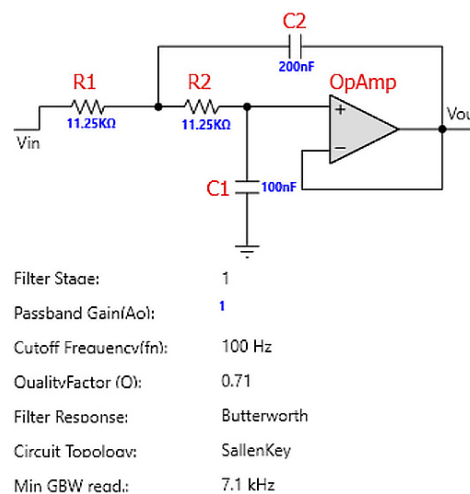


Figura 4.27: Filtro antifalseamento implementado para aquisição do sinal.



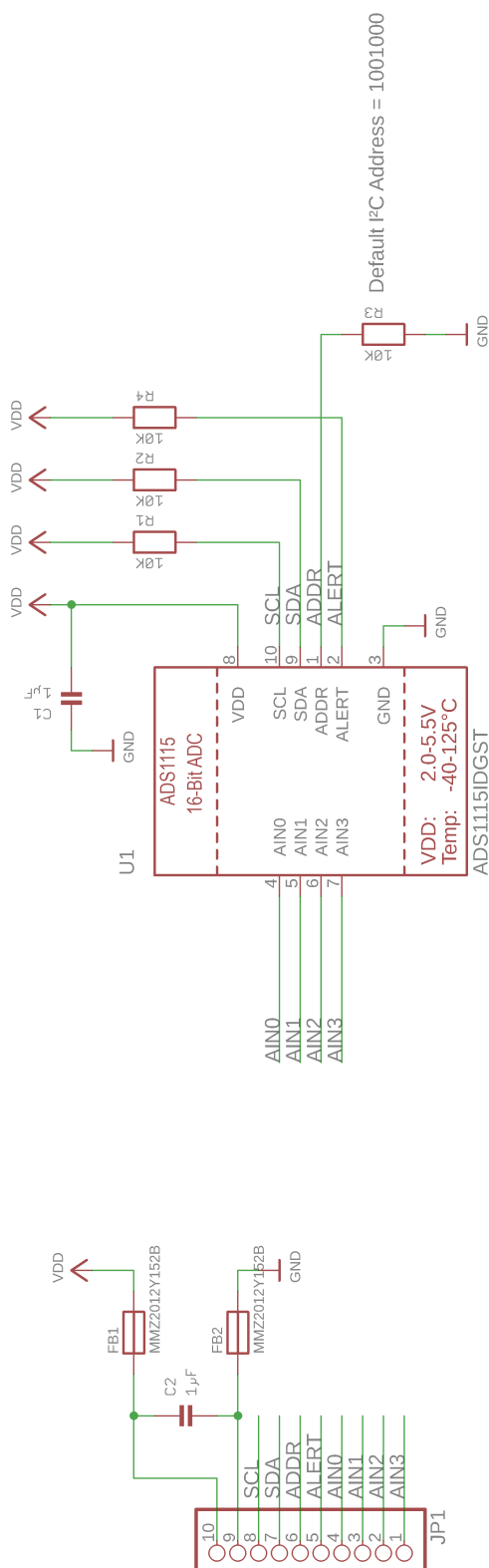


Figura 4.28: Esquema da placa ADS1115 (imagem extraída do *datasheet* do fabricante).

O diagrama esquemático, com detalhes de conexão do sistema proposto para aquisição e processamento do sinal de varredura AFM encontra-se representado na Figura

## 4.29.

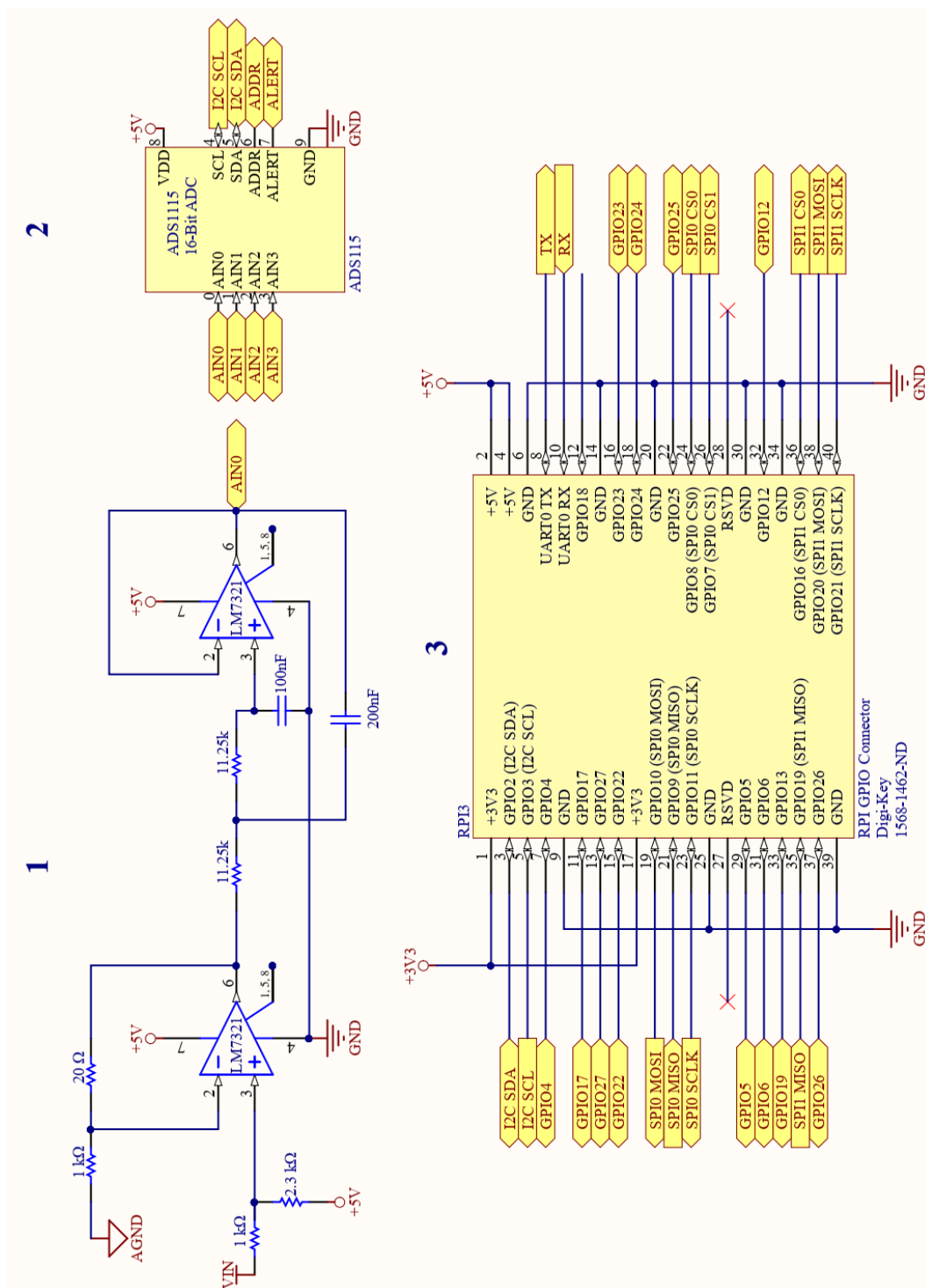


Figura 4.29: Diagrama do sistema de aquisição e processamento. Em (1) circuito de aquisição, que condiciona o sinal para a faixa desejada. A saída desse circuito está ligada a entrada do conversor ADC (2), identificada como  $AIN0$ . Este conversor está conectado aos pinos de conexão  $I^2C$ , do Raspberry Pi (3), identificados como  $I^2C$ .

### 4.3 Desenvolvimento do algoritmo para sonificação dos dados de varredura

Um dos objetivos deste trabalho é a conversão do valor de tensão lido que corresponde a uma determinada posição em altura  $Z(nm)$ , em um sinal sonoro informativo ao usuário, conforme ilustrado na Figura 4.30. Para validar se o sistema proposto atenderia aos objetivos iniciais propostos, foi desenvolvido um algoritmo capaz de converter o valor de varredura lido em um sinal sonoro. Os resultados obtidos são discutidos com maiores detalhes no Capítulo 5. O sinal adquirido precisou ser adequado para que o processo de conversão fosse possível, uma vez que converter em sinal sonoro todos os dados adquiridos na varredura com as percepções de variações topográficas desejadas no sinal sonoro seria uma tarefa dispendiosa.

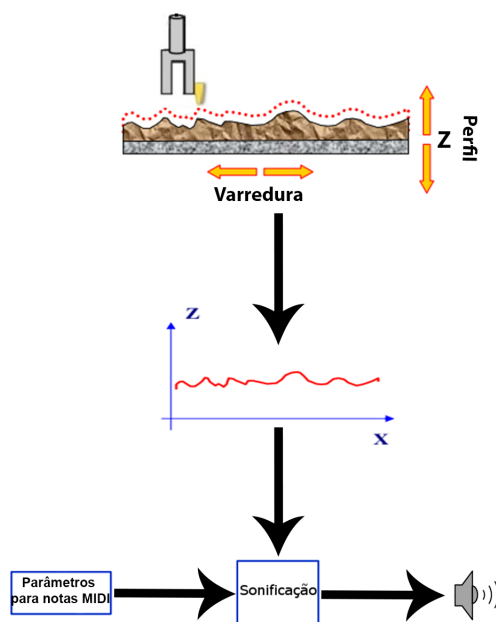


Figura 4.30: Representação esquemática do processo de varredura de um AFM e o processo de sonificação.

A estratégia utilizada para adequação foi reduzir o número de amostras ao mínimo possível, com fidelidade ao perfil topográfico da varredura. Para esse processo, foi utilizada a técnica conhecida como decimação, conforme descrita no item 2.3.2. Optou-se pela utilização dessa técnica devido a uma maior flexibilidade no processo de diminuição da amostragem, pois permite adequar o sistema proposto a diferentes taxas de amostragens, bem como adquirir sinais com faixas de frequência variadas. O mesmo processo de adequação a nível de *hardware* implicaria em possíveis mudanças no circuito, ou demandaria um maior custo na produção do mesmo, pois precisaria utilizar componentes eletrônicos que permitissem esse nível de ajuste no sistema.

A partir dos dados decimados, foi possível implementar o modelo de sonificação, considerando que a cada  $M$  amostras adquiridas, apenas uma será considerada para construção do sinal. Após a validação do processo de decimação, a próxima etapa consistiu no desenvolvimento de um algoritmo, cuja função principal é a conversão de um valor de tensão elétrica em um sinal sonoro, com valor informativo ao usuário. O próximo passo foi definir como realizar o processo de conversão, ou seja, como representar um dado valor em Volts em um padrão sonoro que permitisse ao usuário ter a percepção das variações topográficas ocorridas durante a varredura, ressaltando que cada ponto da varredura deve dar origem a um sinal sonoro distinto.

Para implementação do algoritmo proposto foi utilizada a linguagem de programação Python. O *Python* surgiu nas últimas décadas como uma ferramenta primordial para tarefas de computação científica, incluindo a análise e visualização de grandes conjuntos de dados, bem como a possibilidade futura de embarcar o algoritmo em uma placa de desenvolvimento oferecendo, dessa forma, uma maior versatilidade e mobilidade para o sistema proposto. Para o programa de sonificação, a linguagem de programação Python foi usada em combinação com a biblioteca *Pygame* para reprodução de som. Também foi utilizado o Numpy, um pacote fundamental para computação científica com Python e a biblioteca para comunicação do Raspberry Pi com a placa ADS1115 para conversão do sinal de varredura.

*Pygame* é uma biblioteca de linguagem de programação Python de código aberto para fazer aplicações multimídia, altamente portátil e funciona em quase todas as plataformas e sistemas operacionais. Entre os muitos recursos oferecidos por esta biblioteca, está disponível um módulo MIDI (Musical Instrument Digital Interface) para interações com entradas e saídas MIDI. Um sinal MIDI é um sinal de Interface Musical Digital Integrada que possui parâmetros-chave de velocidade de tom (volume), tom e duração da nota. Cada um desses parâmetros pode receber valores variando de 0 a 127 (Paul, 1997).

Apesar de ser uma técnica antiga e simples de sonificação, O MIDI foi utilizado com intuito de validação inicial do sistema de aquisição e processamento do sinal de varredura. Uma vez validado a funcionalidade do sistema, espera-se ser possível implementar técnicas mais sofisticadas de sonificação de dados com auxílio de profissionais da área de computação musical.

Os valores de velocidade em MIDI correspondem a quão forte uma nota virtual é tocada, com 0 sendo equivalente ao fim da nota, o que em termos de volume a nota seria inaudível, e 127 sendo o mais forte. Os valores de pitch correspondem à faixa de notas musicais que podem ser relacionadas a uma nota MIDI, com 0 sendo a nota do mais grave ( $C0$ ) e 127 sendo a nota do mais aguda ( $G10$ ) (Paul, 1997). A duração de cada nota não é alterada em tempo de execução para tornar o padrão de som

mais consistente ao reproduzir os dados topográficos que apresentam uma varredura de velocidade constante. Uma característica de interesse oferecida por esta biblioteca é a possibilidade de usar diferentes instrumentos musicais. Com esta opção é possível obter diferentes feedbacks sonoros que podem ser ajustados para obter uma melhor qualidade de som.

Dentro deste contexto, um algoritmo foi desenvolvido para converter o sinal de tensão correspondente à posição da sonda no eixo  $Z$  em uma nota musical MIDI. A estrutura básica do algoritmo consiste em converter o valor da varredura em uma nota e depois reproduzi-la com um dispositivo de saída de áudio, de acordo com o Algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1:** Leitura do sinal de varredura e conversão em sinal sonoro.

---

**Entradas :** Sinal de tensão correspondente à posição da sonda no eixo  $Z$ .

**Saída :** Sinal sonoro com frequência equivalente a posição da sonda no eixo  $Z$ .

```

Input: voltageVal
while true do
   $cont \leftarrow cont + 1$ 
  if  $cont = M$  then
     $note \leftarrow get\_note(voltageVal)$ 
     $play\_midi(note, prevnote, volume)$ 
     $cont = 0$ 
  end if
end while

```

---

Este processo de conversão foi realizado usando proporções. Quando  $voltageVal = minVolt$ , a nota resultante será a nota mais baixa ( $minNote$ ). É feito da mesma forma no outro extremo da escala. Isso permite que o algoritmo defina a relação entre a distância da sonda e as etapas de cada nota em um formulário de função. Esta função é avaliada toda vez que um valor de voltagem ( $voltageval$ ) é medido, de acordo com o Algoritmo 2.

Em relação à nota mais baixa ( $minNote$ ) e nota mais alta ( $maxNote$ ), a  $minNote$  é um valor fixo definido dentro da escala de 0 a 127, o valor de  $maxNote$  é calculado como uma função do número de oitavas a serem adicionadas ao valor da nota mínima. O número de oitavas pode ser alterado conforme desejado.

Uma vez que as notas musicais são definidas de acordo com o sinal da varredura mensurado, a nota é então reproduzida para o usuário através da função  $play\_midi$ , Algoritmo 3. Essa função armazena uma saída de som e a altera com base em cada ponto de dados topográfico fornecido pelo algoritmo de decimação, gerando assim um novo padrão de som a ser reproduzido, representando as variações topográficas com uma variação de sinal sonoro durante a varredura.

---

**Algoritmo 2:** Conversão do valor de tensão lido em um nota (frequência) equivalente

---

**Entradas :** Valor de tensão amostrado.

**Saída :** Nota(frequência) musical equivalente.

**Input:** *voltageval*, *minNote*, *minVolt*, *maxVolt*

*minNote* = 60

*minVolt* = 0

*octave* = 3

**if** *voltageval* > *maxVolt* **then**

*maxVolt* = *volt*

**end if**

*maxNote* = *minNote* + (12 \* *octaves*)

*note* = *minNote* + ((*voltageval* - *minVolt*) \* (*maxNote* - *minNote*)) / (*maxVolt* - *minVolt*)

**retorna** *note*

---

**Algoritmo 3:** Reprodução sonora da nota musical gerada.

---

**Entradas :** Nota (frequência) gerada pela função `get_note`

**Saída :** Reprodução sonora da nota na saída de áudio da placa Raspberry pi.

**Input:** *note*, *b4note*, *volume*

**if** *note* != *b4note* **then**

`play.note_off(b4note, volume)`

`play.note_on(note, volume)`

**end if**

---

As etapas do processo de sonificação encontram-se descritas na Figura 4.31.

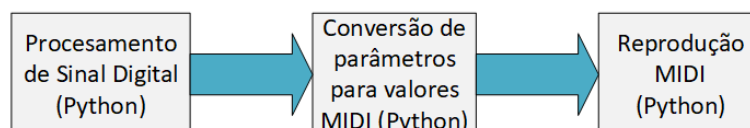


Figura 4.31: Estágios do processo de sonificação.

Definido a estrutura do algoritmo a ser utilizado para os testes de conversão sonora, o algoritmo foi implementado em Python. Inicialmente foram realizados testes de sonificação *off-line*, onde dados de varredura previamente armazenados foram submetidos ao algoritmo para verificar se as variações topográficas foram representadas satisfatoriamente na forma de som. Os detalhes desse processo são melhores discutidos na Seção 5.1.

Posteriormente o algoritmo foi implementado na placa Raspberry Pi, com as modificações necessárias para que os dados de varredura fossem lidos em tempo real, através do conversor ADC externo utilizado. Os resultados obtidos são discutidos na Seção 5.2.

## 4.4 Questionário para avaliação do retorno sonora

As hipóteses levantadas para desenvolvimento deste trabalho dizem respeito a questões subjetivas de percepção do usuário e, neste caso, o questionário representa um método eficaz para testar, de forma precisa, as hipóteses levantadas (Günther, 2003). Uma pesquisa <sup>1</sup> foi conduzida utilizando questionários, Apêndice 2, com 16 perguntas de múltipla-escolha (limitadas aos tipos de percepções esperadas com o sistema proposto), sendo que 4 perguntas contém opção discursiva (para possibilitar respostas mais elaboradas baseadas em opiniões e sentimentos dos voluntários). O objetivo principal do questionário foi de avaliar se a retorno sonoro adiciona informação valiosa ao retorno visual.

Foram realizados testes com retorno visual e auditiva com 20 voluntários, alunos de pós-graduação (17) e professores (3) da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Deste total nenhum alegou apresentar limitação visual ou auditiva. O teste aplicado a cada usuário teve duração entre 25 min a 30 min, sendo que a maior parte, 60%, já havia realizado experimentos com SPM. Os resultados obtidos com a pesquisa são melhor discutidos ao final da Seção 5.1.

---

<sup>1</sup>Esse teste caracterizou-se como sendo quantitativo e descritivo e faz parte de um projeto aprovado no Comitê de Ética em Pesquisa da instituição de origem sob o número 89062718.1.0000.5149. Como condição obrigatória para participação do estudo, os voluntários que se disponibilizaram a participar dos testes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 Teste sonificação *off-line* de dados de varredura

Com o intuito de validar o algoritmo proposto, foram utilizados dados de uma varredura topográfica realizada em uma amostra de grafeno, conforme descrito na Seção 4.1.2, para análise *off-line*.

Os dados utilizados para realizar a conversão em sinal sonoro correspondem ao trecho identificado pela linha preta, na Figura 5.1(a). A superfície da amostra de grafeno, em escala nanométrica, apresenta imperfeições que podem ser vistas no gráfico da Figura 5.2 (a), que representa o perfil topográfico da seção demarcada, após subtração da inclinação do sinal devido ao desnível da amostra.

Os dados da varredura foram lidos pelo algoritmo implementado, e cada valor de tensão correspondente à topografia da amostra foi convertido em uma nota (frequência) musical no padrão MIDI, conforme descrito na Seção 4.3. Os valores de notas obtidos a partir do processo de conversão proposto foram representados em forma de gráfico para validar se a conversão era compatível com o perfil topográfico. O resultado obtido encontra-se ilustrado na Figura 5.2 (b).

Ao realizar a sonificação dos dados, foi possível perceber que as variações sonoras correspondiam às variações do perfil topográfico da amostra, constatando, dessa forma, que o retorno sonoro de uma varredura AFM ponto a ponto é possível. Um ponto importante a ser observado diz respeito aos níveis de detalhes da superfície da amostra de grafeno, pois quando os dados são analisados via *software*, com retorno visual para o usuário, detalhes sutis da superfície muitas vezes são sobrepostos/unificados pelo sistema de tratamento desses dados para conversão em imagem. Conforme descrito na Seção 2.2.1, o usuário não tem controle sobre o tratamento do sinal na maioria dos instrumentos SPM. A aquisição direta dos dados de microscopia de varredura abriu possibilidade de um maior detalhamento da superfície da amostra, bem como uma



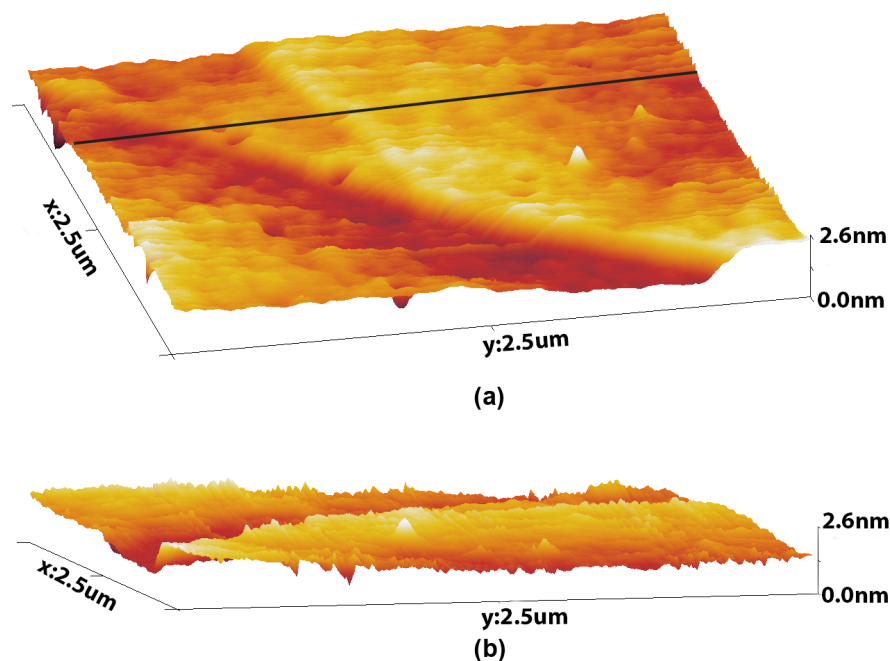


Figura 5.1: Imagens 3D da amostra de grafeno, com detalhes da topografia da superfície.

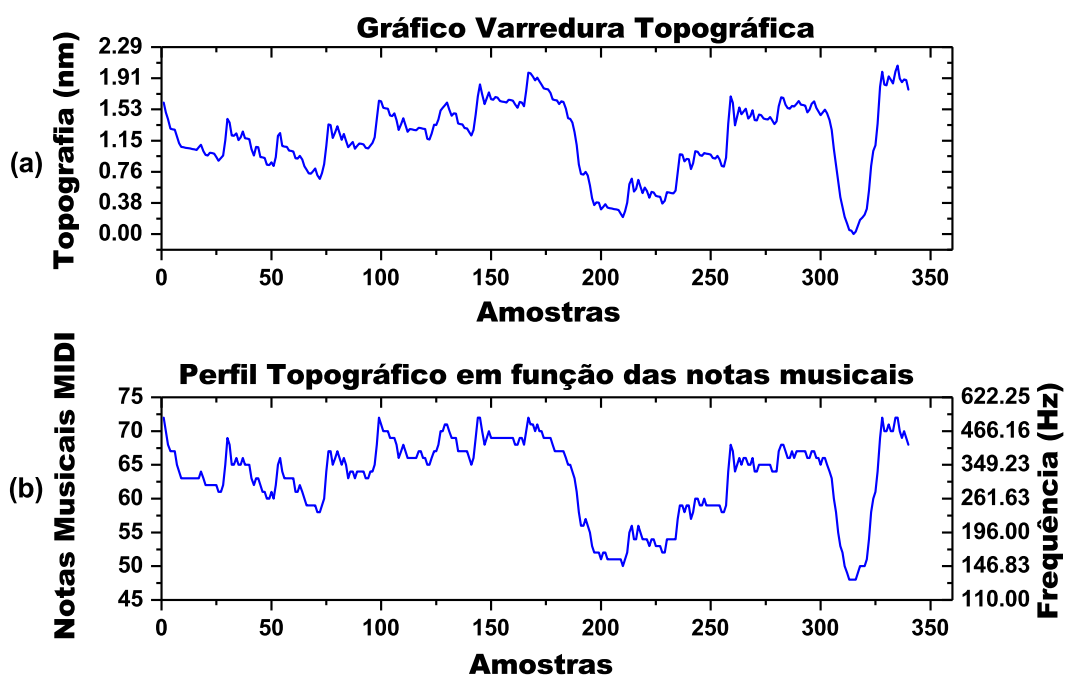


Figura 5.2: Gráficos comparativos entre topografia (a) e notas musicais (b).

melhor compreensão do processo.

Conforme relatado na Seção 4.4, um teste com retroalimentação visual e sonora foi

aplicado a alguns voluntários, para avaliar a percepção dos usuário bem como para validar se o retorno sonoro acrescenta informação a varredura AFM. O teste visual consistiu na utilização dos valores de tensão referente à posição da sonda para modificar a amplitude de uma onda senoidal, similar ao visor de um osciloscópio. O teste auditivo consistiu em reproduzir um trecho sonoro com variações das notas musicais em função da variação do sinal da posição da sonda em relação à superfície da amostra.

Foram utilizados os dados da amostra de grafeno, acima descrito, para realização desse teste. Nos dois casos, os testes foram realizados em duas velocidades distintas, com taxa de atualização de 100 ms e 200 ms, de forma que as variações de amplitude de onda senoidal e de frequência de nota musical correspondem às variações topográficas em duas varreduras de velocidades distintas (uma o dobro da outra).

Em uma primeira etapa, o usuário foi exposto ao *feedback* auditivo, em seguida ao *feedback* visual, e por último ao visual e auditivo conjuntamente. Após essa etapa os usuários responderam a um questionário relatando suas percepções. Os usuários foram questionados sobre suas percepções com relação às variações auditivas e visuais, considerando as três condições de *feedback* ao qual foram expostos. Do total de voluntários, 85% consideraram que no *feedback* visual conjunto com o auditivo, foi possível distinguir as variações relacionando-as ao perfil topográfico quando foi utilizada a taxa de atualização de 100 ms, e 75% na condição onde a taxa de atualização foi de 200 ms.

Em uma segunda etapa os voluntários foram submetidos aos mesmos *feedbacks* da primeira etapa, porém o *feedback* visual foi alterado para um perfil topográfico formado ao longo do tempo, com o intuito de verificar se o voluntário seria capaz de correlacionar as variações de notas musicais às variações do perfil topográfico. Do total de voluntários, 50% consideraram o *feedback* auditivo com a taxa de atualização de 200ms melhor para essa correlação. 30% consideraram a taxa de atualização de 100ms melhor para correlacionar o sinal e 20% alegaram ser indiferente as taxas de atualização.

Em uma análise mais detalhada, relacionando o feedback auditivo e as variações do perfil topográfico, 70% dos usuários consideraram perceber um maior número de detalhes da amostra com auxílio do feedback auditivo e 80% consideraram ser possível relacionar o deslocamento da sonda em relação a amostra com as variações sonoras. Já em relação às variações topográficas, 100% dos entrevistados consideraram perceber melhor as depressões e 85% tiveram uma melhor percepção dos picos na amostra com auxílio do feedback auditivo. Do total de entrevistados, 95% consideraram que uma resposta auditiva acrescenta informação ao processo, e apenas 01 voluntário, considerou não haver agregação de valor ao processo de SPM através de feedback auditivo.

Os resultados obtidos com os testes foram baseados na compilação de todas as respostas do questionário aplicado aos voluntários, que encontra-se representada no relatório

do Apêndice C.

## 5.2 Teste sonificação *on-line*, com aquisição direta dos dados de varredura

Realizado o teste *off-line* de conversão do sinal de varredura em uma retroalimentação sonora, o próximo passo foi realizar a implementação do algoritmo em uma placa Raspberry Pi. Os dados de varredura foram lidos através do circuito desenvolvido que estava conectado à saída de baixa tensão do R9. Foi utilizado o padrão de calibração AFM, modelo TGZ02, fabricado pela MicroMasch, como amostra para realizar a aquisição dos dados de varredura utilizando este sistema proposto.

O objetivo desse teste era validar se seria possível adquirir os dados em tempo de varredura e converter o mesmo em um sinal sonoro de forma que o usuário do sistema de varredura pudesse perceber as variações de posicionamento da sonda no eixo  $Z$  em relação às amostra, o que nesse teste caracterizaria as variações topográficas da superfície da amostra.

Depois que o sistema de varredura do AFM foi configurado, uma área de  $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$  da área total de varredura do AFM foi selecionada. O resultado obtido com a varredura realizada pode ser visto na Figura 5.3 (a). Em condições ideais, a superfície do padrão é completamente plana, então o perfil deve ser linear em cada nível. Devido às partículas de sujeira na superfície, bem como pequenas deformações na parte da sonda que interage com a superfície do padrão, o perfil topográfico pode apresentar alguns defeitos, como pode ser visto na Figura 5.3 (b). Uma linha de varredura, marcada pela linha preta na Figura 5.3 (a) foi selecionada para destacar as falhas relatadas acima. O perfil topográfico da linha pode ser visto na Figura 5.3 (c), que consiste nos dados adquiridos na direção de varredura direta.

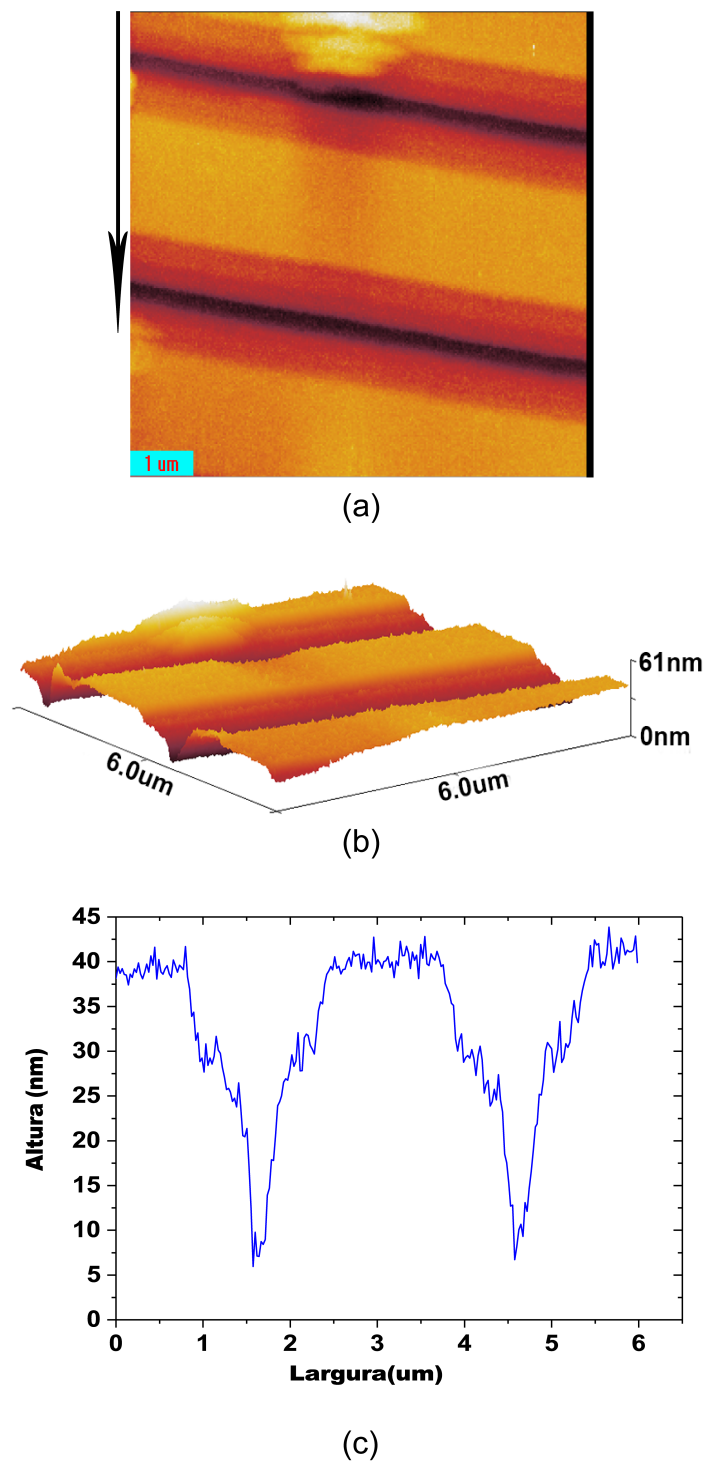


Figura 5.3: Sinal adquirido durante a varredura do padrão. Em (a) o sinal de varredura é mostrado como imagem 2D pós-processada; Em (b), imagem 3D da varredura padrão, com detalhes da superfície; e em (c) sinal correspondente à seção preta marcada na Figura 5.3 (a)

Observe os níveis de detalhe da superfície da amostra. Quando os dados são analisados via software, com feedback visual para o usuário, os detalhes sutis da superfície

são frequentemente sobrepostos ou unificados pelo sistema de processamento de dados para conversão em imagem. A Figura 5.4 representa a seção marcada na Figura 5.3, validando que o sistema adquire dados de varredura compatíveis com as variações topográficas da amostra.

Conectando o sistema de sonificação desenvolvido ao sistema de controle SPM R9 para leitura em tempo real dos dados de varredura, foi possível perceber variações sonoras correspondentes às variações do perfil topográfico da amostra similares ao teste *off-line*. Após a realização do processo de conversão de tensão para a nota musical MIDI e sua reprodução sonora, foi gerado um gráfico com os valores das notas obtidas para validar se a conversão era compatível com o perfil topográfico gerado pelo sistema de feedback visual utilizado pelo sistema SPM.

O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.5. Pode-se perceber que as imperfeições do processo de varredura perceptíveis na Figura 5.4 foram reproduzidos no gráfico que representa a conversão acima descrita.

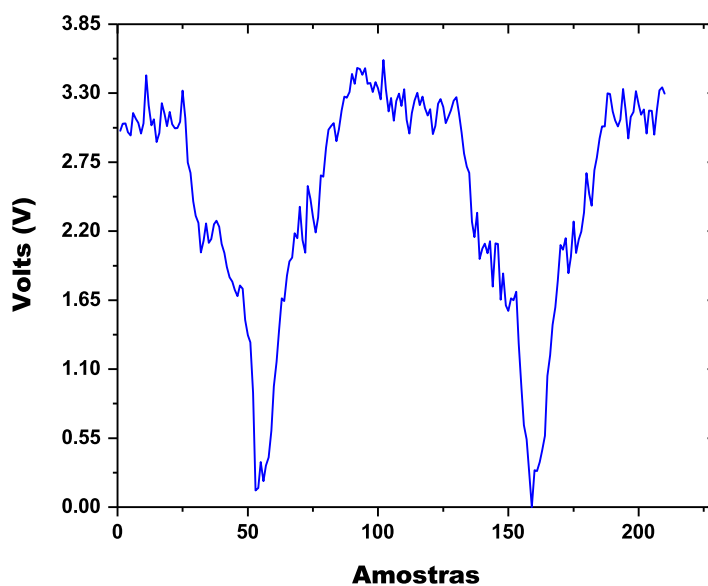


Figura 5.4: Sinal de varredura topográfica do padrão de calibração AFM obtido com a varredura AFM, marcado na Figura 5.3 (a) pela linha preta.

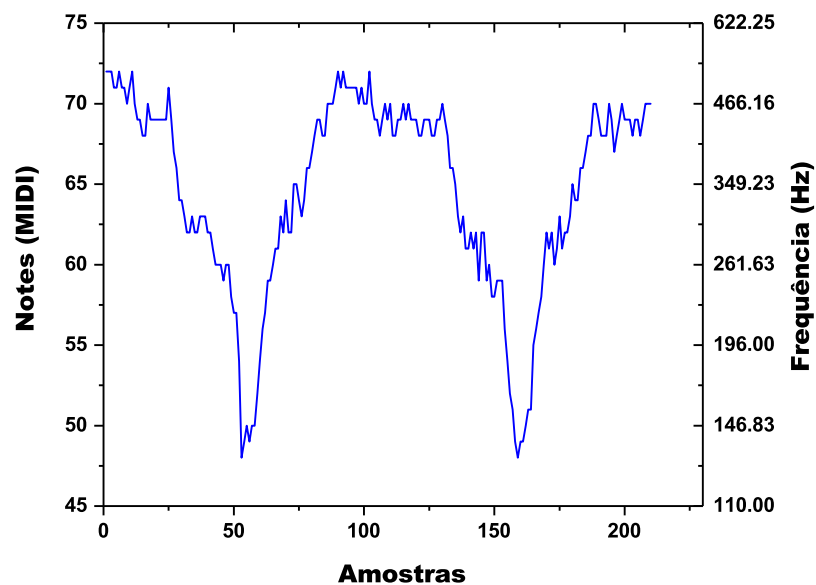


Figura 5.5: Gráfico das notas musicais geradas em tempo real a partir dos dados adquiridos no processo de digitalização.

Ao realizar a conversão sonora dos dados em tempo de varredura, o usuário pode ter uma percepção adicional do processo de varredura, durante sua realização, uma vez que, até então, somente uma retroalimentação visual com um certo atraso em relação a real posição da sonda durante a varredura era disponibilizada para o mesmo.

# Capítulo 6

## Conclusão

Nesse trabalho, foi implementado um processo de retroalimentação sonora do sinal de varredura de um sistema AFM com o intuito de fornecer um retorno sonoro para o usuário final, de forma a complementar o visual, método de retorno comumente utilizado nos atuais sistemas de microscopia de varredura por sonda.

Inicialmente foram utilizados dados obtidos previamente durante uma varredura AFM, para realização da conversão em um padrão sonoro que representasse as variações de perfil topográfico que ocorrem durante a varredura. O processo de conversão foi testado através de um algoritmo implementado na linguagem de programação *Python*, utilizando o padrão MIDI para geração do sinal sonoro a ser exibido para o usuário.

Através do questionário referente ao teste que foi aplicado a alguns voluntários, foi possível constatar que a retroalimentação sonora apresenta grande potencial para uma futura implementação em condições reais de uso, uma vez que os resultados obtidos comprovaram a complementariedade dos sinais sonoros e visuais em um sistema de microscopia de varredura.

Em um segundo momento, um sistema para gerar os parâmetros de sonificação para o sinal de varredura de um sistema AFM foi implementado. Uma placa para aquisição do sinal de varredura do sistema de SPM foi desenvolvida para alimentar o algoritmo que foi implementado no Raspberry Pi, de forma que os dados da varredura fossem convertidos simultaneamente em um sinal sonoro, que reproduzisse as variações topográficas da superfície de uma amostra durante o processo de varredura.

Um retorno sonoro compatível com as variações topográficas ocorridas durante o processo de varredura de AFM foi obtido, proporcionando ao usuário do sistema SPM ter uma percepção das variações do perfil topográfico simultaneamente ao processo de varredura. Com os resultados obtidos através da retroalimentação sonora, foi possível perceber que o retorno sonoro em um sistema de microscopia de varredura em condições ambientes é viável. A aquisição direta abriu a possibilidade de um maior detalhamento

da superfície da amostra, bem como um melhor entendimento do processo.

Uma aplicação interessante de retorno sonoro seria no ajuste de sistemas SPM. Na maioria das vezes é utilizado um padrão de calibração para alinhamento do sistema, onde ao final uma imagem do perfil topográfico desse padrão é obtido. Utilizando o mesmo padrão de calibração, pode-se obter, através de testes sucessivos, um padrão sonoro que corresponderia ao funcionamento ideal de um processo de varredura SPM. A partir desse dado e de treinamento prévio do usuário, o mesmo seria capaz de ajustar o sistema sem se ater ao retorno visual, o que a princípio traria mais agilidade no processo de alinhamento do sistema.

Um estudo mais aprofundado voltado para a aquisição dos dados de varredura pode ser realizado, com a objetivo de se obter um dispositivo configurável voltado para sonificação de dados, onde diferentes tipos de sinais possam ser adquiridos e convertidos em um retorno sonoro. Foram realizados testes de conversão sonora, de forma a se obter um sinal sonoro ponto-a-ponto, com o intuito de reproduzir em forma de som a posição da sonda a cada instante de tempo. O processo de sonificação de dados, um campo de estudo dentro da área de computação musical, pode ser largamente explorado para se obter sinais sonoros mais complexos, processando um volume maior dos dados adquiridos durante o processo de varredura, sendo possível obter informação referente a textura do material em análise.

A microscopia de varredura por sonda apresenta cenários complexos que para o retorno sonoro são um grande desafio. Sujeira na superfície da amostra, bem como na sonda compromete a qualidade do sinal durante a varredura, influenciando diretamente o retorno sonoro gerado. Durante a varredura de AFM qualquer contato da sonda com a amostra danifica a mesma, o que compromete o sistema. Um sistema de sonificação ideal deveria ser capaz de descrever através do retorno sonoro esse casos, de forma que a técnica e microscopia de varredura fosse possível ser compreendida por um deficiente visual, vislumbrando a possibilidade de inclusão do mesmo no campo/área de pesquisa científica.

Em trabalhos futuros propomos aplicar o sistema de geração de parâmetros desenvolvido neste trabalho, em outras técnicas de microscopia de varredura, bem como demais técnicas de análise e caracterização de materiais, como por exemplo técnicas de espectroscopia. No caso específico do LabNS, seria interessante aplicar o sistema descrito neste trabalho ao TERS, (*do inglês, Tip-Enhanced Raman Spectroscopy*). O TERS é a combinação de espectroscopia Raman com uma técnica de microscopia de varredura por sonda, seja AFM ou outra, de forma que a imagem da assinatura Raman de uma amostra, gerada pelo TERS, tenha uma resolução nanométrica e sensibilidade molecular (Nicklaus, 2014). Por ser uma técnica ainda em desenvolvimento, é provável que tenha ganhos significativos com novos sistemas de retroalimentação.



# Referências Bibliográficas

- 3rdTech (2006). *Interactive Visualization and Control System for Scanning Probe Microscopes*. 3rdTech,Inc, v031303a.
- Alan V. Oppenheim, R. W. S. (2009). *Discrete-Time Digital Signal Processing*, volume 1 of *Prentice-Hall Signal Processing Series*. Prentice-Hall,3.
- Araujo, P. (2010). *Study of the Electrostatic Shielding and Environmental Interactions in Carbon Nanotubes by Resonance Raman Spectroscopy*. PhD thesis, Department of Physics-Federal University of Minas Gerais.
- B. Bhushan, H.Fuchs, S. H. a. (2004). *Applied Scanning Probe Methods*. NanoScience and Technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 .
- Cadoz, C.; Luciani, A. e Florens, J. L. (1993). Cordis-anima: a modeling and simulation system for sound and image synthesis: the general formalism. *Computer music journal*, 17(1):19–29.
- Cherston, J.; Hill, E.; Goldfarb, S. e Paradiso, J. A. (2016). Sonification platform for interaction with real-time particle collision data from the atlas detector. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1647–1653. ACM.
- Colton, R. J.; Baselt, D. R.; Dufrière, Y. F.; Green, J.-B. D. e Lee, G. U. (1997). Scanning probe microscopy. *Current opinion in chemical biology*, 1(3):370–377.
- Custance, O.; Perez, R. e Morita, S. (2009). Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation. *Nature nanotechnology*, 4(12):803.
- Eaton, P. e West, P. (2010). *Atomic force microscopy*. Oxford University Press.
- Eigler, D. M. e Schweizer, E. K. (1990). Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, 344(6266):524.

- Flores, S. M. e Toca-Herrera, J. L. (2009). The new future of scanning probe microscopy: Combining atomic force microscopy with other surface-sensitive techniques, optical microscopy and fluorescence techniques. *Nanoscale*, 1(1):40–49.
- Flynn, M. J. e Luk, W. (2011). *Computer System Design: System-on-Chip*. John Wiley & Sons.
- Günther, H. (2003). Como elaborar um questionário (série: Planejamento de pesquisa nas ciências sociais, nº 01). *Brasília, DF: UnB, Laboratório de Psicologia Ambiental*.
- Halfacree, G. e Upton, E. (2012). *Raspberry Pi User Guide*. Wiley Publishing, 1st.
- Hermann, T. (2002). *Sonification for exploratory data analysis*. PhD thesis, Faculty of Engineering of the University of Bielefeld.
- Hermann, T. e Hunt, A. (2005). Guest editors' introduction: An introduction to interactive sonification. *IEEE multimedia*, 12(2):20–24.
- Instruments, T. (2015). Understanding the i2c bus. Technical report.
- Klapetek, P. (2013). *Quantitative Data Processing in Scanning Probe Microscopy: SPM Applications for Nanometrology*. Elsevier.
- Li, M.; Liu, L.; Xi, N. e Wang, Y. (2015). Biological applications of a nanomanipulator based on afm: In situ visualization and quantification of cellular behaviors at the single-molecule level. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 9(3):25–35.
- Liptak, B. G. (2003). *Instrument Engineers' Handbook, Volume 1, Fourth Edition: Process Measurement and Analysis*.
- Loos, J. (2005). The art of spm: Scanning probe microscopy in materials science. *Advanced Materials*, 17(15):1821–1833.
- Mancini, R. e Carter, B. (2002). *Op amps for everyone*. Texas Instruments - Design Reference.
- Marchi, F.; Urma, D.; Marliere, S.; Florens, J.-L.; Besancon, A.; Chevrier, J. e Luciani, A. (2005). Educational tool for nanophysics using multisensory rendering. In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 473–476. IEEE.
- Marliere, S.; Urma, D.; Florens, J.-L. e Marchi, F. (2004). Multi-sensorial interaction with a nano-scale phenomenon: the force curve. *arXiv preprint arXiv:1005.3181*.

- Martini, J.; Hermann, T.; Anselmetti, D. e Ritter, H. (2004). Interactive sonification for exploring single molecule properties with afm-based force spectroscopy. In *Proceedings of the International Workshop on Interactive Sonification*.
- Mironov, V. L. (2004). *Fundamentals of scanning probe microscopy*. Moscow:Technosfera.
- Mišković, B. et al. (2014). Applications of the single board computers in the software defined radio systems. *Sinteza 2014-Impact of the Internet on Business Activities in Serbia and Worldwide*, pp. 882–886.
- National (2014). *USER GUIDE USB-6008/6009*. National Instruments. Revisado Novembro de 2015.
- Nicklaus, M. (2014). *Tip-Enhanced Raman Spectroscopy for Nanoelectronics*. BoD–Books on Demand.
- Pajankar, A. (2015). *Raspberry Pi Computer Vision Programming: Design and implement your own computer vision applications with the Raspberry Pi*. Packt Publishing.
- Pajankar, A. (2017). *Raspberry Pi Supercomputing and Scientific Programming: MPI4PY, NumPy, and SciPy for Enthusiasts*. Apress, 1.
- Paul, M. (1997). *Maximum MIDI: Music Applications in C++*. Manning Publications Co., Canada.
- Polotti, P. (2008). *Sound to sense, sense to sound: a state of the art in sound and music computing*. Logos Verlag Berlin GmbH.
- Proakis, J. G. e Manolakis, D. G. (2013). *Digital signal processing*. Pearson Education.
- RaspberryPi, F. (2018). Raspberry pi - teach, learn and make with raspberry pi. Disponível em ::Acessado em 21-05-2018.
- RHK (2015). *R9 Control System User Guide v5.5*. RHK Technology.
- Roginska, A.; Childs, E. e Johnson, M. K. (2006). Monitoring real-time data: A sonification approach. Georgia Institute of Technology.
- Rubio-Sierra, F. J.; Heckl, W. M. e Stark, R. W. (2005). Nanomanipulation by atomic force microscopy. *Advanced Engineering Materials*, 7(4):193–196.
- Ruiter, A.; Van Der Werf, K.; Veerman, J.; Garcia-Parajo, M.; Rensen, W. e Van Hulst, N. (1998). Tuning fork shear-force feedback. *Ultramicroscopy*, 71(1):149–157.

- Salapaka, S. M. e Salapaka, M. V. (2008). Scanning probe microscopy. *IEEE Control Systems*, 28(2):65–83.
- Sitti, M. (2001). Survey of nanomanipulation systems. In *Nanotechnology, 2001. IEEE-NANO 2001. Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on*, pp. 75–80. IEEE.
- Texas (2008). *LM7321x Single and LM7322x Dual Rail-to-Rail , High-Output Current and Unlimited Capacitive Load Operational Amplifier*. Texas Instruments, snosaw8e. Revisado Setembro de 2015.
- Texas (2009). *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I<sup>2</sup>C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator*. Texas Instrument, sbas444d. Revised January de 2018.
- Upton, E. e Halfacree, G. (2014). *Raspberry Pi user guide*. John Wiley & Sons.
- Worrall, D. (2015). Realtime sonification and visualisation of network metadata. Georgia Institute of Technology.

# Apêndice A

## Carta de aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa - UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA - COEP


**Projeto: CAAE – 89062718.1.0000.5149**

**Interessado(a): Prof. Ado Jorio De Vasconcelos**  
**Depto. Física**  
**ICEX- UFMG**

### DECISÃO

O Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG – COEP aprovou, no dia 20 de junho de 2018, o projeto de pesquisa intitulado **“Implementação de sistema para sonificação de microscopia de varredura por sonda”** bem como o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

O relatório final ou parcial deverá ser encaminhado ao COEP um ano após o início do projeto através da Plataforma Brasil.

  
Profª. Dra. Vivian Resende  
Coordenadora do COEP-UFMG

# Apêndice B

## Questionário aplicado para avaliação da retroalimentação sonora

Universidade Federal de Minas Gerais

Departamento de Física

**Pesquisa:** Implementação de sistema para sonificação de microscopia de varredura por sonda.

**Pesquisador Orientador:** Ado Jorio de Vasconcelos

**Pesquisador mestrando:** Tiago Abreu Freitas - Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE)

### Roteiro do questionário a ser aplicado

Contato prévio: por e-mail, telefone ou presencial. Apresentar o objetivo da pesquisa que é testar uma nova metodologia de avaliação da técnica de microscopia de força atômica, utilizando sonificação de dados em tempo real. Quando se fala de sonificação de dados, quer-se dizer converter um dado lido/adquirido em um sinal sonoro perceptível ao ser humano.

Observações: este roteiro é proposto vislumbrando potenciais usuário do sistema em desenvolvimento; as perguntas propostas compõem a parte estruturada do questionário.

A entrevista é realizada após assinatura, pelo entrevistado, do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

- **Etapas a serem executadas nos testes:**

**ETAPA 1** – Explicar o experimento e realizar testes de adequação com participante.

### PERGUNTAS

- **Sente-se confortável para iniciar o experimento?**

( ) Sim      ( ) Não

- **Você já realizou experimentos de SPM?**

( ) Sim      ( ) Não

- **Você tem algum conhecimento/experiência atual na área da música?**

( ) Sim      : ( ) Canto ( ) instrumento ( ) composição e arranjo      ( ) Não

- **Você possui algum tipo de limitação visual ou auditiva?**

( ) Sim: ( ) Visual ( ) Auditiva ( ) Não

**ETAPA 2** – Realizar teste com feedback sonoro em duas velocidades a serem definidas.(100ms/200ms)

– Realizar o teste com feedback visual. As variações de amplitude ocorrerão com as mesmas velocidades da variação do feedback sonoro.

– Realizar um teste com os feedbacks visual e auditivo simultaneamente.

**PERGUNTAS:**

- **Numere de 1 a 3 ordenando em qual feedback foi mais perceptível as variações (amplitude/sonora). Colocar 1 para a melhor percepção e 3 para a pior.**

Menor velocidade

(1) ( 2) ( 3) Visual    (1) ( 2) ( 3) Auditivo    (1) ( 2) ( 3) Visual + auditivo

Maior velocidade

(1) ( 2) ( 3) Visual    (1) ( 2) ( 3) Auditivo    (1) ( 2) ( 3) Visual + auditivo

- **Numere de 1 a 3 ordenando qual feedback foi mais perceptível a correspondência entre as variações (amplitude/sonora) e as variações topográficas do escaneamento. Colocar 1 para a melhor percepção e 3 para a pior.**

Menor velocidade

(1) ( 2) ( 3) Visual    (1) ( 2) ( 3) Auditivo    (1) ( 2) ( 3) Visual + auditivo

Maior velocidade

(1) ( 2) ( 3) Visual    (1) ( 2) ( 3) Auditivo    (1) ( 2) ( 3) Visual + auditivo

- **Qual das três velocidades oferece melhor percepção de variação dos sinais sonoros?**

( ) Maior ( ) Menor ( ) Indiferente

- **Qual das três velocidades oferece melhor percepção de variação dos sinais visuais?**

( ) Maior ( ) Média ( ) Indiferente

- **Qual das três velocidades oferece melhor percepção de correlação entre as variações dos sinais sonoros e uma varredura topográfica em SPM?**

( ) Maior ( ) Menor ( ) Indiferente

**- Qual das três velocidades oferece melhor percepção de correlação entre as variações dos sinais visuais e uma varredura topográfica em SPM?**

Maior  Menor  Indiferente

**- Teve alguma dificuldade com relação ao feedback sonoro?**

- Reprodução sonora muito rápida.  Sim  Não
- Assimilar notas muito agudas ao perfil topográfico.  Sim  Não
- Assimilar notas muito graves ao perfil topográfico.  Sim  Não
- Diferenciação das notas musicais em função das variações topográficas.  Sim  Não
- Outras (Descrever)

**- O sistema proposto apresenta qualidade sonora agradável? Descreva sua percepção a respeito do mesmo.**

Sim  Não

Comentários:

**ETAPA 3** - Repetir a etapa 2 conjuntamente ao gráfico do perfil topográfico que está sendo analisado.

**PERGUNTAS:**

**- Qual das três velocidades foi possível melhor correlacionar o sinal sonoro com a posição no gráfico do perfil topográfico?**

Maior  Menor  Indiferente



**- Qual das três velocidades foi possível melhor correlacionar a variação de amplitude com a posição no gráfico do perfil topográfico?**

Maior  Menor  Indiferente

**- O feedback sonoro proporcionou outras percepções do perfil topográfico?**

- Maior número de detalhes da amostra.  Sim  Não
- Deslocamento vertical da sonda em relação a superfície da amostra.  Sim  Não
- Melhor percepção de depressões (vales) na amostra.  Sim  Não
- Melhor percepção de picos (extremidades) na amostra.  Sim  Não
- Outras (Descrever)

**- Você considera que o feedback sonoro agrega valor (informação) ao processo de SPM?**

Sim  Não

**- Observações/Sugestões:**



