

IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA PARA SONIFICAÇÃO DE MICROSCOPIA DE VARREDURA POR SONDA

TIAGO ABREU FREITAS*, HUDSON MIRANDA*, CASSIANO RABELO*, ADO JORIO*[†]

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901
Belo Horizonte, MG, Brasil*

*[†]Departamento de Física - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Emails: tiago.tiagofreitas@gmail.com, HUDSON@labns.com.br, cassianorabelo@ufmg.br,
adojorio@fisica.ufmg.br

Abstract— The present work aims at the development of scientific instrumentation in scanning probe microscopy, a field of wide application and versatility that allows to explore new methods and techniques of control. We propose to add a new methodology for the evaluation of the atomic force microscopy technique using data sonification in such a way that information about the available data and the physical process are included in an auditory feedback to the user. For validation, volunteers were submitted to auditory and visual feedback tests, the results of which confirmed the use of sound feedback in scanning probe microscopy.

Keywords— microscopy, sonification, real-time data sonification, scanning probe microscopy, auditory feedback.

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 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. Para validação, voluntários foram submetidos a testes com *feedback* auditivo e visual, cujos resultados confirmaram ser promissor a utilização do retorno sonoro em microscopia de varredura por sonda.

Palavras-chave— microscopia, sonificação de dados em tempo real, microscopia de varredura por sonda, *feedback* auditiva.

1 Introdução

A microscopia de varredura por sonda (do inglês *Scanning Probe Microscopy*, *SPM*) é uma técnica de pesquisa em nanociência, pois permite investigar a morfologia e as propriedades locais da superfície de amostras com resolução espacial inferior a um angstrom (Eaton and 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). O que se propõe neste trabalho é o desenvolvimento de instrumentação e algoritmos para a sonificação dos dados obtidos durante a varredura em tempo real em um sistema SPM.

A sonificação apresenta informações utilizando áudio para que o usuário do sistema obtenha uma nova compreensão dos dados ou processos sob investigação, por meio da audição (Hermann and 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), por meio da interação direta com a informação topográfica gerada. 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.

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, a varredura auditiva pode ser mais adequada para detectar dados sutis ou transitórios, pois a audição pode detectar características de sinais com duração temporal muito curtas mais intuitivamente (Roginska et al., 2006). 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 usuá-

rio; 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 áudio-háptica para o controle de um microscópio de força atômica (do 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, por meio da chamada Sonificação Baseada em Modelos (MBS, do inglês *Model Base Sonification*), 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. Dessa forma, este trabalho reporta a implementação de um sistema de sonificação de dados obtidos a partir de varreduras feitas por AFM para o desenvolvimento de novas metodologias de avaliação, bem como fornecer informações em tempo real que permitirão ao usuário atuar na calibração e ajuste de sistemas de SPM.

2 Metodologia

Dentre as técnicas de SPM existentes, para desenvolvimento deste trabalho foi escolhida o AFM, uma técnica de microscopia de varredura, que destaca-se pela versatilidade e simplicidade de aplicação em diversos tipos de materiais como: condutores, isolantes, materiais biológicos, dentre outros (B. Bhushan, 2004).

O processo de varredura de um AFM consiste em varrer uma amostra com uma sonda e, a partir da interação sonda-amostra, formar um perfil de posição da sonda ao longo do eixo Z, à medida que ela varre a superfície no plano XY (Figura 1).

Ao longo da varredura, é coletado um sinal de tensão elétrica proporcional à posição da sonda no eixo Z, que representa o perfil topográfico da amostra. Realizado o condicionamento do sinal, que consiste em adequar o mesmo a grandezas e faixas de valores que possam ser digitalizados e processados por *software*, o que se propõe é a conversão dos dados obtidos em um sinal sonoro que represente características da superfície da amostra, conforme ilustrado na Figura 1. Por meio desse processo, detalhes referentes à posição da sonda serão perceptíveis ao usuário no momento da varredura.

O ouvido humano é um órgão sensorial ca-

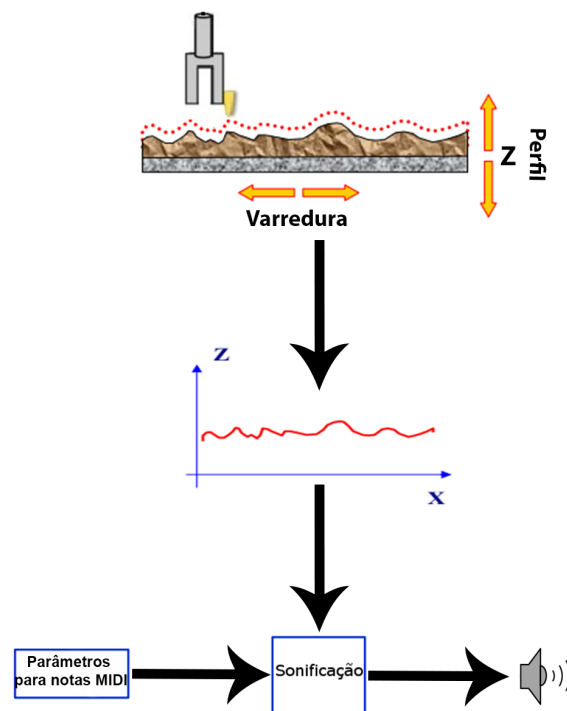


Figura 1: Representação esquemática do processo de varredura de um AFM e o processo de sonificação.

paz de perceber e interpretar ondas sonoras em uma faixa de frequência típica de 20 Hz a 20 kHz (Hermann, 2002). Durante o processo de sonificação, os dados precisam ser convertidos em frequências audíveis que permitam uma interpretação por parte do usuário. Neste trabalho, sons mais graves representam a posição da sonda em Z nos pontos mais baixos do perfil topográfico. Sons mais agudos representam a posição da sonda em Z nos pontos mais elevados do perfil topográfico. Tais características serão detalhadas no item 2.2, que trata do processo de aquisição dos sinais.

2.1 Instrumentação para realização do experimento

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado um sistema AFM com retroalimentação baseado em PLL (do inglês, *Phase Locked Loop*), associado à vibração de um diapasão de quartzo que compõe a sonda, método conhecido como *tuning fork (TF)-AFM* (Nicklaus, 2014). Essa técnica é baseada no *shear-force feedback* (Ruiter et al., 1998), onde um diapasão de quartzo é utilizado no chamado *non-contact AFM* para varredura de modo sem contato (Eaton and West, 2010). Na ponta do diapasão é fixada uma ponta afiada (sonda), e excitado mecanicamente em sua frequência de ressonância por um elemento piezoelétrico, denominado *dither*. 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, encontra-se ilustrado o esquemático básico do sistema AFM descrito.

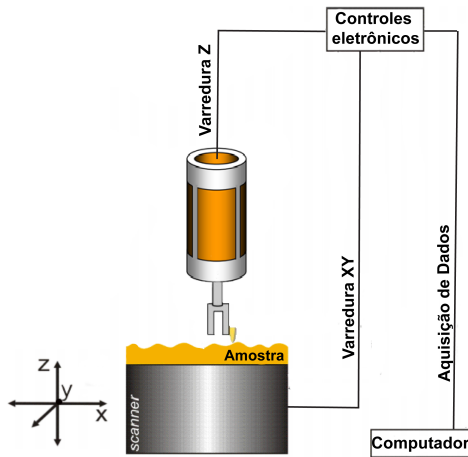


Figura 2: Esquemático de um sistema AFM baseado em um diapasão.

Quando a sonda interage com a superfície, há uma alteração na frequência de oscilação do diapasão. Sendo a variação em frequência (Δf) relacionada à distância entre a sonda e a amostra, o sistema de controle atua aplicando um sinal de tensão no tubo piezoelétrico, responsável pela posição da sonda em Z, de forma a manter constante a frequência de oscilação do diapasão.

Com base no sistema acima descrito, o processo de sonificação consistirá em fazer a leitura do sinal de tensão aplicado no tubo piezoelétrico e converter o mesmo em sinal sonoro. Na Figura 3, encontram-se descritas as etapas da sonificação do sinal gerado.

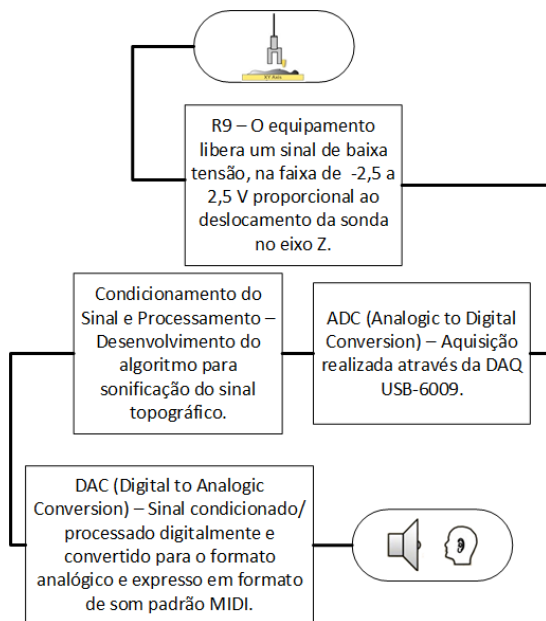


Figura 3: Fluxograma dos estágios do processo de sonificação do sinal gerado por um sistema AFM.

2.2 Aquisição do sinal

Foi utilizado, para o AFM, um sistema desenvolvido baseado na controladora R9, fabricado pela RHK Technology (RHK, 2015). Este equipamento fornece uma plataforma de controle totalmente integrada para todos os modos e técnicas de SPM. O R9 disponibiliza uma saída de baixa tensão, proporcional à posição da sonda ao longo do eixo Z, cuja faixa varia entre -2,5 V e +2,5 V, sendo que, dentro dessa faixa, o valor de +2,5 V representa o limite superior para topografia e o valor de -2,5 V representa o limite inferior. O deslocamento da amostra em XY é realizado por um nano posicionador, Nano-H50, fabricado pela empresa Mad City Labs, cuja controladora, Nano-Drive, está interligada ao R9.

Para aquisição do sinal, foi utilizado um dispositivo de aquisição de dados por USB da *National Instruments*, modelo USB-6009 (National, 2014). O mesmo foi configurado com taxa de aquisição de 48k amostras/s, ligado diretamente à interface de baixa tensão da controladora, que provê o sinal topográfico em tempo real. Optou-se por utilizar o módulo de aquisição com a taxa de amostragem informada, para validar se o sinal seria correspondente ao utilizado pelo sistema de controle para gerar o retorno visual ao usuário.

Para a realização da primeira aquisição do sinal, foi utilizado como amostra um padrão de AFM, modelo TGZ02, fabricado pela *MicroMasch*, conforme a Figura 4. O padrão foi utilizado por apresentar um perfil de topografia conhecido, característica importante para validar o processo de aquisição proposto. A grade de calibração de silício do modelo utilizado compreende uma matriz de passos retangulares com um valor de altura caracterizado, destinada à calibração do eixo Z de equipamentos para SPM. O padrão apresenta as características descritas na Figura 4 e Tabela 1.

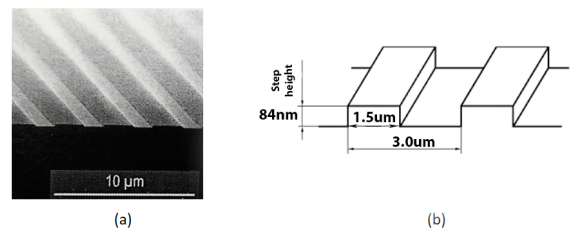


Figura 4: Em (a) uma imagem do padrão gerada por microscopia eletrônica de varredura. Em (b) as dimensões das grades do modelo. (Adaptada do manual do modelo TGZ02 da fabricante MicroMasch.)

A aquisição dos dados da varredura do padrão de AFM pode ser vista na Figura 5. As inclinações que geram o padrão triangular presente no sinal correspondem a uma inclinação intrínseca existente entre o plano de escanamento (amostra) e o sistema de varredura (*scanhead*), uma vez que, em condições reais, não é possível garantir que

Tabela 1: Características da amostra padrão ilustrada na Figura 4

Características	Dimensão
Área	3 mm × 3 mm
Altura do passo	84 nm
Largura do passo	1,5 nm
Precisão	1,5 nm
Período	3,0 nm

ambos estejam totalmente paralelos.

A rampa de subida presente no sinal corresponde ao sentido de varredura de ida, ou seja, a sonda se desloca a partir de uma posição inicial da linha até o final da mesma. A rampa de descida corresponde ao sentido de varredura de retorno, 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 a priori, sendo que a imagem final de varredura é composta pelas informações coletadas nos dois sentidos de varredura. O processo de varredura encontra-se ilustrado na Figura 6.

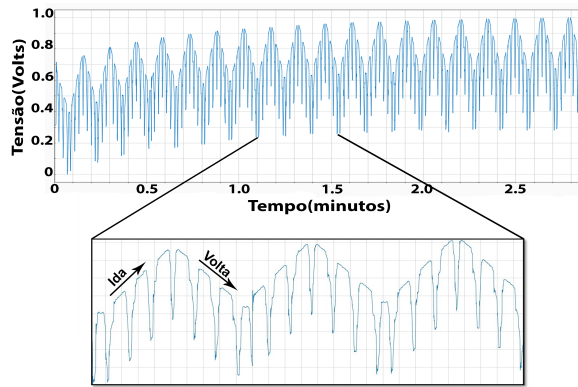


Figura 5: Sinal topográfico adquirido a partir da varredura do padrão de AFM.

Para validação da aquisição e aplicação do método de sonificação, foi coletado o sinal de uma varredura AFM a partir de uma amostra de grafeno (vide Item 3) que ao contrário do padrão de AFM, não apresenta características previamente conhecidas. Fez-se isto com o objetivo de analisar os sinais gerados em condições reais de aplicação da técnica de AFM.

2.3 Implementação do sistema de sonificação dos dados

Um dos objetivos deste trabalho é a conversão do valor de tensão lido que corresponde a uma determinada posição em altura Z, em um sinal sonoro informativo ao usuário. Os resultados obtidos são discutidos com maiores detalhes no Item 3. O sinal adquirido precisou ser adequado para o processo de sonificação.

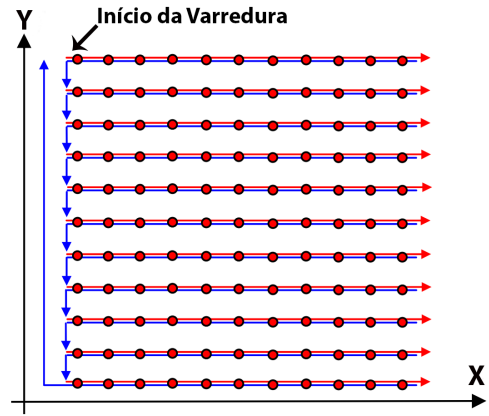


Figura 6: Ilustração esquemática do processo de varredura. A direção do movimento para frente é indicada por setas vermelhas. O movimento reverso é indicado por setas azuis. Cada ponto representa local de coleta de informação.

A estratégia utilizada para adequação foi reduzir o número de amostras ao mínimo possível, considerando a taxa de aquisição de 48k amostras/s, com fidelidade ao perfil topográfico da varredura. Para esse processo foi utilizado a técnica conhecida como decimação. Na decimação, a taxa de amostragem é reduzida de F_s para F_s/M descartando $(M - 1)$ amostras para todas as amostras M na sequência do sinal adquirido. A definição formal de decimação é definida pela Equação 1, sendo que $h[k]$ representa o filtro *anti-aliasing*, normalmente um passa-baixa, aplicado para evitar o efeito de falseamento, devido a redução da taxa de amostragem.

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k]x[nM - k] \quad (1)$$

Sabemos que, se reduzirmos a taxa de amostragem simplesmente selecionando cada valor M de $x(n)$, o sinal resultante será uma versão com *alias* de $x(n)$, com o dobro da frequência de $Fx/2M$, fenômeno que ocorre com frequências maiores que a frequência de *Nyquist*. Para evitar o aliasing, devemos primeiro reduzir a largura de banda de $x(n)$ para $F_{max} = Fx/2M$, sendo F_{max} a frequência máxima do sinal adquirido (Proakis and Manolakis, 2013). Dessa forma para amostrar um sinal em torno de 100 Hz, foi encontrado um valor M de 240 para realizar a decimação do sinal adquirido.

Na Figura 7 (c) encontra-se ilustrado a análise dos dois sinais no domínio da frequência, onde é possível constatar que, mesmo após a técnica de decimação, não houve alteração espectral em baixa frequência, considerando a frequência do sinal adquirido, validando dessa forma o método utilizado para o sinal de varredura topográfica.

Optou-se pela utilização dessa técnica devido a uma maior flexibilidade no processo de diminuição da amostragem, pois permite adequar o sistema

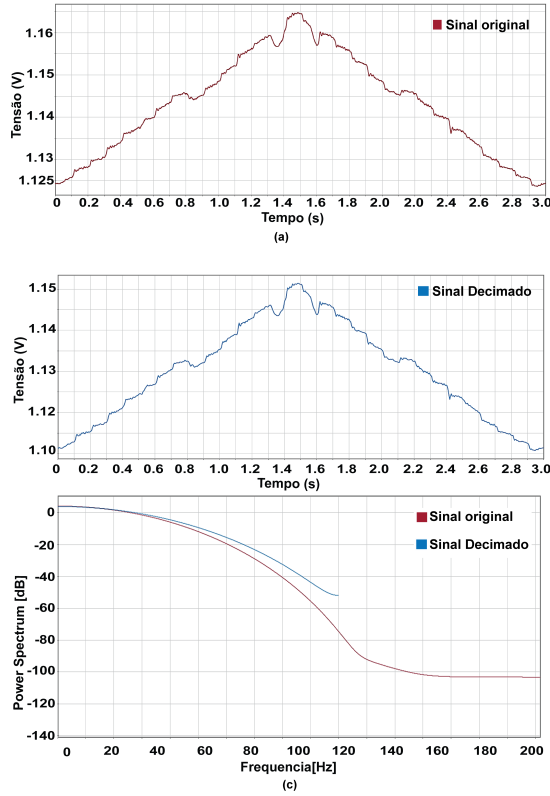


Figura 7: Amostra de grafeno cujo sinal passou por um processo de decimação. Em (a) sinal originalmente adquirido, em (b) sinal de varredura que passou por um processo de decimação e em (c) comparativo dos dois sinais no domínio da frequência.

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 possíveis mudanças no circuito, ou demandaria um maior custo na produção do mesmo pois precisaria utilizar componentes eletrônicos que permitisse esse nível de ajuste no sistema.

A partir dos dados decimados é possível implementar o modelo de sonificação em tempo real, 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.

Após a realização de alguns testes para a reprodução sonora, optou-se pela utilização da biblioteca *RtMidi*. O *RtMidi* é um conjunto de classes

C++ que fornece uma API (*Application Programming Interface*) para entrada/saída (MIDI) em tempo real, multiplataforma (Linux, macOS, Windows). A utilização da biblioteca para implementação do algoritmo em *Python* foi possível utilizando o *python-rtmidi*. Basicamente é a mesma API do C++, adaptada à estrutura de nomenclatura do pacote *Python*.

Um sinal (MIDI) (do inglês, *Musical Instrument Digital Interface*) é um sinal de interface Digital Musical Integrado que possui parâmetros principais de velocidade, tom e duração da nota. Cada um desses parâmetros pode ser atribuído a valores variando de 0 a 127. Os valores de velocidade, em (MIDI), correspondem a quão forte uma nota virtual é tocada, com 0 sendo mais fraco, o que em termos de volume a nota seria inaudível e 127 sendo o mais forte, o que corresponde ao volume mais alto que a respectiva nota pode ser tocada. Os valores de tom correspondem ao intervalo de notas musicais que podem ser relacionadas a uma nota (MIDI) com 0 sendo *C0* e 127 sendo *G10*. A duração de cada nota não é alterada em tempo de execução para tornar o padrão sonoro mais consistente ao sonificar os dados topográficos.

Dentro desse contexto, o valor de varredura é lido pelo Algoritmo 1, que possui uma função que converte o valor de tensão em notas (MIDI) em função de uma chave musical (nota musical) especificada pelo usuário. A função *SomMIDI* é usada para a conversão, sendo que a mesma utiliza 3 parâmetros: valor da varredura *valvarredura*, a chave musical *chmusica* e um número inteiro de oitavas *numoitavas*. O parâmetro número de oitavas especifica quantas oitavas acima / abaixo da nota 60 (*middle C*) nas possíveis notas (MIDI) serão geradas, bem como a menor nota a ser utilizada. O parâmetro chave musical pode ser qualquer uma das 12 notas musicais a ser definida pelo usuário.

Algoritmo 1: SOMMIDI

Entrada: *valvarredura*, *chmusica*, *noitavas*

Saída: forma de onda da nota MIDI

início

$nota = 0$

para cada valor $\in$ *valvarredura* **faça**

$nota \leftarrow$

NotaMIDI(valor, *chmusica*, *noitavas*)

retorna *nota*

Usando a função *NotaMIDI*, Algoritmo 2, e a matriz de notas (*Knotas*), define o valor médio da matriz (*mnota*) logo em seguida determina o número total de oitavas acima da nota mais baixa multiplicando o número de oitavas acima e abaixo do parâmetro por 2. A função então define uma nota musical acima da nota mais baixa (*dataNota*), medido sobre o número total de oitavas, sendo esta a nota gerada para o valor de varredura informado.

As etapas do processo de sonificação

Algoritmo 2: NOTAMIDI

Entrada: *valor, chmusica, Knotas, noitavas***Saída:** nota MIDI criada para reprodução**início** $mnota \leftarrow \minNota(noitavas)$ $notager \leftarrow$ $dataNota(Knotas, mnota, noitavas) *$ $valor$ **retorna** *notager*

encontram-se descritas na Figura 8.

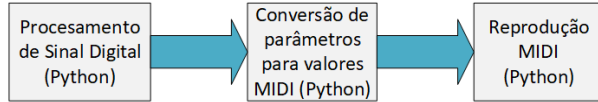


Figura 8: Estágios do processo de sonificação.

2.4 Questionário para avaliação do feedback auditivo

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 foi conduzida utilizando questionários, 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 o *feedback* auditivo adiciona informação valiosa ao *feedback* visual.

Foram realizados testes com *feedback* visual e auditivo 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 próxima seção.

3 Resultados

Para testar o algoritmo desenvolvido baseado em conversão em notas (MIDI), uma amostra foi utilizada para análise offline. Especificamente, foi utilizada uma imagem topográfica de grafeno, conforme ilustrado na Figura 9. O retângulo azul representa a região da amostra cujo sinal de varredura foi coletado. Nessa região foram demarcadas três seções (preta, vermelha e verde), cujas topografias apresentam as características que podem

ser vistas na Figura 10 (b), formadas pelas varreduras de ida. O sinal Z coletado deverá apresentar características semelhantes aos mesmos.

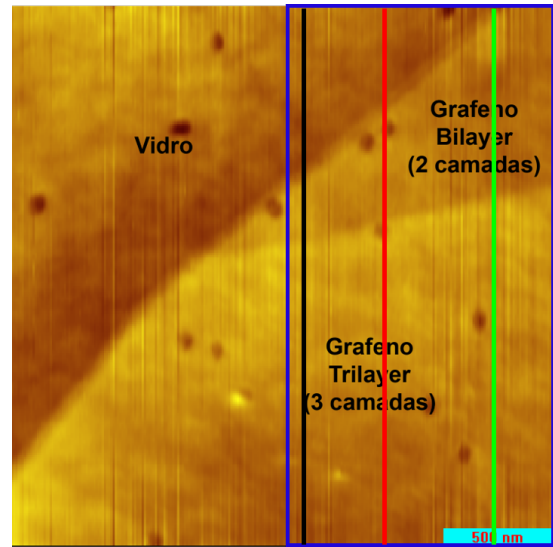


Figura 9: Amostra de grafeno analisada. O retângulo azul representa a região da amostra cujo sinal de varredura foi coletado, onde foram demarcadas três sessões (preta, azul e vermelha).

O sinal Z adquirido pode ser observado na Figura 10 (a). O trecho do sinal destacado na Figura 10 (a) mostra o sinal de duas linhas de escaneamento(ida e volta). Os detalhes destacados com círculos vermelhos correspondem à depressões na superfície da amostra, correspondentes às encontradas quando analisamos a seção vermelha destacada na Figura 9, representada na Figura 10 (b).

A sonificação dos dados foi realizada selecionando um intervalo dos dados que correspondem ao trecho identificado pela linha preta, na Figura 11(a). A superfície da amostra de grafeno, em escala nanométrica, apresenta imperfeições que podem ser vistas no gráfico da Figura 12 (a), que representa o perfil topográfico da seção demarcada, após subtração da inclinação do sinal devido ao desnível da amostra.

Após realizar o processo de conversão de tensão para nota musical *MIDI*, os novos valores de notas foram representados em forma de gráfico para validar se a conversão é compatível com o perfil topográfico, como mostrado na Figura 12 (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 trata-

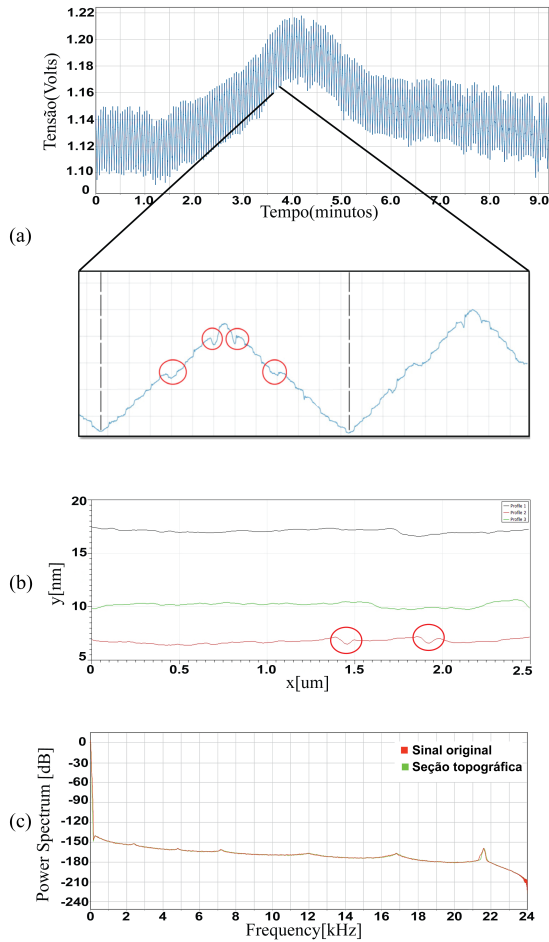


Figura 10: Sinal adquirido da mostra de grafeno. Em (a) o sinal de varredura que foi coletado; Em (b), sinal correspondente a seção vermelha demarcada na Figura 9 e em (c) ambos os sinais analisados no domínio da frequência.

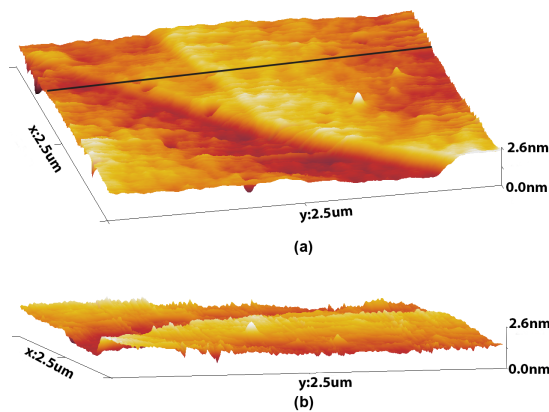


Figura 11: Imagem 3D da amostra de grafeno, com detalhes da superfície.

mentos desses dados para conversão em imagem. A aquisição direta abriu possibilidade de um maior detalhamento da superfície da amostra, bem como a compreensão do processo.

Conforme relatado, um teste com *feedback* visual e sonoro foi aplicado a alguns voluntários, para avaliar a percepção dos usuário bem como para

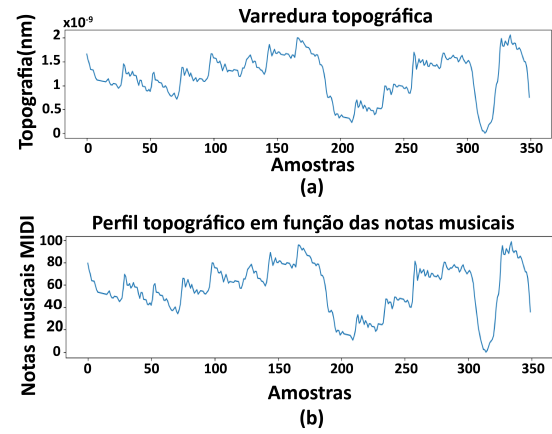


Figura 12: Gráfico comparativo entre topografia e notas musicais.

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 da 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 a superfície da amostra. 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 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. O resultado geral obtido encontra-se representados na Tabela 2.

Tabela 2: Percentual de usuários que consideraram ter melhor percepção com acréscimo do *feedback* auditivo ao visual (Onda Senoidal), em função da taxa de atualização.

Taxa Atualização	Percentual
100ms	85%
200ms	75%

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 voluntários seria capaz de correlacionar as variações de notas musicais as variações do perfil topográfico. Os resultados obtidos encontram-se representados na Tabela 3.

Resultados obtidos em uma análise mais detalhada, relacionando o *feedback* auditivo e as varia-

Tabela 3: Percentual de usuários que consideraram ter melhor percepção com acréscimo do *feedback* auditivo ao visual (Sinal Topográfico), em função da taxa de atualização.

Taxa Atualização	Percentual
100ms	30%
200ms	50%
Indiferente	20%

ções do perfil topográfico, encontram-se representados na Tabela 4.

Tabela 4: Percentual de usuários que consideraram perceber melhoras nas características da varredura topográfica com o acréscimo do *feedback* auditivo.

Características	Percentual
Detalhes aumentados	70%
Deslocamento da sonda	80%
Variações topográficas	100%
Pontos mais altos da amostra	85%

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 por meio de *feedback* auditivo.

4 Conclusões

Nesse artigo, foi implementado um processo de sonificação de dados do sinal de varredura de um sistema AFM com o intuito de fornecer um retorno sonoro para o usuário final, de forma a complementar a visual, comumente utilizado nos sistemas atuais.

Com o trabalho desenvolvido foi possível obter um retorno sonoro compatível com as variações topográficas que ocorrem durante o processo de varredura AFM, validando a complementariedade entre os dois modos, confirmando também a viabilidade de deficientes visuais realizarem futuros experimentos de SPM.

Por meio de um questionário, foi possível constatar que o sistema proposto apresenta grande potencial para possível implementação em condições reais de uso.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Márcia Dias Diniz Costa pelo suporte técnico e as pessoas que responderam ao questionário. O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES, CNPq e FAPEMIG.

Referências

B. Bhushan, H.Fuchs, S. H. a. (2004). *Applied Scanning Probe Methods*, NanoScience and

Technology, 1 edn, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Cherston, J., Hill, E., Goldfarb, S. and Paradiso, J. A. (2016). Sonification platform for interaction with real-time particle collision data from the atlas detector, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 1647–1653.

Eaton, P. and West, P. (2010). *Atomic force microscopy*, Oxford University Press.

Günther, H. (2003). Como elaborar um questionário (série: Planejamento de pesquisa nas ciências sociais, nº 01), *Brasília, DF: UnB, Laboratório de Psicologia Ambiental*.

Hermann, T. (2002). *Sonification for exploratory data analysis*, PhD thesis, Faculty of Engineering of the University of Bielefeld.

Hermann, T. and Hunt, A. (2005). Guest editors' introduction: An introduction to interactive sonification, *IEEE multimedia* **12**(2): 20–24.

Martini, J., Hermann, T., Anselmetti, D. and Ritter, H. (2004). Interactive sonification for exploring single molecule properties with afm-based force spectroscopy, *Proceedings of the International Workshop on Interactive Sonification*.

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.

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. and Manolakis, D. G. (2013). *Digital signal processing*, Pearson Education.

RHK (2015). *R9 Control System User Guide v5.5*, RHK Technology.

Roginska, A., Childs, E. and Johnson, M. K. (2006). Monitoring real-time data: A sonification approach, Georgia Institute of Technology.

Ruiter, A., Van Der Werf, K., Veerman, J., Garcia-Parajo, M., Rensen, W. and Van Hulst, N. (1998). Tuning fork shear-force feedback, *Ultramicroscopy* **71**(1): 149–157.

Worrall, D. (2015). Realtime sonification and visualisation of network metadata, Georgia Institute of Technology.