



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
(POLO 58 - UFRPE)

UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE
SIGNIFICATIVA PARA O ESTUDO FÍSICO E MUSICAL
DA VIBRAÇÃO DE BARRAS HOMOGÊNEAS POR MEIO
DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DA KALIMBA

Vinícius de Oliveira Moraes

Orientador:
Prof. Dr. Francisco Nairon Monteiro Júnior

Recife, julho de 2022.

Sumário

1. Apresentação do Produto.....	3
2. Exposição de cada Aula	15
3. Anexos	
• Verificação de Subsunoçores por meio de Questionario.....	19
• Atividade Experimental I.....	21
• Atividade Experimental II.....	23
4. Referências Bibliográficas	25

Produto educacional

Apresentação

O presente produto educacional consiste na utilização lúdica e participativa de um instrumento da família dos lamelofones denominado Kalimba, com o qual buscamos construir, de forma significativa, a aprendizagem em torno da física da vibração de lâminas homogêneas, no caso particular da lâmina com um dos terminais fixo e vibrando no modo fundamental. Ao mesmo tempo, construir um diálogo de tal estudo com a acústica musical, evidenciando a íntima relação entre a frequência fundamental de vibração de cada lâmina e a respectiva nota musical. Permite ainda avançar na identificação da escala musical presente na afinação mais comum do instrumento aqui no Brasil, bem como identificar as oitavas ao longo das hastes. Esperamos que nosso estudo contribua para os colegas professores de física do país, trazendo o universo da música para as aulas de física, de forma interdisciplinar e evidenciando a beleza que há quando olhamos o mundo a partir do diálogo entre ciência e arte. Sendo ambas, a física e a música, criações do espírito humano, culturas nascidas da mesma realidade, acrescentamos que o homem faz aquilo que ele não criou, esse interessante instrumento musical de origem africana, a partir da perspectiva da aprendizagem significativa, um elo entre estas duas culturas, que outrora caminharam juntas e que, agora, dialogam a partir de uma proposta pedagógica. Mas o que é a kalimba?

A Kalimba consiste em um conjunto de lâminas (também chamadas teclas) fixado no tampo superior de uma caixa de ressonância com um ou mais orifícios, cuja função é a de otimizar a propagação do som produzido pela vibração das lâminas e amplificado pela caixa de ressonância. Os lamelofones são geralmente construídos sobre uma base de madeira. Em alguns casos, essa base pode ser a própria caixa de ressonância do instrumento. Há diversos tipos de lamelofones, desde aqueles construídos em cima de tábuas, até os mais sofisticados, com os quais é possível executar melodia quando devidamente afinados.

Para aumentar o volume/intensidade do som, o lamelofone é acoplado dentro ou sobre um corpo ressoador, que tem a mesma função da caixa de um violão ou violino ou ainda de um piano, amplificando o som. Por meio dos dois cavaletes, a vibração das lâminas, produzidas pelo dedo do executante, se propaga para a caixa, onde ganha intensidade, permitindo que uma melodia seja escutada por outras pessoas, assim como ocorre com instrumentos musicais como os acima citados.

A kalimba pertence à família dos lamelofones e, apesar de ser de origem africana, propagou-se pelo mundo, chegando, inclusive, ao Brasil no século XVIII, vindo juntamente com os africanos. *Jean-Baptiste Debret*, pintor, desenhista e professor francês retratou, num quadro daquele período, a chegada do instrumento, como visto na figura 1. Tal instrumento, também conhecido como Mbira, surgiu no vale do Zambeze, numa região que hoje faz parte da República do Zimbábue. Os primeiros instrumentos eram feitos de madeiras de palmeiras, bambus ou de outros vegetais e datam de 1.000 a.C.



Figura 1. Chegada da kalimba ao Brasil.

Hoje é possível adquirir esse instrumento na internet com preço acessível, inclusive em diversos tamanhos e versões. Na figura 2 apresentamos os modelos adquiridos por nós para utilização em sala de aula, quando aplicamos o presente produto educacional numa escola da rede estadual de ensino do estado de Pernambuco. Na foto da esquerda, temos uma kalimba de tamanho comum, com 13 cm de largura, 18 cm

de comprimento e 3,5 cm de altura da caixa de ressonância. Na figura da direita, apresentamos a outra kalimba adquirida, com 5,0 cm de largura máxima, 6,5 cm de comprimento máximo, e 1,5 cm de altura da caixa de ressonância. Optamos por adquirir estes dois modelos para contrastar as tessituras, ou seja, a faixa de altura das notas de uma e da outra, uma vez que enquanto a kalimba da esquerda possui uma tessitura mais grave, a da direita possui uma tessitura mais aguda, além do timbre ser mais brilhante, semelhante ao som de uma caixinha de música. Além disso, permite a escuta atenta, por parte dos estudantes, das nuances dos sons produzidos por cada um dos citados modelos. Deixamos aqui como possibilidade de utilização futura por outros colegas professores de física que venham a utilizar o produto educacional. Na aplicação do produto, só utilizamos o modelo da esquerda. Há uma vasta quantidade de vídeos na internet, ensinando a tocar, bem como de execução de melodias de músicas famosas. Há até vídeos de executantes já bastante avançados, exibindo impressionantes técnicas de solo. Além de ser um instrumento de fácil transporte, consiste em um excelente exercício de aprendizado das bases da harmonia e melodia, além de ser prazeroso. Mas como são produzidas as diferentes notas musicais na kalimba?



Figura 2. Modelos da kalimba adquiridos para a aplicação do produto educacional.

Afinação da kalimba

As lâminas precisam ter tamanhos úteis adequadamente diferentes para reproduzirem todas as notas da escala diatônica maior, e são postas em cima dos dois cavaletes e pressionadas contra eles pelo travessão, o qual, por sua vez, consiste numa

barra de metal que é aparafusada no tampo superior da caixa de ressonância. Por meio do aperto desses parafusos, ajustamos a pressão de fixação das lâminas. Essa barra transversal de metal é colocada entre os dois cavaletes e acima das lâminas, possuindo a função de pressionar a parte final das lâminas, bem como a função de ajuste do comprimento útil, tamanho adequado para produzir a frequência de vibração da nota musical a ela destinada. A figura 3 mostra detalhes da construção. Podemos observar que são dois cavaletes abaixo das lâminas e um suporte acima delas e entre os dois, permitindo, assim, a fixação de uma extremidade de cada lâmina, minimizando, portanto, qualquer possibilidade de desafinar o instrumento durante uma execução. É importante que se diga que a afinação encontrada nas primeiras kalimbas não era ocidental. Dentre quintas justas que eram encontradas, havia outros intervalos que não se encaixavam nos padrões de intervalos próprios da música ocidental, ainda em evolução e que viria a culminar no estabelecimento da escala de 12 semitons igualmente temperados, apresentada mais adiante. Com o passar do tempo, estas notas musicais foram sendo substituídas pelas notas das escalas ocidentais, além de afinações pentatônicas e modos gregos. Contudo, o que temos hoje de mais comum é a afinação da escala maior, derivada da escala de 12 semitons igualmente temperados. Os lamelofones com escalas cromáticas são recentes e ainda muito pouco difundidos, muito embora a escala mais utilizada para a afinação da kalimba seja esta. E como ajustamos o tamanho útil de cada lâmina?

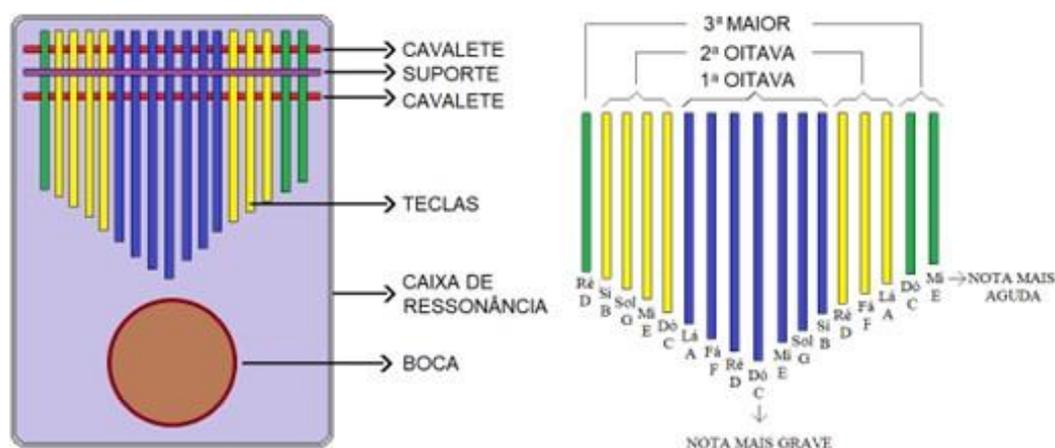


Figura 3. Fixação e disposição das lâminas e identificação das notas musicais.

Ajustando o tamanho útil de cada lâmina

As lâminas são arranjadas alternadamente, dispondo a lâmina da nota mais grave no centro e, a partir daí, as subsequentes da escala são colocadas, alternadamente, à esquerda e à direita, e daí por diante, até chegar às notas mais agudas, nos extremos esquerdo e direito. O tamanho útil é aquela parcela da lâmina que está livre para vibrar, ou seja, o comprimento medido da extremidade livre até o ponto de apoio em cima do segundo cavalete, aquele que está mais próximo da boca do instrumento. Folgando a barra, ajustamos o tamanho útil de cada lâmina para reproduzir exatamente a frequência da nota musical de cada uma delas e, feito isso, reapertamos os parafusos para fixação das lâminas. A parte esquerda da figura 4 ilustra essa disposição, na pauta da clave de sol, para a primeira oitava, da nota mais baixa, no meio, para a nota mais alta no final. A parte da direita ilustra a nota de cada uma das lâminas para a afinação mais comum da kalimba. E como desenvolvemos as técnicas de execução desse fascinante instrumento?

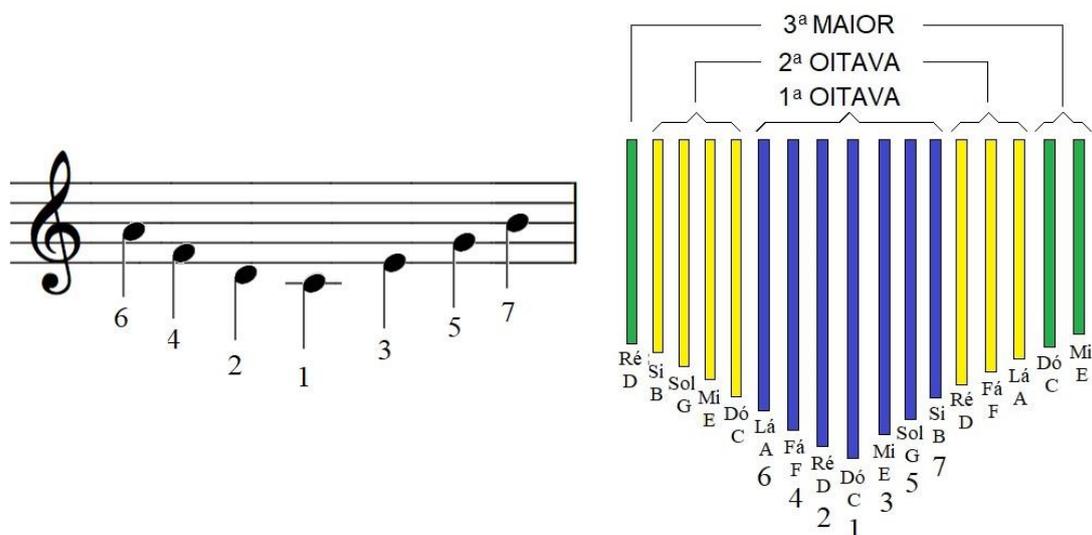


Figura 4. Posição das notas musicais da primeira oitava na pauta (clave de sol).

As técnicas de execução e o auxílio do Youtube

Há interessantes atividades, exercícios, para adquirir destreza na execução do instrumento musical em apreço, como mostrado nos exemplos da parte direita da figura 5. São exercícios cujo objetivo é familiarizar o executante com a digitação da escala em suas formas ascendente e descendente e, também, com arpejos relativos aos acordes que podem ser construídos para a harmonização de melodias que possam ser executadas em outra kalimba, formando, assim, uma apresentação musical. O Youtube tornou-se

um espaço de compartilhamento de vídeos sobre a execução musical da kalimba. Lá é possível, partindo do zero, conseguir, de forma constante e dentro do ritmo de cada pessoa, aprender a tocá-la. Uma vez que, como dito, a afinação da kalimba é feita por meio do ajuste do comprimento útil de cada lâmina, o qual é medido exatamente no ponto da lâmina que fica em cima do segundo cavalete, o que fica mais perto da boca do instrumento, movê-las em direção ao tocador tornará as notas mais graves, enquanto movê-las na direção oposta tornará as notas mais altas. A frequência fundamental de vibração das lâminas também pode ser alterada de acordo com sua forma e flexibilidade do material, alterando assim a ressonância dos harmônicos. A figura 5 mostra a disposição das notas musicais de acordo com a afinação mais comum da kalimba, realizada com o auxílio de um afinador (“tuner”) instalado em smartphone, consistindo em uma atividade a ser desenvolvida em sala de aula, como forma de aprendizado de conceitos relacionados à acústica música, além do que valoriza o desenvolvimento de habilidades no uso de aplicativos de áudio para smartphone. Existe uma vasta quantidade de aplicativos afinadores gratuitos disponíveis para smartphone, a maioria dos quais de fácil utilização. Nesse contexto, mesmo que não valorize o desenvolvimento da escuta musical no processo de afinação, tem seu valor na medida em que valoriza a inserção das NTIC’s no ensino de física. Em resumo, concebemos pelo menos três atividades organizadoras de conhecimentos e habilidades relativos à acústica física e musical, quais sejam: afinação com o auxílio de aplicativos; afinação a partir da medição dos comprimentos úteis das lâminas; e afinação a partir da comparação com um instrumento já afinado ou diapasão, valorizando, nessa última, a escuta musical e seu desenvolvimento como habilidade. Mas qual a relação matemática entre a frequência fundamental de vibração de uma lâmina e a respectiva nota musical?

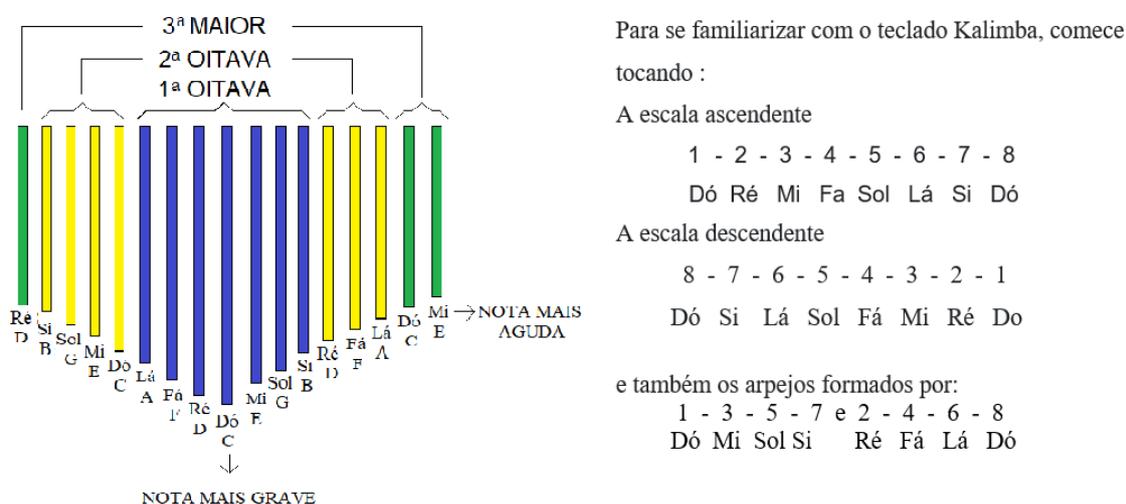


Figura 5. Afinação mais comum da kalimba.

Matemática e música no contexto da afinação da kalimba

Sabemos que quando uma lâmina, presa em uma das extremidades é posta para vibrar, ela vibra em frequências que dependem, fundamentalmente, da sua elasticidade e comprimento. A figura 6, retirada do livro “The Physics of Musical Instruments”, de Neville H. Fletcher e Thomas D. Rossing (1993), ilustra os quatro primeiros modos de vibração da barra.

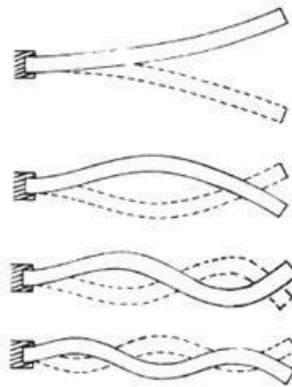


Figura 6. Quatro primeiros modos de vibração de uma barra fixa numa das extremidades.

O desenvolvimento do modelo matemático infelizmente não cabe aqui como proposta para o ensino médio. Contudo, vale dizer que a fórmula que descreve os modos naturais de vibração da lâmina, tomando a condição de que ela está presa numa das extremidades, como no caso da kalimba, é dada por:

$$f_n = \frac{\pi K}{8L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Equação 1})$$

Partindo dessa relação matemática e tomando a variação da frequência em função do comprimento da lâmina, considerando, para tanto, todo o resto constante, podemos observar que a frequência do modo fundamental (primeiro modo mostrado na figura) varia com o inverso do quadrado do comprimento da lâmina, ou seja, $f_1 \sim \frac{1}{L^2}$. Isso significa dizer que a frequência de uma lâmina alcança a oitava ($f_2 = 2f_1$) quando:

$$f_2 = 2f_1 \rightarrow \frac{f_2}{f_1} = 2 \rightarrow \frac{\frac{\pi K}{8L_2^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}}{\frac{\pi K}{8L_1^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}} = 2 \rightarrow \frac{\frac{1}{L_2^2}}{\frac{1}{L_1^2}} = 2 \rightarrow \frac{L_1^2}{L_2^2} = 2 \rightarrow L_1 = \sqrt{2}L_2$$

Da relação acima descrita, podemos concluir que quando a lâmina vibra com a metade de seu comprimento inicial, ou seja, $L_2 = \frac{L_1}{2}$, sua frequência será:

$$L_2 = \frac{L_1}{2} \rightarrow L_2^2 = \frac{L_1^2}{4} \rightarrow \frac{\pi K}{8f_2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{\pi K}{8f_1} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{\pi K}{8f_1} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{\pi K}{8f_2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 4 \rightarrow \frac{1}{f_1} = 4 \rightarrow f_2 = 4f_1$$

Da demonstração acima, podemos concluir que quando a lâmina é posta para vibrar com a metade do seu comprimento inicial, sua frequência será quatro vezes maior, ou seja, duas oitavas. Se voltarmos a observar a figura 3, veremos que o comprimento útil da lâmina do dó agudo da segunda oitava tem a metade do comprimento útil da lâmina do primeiro dó, o de frequência mais grave, da lâmina central.

É preciso deixar claro que a kalimba é afinada na escala diatônica maior, reproduzindo as notas das teclas brancas do piano. Mas o que é a escala diatônica maior?

Antes de chegar a ela, vamos primeiro discutir como é construída a escala de 12 semitons igualmente temperados, conhecida como escala cromática, a qual é a base de toda a construção melódica e harmônica da música ocidental, incluindo as escalas ocidentais que são derivadas da escala de 12 semitons.

Escala de igual temperamento, as progressões geométricas e o número da música

Segundo Monteiro Júnior (2012), a música ocidental está baseada na escala cromática de 12 semitons (doze notas), igualmente temperados. Nessa escala, as dozenotas musicais dividem a oitava numa progressão geométrica na qual o 13º termo, o intervalo de oitava, ou seja, a nota de mesmo nome, possui o dobro da frequência da fundamental (primeira nota). Mas o que é intervalo?

O intervalo “I” entre duas notas quaisquer é a razão entre suas frequências. Uma vez que quanto maior a frequência de uma nota, maior sua altura, temos $I = \frac{f_2}{f_1}$. Por exemplo, o intervalo de quinta justa ocorre quando $I = \frac{3}{2}$, o de quarta justa quando $I = \frac{4}{3}$ e o de oitava, quando $I = 2$. Em música, diz-se que quando duas notas estão separadas por um intervalo de oitava, elas são iguais, e toda escala musical começa e termina na mesma nota musical, separadas por um intervalo de oitava, ou seja, começa com uma nota de frequência f e termina com a mesma nota, agora com frequência $2f$. Em nosso produto educacional, utilizamos a kalimba de 17 teclas. A tessitura (distância entre a nota mais grave e a mais aguda) do instrumento alcança duas oitavas e uma terça maior, como

ilustrado na figura 1, acima analisada, indo do Dó até o Mi da terceira oitava.

Podemos, então, dizer que a estrutura harmônica é baseada nesse padrão de intervalos, conhecido como escala temperada ou escala cromática. A escala cromática possui doze notas. A décima terceira é chamada oitava, a mesma nota musical da primeira, agora com o dobro da frequência, ou seja, a oitava é o intervalo de altura entre duas notas em que uma delas possui o dobro da frequência da outra. Assim, para construirmos a escala cromática, dividimos o intervalo de oitava, o qual inclui 13 notas musicais, numa progressão geométrica de 13 termos (12 intervalos), criando-se, então, doze intervalos iguais em altura, chamados de semitons. Assim, a frequência de cada nota da escala cromática será $\sqrt[12]{2}$ vezes maior que a sua anterior, definindo, como dissemos acima, uma progressão de razão igual a $\sqrt[12]{2} \sim 1,05946$. Observe que são 12 intervalos iguais em altura e não em variação de frequência, uma vez que o intervalo musical é definido como sendo a razão entre as frequências de duas notas, e não a diferença entre essas frequências, o que subjaz à própria definição da progressão geométrica. A tabela 1 mostra a construção da escala cromática de igual temperamento, iniciando-se no Lá de 220Hz (A_3) e terminando no Lá de 440 Hz (A_4). Ilustra ainda os intervalos, de semitom em semitom, até chegar ao intervalo de oitava.

Nota musical	Símbolo	Termo da P.G. $f_n = 220(\sqrt[12]{2})^{n-1}$	Frequência (Hz)	Nome do Intervalo
Lá	A	$f_1 = 220$	220	Uníssonos
Lá sustenido/ Si bemol	A#/Bb	$f_2 = 220(\sqrt[12]{2})^1$	233,082	Segunda Menor
Si	B	$f_3 = 220(\sqrt[12]{2})^2$	246,942	Segunda maior
Dó	C	$f_4 = 220(\sqrt[12]{2})^3$	261,626	Terça menor
Dó sustenido/ Ré bemol	C#/Db	$f_5 = 220(\sqrt[12]{2})^4$	277,183	Terça maior
Ré	D	$f_6 = 220(\sqrt[12]{2})^5$	293,665	Quarta justa
Ré sustenido/ Mi bemol	D#/Eb	$f_7 = 220(\sqrt[12]{2})^6$	311,127	Quarta aumentada/ Quinta diminuta
Mi	E	$f_8 = 220(\sqrt[12]{2})^7$	329,628	Quinta justa
Fá	F	$f_9 = 220(\sqrt[12]{2})^8$	349,228	Quinta aumentada/ Sexta menor
Fá sustenido/ Sol bemol	F#/Gb	$f_{10} = 220(\sqrt[12]{2})^9$	369,994	Sexta maior/ Sétima diminuta
Sol	G	$f_{11} = 220(\sqrt[12]{2})^{10}$	391,995	Sétima menor
Sol sustenido/ Lá bemol	G#/Ab	$f_{12} = 220(\sqrt[12]{2})^{11}$	415,305	Sétima maior
Lá	A	$f_{13} = 220(\sqrt[12]{2})^{12}$	440,000	Oitava

Tabela 1. Escala de igual temperamento para a oitava de Lá, iniciando no Lá de 220Hz.

Construída a ideia da escala cromática de doze semitons igualmente temperados, aquela cuja razão entre a frequência de qualquer nota e a frequência da imediatamente anterior é sempre igual a $\sqrt[12]{2}$, podemos seguir em frente, discutindo o porquê da afirmação acima de que a afinação da kalimba é a da escala diatônica maior.

A escala cromática de doze semitons é a base de quase todas as escalas utilizadas na música ocidental. Há um vasto número de escalas, algumas características de determinados estilos musicais, como as pentatônicas do blues e a escala de tons inteiros, por exemplo, e outras de uso bem genérico. Dentre estas, as mais utilizadas são, indubitavelmente, a escala maior e a escala menor natural. Para se ter uma ideia, a grande maioria das músicas comerciais brasileiras são construídas tomando por base essas escalas. Para a escala maior, o padrão de intervalos é “TOM-TOM-SEMITON- TOM-TOM-TOM-SEMITOM” (2-2-1-2-2-2-1), enquanto que, para a escala menor natural, o padrão de intervalos é “TOM-SEMITOM-TOM-TOM-SEMITOM-TOM- TOM” (2-1-2-2-1-2-2). A tabela 2 mostra as notas musicais que compõem as escalas maior e menor natural para a tonalidade de Dó, objeto de utilização na kalimba.

Intervalo	Semitom												
Escala de 12 semitons	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C
Escala Maior	C		D		E	F		G		A		B	C
Escala Menor	C		D	D#		F		G	G#		A#		C

Tabela 2. Escalas maior e menor natural, derivadas da escala de 12 semitons.

Assim como há 12 notas na escala de 12 semitons, já que a décima terceira é a mesma nota da primeira, podemos, começando em cada uma delas, construir a escala maior nas 12 tonalidades. Os músicos de conservatório estudam as diversas escalas em todas as 12 tonalidades, na medida em que avançam no estudo da música. Contudo, se formos observar as composições populares, perceberemos que algumas dessas tonalidades são pouco usadas. Por exemplo, em se tratando das escalas maiores, a imensa maioria das músicas é composta em C, D, E, F, G ou A, provavelmente por uma questão de praticidade. A tabela 3 apresenta as notas que compõem a escala de 12 semitons nas

12 tonalidades.

	Semitom											
C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C
C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db
D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D
D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb
E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E
F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F
F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb
G	G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G
G#/Ab	A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab
A	A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A
A#/Bb	B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb
B	C	C#/Db	D	D#/Eb	E	F	F#/Gb	G	G#/Ab	A	A#/Bb	B

Tabela 3. Escala de 12 semitons (13 notas) nas 12 tonalidades.

Construída a ideia de como se estrutura a música ocidental, tendo suas principais escalas apresentadas no texto, podemos seguir adiante, discutindo especificamente o caso da escala tomada por base na afinação da kalimba.

A tessitura da kalimba

A tabela 4 mostra a escala cromática iniciando-se no “Dó” central da kalimba (C_3 com $f=261,626\text{Hz}$) e encerrando-se no Mi da sétima oitava, E_5 , 1.318,510 Hz, que é, por sua vez, a nota mais aguda para a afinação mais comum da kalimba. Nessa, estão presentes todas as notas desde o C_3 até o E_5 , de meio em meio tom. Contudo, a última coluna mostra apenas as notas presentes na kalimba.

Nota musical	Símbolo	Frequência (Hz)	Nome do Intervalo	Notas presentes na kalimba
Dó	C	261,626	Unísono	C ₃
Dó sustenido/ Ré bemol	C#/Db	277,183	Segunda Menor	
Ré	D	293,665	Segunda maior	D ₃
Ré sustenido/ Mi bemol	D#/Eb	311,127	Terça menor	
Mi	E	329,628	Terça maior	E ₃
Fá	F	349,228	Quarta justa	F ₃
Fá sustenido/ Sol bemol	F#/Gb	369,994	Quarta aumentada/ Quinta diminuta	
Sol	G	391,995	Quinta justa	G ₃
Sol sustenido/ Lá bemol	G#/Ab	415,305	Quinta aumentada/ Sexta menor	
Lá	A	440,000	Sexta maior/ Sétima diminuta	A ₃
Lá sustenido/ Si bemol	A#/Bb	466,164	Sétima menor	
Si	B	493,883	Sétima maior	B ₃
Dó	C	523,251	Oitava	C ₄
Dó sustenido/ Ré bemol	C#/Db	554,365	Segunda Menor	
Ré	D	587,330	Segunda maior	D ₄
Ré sustenido/ Mi bemol	D#/Eb	622,254	Terça menor	
Mi	E	659,255	Terça maior	E ₄
Fá	F	698,456	Quarta justa	F ₄
Fá sustenido/ Sol bemol	F#/Gb	739,989	Quarta aumentada/ Quinta diminuta	
Sol	G	783,991	Quinta justa	G ₄
Sol sustenido/ Lá bemol	G#/Ab	830,609	Quinta aumentada/ Sexta menor	
Lá	A	880,000	Sexta maior/ Sétima diminuta	A ₄
Lá sustenido/ Si bemol	A#/Bb	932,328	Sétima menor	
Si	B	987,767	Sétima maior	B ₄
Dó	C	1046,502	Oitava	C ₅
Dó sustenido/ Ré bemol	C#/Db	1108,731	Segunda Menor	
Ré	D	1174,659	Segunda maior	D ₅
Ré sustenido/ Mi bemol	D#/Eb	1244,508	Terça menor	
Mi	E	1318,510	Terça maior	E ₅

Tabela 4. A escala cromática e as progressões geométricas (fonte: Monteiro Júnior, 2012).

Na primeira aula, faremos a introdução do tema, onde os alunos assistirão a um vídeo sobre a kalimba, seguido do qual serão convidados a realizar uma atividade experimental envolvendo a análise da vibração de uma lâmina de serra, a partir do que serão indagados, por meio de questionário, sobre aspectos ligados à relação entre frequência e comprimento da lâmina, bem como sobre a relação entre amplitude de vibração da lâmina e intensidade do som. Tais atividades consistem em organizadores prévios por meio dos quais pretendemos colocar em cena os conceitos necessários ao entendimento da acústica física e musical relativa à vibração de uma lâmina homogênea ou construí-los, caso ainda não estejam presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Aqui estão em cena os conceitos de frequência e altura, bem como a relação entre eles, os conceitos de amplitude e intensidade, assim como a relação entre eles. Após a atividade experimental, introduziremos a equação que relaciona a frequência de vibração de uma lâmina com seu comprimento, tomando, para tanto, todas as outras variáveis constantes, conforme equação 1. Na segunda aula, retomaremos os conceitos acima elencados, agora no contexto da análise física e musical da kalimba. Nesta ocasião, partindo da relação entre altura e frequência, bem como da relação entre frequência e comprimento útil da lâmina, introduziremos o estudo das notas e escalas musicais. Por fim, na terceira aula, avaliaremos o aprendizado dos estudantes por meio de uma atividade organizadora dos conceitos e habilidades desenvolvidos.

Aula 1:

Passo 1: Definir o tema a ser trabalhado na UEPS, identificando aspectos procedimentais, tais como os aceitos no contexto da disciplina.

Atividade 1 (10 minutos): apresentação do tema valorizando o protagonismo dos estudantes durante toda a atividade, que terá um encaminhamento experimental e lúdico, envolvendo física e música, evidenciando que se trata do fechamento do estudo que está sendo feito sobre ondas mecânicas e som. Neste momento, é importante evidenciar que o sucesso do percurso a ser trilhado dependerá, efetivamente, do foco que eles emprestem às atividades desenvolvidas e que a grande novidade é que eles sairão, ao final, com algum entendimento de que há profícuas relações entre física e música.

Passo 2: Aplicação de um questionário inicial, buscando identificar os conhecimentos prévios dos estudantes acerca do tema.

Passo 3: Criar e/ou propor situações que possam oportunizar, a partir da identificação dos conhecimentos prévios relevantes da estrutura cognitiva dos alunos, o passo inicial para obtenção de uma aprendizagem significativa.

Atividade 2 (20 minutos): Na sequência, o professor aplicará o questionário inicial e, em seguida, convidará os alunos para assistirem, em conjunto, a um vídeo do Youtube sobre a kalimba (<https://www.youtube.com/watch?v=DPmQv2Pp8nk>). Após o vídeo, mediar um debate sobre o que eles acharam interessante, procurando relevar se observaram detalhes da confecção da kalimba (presença das lâminas, da caixa de ressonância e dos orifícios), bem como da forma como o som é produzido no instrumento. Neste contexto, valorizar, caso apareça nas falas dos alunos, os conceitos de frequência, altura, intensidade, volume, ressonância, nota musical, escala, dentre outros pertinentes.

Atividade 3 (20 minutos): aplicação da atividade experimental 1 em grupo (a quantidade de alunos por grupo fica a critério do professor) sobre a vibração de uma lâmina de serra, guiada por um procedimento de laboratório a ser-lhes entregue no início da atividade, com passos a serem executados e perguntas a serem respondidas, materializando-se, aqui, o questionário dos conhecimentos prévios.

Aula 2:

Passo 4: Uma exposição dialogada do tema que compõe a unidade de ensino da acústica de forma a apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em consideração a diferenciação progressiva.

Passo 5: Retomar aspectos mais gerais sobre o tema em conjunto com a turma para sintetizar os conceitos e equações aprendidos, culminando no que seria um construto de saberes sobre todos os tópicos abordados, propondo o conhecimento de um maior nível de complexidade, colocando novos exemplos e destacando semelhanças e diferenças em relação à primeira apresentação.

Passo 6: Concluir a unidade retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, buscando a reconciliação integrativa.

Atividade 4 (25 minutos): a partir a socialização das respostas da atividade experimental, introduzir a equação matemática que descreve o modo fundamental de vibração da lâmina em função do seu comprimento, discutindo os conceitos de frequência e altura, em função do comprimento da lâmina de serra. É importante ressaltar que para esta análise da relação entre a frequência/altura e o comprimento da lâmina, toma-se, como condição, que a lâmina é homogênea e que as outras variáveis presentes na relação matemática permanecem constantes. Partindo dessa relação matemática, podemos observar que a frequência varia com o inverso do quadrado do comprimento da lâmina, ou seja, $f_1 \rightarrow \frac{1}{L^2}$. Para esta apresentação, é necessário que o professor se aproprie da discussão presente no tópico “**Matemática e música no contexto da afinação da kalimba**“, acima descrito, e prepare a apresentação da forma que melhor lhe convier.

Atividade 5 (25 minutos): uma vez clara a dependência da frequência com relação ao comprimento da lâmina, podemos partir para o debate em torno da escala da kalimba. Neste momento, o professor apresenta, primeiro, a construção da escala cromática de 12 semitons, subjacente à qual está a progressão geométrica cuja razão é $\sqrt[12]{2}$, oportunidade em que o conceito de intervalo deve ser discutido, evidenciando os intervalos de quarta, quinta e oitava. Na sequência, apresentar o padrão de intervalos que dá origem às escalas maior e menor, evidenciando que são derivadas da escala de 12 semitons. Para esta apresentação, é necessário que o professor se aproprie da discussão presente dos tópicos “**Escala de igual temperamento, as progressões geométricas e o número da música**” e “**A tessitura da kalimba**”, acima descritos, e prepare a apresentação da forma que melhor lhe convier.

Aula 3: Avaliação

Passo 7: Realizar a avaliação da aprendizagem a partir da UEPS.

Passo 8: O desempenho dos alunos deverá fornecer evidências de aprendizagem significativa é progressiva não só no campo conceitual e progressivo, dando a ênfase em evidências, e não em comportamentos finais.

Atividade 6 (50 minutos): aplicação da atividade experimental 2 em grupo, na qual os estudantes serão convidados a medirem o comprimento útil das 17 lâminas da kalimba, anotando os valores na ficha de atividade. Na sequência, os estudantes irão calcular os valores, tomando por base o valor medido para a lâmina de maior comprimento (dó) e calculando os comprimentos das outras 16 lâminas, utilizando a razão $1,059 \approx \sqrt[12]{2}$. Após esta etapa, os

estudantes responderão às perguntas presentes na ficha da atividade experimental 2. Tais perguntas possuem o caráter de informar a respeito da aprendizagem que eles tiveram em torno dos conceitos da acústica física e da acústica musical trabalhados durante a aplicação da UEPS. Tal “feedback” servirá também para o professor planejar desdobramentos futuros a fim de aprofundar as relações entre física e música, aumentando o campo perceptivo dos estudantes no tema em questão.

QUESTIONÁRIO INICIAL

1º) Certamente, vocês estão habituados a ouvirem música. Música dá prazer e é diversão. Vamos pensar sobre os cantores que vocês gostam de ouvir. Pense num cantore, também, numa cantora de sua preferência. Existe diferença entre suas vozes? Quais? A que você atribuiria tal diferença?

2º) Vamos agora pensar em dois instrumentos musicais bem conhecidos na música popular, quais sejam, a Guitarra e o Contrabaixo. Ambos possuem cordas. Há diferença entre elas? Há diferença entre os sons produzidos por estes instrumentos? A que se deve tal diferença?



GUITARRA



CONTRA BAIXO

3º) Vamos agora lembrar de dois instrumentos de percussão muito presentes no nosso Maracatu, a Alfaia e o Tarol. Há diferença entre eles? Há diferença entre os sons produzidos por esses instrumentos? A que se deve tal diferença?



TAROL



ALFAIA

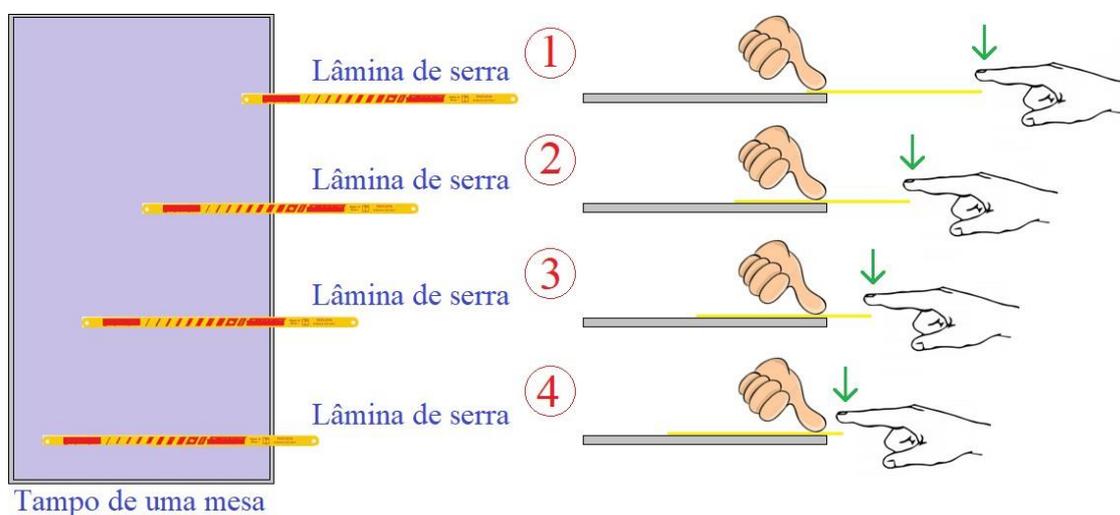
4º) Há um instrumento que não é muito popular, mas que está presente em muitas bandas marciais que é a Lira. A Lira é feita de um conjunto de hastes (lâminas). Há diferença entre elas? Há diferença no som produzido por cada uma delas?



LIRA

ATIVIDADE EXPERIMENTAL 1

Nesta atividade, iremos observar como se comporta uma lâmina de serra, posta para vibrar na borda do tampo de uma mesa ou de uma carteira escolar. De posse da lâmina de serra, disponha-a sobre a borda do tampo, conforme mostra a figura abaixo. De acordo com a figura, são quatro situações. Na primeira, a lâmina fica quase toda fora do tampo, ou seja, o comprimento útil é quase o comprimento total da lâmina. Na segunda, apenas a metade da lâmina é posta para vibrar. Na terceira, um quarto da lâmina, enquanto que na quarta temos um oitavo do comprimento da lâmina.



Procedimentos:

1. Prenda a lâmina com o polegar, deixando-a quase toda fora do tampo, conforme mostra a situação ① da figura 7. Em seguida, com o dedo indicador da outra mão, desloque a lâmina da posição de equilíbrio e a libere para oscilar. Observe a frequência com que ela vibra. Você escuta algum som?
2. Prenda a lâmina com o polegar, deixando a metade do seu comprimento fora do tampo, conforme mostra a situação ② da figura 7. Em seguida, com o dedo indicador da outra mão, desloque a lâmina da posição de equilíbrio e a libere para oscilar. Observe a frequência com que ela vibra. Você escuta algum som?

3. Prenda a lâmina com o polegar, deixando um quarto do seu comprimento fora do tampo, conforme mostra a situação ③ da figura 7. Em seguida, com o dedo indicador da outra mão, desloque a lâmina da posição de equilíbrio e a libere para oscilar. Observe a frequência com que ela vibra. Você escuta algum som?

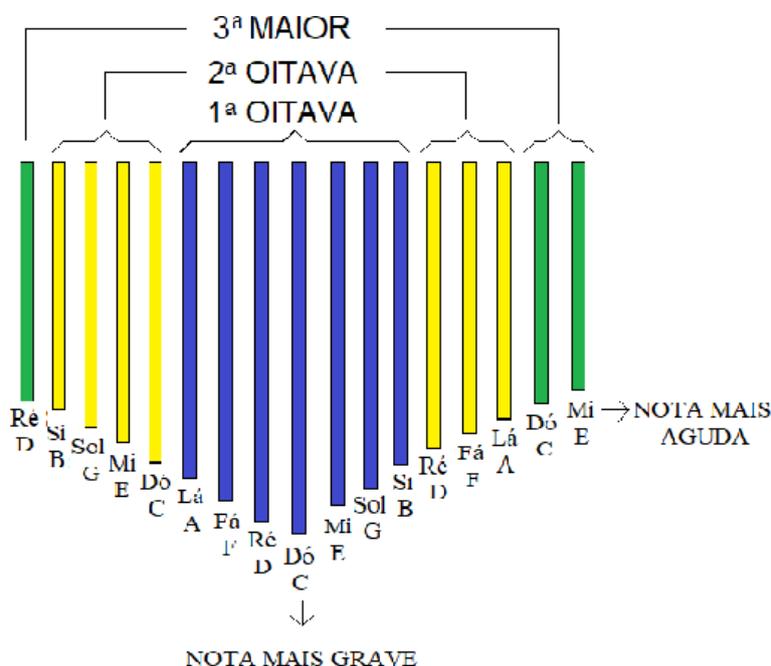
4. Prenda a lâmina com o polegar, deixando um oitavo do seu comprimento fora do tampo, conforme mostra a situação ④ da figura 7. Em seguida, com o dedo indicador da outra mão, desloque a lâmina da posição de equilíbrio e a libere para oscilar. Observe a frequência com que ela vibra. Você escuta algum som?

Conclusões:

1. O que vocês concluíram a respeito da frequência de oscilação da lâmina?
2. O que vocês concluíram a respeito da emissão de som?

ATIVIDADE EXPERIMENTAL 2

Nesta atividade, consolidaremos os conhecimentos que foram aprendidos durante as atividades anteriores. A kalimba que vocês irão analisar possui 17 lâminas, afinadas conforme mostra a figura a seguir. Cada uma dessas lâminas possui um comprimento útil adequado para produzir a frequência correta e, conseqüentemente, a nota musical correta. Para tanto, elas precisam, a partir da lâmina mais comprida (Dó mais grave), diminuir na razão inversa com que as frequências aumentam.



Procedimentos:

1. Meçam, com o auxílio de uma régua, o comprimento útil de cada uma das 17 lâminas da kalimba, anotando os valores na tabela abaixo.

2. Após o registro dos comprimentos das 17 lâminas na tabela abaixo, calculem os valores, tomando por base o valor medido para a lâmina de maior comprimento (dó), os comprimentos das outras 16 lâminas, que são os comprimentos corretos, para que ela esteja afinada, utilizando, para tanto, a razão $1,059 \approx \sqrt[12]{2}$. Lembrem-se que, como estamos calculando o comprimento da maior para a menor, a razão da progressão geométrica ($1,059 \approx \sqrt[12]{2}$) deve figurar o quociente.

Nota musical	Comprimento medido (mm)	Comprimento calculado (mm)	Erro
Dó			
Ré			
Mi			
Fá			
Sol			
Lá			
Si			
Dó			
Ré			
Mi			
Fá			
Sol			
Lá			
Si			
Dó			
Ré			
Mi			

Conclusões:

1. Comparando os valores medidos com os valores calculados, o que vocês poderiam concluir com respeito à afinação da kalimba analisada?
2. Parando um pouco para pensar em tudo que foi vivenciado hoje, o que vocês acharam das atividades desenvolvidas em grupo e com o professor, e qual foi o aprendizado que vocês tiveram?
3. Que relações vocês conseguiram perceber entre as comparações da guitarra com o contrabaixo, do Tarol com a Alfaia e da Lira

Referências bibliográficas

ARAÚJO FILHO, J. V. **Sequência de ensino por investigação significativa no estudadas relações entre física e música em atividades experimentais envolvendo o oscilador de Melde**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Polo 58 – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, 2018. Disponível em: <<http://mnpef.ufrpe.br/?q=pt-br/dissertacoes>>. Acesso em: 12 jun. 2022.

CUNHA, R. C. **Investigando a equação de uma onda estacionária no tempo e no espaço por meio de atividades experimentais como organizadores avançados**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Polo 58 – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, 2019. Disponível em: <<http://mnpef.ufrpe.br/?q=pt-br/dissertacoes>>. Acesso em: 12 jun. 2022.

FREIRE, P. R. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 25ed. São Paulo: Paz e Terra, 2002.

JARDIM, M. I. A.; ERROBIDART, N. C. G.; GOBARA, S. T. Levantamento dos trabalhos em ensino de física que investigaram ondas sonoras. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA - EPEF, XI, 2008, Curitiba/PR. **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Física, 2008.

MACIEL NETO, A. S. **Sequência didática para a aprendizagem significativa da acústica física e da acústica musical, relativas aos tubos sonoros, utilizando organizadores prévios e atividades experimentais com o tubo de Kundt**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Polo 58

– Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, 2019. Disponível em: <<http://mnpef.ufrpe.br/?q=pt-br/dissertacoes>>. Acesso em: 12 jun. 2022. MEDEIROS, A. C. B. **Ciência e percepção: Aprendizagem significativa do conceito de ressonância por meio de atividades experimentais como organizadores avançados**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Polo 58

– Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, 2019. Disponível em: <<http://mnpef.ufrpe.br/?q=pt-br/dissertacoes>>. Acesso em: 12 jun. 2022. MONTEIRO JÚNIOR, F. N.; MEDEIROS, A. J. G. Distorções conceituais dos atributos do som presentes nas sínteses dos textos didáticos: aspectos físicos e fisiológicos. **Ciência & Educação** (Bauru), v. 5, n. 2, p. 01 – 14, 1998.

MONTEIRO JÚNIOR, F. N. **Educação sonora: encontro entre ciência, tecnologia e cultura**. 2012. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências. Faculdade de Educação. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Bauru/SP,

2012. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102066>>. Acesso em: 12 jun. 2022. MOREIRA, M. A. **Unidades de ensino potencialmente significativas – UEPS**. Porto Alegre: instituto de Física, 2016. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>> Acesso em 12/06/2022. MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem**. 2ed. São Paulo: EPU, 2011a.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa**: o conceito subjacente. *Aprendizagem Significativa em Revista*, v. 1, n. 3, 2011b.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. 2ed. São Paulo: Centauro, 2006.

OLIVEIRA FILHO, J. P. **Sequência didática investigativa baseada nos três momentos pedagógicos de Delizoicov para a determinação experimental da velocidade do som no ar**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Polo 58 – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, 2022. Disponível em: <<http://mnpef.ufrpe.br/?q=pt-br/dissertacoes>>. Acesso em: 12 jun. 2022.

OSTERMANN, F.; CAVANCANTI, C. J. H. **Teorias de aprendizagem**. Porto Alegre: Evangraf (UFRGS), 2011.

ROSA, P. R. S. Uma introdução à pesquisa qualitativa em ensino de ciências. Campo Grande: UFMS, 2013.

STUDART, N. Inovando a Ensino de Física com Metodologias Ativas. **Revista do Professor de Física**: v. 3, n. 3, 2019.

FLETCHER, Neville H; ROSSING, Thomas D. Continuous Systems in One Dimension: Strings and Bars. In: *The Physics of Musical Instruments*. Nova York, Springer-Verlag, 1991. Capítulo 2, p. 33-64.

SOUZA, R. C. Um modelo de kalimba em Csound usado em o livro dos sons. **Música Hodie**, v. 11, n. 1, 2011.