



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO  
LICENCIATURA INTEGRADA EM BIOLOGIA QUÍMICA – QUÍMICA

**SAMUEL CARVALHO COSTA**

**OUVINDO O pH**

Santarém  
2021

Cartão catalográfico elaborado pelo Sistema Integrado de Bibliotecas (SIBI) da UFOPA  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFOPA - Biblioteca Unidade Rondon

Costa, Samuel Carvalho.

Ouvindo o pH / Samuel Carvalho Costa. - Santarém,  
2021.

54f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) -  
Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de  
Ciências da Educação, Programa de Ciências Naturais.  
Orientador: Julio Cesar Bastos Fernandes.

1. pH. 2. Inclusão. 3. Ensino de Química. I.  
Fernandes, Julio Cesar Bastos. II. Título.

UFOPA/Sistema Integrado de Bibliotecas  
ed. 540

CDD 23

**SAMUEL CARVALHO COSTA**

## **OUVINDO O pH**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso de Licenciatura em Química para obtenção do grau de Licenciado em Biologia e Química com Habilitação em Química pela Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências da Educação, sob orientação do Professor Doutor Julio Cesar Bastos Fernandes.

**Santarém  
2021**

Aos meus pais, Sueli e Wanderley, por  
toda a dedicação, amor e incentivo.  
Aos meus irmãos, pelo apoio em todas  
as fases da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Universidade Federal do Oeste do Pará, instituição responsável por toda minha formação acadêmica, e por possibilitar-me inúmeras experiências profissionais e de vida, moldando a pessoa que sou hoje.

Ao Professor Dr. Julio Cesar Bastos Fernandes, por todo os ensinamentos a mim repassados, pela orientação neste e em outros trabalhos acadêmicos, e principalmente por mostrar que sempre há uma forma de nos tornamos melhores naquilo que desejamos.

Aos Docentes do curso de Licenciatura em Química por fazerem parte da minha formação acadêmica.

Aos meus amigos, Emylle e Michael por estarem presentes e torcendo por mim em todos os degraus subidos, vocês são meu apoio.

Ao Victor Valentim e a Fabricia, agradeço pela amizade, por sempre me incentivarem e aconselharem em todas as decisões acadêmicas e pela parceria nas noites em claro estudando, juntos vivenciamos dos piores aos melhores momentos dentro da Universidade, vocês foram imprescindíveis.

A Ellen Janaína, Simone e Waylla por toda a parceria e companheirismo durante a graduação, compartilhamos momentos de alegria e de tensão, ter vocês por perto fez com que tudo ficasse mais leve.

À minha família, que é a base e o motivo para que tudo se concretize. Sem vocês eu não chegaria neste momento. Obrigado por sempre me impulsionar e mostrar que a educação é essencial para sermos pessoas melhores.

A todos que contribuíram com meu percurso acadêmico e que ajudaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a força de vontade”

- Albert Einsten

## RESUMO

Desenvolvemos um dispositivo simples para ensinar o conceito de pH a pessoas com deficiência visual, através de uma abordagem experimental. Uma interface entre um eletrodo de vidro e uma plataforma *open-source* de hardware e software fácil de usar (Arduino Uno) foi projetada, usando um amplificador operacional de ultra-baixa corrente de entrada. Um fone de ouvido conectado à saída digital do Arduino Uno foi empregado para converter os sinais elétricos do pH para a frequência sonora. Os alunos com deficiência visual podem ser treinados para associar frequências específicas com valores de pH usando um arquivo de áudio que emite frequências sonoras. Verificou-se uma relação direta entre o logaritmo da frequência sonora de uma determinada nota musical com um valor de pH, que pode ser usado para treinar alunos com baixa visão que teriam dificuldade em observar valores de pH a partir de indicações visuais. Sinais de frequência sonora de 131,0 a 659,0 Hz – que correspondem à escala musical de piano de C3, que é uma oitava abaixo do C médio (oitava menor ou a nota "Dó" em solfège) para E5, uma oitava acima do E médio (nota "Mi" em solfège) –, foram usados para obter sons para a escala de pH. Cada nota musical dessas escalas corresponde a um valor de pH com precisão de 0,5 unidade. Este método proposto pode ser facilmente implementado em um laboratório com um custo relativamente baixo.

**Palavras-chaves:** pH. Inclusão. Deficiência Visual. Ensino de Química. Arduino.

## ABSTRACT

We developed a simple device to teach the concept of pH to visually impaired people through an experimental approach. An interface between a glass electrode and an open-source electronics platform based on easy-to-use hardware and software (Arduino Uno) was designed using an operational amplifier of ultra-low input current. A headphone connected to digital output from Arduino Uno was employed to convert the electrical signals from pH to sound frequency. Using an audio file that emits sound frequencies, visually impaired students were trained to associate specific frequencies with pH values. There is a direct relationship between the logarithm of sound frequency from a given musical note and a pH value, which can be used to train students with low-vision who would otherwise have difficulty observing pH values from visual indications. Sound frequency signals of 131–659 Hz that correspond to the piano musical scale of C3, which is one octave below middle C (small octave or the “Do” note in solfège) to E5, one octave above middle E (two-lined octave or “Mi” note in solfège), were used to obtain sounds for the pH scale. Each musical note from these scales corresponded to one pH value with precision of 0.5 unit. This proposed method can be easily implemented in a laboratory with a relatively low cost.

**Keywords:** pH. Inclusion. Visual impairment. Chemistry teaching. Arduino.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 CIRCUITO COMPLETO MOSTRANDO CONECTIVIDADE (CIRCUITO COM IMAGEM ARDUINO DA AUTODESK® SITE DA TINKERCAD®, CORTESIA AUTODESK, INC.).....	15
FIGURA 2 RELAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIA SONORA DE NOTAS MUSICAIS. A: PH; B: POTENCIAL ELÉTRICO ( $\Delta E$ , MV).....	17

## SUMÁRIO

RESUMO .....	10
RESUMO GRÁFICO .....	11
PALAVRAS-CHAVE .....	11
CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL .....	14
PERIGOS .....	16
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	17
CONCLUSÃO .....	21
CONTEÚDO ASSOCIADO .....	21
INFORMAÇÕES DO AUTOR .....	21
AGRADECIMENTOS .....	22
REFERÊNCIAS .....	23
APENDICE A .....	26
ANEXO 1 – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION .....	37
ANEXO 2 – MATERIAL DE SUPORTE DISPONÍVEL NO JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION .....	42

## Ouvindo o pH

Samuel C. Costa, Julio C. B. Fernandes\*

Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, Instituto de Ciências Educacionais - ICED S/N Marechal Rondon, Avenida Caranazal, CEP 68040-070, Santarém, PA, Brasil

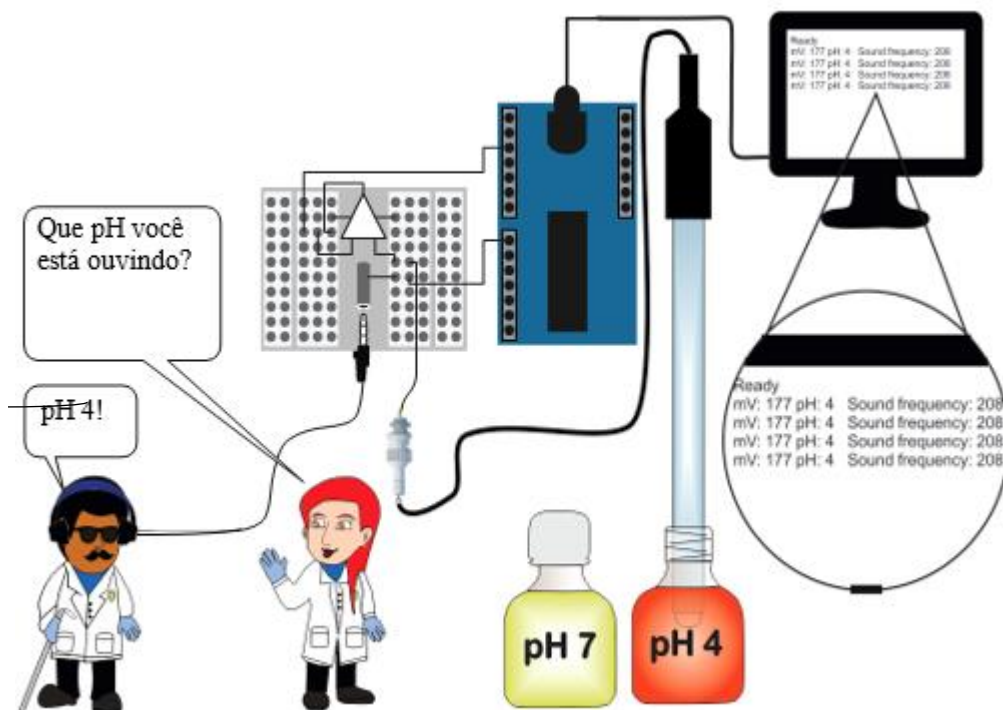
### RESUMO

Desenvolvemos um dispositivo simples para ensinar o conceito de pH a pessoas com deficiência visual, através de uma abordagem experimental. Uma interface entre um eletrodo de vidro e uma plataforma *open-source* de hardware e software fácil de usar (Arduino Uno) foi projetada, usando um amplificador operacional de ultra-baixa corrente de entrada. Um fone de ouvido conectado à saída digital do Arduino Uno foi empregado para converter os sinais elétricos do pH para a frequência sonora. Os alunos com deficiência visual podem ser treinados para associar frequências específicas com valores de pH usando um arquivo de áudio que emite frequências sonoras. Verificou-se uma relação direta entre o logaritmo da frequência sonora de uma determinada nota musical com um valor de pH, que pode ser usado para treinar alunos com baixa visão que teriam dificuldade em observar valores de pH a partir de indicações visuais. Sinais de frequência sonora de 131,0 a 659,0 Hz – que correspondem à escala musical de piano de C3, que é uma oitava abaixo do C médio (oitava menor ou a nota "Dó" em solfège) para E5, uma oitava acima do E médio (nota "Mi" em solfège) –, foram usados para obter sons para a escala de pH. Cada nota musical dessas escalas corresponde a

\*O artigo apresentado foi redigido conforme as diretrizes de submissão da revista Journal of Chemical Education. As normas indicadas para a redação de artigos pela revista estão disponíveis no link: [https://pubs.acs.org/page/jceda8/submission/jceda8\\_templates.html](https://pubs.acs.org/page/jceda8/submission/jceda8_templates.html)

um valor de pH com precisão de 0,5 unidade. Este método proposto pode ser facilmente implementado em um laboratório com um custo relativamente baixo.

## RESUMO GRÁFICO



## PALAVRAS-CHAVE

Público Geral, Química Analítica, Demonstrações, Aprendizado Prático/Manipuladores, Aprendizagem Baseada em Multimídia, Ácidos/Bases, pH, Potenciometria.

No Mundo atual, 285 milhões de pessoas são deficientes visuais, correspondendo a 3,8% dos 7,6 bilhões de habitantes da Terra.<sup>1</sup> Por essa razão, em 1994, foi organizada a Conferência Mundial de Educação Especial em Salamanca, Espanha, onde representantes de 88 governos e 25 organizações internacionais reconheceram a importância de proporcionar à

educação o nível adequado de educação e aprendizagem para crianças, jovens e adultos com necessidades especiais dentro do sistema educacional convencional.<sup>2</sup>

A química é uma ciência baseada em representações visuais, manipulação e observação de fenômenos; além disso, as transformações químicas no laboratório são frequentemente visualizadas e medidas por mudanças de cor, precipitação, cromatografia e espectrofotometria. Portanto, a visão é um dos sentidos essenciais para os alunos em um curso de química. Isso mostra como é difícil incluir alunos com deficiência visual em aulas de química experimentais, e o porquê os professores de química têm muita preocupação sobre como envolver pessoas com este tipo de deficiência no laboratório de ensino.

Atualmente, os cursos de formação de professores têm prestado pouca atenção à formação de alunos com deficiências visuais. Apenas um número limitado de atividades de laboratório de química são acessíveis aos alunos com deficiência visual.<sup>3</sup> No entanto, com a recente introdução de várias tecnologias de baixo custo, estes alunos podem realizar uma série de experimentos de química.<sup>4-8</sup> *Independence Science*, uma organização liderada por Cary Supalo, abordou o problema desenvolvendo dispositivos como o *Sci-Voice Talking LabQuest 2*, baseado na tecnologia *text-to-speech* (texto-a-fala) para que os resultados sejam falados.<sup>9,10</sup> Supalo também fornece informações aos professores que estão ensinando ciências aos alunos com dificuldades visuais.<sup>9</sup> No entanto, o *Sci-Voice Talking LabQuest 2* custa cerca de US \$ 2.000, sendo um valor caro para os países em desenvolvimento.<sup>10</sup> Por isso, também é importante produzir soluções simples e de baixo custo para este

problema. Pereira et al. propuseram um método simples para produzir um espectro infravermelho sonificado que permitisse aos alunos deficientes visuais sua interpretação.<sup>11</sup> Outros exemplos são as titulações olfativas.<sup>12,13</sup>

Além das funções olfativas, experimentos químicos são geralmente desenvolvidos para aumentar sua acessibilidade aos deficientes visuais, empregando habilidades sensoriais como gosto e toque. Acredita-se que o paladar e o toque sejam mais agudos em pessoas cegas ou com baixa visão. No entanto, estudos recentes têm demonstrado que a cegueira tem pouca influência nas habilidades quimi.osensoriais.<sup>14</sup> Reações calorimétricas podem ser detectadas usando o sentido tátil, o que seria fácil para estudantes com deficiência visual, mas de maneira apenas qualitativa.<sup>15</sup> Portanto, essas análises são bastante difíceis para os alunos com deficiência visual.

pH é um conceito importante em química. A letra "H" significa atividade de íons de hidrogênio ( $H^+$ ), mas há um enorme equívoco sobre o significado da letra "p". O fato é que o "p" não significa nada, como mostrado por Jens Nørby em seu artigo histórico sobre este assunto.<sup>16</sup> O conceito de pH foi proposto em 1909 por Sørensen quando estudou a influência da acidez nas reações enzimáticas usando as letras "p" e "q" como variáveis matemáticas.<sup>17</sup>

O conceito de pH é muito importante no mundo macroscópico porque as mudanças de pH estão associadas à absorção de alimentos e drogas em organismos vivos, qualidade da água que é distribuída de cidades em cidades, síntese química, crescimento de plantas e muitas outras aplicações e fenômenos. Logo, este assunto é realmente relevante para todos os alunos.

Como mencionado anteriormente, a inclusão de alunos com deficiência visual em atividades laboratoriais pode ser difícil, embora a experimentação

em química seja altamente significativa para os alunos em seu próprio processo de aprendizagem.<sup>18-21</sup>

Portanto, o dispositivo aqui apresentado visa permitir que alunos com deficiência visual participem de aulas experimentais nas quais as medições de pH de diferentes soluções possam ser obtidas com um eletrodo de vidro, utilizando um medidor de pH que converte valores de pH em diferentes frequências sonoras de notas musicais.

## CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O hardware consiste em uma plataforma eletrônica de código aberto (*open-source*) baseada no Arduino Uno<sup>22</sup> e um amplificador operacional (opamp, do inglês, *operational amplifier*) (LMC6041) de ultra-baixa corrente de entrada (2fA).<sup>23</sup> Um eletrodo de vidro para pH é conectado à entrada não inversora do LMC6041 (pino 3), que é projetado em uma configuração buffer (a entrada não inversora do pino 2 é conectada à saída do pino 6), conforme mostrado na Figura 1.<sup>24</sup> A saída do opamp (pino 6) é conectada a um circuito soma<sup>24</sup> e este é então conectado a uma entrada analógica/digital (Pino A<sub>0</sub> no microcontrolador ATmega328) do Arduino Uno.<sup>25</sup> No Arduino, uma saída digital (pino 12 do microcontrolador ATmega328) é conectada a uma entrada de áudio,<sup>26</sup> que é anexada a um fone de ouvido (pino P2). O eletrodo de referência, as baterias em configuração simétrica, o fone de ouvido e o Arduino Uno foram todos conectados ao mesmo pino terra (GND). O software escrito na língua C++ Arduino foi incorporado em um microcontrolador ATmega328 da Arduino Uno.<sup>27</sup> Este software converteu o potencial elétrico desenvolvido na superfície do eletrodo de vidro de pH em frequências sonoras que

correspondem a notas musicais. A leitura feita dos valores de pH pode ser monitorada ao mesmo tempo em que o aluno ouve a frequência correspondente ao sinal de pH usando o monitor serial em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês, *Integrated Development Environment; open-source Arduino software*).<sup>22</sup> Quatro soluções de pH conhecidos (vinagre; Tampões 4.0 e 7.0; e solução de soda cáustica 0,01 mol L<sup>-1</sup>) foram utilizados para testar o dispositivo. Antes de ouvir, treinamos um aluno com deficiência visual usando um arquivo de áudio em formato mp3, que gera frequências de 131–659 Hz para cada valor de pH com uma precisão de uma unidade de pH. Para a construção do áudio, usamos um aplicativo gratuito capaz de gerar tons com uma frequência entre 1 e 22.000 Hz (aplicativo disponível na *playstore* em smartphones Android).<sup>28</sup> Detalhes adicionais podem ser encontrados no material de suporte.

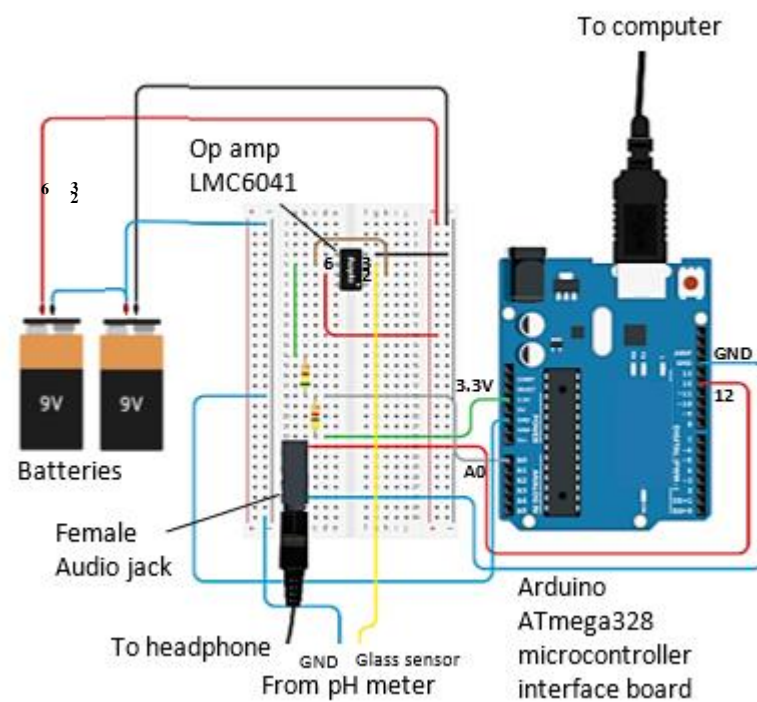


Figura 1 Circuito completo mostrando conectividade (Circuito com Imagem arduino da Autodesk® site da Tinkercad®, cortesia Autodesk, Inc.).

Os experimentos envolvendo seres humanos foram aprovados pelo comitê de ética da Universidade Estadual do Pará sob o protocolo número CAAE 90054318.0.0000.5168 em 17 de agosto de 2018.

## PERIGOS

Os professores devem ter cuidado com os alunos com deficiência visual em experimentos de laboratório. A seguir, algumas orientações são importantes para ajudar esses alunos. Todos os reagentes utilizados nesta prática devem ser duplamente rotulados, um em impressão padrão (letras grandes) e outro em Braille; os alunos com deficiência visual devem examinar o dispositivo proposto antes do experimento prático; instruções podem ser faladas com alunos com dificuldades visuais, mas também é importante que eles tenham manuais de laboratório em Braille. Além disso, *Dorothy Tombaugh* descreve em detalhes como os alunos com deficiência visual podem trabalhar com segurança em laboratório. <sup>29</sup>

A soda cáustica é prejudicial porque pode causar danos oculares graves e queimar a pele no contato; este composto em solução é corrosivo para metais. As soluções tampão, pH 4.01 (biftalato de potássio) e 7.00 (9 g/L de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  [0,0634 M], 5 g/L de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  [0,0367 M]), não são consideradas perigosas de acordo com a legislação da União Europeia. O vinagre contém ácido acético, que é uma substância corrosiva e inflamável. Este ácido pode causar queimaduras graves na pele e danos oculares, no entanto, o vinagre contém cerca de 4-5% de ácido acético. Assim, o risco de vinagre para a saúde humana

pode ser considerado baixo, embora o vinagre seja um irritante para os olhos e, portanto, deve ser manipulado cuidadosamente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Arduino Uno é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software de fácil uso, que pode ser usada para demonstração de dispositivos de medição, como termômetros e medidores de pH.<sup>4,5</sup> Usamos essa ideia para desenvolver um sistema simples que converte as medições de pH em frequências sonoras de notas musicais. Há uma relação direta entre o pH e o logaritmo da frequência sonora (Figura 2). Escolhemos a faixa de frequências sonoras de 131 Hz a 659 Hz, que correspondem às notas musicais C<sub>3</sub> até E<sub>5</sub> (ver Tabela 1 no Material de Suporte).

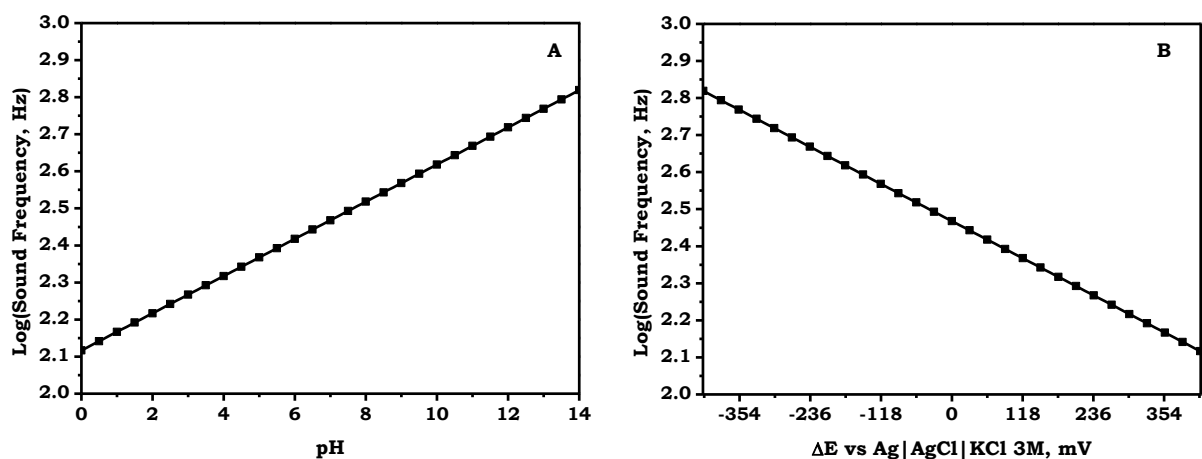


Figura 2 Relação entre frequência sonora de notas musicais. A: pH; B: Potencial elétrico ( $\Delta E$ , mV).

Um eletrodo de vidro tem alta resistência<sup>15</sup>, portanto, não é possível ligar este eletrodo diretamente ao Arduino Uno. Superamos este problema usando um amplificador operacional com uma alta impedância de entrada, o LMC6041 da *Texas Instruments*. Este opamp tem uma corrente de entrada ultra-baixa (2 fA),<sup>23</sup> portanto, as medidas potenciométricas usando o eletrodo de vidro não são afetadas pelo circuito eletrônico. O LMC6041 opera com uma

tensão de alimentação, positiva ou negativa, entre 4.5 V e 15.5 V. <sup>23</sup> Utilizamos uma tensão de alimentação de  $\pm 9$  V através de duas baterias alcalinas, 6LR61, em configuração simétrica (ver o Material de Suporte). Isso foi necessário para medir os valores negativos do potencial elétrico provenientes das soluções com valores de pH acima de 7.0. Geralmente, eletrodos de vidro combinados medem cerca de 0 V quando imersos em solução tampão de pH 7.0. Este eletrodo potenciométrico responde a espécies iônicas em solução de acordo com a equação de Nernst. <sup>15</sup>

$$E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln a_{H^+} \quad (1)$$

onde  $E_0$  é o potencial padrão medido em volts, mas se esse potencial é expresso em milivolts, o valor da inclinação  $(-\frac{RT}{zF})$  deve ser multiplicado por 1000;  $R$  é a constante universal dos gases, cujo valor é igual a  $8,314472 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ;  $T$  é a temperatura da solução em Kelvin;  $z$  é a carga do íon primário em solução;  $F$  é a constante Faraday, ou seja, o número de coulombs por mols de elétrons. Seu valor é  $9,64853399 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$ ;  $a_{H^+}$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) é a atividade molar para o íon hidrônio.

A equação de Nernst é comumente representada em termos de logaritmo de base 10. Assim, se a solução de íons hidrônio estiver à temperatura ambiente ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ou  $298.15 \text{ K}$ ) e, como o íon hidrogênio é monovalente, podemos expressar a equação de Nernst da seguinte forma:

$$E = E_0 - 59.2 \log_{10} a_{H^+} \quad (2)$$

A equação 2 mostra que cada mudança de uma década na atividade de íon hidrônio gera uma variação de 59.2 mV no potencial elétrico dos eletrodos de

vidro. Portanto, considerando uma resposta nernstiana, as soluções entre 0 e 14 unidades de pH apresentam um potencial elétrico de +414.4 mV a -414.4 mV. Por outro lado, o Arduino possui uma tensão de fornecimento de +5 V, de tal modo, que esta plataforma eletrônica não consegue medir os potenciais elétricos negativos. Desta forma, utilizamos um circuito de soma<sup>24</sup> (Material de Suporte) a partir da saída do opamp para converter os valores negativos do potencial elétrico em positivos.

O Arduino Uno tem seis entradas analógicas/digitais com resolução de 10bits. <sup>22,25</sup> Como sua tensão de alimentação é de 5 V, este dispositivo tem uma resolução na medida do potencial elétrico com precisão de acordo com:<sup>24,30</sup>

$$LSB = \frac{V_{FSR}}{2^n} = \frac{5000}{2^{10}} = 4.9 \text{ mV} \quad (3)$$

Onde o *LSB* é o bit menos significativo;  $V_{FSR}$  é faixa de tensão de entrada na escala total em milivolts (mV), e  $n$  é número de bits. <sup>30</sup>

O sistema apresenta uma precisão de cerca de 0.08 unidades pH, que podem ser calculadas usando a equação de Nernst (ver Tabela S2 no Material de Suporte). Embora seja possível medir unidades de pH com precisão para duas casas decimais, adotamos uma escala de pH musical de uma faixa decimal. É importante considerar que os alunos não precisam identificar medições de pH com alta precisão, uma vez que o experimento é meramente pedagógico. Apesar dessa limitação, poderíamos fazer uma escala de pH audível com maior precisão, apenas alterando a faixa de frequência das notas musicais.

O potencial elétrico ( $E$ , mV), medido com um eletrodo combinado de vidro para pH, é convertido em frequência sonora ( $F$ , Hz) através do software instalado no Arduino Uno (código de programação no Material de Suporte) utilizando a eq 4. Esta equação foi obtida a partir da regressão linear da reta mostrada na Figura 2B.

$$\log_{10} F(\text{Hz}) = (2.46803 \pm 0.00006) - (0.0008462 \pm 0.0000003) \times \Delta E(\text{mV}) \quad (4)$$

onde o coeficiente de correlação é igual a 1.

A frequência sonora calculada a partir do antilog da eq 4 é usada para gerar uma nota musical através de um fone de ouvido. A nota musical tem uma forma de onda quadrada, porque a frequência é gerada por valores de 0 V ou 5 V, já que o fone de ouvido está conectado à saída digital do Arduino Uno.

Testamos o dispositivo com nossa equipe. Verificamos que é simples identificar soluções ácidas e alcalinas através da frequência sonora, pois a diferença entre a percepção dos sons graves e agudos é clara. Por outro lado, para determinar valores de pH e discriminá-lo de forma mais precisa através dos sons, requer-se um treinamento mais elaborado. Embora as diferenças sonoras sejam facilmente perceptíveis para cada valor de pH com 0.5 unidades de precisão, é difícil memorizar todos os valores relacionados ao pH em relação às frequências sonoras. Sugerimos ouvir simultaneamente os valores de calibração e da amostra para que o aluno possa comparar os sons (arquivo de áudio no Material de Suporte) de maneira análoga ao que é feito com a escala visual em que o aluno usa a cor da solução/fita indicadora em comparação a uma escala pré-estabelecida.

## CONCLUSÃO

O dispositivo descrito aqui apresenta uma solução de baixo custo, cerca de R\$400,00 (Material de Suporte), que permite aos professores de qualquer nível educacional replicá-lo. A coleta de dados é rápida e o experimento pode usar soluções para medição de pH disponíveis em mercados locais como refrigerante, frutas, limpador de fogão ou leite de magnésia, entre outros. Os valores de pH são facilmente correlacionados com frequências sonoras de notas musicais. Como resultado, este trabalho pode contribuir para a inclusão de alunos com deficiência visual em aulas laboratoriais dos cursos de química. Assim, alunos com dificuldades visuais podem se tornar agentes de seu próprio aprendizado sobre o pH, um conceito importante em química.

## CONTEÚDO ASSOCIADO

### Material de Suporte\*

O material de Suporte está disponível no site da *ACS Publications*. Concordância dos valores do pH e suas respectivas notas musicais; Detalhes do tampão; circuito soma do arduino e a configuração experimental; Fornecedores e custos para os componentes do dispositivo; Código-fonte de acessibilidade para software Arduino (DOCX); Calibração de áudio dos valores e tons de pH (AVI).

## INFORMAÇÕES DO AUTOR

### Autor correspondente

\*E-mail: samuel.costa@discente.ufopa.edu.br

## **AGRADECIMENTOS**

Esta pesquisa foi apoiada em parte pela FAPESPA por meio de bolsa de iniciação científica para o discente Samuel Carvalho Costa. Agradecemos ao Gleber Maciel pela ajuda na teoria musical, Carlos Eduardo Fernandes por ajudar com os dispositivos eletrônicos, e o Prof. Dr. Troy Beldini pela revisão da língua inglesa.

## REFERÊNCIAS

1. World Health Organization. *World Report on Disability*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2011 [http://www.who.int/disabilities/world\\_report/2011/report.pdf](http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/report.pdf). (accessed Dec 2018).
2. World Conference on Special Needs Education: Access and Quality. The Salamanca Statement and Framework for Action on Special Needs Education. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and Ministry of Education and Science Spain. Salamanca, Spain, 7–10 June 1994. <http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000984/098427eo.pdf> (accessed Dec 2018).
3. Gonçalves, F. P.; Regiani, A. M.; Auras, S. R.; Silveira, T. S.; Coelho, J. C.; Hobmeier, A. K. Inclusive Education in Teacher Training and Chemistry Teaching: Visual Impairment in Debate. [A educação inclusiva na formação de professores e no ensino de química: A deficiência visual em debate]. *QNEsc.* **2013**, 35 (4), 264-271.
4. Mabbott G. A. Teaching Electronics and Laboratory Automation using Microcontroller Boards. *J. Chem. Educ.* **2014**, 91 (9), 1458–1463.
5. Kubínová, S.; Slégr, J. ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory. *J. Chem. Educ.* **2015**, 92 (10), 1751–1753.
6. Kuntzleman, T. S.; Jacobson, E. C. Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol. *J. Chem. Educ.* **2016**, 93 (7), 1249–1252.
7. Kehoe, E.; Penn, R. L. Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry. *J. Chem. Educ.* **2013**, 90, 1191–1195.
8. Soong, R.; Agmata, K.; Doyle, T.; Jenne, A.; Adamo, T.; Simpson, A. Combining the Maker Movement with Accessibility Needs in an Undergraduate Laboratory: A Cost-Effective Text-to-Speech Multipurpose, Universal Chemistry Sensor Hub (MUCSH) for Students with Disabilities. *J. Chem. Educ.* **Article ASAP**, DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00638.
9. Supalo, C. A.; Isaacson, M. D.; Lombardi, M. V. Making Hands-On Science Learning Accessible for Students Who Are Blind or Have Low Vision. *J. Chem. Educ.* **2014**, 91, 195–199.
10. Independence Science. <http://independencescience.com/> (accessed Dec 2018).
11. Pereira, F.; Ponte-e-Sousa, J. C.; Fartaria, R. P. S.; Bonifácio, V. D. B.; Mata, P.; Aires-de-Sousa, J.; Lobo, A. M. Sonified Infrared Spectra and Their Interpretation by Blind and Visually Impaired Students. *J. Chem. Educ.* **2013**, 90 (8), 1028-1031.
12. Neppel, K.; Oliver-Hoyo, M. T.; Queen, C.; Reed, N. A Closer Look at Olfactory Titrations. *J. Chem. Educ.* **2005**, 82 (4), 607-610.
13. Wood, J. T.; Eddy, R. M. Olfactory Titrations. *J. Chem. Educ.* **1996**, 73 (3), 257. DOI: 10.1021/ed073p257

14. Smith R. S.; Doty, R. L.; Burlingame, G. K.; McKeown, D. A. Smell and Taste Function in the Visually Impaired. *Percept. Psychophys.* **1993**, *54* (5), 649-655.
15. Skoog, D. A.; West, D. M.; Holler, J. F. *Fundamentals of Analytical Chemistry*, 7th ed.; Saunders College Publishing: Orlando, Florida, 1996; pp 392, 420, 861.
16. Nørby, J. The Origin and the Meaning of the Little p in pH. *Trends Biochem. Sci.* **2000**, *25* (1), 36–37.
17. Sørensen, S. P. L. Études enzymatiques. II. Sur la mesure et l'importance de la concentration des ions hydrogène dans les réactions enzymatiques. *Compt. rend. du Lab. de Carlsberg* **1909**, *8*, 1–168.
18. Eggen, P. O.; Kvittingen, L.; Lvkknæs, A.; Wittje, R. Reconstructing Iconic Experiments in Electrochemistry: Experiences from a History of Science Course. *Sci. and Educ.* **2012**, *21*, 179.
19. Hofstein, A.; Shore, R.; Kipnis, M. Providing High School Chemistry Students with Opportunities To Develop Learning Skills in an Inquiry-Type Laboratory: A Case Study. *Int. J. Sci. Educ.* **2004**, *26* (1), 47–62, DOI: 10.1080/0950069032000070342.
20. Hart, C.; Mulhall, P.; Berry, A.; Loughran, J.; Gunston, R. What Is the Purpose of This Experiment? Or Can Students Learn Something from Doing Experiments? *J. Res. Sci. Teach.* **2000**, *37* (7), 655–675.
21. Ibrahim, N. H.; Surif, J.; Hui, K. P.; Yaakub, S. “Typical” Teaching Method Applied in Chemistry Experiment. In *5th World Conference on Educational Sciences—WCES 2013, Procd. Soc. Behv.* **2014**, *116*, 4946–4954.
22. Arduino home page. <https://www.arduino.cc/> (accessed Dec 2018).
23. Texas Instruments, Inc. Datasheet: LMC6041 CMOS Single Micropower Operational Amplifier, SNOS610E, December 1994—Revised March 2013. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc6041.pdf> (accessed Dec 2018).
24. Horowitz, P.; Hill, W. *The Art of Electronics*, 3rd ed.; Cambridge University Press: New York, 2015.
25. Atmel. ATmega328/P Datasheet Summary; Atmel Corporation: San Jose, CA, 2016. [https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf) (accessed Dec 2018).
26. Kycon Corporation home page. Audio Jacks: STX-3100 Series PCB Mount 3.5 mm Audio Jack. <http://www.kycon.com/2013Catalogpage/Audio%20Jacks/STX3200.pdf> (accessed Dec 2018).
27. DFRobot. pHmeter (SKU: SEN0161). [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PH\\_meter\(SKU:\\_SEN0161\)](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PH_meter(SKU:_SEN0161)) (accessed Dec 2018).
28. Boedec, H. Frequency Sound Generator app at Google Play, version 2.3. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.boedec.hoel.frequencygenerator> (accessed Dec 2018).
29. Tombaugh, D. Chemistry and the Visually Impaired—Available Teaching Aids. *J. Chem. Educ.* **1981**, *58* (3), 222–226.
30. Texas Instruments, Inc. Application Report: Principles of Data Acquisition and Conversion, SBAA051A—January 1994—Revised April

2015. <http://www.ti.com/lit/an/sbaa051a/sbaa051a.pdf> (accessed Dec 2018).

## APENDICE A

### Material de suporte para Ouvindo o pH

Samuel C. Costa, Julio C. B. Fernandes\*

Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Instituto de Ciências Educacionais  
– ICED

S/N Marechal Rondon, Avenue - Caranazal, CEP 68040-070 – Santarém – PA

### INFORMAÇÕES DO AUTOR

Autor correspondente

\*E-mail: samuel.costa@discente.ufopa.edu.br

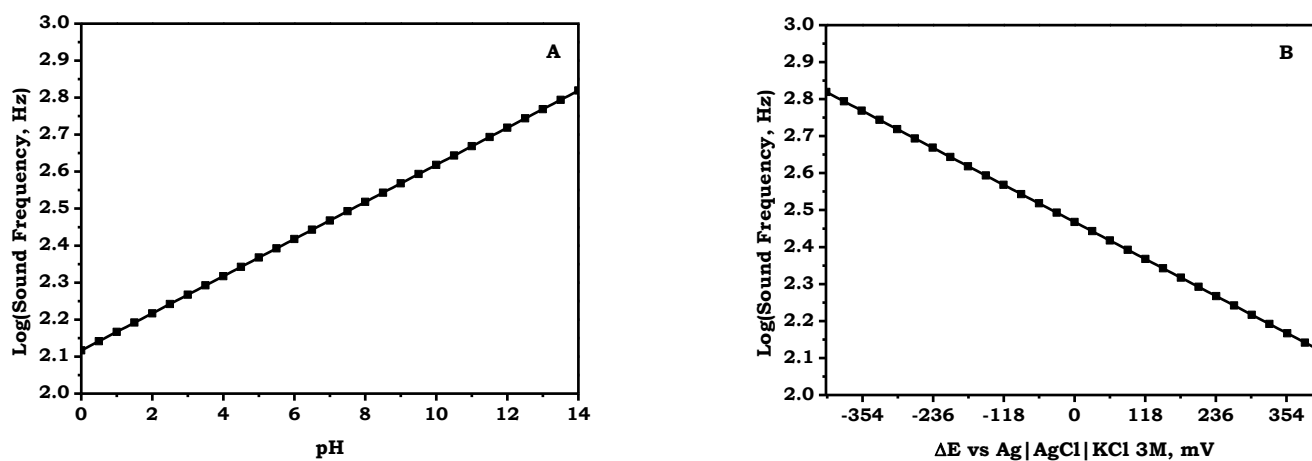


Figura 1. Gráfico mostrando a relação entre a frequência sonora das notas musicais e: **A.** pH. **B.** Potencial elétrico ( $\Delta E$ , mV).

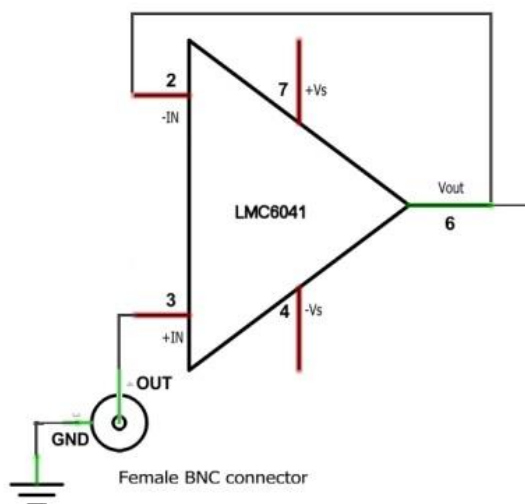
Tabela 1 - Valores de pH e suas respectivas notas musicais.

pH	Nota Musical	Frequência (F), Hertz	Log (F, Hertz)
0.0	C3	131	2.1173
0.5	C#3	139	2.1430
1.0	D3	147	2.1673
1.5	D-3	156	2.1931
2.0	E3	165	2.2175
2.5	F3	175	2.2430
3.0	F#3	185	2.2672
3.5	G3	196	2.2923
4.0	G#3	208	2.3181
4.5	A3	220	2.3424
5.0	A#3	233	2.3674
5.5	B3	247	2.3927
6.0	C4	262	2.4183
6.5	C#4	277	2.4425
7.0	D4	294	2.4684
7.5	D-4	311	2.4928
8.0	E4	330	2.5185
8.5	F4	349	2.5428
9.0	F#4	370	2.5682
9.5	G4	392	2.5933
10.0	G#4	415	2.6181
10.5	A4	440	2.6435
11.0	A#4	466	2.6684
11.5	B4	494	2.6937
12.0	C5	523	2.7185
12.5	C#5	554	2.7435
13.0	D5	587	2.7686
13.5	D-5	622	2.7938
14.0	E5	659	2.8189

Cada nota musical da escala de pH pode ser gerada usando o aplicativo gerador de frequência da Boedec. Este aplicativo pode ser baixado na *Play Store* (Pesquisa por gerador de frequência, autor: Hoel Boedec, e-mail: [hoel.boedec.contact@gmail.com](mailto:hoel.boedec.contact@gmail.com)).

Antes de usar, altere a forma de onda seno para a forma de onda quadrada.

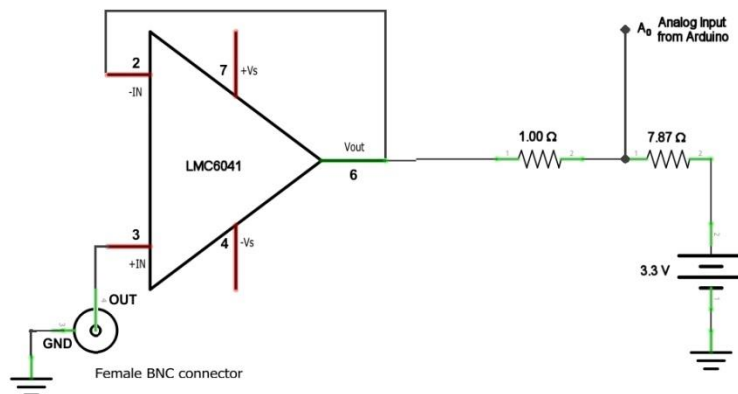
## CIRCUITO BUFFER



Esquema 1. Circuito opamp na configuração buffer para medir o pH de soluções com eletrodo de vidro.

O amplificador operacional (opamp), LMC6041, está configurado em circuito Buffer. Neste caso, há um loop entre o pino 2 (entrada do inversor) e o pino 6 (saída) do LMC6041. O ganho é unitário. O eletrodo de vidro é ligado ao conector BNC feminino, que está conectado ao pino 3 do opamp. A tensão de alimentação do opamp são os pinos 4 e 7, que foram conectados a  $-9V$  e  $+9V$ , respectivamente. Esses potenciais são fornecidos por duas baterias em configuração simétrica.

## CIRCUITO DE SOMA – CIRCUITO MÉDIO PASSIVO



Esquema 2. Circuito opamp na configuração buffer para medir o pH de soluções com eletrodo de vidro e circuito de soma para converter valores negativos do potencial elétrico em valores positivos.

O circuito de soma é constituído por dois resistores conectados em série. A saída do opamp está ligada ao resistor de 1,00 ohm e a fonte de fornecimento de Arduino de 3,3V está ligada ao resistor de 7,87  $\Omega$ . Este circuito converte o sinal negativo para positivo por adição de um incremento de potencial. O Arduino Uno não mede valores negativos de potencial em entrada analógica ( $A_0$ ), portanto este circuito é necessário. Os valores do resistor podem ser estimados pelas equações a seguir.

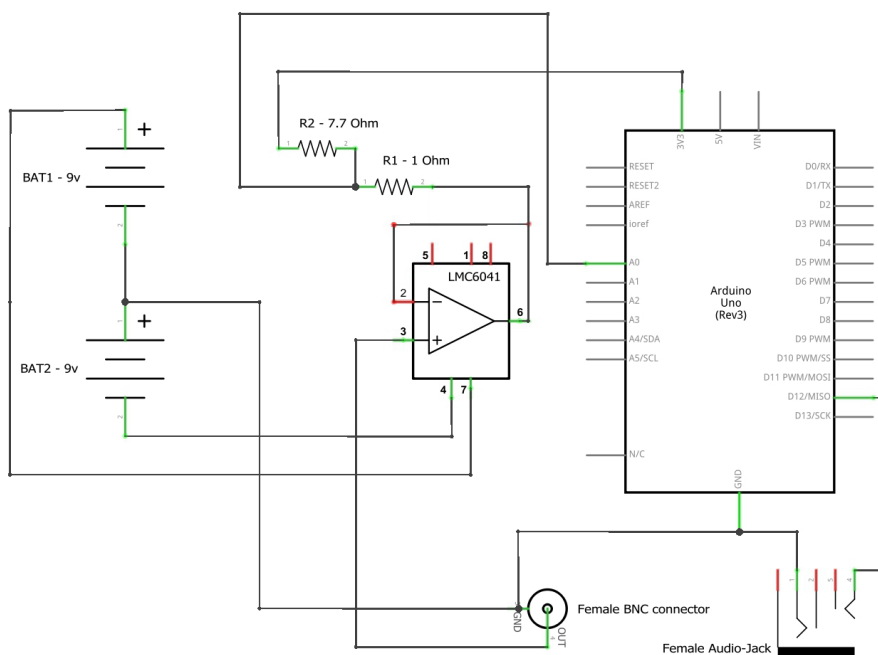
$$V_{out} = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (1)$$

Gostaríamos que o potencial elétrico para pH 14 fosse 0V. Considerando  $V_1$  igual a -0,42 V (ddp a pH 14) e  $V_2$  igual a 3,30 V (ddp de Arduino), então:

$$0 = \frac{\frac{-0.42}{R_1} + \frac{3.30}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (2) \quad \frac{R_1}{R_2} = 0.12727 \dots \quad (3)$$

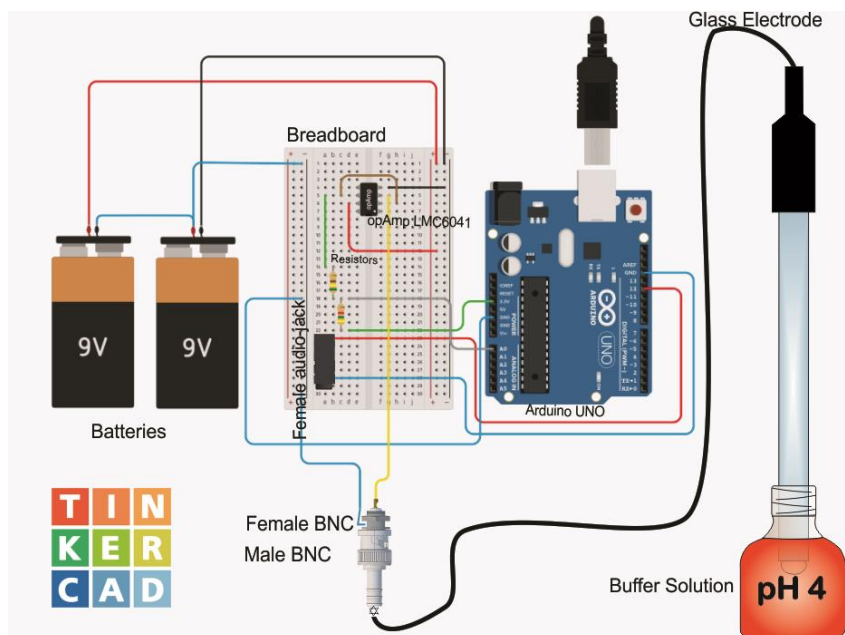
Quando  $R_1$  é igual a 1,00  $\Omega$ ,  $R_2$  é igual a 7.87  $\Omega$  (equação 3). Assim, os valores negativos do potencial elétrico podem ser lidos a partir do Arduino (Entrada Analógica –  $A_0$ ).

## CIRCUITO BUFFER/SOMA COM ARDUINO



Esquema 3. Circuito completo para medir pH com eletrodo de vidro e Arduino Uno usado para converter valores de potenciais elétricos em frequência sonora.

O esquema 3 mostra o circuito completo do dispositivo para converter potencial elétrico devido a medidas de soluções de pH com eletrodo de vidro para frequência sonora de notas musicais. A entrada digital analógica (A<sub>0</sub>) do Arduino Uno foi empregada para receber o potencial elétrico medido com eletrodo de vidro. Através do software instalado no Atmega328, o potencial elétrico é convertido em frequência sonora, sendo esta frequência enviada para a saída digital do Arduino (pino 12– D12/MISO). O pino 12 do Arduino está conectado à entrada de áudio fêmea onde um fone de ouvido é conectado. O fone de ouvido reproduz a frequência calculada a partir de software embarcado. O esquema 4 mostra o circuito do esquema 3 usando componentes reais.



Esquema 4. Pictografia do circuito completo com base no esquema 3. *Circuito com imagem arduino da Autodesk® site da Tinkercad®, cortesia Autodesk, Inc.*

## PRECISÃO DO CIRCUITO BUFFER-SUMMING-ARDUINO

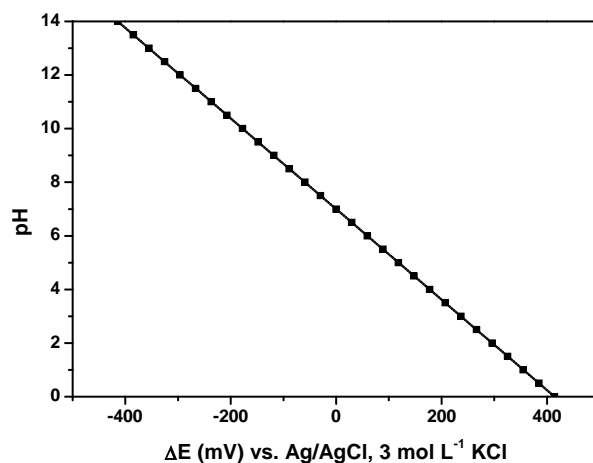


Figura 2. Gráfico mostrando a relação entre pH e potencial elétrico desenvolvido pelo eletrodo de vidro.

$$pH = 7.000 - 0.0169 \times \Delta E(mV) \quad (4)$$

A equação 4 é o inverso da equação de Nernst obtida a partir da regressão linear dos dados gráficos (Figura 2). Fizemos isto para compensar o valor do potencial elétrico do

eletrodo de referência e, portanto, calcular o erro de pH baseado na precisão AD (equação 5).

$$LSB = \frac{V_{FSR}}{2^n} = \frac{5000}{2^{10}} = 4.9 \text{ mV} \quad (5)$$

Tabela 2 - Potencial elétrico teórico desenvolvido pelo eletrodo de vidro e seu respectivo pH com erro calculado a partir da equação 3.

$\Delta E$ vs Ag/AgCl, 3M KCl (mV)	pH±Error
414,4±4,9	0,00±0.08
384,8±4,9	0,50±0.08
355,2±4,9	1,00±0.08
325,6±4,9	1,50±0.08
296,0±4,9	2,00±0.08
266,4±4,9	2,50±0.08
236,8±4,9	3,00±0.08
207,2±4,9	3,50±0.08
177,6±4,9	4,00±0.08
148,0±4,9	4,50±0.08
118,4±4,9	5,00±0.08
88,8±4,9	5,50±0.08
59,2±4,9	6,00±0.08
29,6±4,9	6,50±0.08
0±0,0	7,00±0.08
-29,6±4,9	7,50±0.08
-59,2±4,9	8,00±0.08
-88,8±4,9	8,50±0.08
-118,4±4,9	9,00±0.08
-148,0±4,9	9,50±0.08
-177,6±4,9	10,00±0.08
-207,2±4,9	10,50±0.08
-236,8±4,9	11,00±0.08
-266,4±4,9	11,50±0.08
-296,0±4,9	12,00±0.08
-325,6±4,9	12,50±0.08
-355,2±4,9	13,00±0.08
-384,8±4,9	13,50±0.08
-414,4±4,9	14,00±0.08

## CUSTOS DO DISPOSITIVO

Tabela 3 - Custos dos componentes eletrônicos utilizados para montar o dispositivo.

item	material	código	quantidade	Custos	Catálogo Eletrônico
1	Placa de Desenvolvimento	Arduin o Uno	1	\$22.00	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Arduino/A000066?qs=sGAEpiMZZMurtJ7VwBTI0XiUIZoreDo05Suo49voq1Q%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Arduino/A000066?qs=sGAEpiMZZMurtJ7VwBTI0XiUIZoreDo05Suo49voq1Q%3d</a>
2	Eletrodo potenciométrico	Vidro - pH	1	\$35.10	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Exttech/601500?qs=sGAEpiMZZMs4AFwHyzhTmykx5FJji9LfqBE5dfIUvgY%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Exttech/601500?qs=sGAEpiMZZMs4AFwHyzhTmykx5FJji9LfqBE5dfIUvgY%3d</a>
3	Amplificador operacional	LMC60 41	1	\$2.27	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/LMC6041AIM?qs=sGAEpiMZZMtCHixnSjNA6JIKxGj6zye%252bU21%252b8PZEhTE%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/LMC6041AIM?qs=sGAEpiMZZMtCHixnSjNA6JIKxGj6zye%252bU21%252b8PZEhTE%3d</a>
4	Bateria de 9V	6LR61	2	\$4.76	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Panasonic-Battery/6LF22XWA-B12?qs=sGAEpiMZZMuXcNZ31nzYhXYswiW5VD0xuMcyEUy4HRI%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Panasonic-Battery/6LF22XWA-B12?qs=sGAEpiMZZMuXcNZ31nzYhXYswiW5VD0xuMcyEUy4HRI%3d</a>
5	Snaps de bateria de 9V	estalo	2	\$1.48	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Keystone-Electronics/232?qs=sGAEpiMZZMsb53hqUvtGaal96fsGiPnZgh58Eickijk%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Keystone-Electronics/232?qs=sGAEpiMZZMsb53hqUvtGaal96fsGiPnZgh58Eickijk%3d</a>
6	Tomada de áudio fêmea	STX- 3200- 3NB	1	\$1.09	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Kycron/STX-3200-3NB?qs=sGAEpiMZZMv0W4pxf2HiVwWP6ujO54M5nnxE4N8IBHs%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Kycron/STX-3200-3NB?qs=sGAEpiMZZMv0W4pxf2HiVwWP6ujO54M5nnxE4N8IBHs%3d</a>
7	protoboard	GS-400	1	\$5.65	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Global-Specialties/GS-400?qs=sGAEpiMZZMtm36YkO3IlgkxGFatzh1vVg">https://www.mouser.com/ProductDetail/Global-Specialties/GS-400?qs=sGAEpiMZZMtm36YkO3IlgkxGFatzh1vVg</a>
8	resistor	1,0 ohm	1	\$0,20	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity-Neohm/CBT25J1R0?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda2%2fwGMz2hofsMiGYdifYzSiI%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity-Neohm/CBT25J1R0?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda2%2fwGMz2hofsMiGYdifYzSiI%3d</a>
9	resistor	8,2 ohm	1	\$0,36	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Kamaya/RC1-48R2JB?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda260u%252bQsOF0S4y1mwKh4nZ7g%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Kamaya/RC1-48R2JB?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda260u%252bQsOF0S4y1mwKh4nZ7g%3d</a>
10	Fios de jumper	ZW- MM- 10  M-M	40	\$4.43	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/BusBoard-Prototype-Systems/ZW-MM-10?qs=sGAEpiMZZMvh1pRuiUVjFZ0aAJXGPYuN92Sy29RqEiiz7sGtW7I80A%3d%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/BusBoard-Prototype-Systems/ZW-MM-10?qs=sGAEpiMZZMvh1pRuiUVjFZ0aAJXGPYuN92Sy29RqEiiz7sGtW7I80A%3d%3d</a>

11	Conector BNC	fêmea	1	\$5.60	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Amphenol-RF/034-1065-12G?qs=sGAEpiMZZMsNqjna29dfSkoxpWW8pWXBm1gU3udOMmU%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Amphenol-RF/034-1065-12G?qs=sGAEpiMZZMsNqjna29dfSkoxpWW8pWXBm1gU3udOMmU%3d</a>
12	fone de cabeça	Fone de ouvido	1	\$2.56	<a href="https://www.amazon.com/Wicked-Audio-Brawl-Earbud-Headphones/dp/B01DZ975X2/ref=sr_1_17?s=aht&amp;ie=UTF8&amp;qid=1539118100&amp;sr=1-17&amp;keywords=headphone&amp;refinements=p_36%3A100-300">https://www.amazon.com/Wicked-Audio-Brawl-Earbud-Headphones/dp/B01DZ975X2/ref=sr_1_17?s=aht&amp;ie=UTF8&amp;qid=1539118100&amp;sr=1-17&amp;keywords=headphone&amp;refinements=p_36%3A100-300</a>
			total	\$85.50	

## CÓDIGO DO SOFTWARE DE ACESSIBILIDADE PARA O ARDUINO (IDE)

```

/*
# Codes for Accessibility-pHmeter V1.0.
# Author: Samuel C Costa and Julio Cesar B Fernandes
# Date: 2018.10.11
# Version: 1.1
*/
/*Variables declaration and Pins from Arduino*/
#include <math.h>
#define OutputOpAmpPin 0 //Output OpAmp LMC6041 to Arduino Analog Input 0
unsigned long int AverageValue; //Store the average value of the glass electrode
/*Integer variables declaration*/
int Buf[10]; //Data array
int Temporary; //Variable to temporary storage
int Headphone = 12; //Define pin 12 from Arduino (digital output) to use with Headphone
int Count1; //Variable for counting
int Count2; //Variable for counting
/*Float point variables declaration*/
float MilivoltValue;
float pHValue;
float LogSoundFrequency;
float SoundFrequency;
void setup()
{
pinMode(Headphone,OUTPUT); //Define digital pin 12 from arduino as output
Serial.begin(9600); //Define data acquisition rate from serial input
Serial.println("Ready"); //Test the serial monitor
}
void loop()
{
for(Count1=0;Count1<10;Count1++) //Take 10 values of potential from interface OpAmp-Glass electrode for smooth the value
{
Buf[Count1]=analogRead(OutputOpAmpPin); //Reading of the Analog-to-Digital Input from Arduino
delay(10); //Waiting 10 ms
}
}

```

```

}
for(Count1=0;Count1<9;Count1++) //Sort the analog from small to large
{
  for(Count2=Count1+1;Count2<10;Count2++)
  {
    if(Buf[Count1]>Buf[Count2])
    {
      Temporary=Buf[Count1];
      Buf[Count1]=Buf[Count2];
      Buf[Count2]=Temporary;
    }
  }
}
AverageValue=0;
for(Count1=2;Count1<8;Count1++) //Take the average value of 6 center sample
AverageValue+=Buf[Count1];
MilivoltValue = (float)AverageValue*5200/1024/6; //Convert the average digital value into millivolt. 10 bits A/D converter (2^10=1024)
MilivoltValue = MilivoltValue - 360; //Adjust to correct summing circuit since arduino do not measure negative values
Serial.print(" mV:");
Serial.print(MilivoltValue,2);
LogSoundFrequency=2.46803 - 0.0008462*MilivoltValue; //Convert potential of the glass electrode from millivoltage to logarithm of the sound frequency
SoundFrequency=pow(10,LogSoundFrequency); //Convert logarithm of the sound frequency to sound frequency in Hertz
{
if (SoundFrequency > 130 and SoundFrequency <= 134)
SoundFrequency = 131;
if (SoundFrequency > 134 and SoundFrequency <= 143)
SoundFrequency = 139;
if (SoundFrequency > 143 and SoundFrequency <= 150)
SoundFrequency = 147;
if (SoundFrequency > 150 and SoundFrequency <= 160)
SoundFrequency = 156;
if (SoundFrequency > 160 and SoundFrequency <= 170)
SoundFrequency = 165;
if (SoundFrequency > 170 and SoundFrequency <= 180)
SoundFrequency = 175;
if (SoundFrequency > 180 and SoundFrequency <= 190)
SoundFrequency = 185;
if (SoundFrequency > 190 and SoundFrequency <= 201)
SoundFrequency = 196;
if (SoundFrequency > 201 and SoundFrequency <= 213)
SoundFrequency = 208;
if (SoundFrequency > 213 and SoundFrequency <= 227)
SoundFrequency = 220;
if (SoundFrequency > 227 and SoundFrequency <= 240)
SoundFrequency = 233;
if (SoundFrequency > 240 and SoundFrequency <= 254)
SoundFrequency = 247;
if (SoundFrequency > 254 and SoundFrequency <= 269)

```

```

SoundFrequency = 262;
if (SoundFrequency > 269 and SoundFrequency <= 285)
SoundFrequency = 277;
if (SoundFrequency > 285 and SoundFrequency <= 302)
SoundFrequency = 294;
if (SoundFrequency > 302 and SoundFrequency <= 320)
SoundFrequency = 311;
if (SoundFrequency > 320 and SoundFrequency <= 340)
SoundFrequency = 330;
if (SoundFrequency > 340 and SoundFrequency <= 360)
SoundFrequency = 349;
if (SoundFrequency > 360 and SoundFrequency <= 381)
SoundFrequency = 370;
if (SoundFrequency > 381 and SoundFrequency <= 403)
SoundFrequency = 392;
if (SoundFrequency > 403 and SoundFrequency <= 427)
SoundFrequency = 415;
if (SoundFrequency > 427 and SoundFrequency <= 453)
SoundFrequency = 440;
if (SoundFrequency > 453 and SoundFrequency <= 480)
SoundFrequency = 466;
if (SoundFrequency > 480 and SoundFrequency <= 508)
SoundFrequency = 494;
if (SoundFrequency > 508 and SoundFrequency <= 539)
SoundFrequency = 523;
if (SoundFrequency > 539 and SoundFrequency <= 570)
SoundFrequency = 554;
if (SoundFrequency > 570 and SoundFrequency <= 604)
SoundFrequency = 587;
if (SoundFrequency > 604 and SoundFrequency <= 640)
SoundFrequency = 622;
if (SoundFrequency > 640 and SoundFrequency <= 660)
SoundFrequency = 659;
}
LogSoundFrequency= log10(SoundFrequency);
MilivoltValue = (LogSoundFrequency - 2.46803)/(- 0.0008462);
pHValue = 7 - 0.01923*MilivoltValue; //Convert potential of the glass electrode from milivolt to pH using Nernst equation
Serial.print("  pH:");
Serial.print(pHValue,4);
Serial.print("  Sound Frequency:");
Serial.print(SoundFrequency,6);
Serial.println(" ");
tone(Headphone, SoundFrequency); // Play the musical note that corresponds measured pH
delay(1000);
noTone(Headphone);
delay(5000);
}

```

# ANEXO 1 – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION

Publicado em: 13 de dezembro de 2018

DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00641>

## Listening to pH

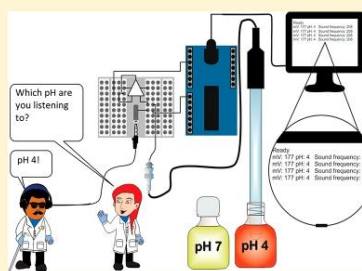
Samuel C. Costa<sup>✉</sup> and Julio C. B. Fernandes<sup>\*✉</sup>

Institute of Educational Sciences—ICED, Federal University of Western Pará—UFOPA, S/N Marechal Rondon, Avenue Caranazal, CEP 68040-070 Santarém, PA, Brazil

### Supporting Information

**ABSTRACT:** We developed a simple device to teach the concept of pH to visually impaired people through an experimental approach. An interface between a glass electrode and an open-source electronics platform based on easy-to-use hardware and software (Arduino Uno) was designed using an operational amplifier of ultralow input current. A headphone connected to digital output from Arduino Uno was employed to convert the electrical signals from pH to sound frequency. Using an audio file that emits sound frequencies, visually impaired students were trained to associate specific frequencies with pH values. There is a direct relationship between the logarithm of sound frequency from a given musical note and a pH value, which can be used to train students with low vision who would otherwise have difficulty observing pH values from visual indications. Sound frequency signals of 131–659 Hz that correspond to the piano musical scale of C<sub>3</sub>, which is one octave below middle C (small octave or the “Do” note in solfège), to E<sub>5</sub>, one octave above middle E (two-lined octave or “Mi” note in solfège), were used to obtain sounds for the pH scale. Each musical note from these scales corresponded to one pH value with precision of 0.5 unit. This proposed method can be easily implemented in a laboratory with a relatively low cost.

**KEYWORDS:** General Public, Analytical Chemistry, Demonstrations, Hands-On Learning/Manipulatives, Multimedia-Based Learning, Acids/Bases, pH, Potentiometry



Worldwide today, 285 million people are visually impaired, corresponding to 3.8% of the 7.6 billion inhabitants of Earth.<sup>1</sup> For this reason, in 1994, the World Conference on Special Education was organized in Salamanca, Spain, where representatives of 88 governments and 25 international organizations recognized the importance of providing education with the appropriate level of learning for children, young people, and adults with special needs within the conventional education system.<sup>2</sup>

Chemistry is a science based on visual representations, manipulation, and observation of phenomena; furthermore, chemical transformations in the laboratory are often visualized and measured by color changes, precipitation, chromatography, and spectrophotometry. Therefore, vision is one of the essential senses for students in a chemistry course. This shows how difficult it is to include students with visual impairments in laboratory chemistry classes, and why chemistry teachers have a great deal of concern about how to involve people who have no or low vision in the teaching laboratory.

Currently, teacher training courses have paid little attention to the training of students with visual difficulties. There are only a limited number of chemistry laboratory activities that are accessible to the students with visual impairment.<sup>3</sup> However, with the recent introduction of several low-cost technologies, students with visual impairment could perform a number of chemistry experiments.<sup>4–8</sup> Independence Science, an organization lead by Supalo and co-workers, addressed the

problem by developing devices such as Sci-Voice Talking LabQuest 2 based on text-to-speech technology so that the results are spoken.<sup>9,10</sup> Supalo also provides information to teachers who are teaching science to students with visual difficulties.<sup>9</sup> Nevertheless, Sci-Voice Talking LabQuest 2 is very expensive for those in developing countries; its cost is about \$2,000.<sup>10</sup> Hence, it is also very important to produce simple and low-cost solutions for this problem. Pereira et al. proposed a simple method to produce a sonified infrared spectrum that provided visually impaired students with its interpretation.<sup>11</sup> Other examples are olfactory titrations.<sup>12,13</sup>

In addition to the olfactory functions, chemical experiments are generally developed to increase their accessibility to the visually impaired by employing sensory abilities such as taste and touch for people who have these abilities. The sense of taste and touch are believed to be more acute in people who are blind or low-vision. Nevertheless, recent studies have shown that blindness has little influence on chemosensory abilities.<sup>14</sup> Calorimetric reactions can be detected using the tactile sense, which would be easy for students with visual impairment. pH experiments are related to colorimetric or electrochemical measurements of aqueous solutions;<sup>15</sup> ther-

Received: August 15, 2018

Revised: December 1, 2018

Published: December 13, 2018

therefore, these analyses are quite difficult for visually impaired students.

pH is an important concept in chemistry. The letter "H" means activity of hydrogen ions ( $H^+$ ), but there is an enormous misconception about the meaning of the letter "p". The fact is that the "p" does not mean anything, as shown by Jens Norby in his historic paper about this subject.<sup>16</sup> The concept of pH was proposed in 1909 by Sorensen when he studied the influence of acidity on enzymatic reactions using the letters "p" and "q" as mathematical variables.<sup>17</sup>

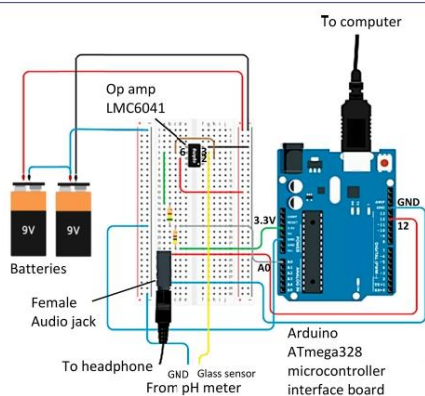
The pH concept is very important in the macroscopic world because pH changes are associated with absorption of food and drugs in live organisms, quality of water that is distributed in towns and cities, chemical synthesis, growth of plants, and many other applications and phenomena. Therefore, this subject is truly relevant for all students.

As previously mentioned, the inclusion of students with visual impairment in laboratory activities can be difficult, even though experimentation in chemistry is highly significant for the students in their own learning process.<sup>18–21</sup>

Therefore, the device presented here aims to allow visually impaired students to participate in laboratory classes in which pH measurements of different solutions can be obtained with a glass electrode using a pH meter that converts pH values into different sound frequencies of musical notes.

#### EXPERIMENTAL SETUP

The hardware consists of an open-source electronics platform based on Arduino Uno<sup>22</sup> and an op amp (LMC6041) of ultralow input current (2fa).<sup>23</sup> A combined pH glass electrode is attached to the noninverting input of the LMC6041 (3-pin), which is designed in a buffer configuration (2-pin inverting input is connected to 6-pin output), as shown at Figure 1.<sup>24</sup>



**Figure 1.** Complete circuit showing connectivity. Circuit with Arduino image from Autodesk Tinkercad Web site, reprinted with permission. Copyright 2018 Autodesk, Inc.

The output of the op amp (6-pin) is connected to a summing circuit,<sup>24</sup> and this is then connected to an analog/digital input (A<sub>0</sub>-pin in ATmega328 microcontroller) from Arduino Uno.<sup>25</sup> In the Arduino, a digital output (12-pin in ATmega328 microcontroller) is connected to a female audio jack,<sup>26</sup> which is attached to a headphone (P2-pin). A reference electrode

(metallic shield), batteries in symmetric configuration, the headphone, and the Arduino Uno were all connected to the same ground (GND). Software written in C++ Arduino language was embedded in an ATmega328 microcontroller from Arduino Uno.<sup>27</sup> This software converted the electrical potential developed on the surface of the combined pH glass electrode into sound frequencies that correspond to musical notes. The reading out of the pH values can be monitored at the same time that students listen to the frequency corresponding to pH signal using the serial monitor in an integrated development environment (IDE; open-source Arduino software).<sup>22</sup> Four solutions of known pH (vinegar, 4.0 and 7.0 buffers, and 0.01 mol L<sup>-1</sup> caustic soda solution) were used to test the device. Before listening, we trained a visually impaired student using an audio file in mp3 format that generates frequencies of 131–659 Hz for each pH value with an accuracy of one pH unit. It is possible to employ the frequency generator free app<sup>28</sup> (available at the Google Play app store), which generates a tone with a frequency between 1 and 22,000 Hz. Additional details are provided in the Supporting Information.

These experiments involving human beings were approved by the ethics committees of State University of Pará under protocol number CAAE 90054318.0.0000.5168 on August 17, 2018.

#### HAZARDS

Teachers must be careful with visually impaired students in laboratory experiments. A few guidelines are important to follow for helping these students: all reagents used in this practice should be double-labeled, one in standard print (large letters) and another in Braille; students with visual impairment must examine the proposed device before the practical experiment; instructions can be spoken to students with visual difficulties, but it is also important that they have laboratory manuals in Braille. Furthermore, Dorothy Tombaugh describes in detail how visually impaired students can work safely in the laboratory.<sup>29</sup>

Caustic soda is harmful because it can cause serious eye damage and burn skin on contact; this compound in solution is corrosive to metals. Buffer solutions, pH 4.01 (potassium hydrogen phthalate) and 7.00 (9 g/L of Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> [0.0634 M], 5 g/L of KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> [0.0367 M]), are not considered dangerous according to European Union legislation. Vinegar contains acetic acid, which is a substance that is corrosive and flammable. This acid can cause severe skin burns and eye damage; however, vinegar typically contains about 4–5% acetic acid. Hence, the risk of vinegar to human health can be considered low, although vinegar is an eye irritant and therefore it must be manipulated carefully.

#### RESULTS AND DISCUSSION

Arduino Uno is an open-source electronics platform based on easy-to-use hardware and software, which can be used for a demonstration of measuring devices such as thermometers and pH meters.<sup>4,5</sup> We used this idea for developing a simple system that converts the pH measurements into sound frequencies of musical notes. There is a direct relationship between pH and the logarithm of the sound frequency (Figure 2A). We chose the range of sound frequencies from 131 to 659 Hz, which corresponds to the musical notes C<sub>3</sub> up to E<sub>3</sub> (see Table S1 in the Supporting Information).

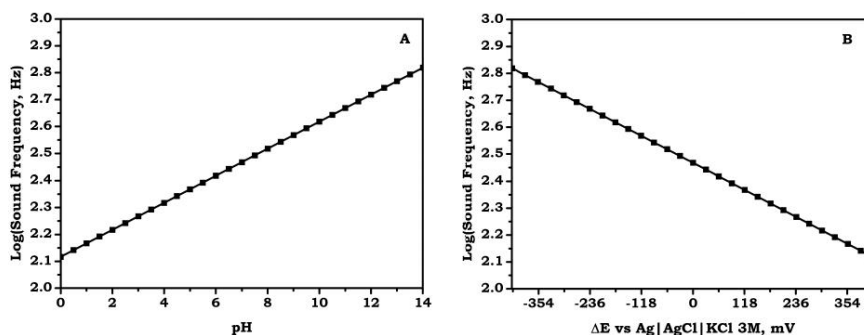


Figure 2. Relationship between sound frequency of musical notes: (A) pH and (B) electrical potential ( $\Delta E$ , mV).

A glass electrode has a high resistance;<sup>15</sup> hence, it is not possible to connect this electrode directly to Arduino Uno. We overcame this problem using an op amp with a high impedance input, the LMC6041 from Texas Instruments. This op amp has an ultralow input current (2 fA);<sup>23</sup> therefore, the potentiometric measures using the glass electrode are not affected by the electronic circuit. The LMC6041 operates with a supply voltage, positive or negative, between 4.5 and 15.5 V.<sup>23</sup> We used a supply voltage of  $\pm 9$  V through two alkaline batteries, 6LR61, in symmetric configuration (see the Supporting Information). This was necessary to measure the negative values of electrical potential from solutions with pH values above 7.0. Generally, combined glass electrodes measure about 0 V when immersed in buffer solution at pH 7.0. This potentiometric electrode responds to ionic species in solution according to the Nernst equation.<sup>15</sup>

$$E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln a_{\text{H}^+} \quad (1)$$

Here, the following abbreviations apply:  $E_0$  is the standard potential measured in volts, but if this potential is expressed in millivolts, the value of the slope  $\left(-\frac{RT}{zF}\right)$  must be multiplied by 1000;  $R$  is the universal gas constant, whose value is equal to  $8.314472 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ;  $T$  is the solution temperature in Kelvin;  $z$  is the charge of the primary ion in solution;  $F$  is the Faraday constant, that is, the number of coulombs per mole of electrons. Its value is  $9.64853399 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$ ;  $a_{\text{H}^+}$  is the chemical activity for the hydronium ion.

The Nernst equation is commonly represented in terms of a base-10 logarithm. Hence, if the hydronium ion solution is at room temperature ( $25^\circ \text{C}$  or  $298.15 \text{ K}$ ) and since hydrogen ion is monovalent, we can express the Nernst equation as follows:

$$E = E_0 - 59.2 \log_{10} a_{\text{H}^+} \quad (2)$$

Equation 2 shows that each change of one decade in the activity of hydronium ion generates a variation of 59.2 mV in the electrical potential of glass electrodes. Therefore, considering a Nernstian response, solutions between 0 and 14 pH units present an electrical potential from +414.4 to  $-414.4 \text{ mV}$ . On the other hand, Arduino has a supply voltage of +5 V; therefore, this electronics platform could not measure the negative electrical potentials. We employed a summing circuit<sup>24</sup> (Supporting Information) from the op amp output to

convert the negative values of electrical potential to positive ones.

Arduino Uno has six analog/digital input with 10-bit resolution.<sup>22,25</sup> Because its supply voltage is 5 V, this device resolves electrical potential with precision according to<sup>24,30</sup>

$$\text{LSB} = \frac{V_{\text{FSR}}}{2^n} = \frac{5000}{2^{10}} = 4.9 \text{ mV} \quad (3)$$

where LSB is least significant bit;  $V_{\text{FSR}}$  is full scale input voltage range in millivolts (mV); and  $n$  is number of bits.<sup>30</sup>

The system presents a precision of about 0.08 pH units, which can be calculated using the Nernst equation (see Table S2 in the Supporting Information). Although it is possible to measure pH units with precision to two decimal places, we adopted a musical pH scale of one decimal place. It is important to consider that students do not need to identify pH measurements with high precision, since the experiment is merely pedagogical. Despite this limitation, we could make an audible pH scale with higher precision by just changing the frequency range of the musical notes.

The electrical potential ( $E$ , mV) measured with a combined pH glass electrode is converted to sound frequency ( $F$ , Hz) through embedded software in Arduino Uno (programming code in the Supporting Information) using eq 4. This equation was obtained from linear regression of the plot shown in Figure 2B.

$$\log_{10} F(\text{Hz}) = (2.46803 \pm 0.000006) - (0.0008462 \pm 0.0000003) \times \Delta E(\text{mV}) \quad (4)$$

Here, the correlation coefficient is equal to 1.

The sound frequency calculated from the antilog of eq 4 is used to generate a musical note through a headphone. The musical note has a square waveform because the frequency is generated by values of 0 or 5 V, since the headphone is connected to digital output from Arduino Uno.

We tested the device with our team. We verified that it is simple to identify acidic and alkaline solutions through sound frequency, because the difference between the perception of bass and treble sounds is clear. On the other hand, for determining pH values, discriminating among the sounds requires training. Although the sound differences are easily discernible to each pH value with 0.5 units of precision, it is difficult to memorize all pH-related values relative to the sound

frequencies. We suggested listening simultaneously to the calibration and sample values so that the student may compare the sounds (audio file in the Supporting Information).

## CONCLUSION

The device described here presents a low-cost solution, about \$85.00 (Supporting Information), which allows teachers at any educational level to replicate it. Data collection is fast, and the experiment can use solutions for pH measurement available in local markets such as soda, fruits, stove cleaner, or milk of magnesia, among others. The pH values are easily correlated with sound frequencies of musical notes. As a result, this work can contribute to the inclusion of students with visual impairment in laboratory classes of chemistry courses. Hence, students with visual difficulties can become the agents of their own learning about pH, an important concept in chemistry.

## ASSOCIATED CONTENT

### Supporting Information

The Supporting Information is available on the ACS Publications website at DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00641.

Concordance of pH values and their respective musical notes, details of the buffer summing Arduino circuit and the experimental setup, suppliers and costs for the device components, and accessibility source code for Arduino software (PDF, DOCX)

Audio calibration of pH values and tones (AVI)

## AUTHOR INFORMATION

### Corresponding Author

\*E-mail: julio.fernandes@ufopa.edu.br.

### ORCID

Samuel C. Costa: 0000-0003-4020-2013

Julio C. B. Fernandes: 0000-0001-6616-3513

### Notes

The authors declare no competing financial interest.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported in part by FAPESPA through scholarship to S.C.C. We thank Gleber Maciel for assistance in musical theory, Carlos Eduardo Fernandes for helping with the electronics devices, and Prof. Dr. Troy Beldini for the English revision. Autodesk and Tinkercad are registered trademarks or trademarks of Autodesk, Inc., in the USA and certain other countries.

## REFERENCES

- (1) World Health Organization. *World Report on Disability*; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2011. [http://www.who.int/disabilities/world\\_report/2011/report.pdf](http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/report.pdf) (accessed Dec 2018).
- (2) World Conference on Special Needs Education: Access and Quality. *The Salamanca Statement and Framework for Action on Special Needs Education*; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and Ministry of Education and Science Spain; Salamanca, Spain, 7–10 June 1994. <http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000984/098427eo.pdf> (accessed Dec 2018).
- (3) Gonçalves, F. P.; Regiani, A. M.; Auras, S. R.; Silveira, T. S.; Coelho, J. C.; Hobmeier, A. K. Inclusive Education in Teacher Training and Chemistry Teaching: Visual Impairment in Debate. [A educação inclusiva na formação de professores e no ensino de

química: A deficiência visual em debate]. *QNEsc.* **2013**, *35* (4), 264–271.

(4) Mabbott, G. A. Teaching Electronics and Laboratory Automation using Microcontroller Boards. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91* (9), 1458–1463.

(5) Kubínová, S.; Slégr, J. ChemDuino: Adapting Arduino for Low-Cost Chemical Measurements in Lecture and Laboratory. *J. Chem. Educ.* **2015**, *92* (10), 1751–1753.

(6) Kuntzleman, T. S.; Jacobson, E. C. Teaching Beer's Law and Absorption Spectrophotometry with a Smart Phone: A Substantially Simplified Protocol. *J. Chem. Educ.* **2016**, *93* (7), 1249–1252.

(7) Kehoe, E.; Penn, R. L. Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry. *J. Chem. Educ.* **2013**, *90*, 1191–1195.

(8) Soong, R.; Agmata, K.; Doyle, T.; Jenne, A.; Adamo, T.; Simpson, A. Combining the Maker Movement with Accessibility Needs in an Undergraduate Laboratory: A Cost-Effective Text-to-Speech Multipurpose, Universal Chemistry Sensor Hub (MUCSH) for Students with Disabilities. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 2268.

(9) Supalo, C. A.; Isaacson, M. D.; Lombardi, M. V. Making Hands-On Science Learning Accessible for Students Who Are Blind or Have Low Vision. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 195–199.

(10) Independence Science. <http://independencescience.com/> (accessed Dec 2018).

(11) Pereira, F.; Ponte-e-Sousa, J. C.; Fartaria, R. P. S.; Bonifácio, V. D. B.; Mata, P.; Aires-de-Sousa, J.; Lobo, A. M. Sonified Infrared Spectra and Their Interpretation by Blind and Visually Impaired Students. *J. Chem. Educ.* **2013**, *90* (8), 1028–1031.

(12) Neppel, K.; Oliver-Hoyo, M. T.; Queen, C.; Reed, N. A Closer Look at Olfactory Titrations. *J. Chem. Educ.* **2005**, *82* (4), 607–610.

(13) Wood, J. T.; Eddy, R. M. Olfactory Titrations. *J. Chem. Educ.* **1996**, *73* (3), 257.

(14) Smith, R. S.; Doty, R. L.; Burlingame, G. K.; McKeown, D. A. Smell and Taste Function in the Visually Impaired. *Percept. Psychophys.* **1993**, *54* (5), 649–655.

(15) Skoog, D. A.; West, D. M.; Holler, J. F. *Fundamentals of Analytical Chemistry*, 7th ed.; Saunders College Publishing: Orlando, FL, 1996; pp 392, 420, 861.

(16) Norby, J. The Origin and the Meaning of the Little p in pH. *Trends Biochem. Sci.* **2000**, *25* (1), 36–37.

(17) Sørensen, S. P. L. Études enzymatiques. II. Sur la mesure et l'importance de la concentration des ions hydrogène dans les réactions enzymatiques. *Compt. rend. du Lab. de Carlsberg* **1909**, *8*, 1–168.

(18) Eggen, P. O.; Kvittingen, L.; Lykknes, A.; Wittje, R. Reconstructing Iconic Experiments in Electrochemistry: Experiences from a History of Science Course. *Sci. and Educ.* **2012**, *21*, 179.

(19) Hofstein, A.; Shore, R.; Kipnis, M. Providing High School Chemistry Students with Opportunities To Develop Learning Skills in an Inquiry-Type Laboratory: A Case Study. *Int. J. Sci. Educ.* **2004**, *26* (1), 47–62.

(20) Hart, C.; Mulhall, P.; Berry, A.; Loughran, J.; Gunstone, R. What Is the Purpose of This Experiment? Or Can Students Learn Something from Doing Experiments? *J. Res. Sci. Teach.* **2000**, *37* (7), 655–675.

(21) Ibrahim, N. H.; Surif, J.; Hui, K. P.; Yaakub, S. Typical Teaching Method Applied in Chemistry Experiment. *Procd. Soc. Behv.* **2014**, *116*, 4946–4954.

(22) Arduino home page. <https://www.arduino.cc/> (accessed Dec 2018).

(23) Texas Instruments, Inc. *Datasheet: LMC6041 CMOS Single Micropower Operational Amplifier, SNOS610E*; December 1994, revised March 2013. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc6041.pdf> (accessed Dec 2018).

(24) Horowitz, P.; Hill, W. *The Art of Electronics*, 3rd ed.; Cambridge University Press: New York, 2015.

(25) *ATmega328/P Datasheet Summary*; Atmel Corporation: San Jose, CA, 2016. <https://cdn.sparkfun.com/assets/c/a/8/e/4/Atmel->

42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\_Datasheet.pdf (accessed Dec 2018).

(26) Kycon Corporation home page. Audio Jacks: STX-3100 Series PCB Mount 3.5 mm Audio Jack. <http://www.kycon.com/2013Catalogpage/Audio%20Jacks/STX3200.pdf> (accessed Dec 2018).

(27) DFRobot. PH meter (SKU: SEN0161). [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PH\\_meter\(SKU:\\_SEN0161\)](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/PH_meter(SKU:_SEN0161)) (accessed Dec 2018).

(28) Boedec, H. Frequency Sound Generator app at Google Play, version 2.3. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.boedec.hoel.frequencygenerator> (accessed Dec 2018).

(29) Tombaugh, D. Chemistry and the Visually Impaired—Available Teaching Aids. *J. Chem. Educ.* **1981**, *58* (3), 222–226.

(30) Texas Instruments, Inc. *Application Report: Principles of Data Acquisition and Conversion, SBAA051A*; January 1994, revised April 2015. <http://www.ti.com/lit/an/sbaa051a/sbaa051a.pdf> (accessed Dec 2018).

## ANEXO 2 – MATERIAL DE SUPORTE DISPONÍVEL NO JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION

### Supporting information for Listening to pH

Samuel C. Costa, Julio C. B. Fernandes\*

Federal University of Western Pará – UFOPA, Institute of Educational Sciences – ICED

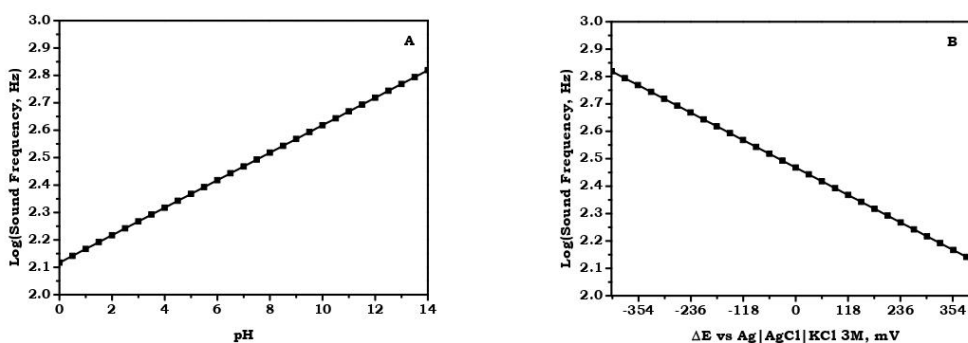
5S/N Marechal Rondon, Avenue - Caranazal, CEP 68040-070 – Santarém – PA

#### AUTHOR INFORMATION

Corresponding Author

\*E-mail: julio.fernandes@ufopa.edu.br

#### GRAPHICS AND TABLES



10

Figure 1. Graphic showing the relationship between sound frequency of musical notes and: A. pH. B. Electrical potential ( $\Delta E$ , mV).

15

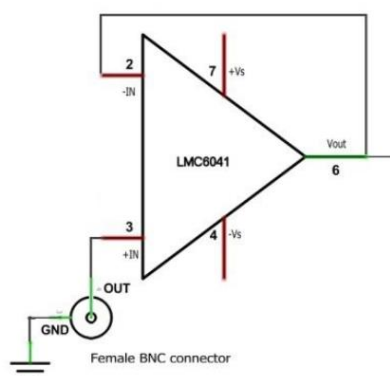
Table 1 pH values and their respective musical notes.

pH	Musical Note	Frequency (F), Hertz	Log (F, Hertz)
0.0	C3	131	2.1173
0.5	C#3	139	2.1430
1.0	D3	147	2.1673
1.5	D#3	156	2.1931
2.0	E3	165	2.2175
2.5	F3	175	2.2430
3.0	F#3	185	2.2672
3.5	G3	196	2.2923
4.0	G#3	208	2.3181
4.5	A3	220	2.3424
5.0	A#3	233	2.3674
5.5	B3	247	2.3927
6.0	C4	262	2.4183
6.5	C#4	277	2.4425
7.0	D4	294	2.4684
7.5	D#4	311	2.4928
8.0	E4	330	2.5185
8.5	F4	349	2.5428
9.0	F#4	370	2.5682
9.5	G4	392	2.5933
10.0	G#4	415	2.6181
10.5	A4	440	2.6435
11.0	A#4	466	2.6684
11.5	B4	494	2.6937
12.0	C5	523	2.7185
12.5	C#5	554	2.7435
13.0	D5	587	2.7686
13.5	D#5	622	2.7938
14.0	E5	659	2.8189

Each note musical of the pH scale can be generated using frequency generator app from Boedec. This app can be downloaded from Play Store (Search by frequency

20generator, author: Hoel Boedec, email: [hoel.boedec.contact@gmail.com](mailto:hoel.boedec.contact@gmail.com)). Before use, change the sine waveform to square wave form. We also created a calibration file in mp3 format which is available in the Supporting information (audio file) and a video showing the working of the device (<https://youtu.be/XrrT-pipU8w>)

### BUFFER CIRCUIT

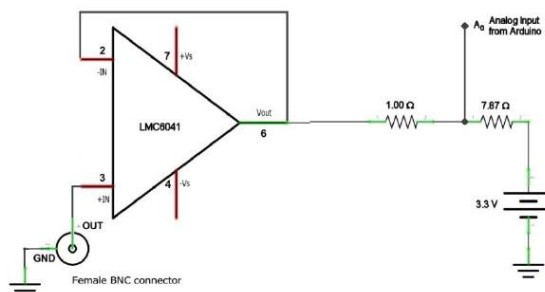


25

Scheme 1. Opamp circuit in buffer configuration to measure pH of solutions with glass electrode.

The operational amplifier (opamp), LMC6041, is configured in buffer circuit. In this case, there is a loop between 2-pin (inverter input) and 6-pin (output) of the LMC6041. 30The gain is unitary. Glass electrode is attached to female BNC connector, which it is linked to 3-pin of the opamp. Supply voltage of the opamp are the pins, 4 and 7, which were connected to -9V and +9V, respectively. These potentials are provided by two batteries in symmetric configuration.

## 35 SUMMING CIRCUIT – PASSIVE AVERAGER CIRCUIT



Scheme 2. Opamp circuit in buffer configuration to measure pH of solutions with glass electrode and summing circuit to convert negative values of electrical potential to positive values.

40 The summing circuit is constituted by two resistors connected in series. The output from opamp is linked to 1.00 ohm resistor and supply source from Arduino of 3.3V is linked to 7.87 ohm resistor. This circuit converts negative signal to positive by addition of an increment of potential. Arduino Uno does not measure negative values of potential in analog input ( $A_0$ ), therefore this circuit is necessary. The resistor values  
45 may be estimated by the equations to follow.

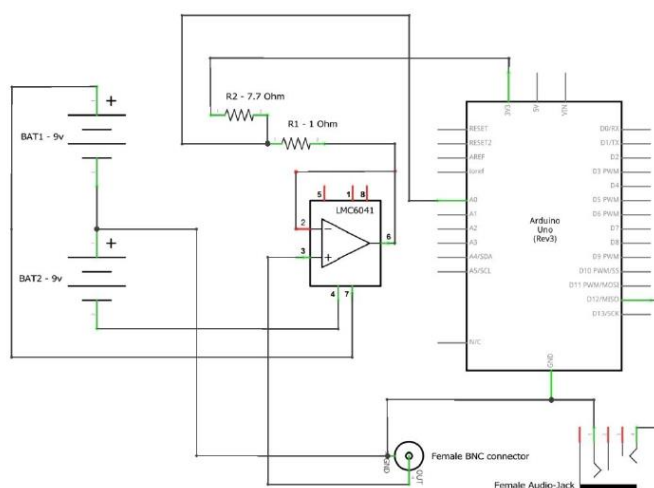
$$V_{out} = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (1)$$

We would like that electrical potential to pH 14 was 0V. Considering  $V_1$  equal to -0.42 V (ddp to pH 14) and  $V_2$  equal to 3.30 V (ddp from Arduino), then:

$$0 = \frac{\frac{-0.42}{R_1} + \frac{3.30}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (2) \quad \frac{R_1}{R_2} = 0.12727... \quad (3)$$

50When  $R_1$  is equal to  $1.00 \Omega$ ,  $R_2$  is equal to  $7.87 \Omega$  (equation 3). Thus, the negative values of electrical potential can be read from Arduino (Analog Input –  $A_0$ ).

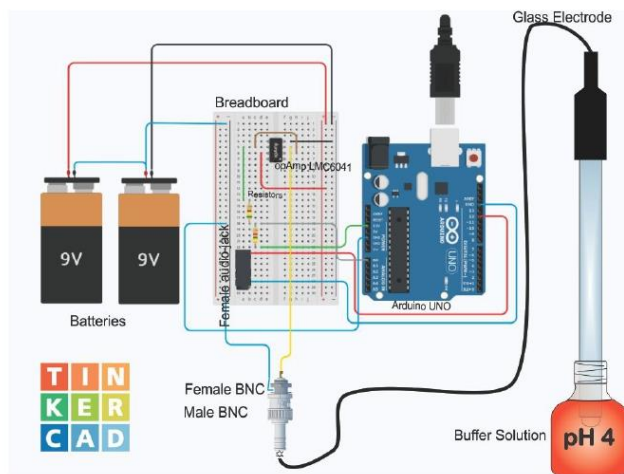
### BUFFER-SUMMING-ARDUINO CIRCUIT



55Scheme 3. Complete circuit to measure pH with glass electrode and Arduino Uno used to convert electrical potential values in sound frequency.

The scheme 3 shows the complete circuit of the device to convert electrical potential due to pH solutions measures with glass electrode for sound frequency of musical notes. Analog/digital input ( $A_0$ ) from Arduino Uno was employed to receive the electrical potential measured with glass electrode. Through of embedded software in Atmega328, the electrical potential is converted in sound frequency, being this frequency sent to digital output of the Arduino (12-pin – D12/MISO). 12-pin from Arduino is connected to

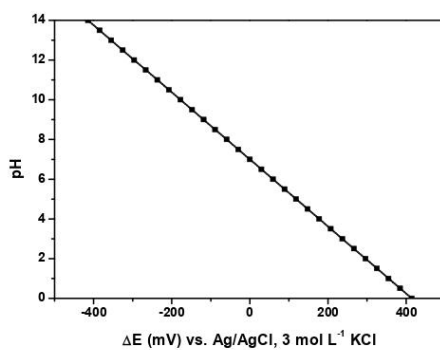
female audio-jack where a headphone is attached. The headphone reproduces the frequency calculated from embedded software. Scheme 4 shows the circuit from scheme 3 using real components.



Scheme 4. Pictography of the complete circuit based on scheme 3. *Circuit with arduino image from Autodesk® Tinkercad® website, courtesy Autodesk, Inc.*

#### ACCURACY OF THE BUFFER-SUMMING-ARDUINO CIRCUIT

75



80

Figure 2. Graphic showing the relationship between pH and electrical potential developed by the glass electrode.

$$pH = 7.000 - 0.0169 \times \Delta E(mV) \quad (4)$$

Equation 4 is the inverse of the Nernst equation obtained from linear regression of the graphic data (Figure 2). We plotted this mode to compensate the value of electrical potential from the reference electrode and hence, to calculate the pH error based on AD precision (equation 5).

$$LSB = \frac{V_{FSR}}{2^n} = \frac{5000}{2^{10}} = 4.9 \text{ mV} \quad (5)$$

Table 2 Theoretical electrical potential developed by the glass electrode and its respective pH with error calculated from equation 3.

$\Delta E$ vs Ag/AgCl, 3M KCl (mV)	pH±Error
414.4±4.9	0.00±0.08
384.8±4.9	0.50±0.08
355.2±4.9	1.00±0.08
325.6±4.9	1.50±0.08
296.0±4.9	2.00±0.08
266.4±4.9	2.50±0.08
236.8±4.9	3.00±0.08
207.2±4.9	3.50±0.08
177.6±4.9	4.00±0.08
148.0±4.9	4.50±0.08
118.4±4.9	5.00±0.08
88.8±4.9	5.50±0.08
59.2±4.9	6.00±0.08

29.6±4.9	6.50±0.08
0±4.9	7.00±0.08
-29.6±4.9	7.50±0.08
-59.2±4.9	8.00±0.08
-88.8±4.9	8.50±0.08
-118.4±4.9	9.00±0.08
-148.0±4.9	9.50±0.08
-177.6±4.9	10.00±0.08
-207.2±4.9	10.50±0.08
-236.8±4.9	11.00±0.08
-266.4±4.9	11.50±0.08
-296.0±4.9	12.00±0.08
-325.6±4.9	12.50±0.08
-355.2±4.9	13.00±0.08
-384.8±4.9	13.50±0.08
-414.4±4.9	14.00±0.08

## 90 DEVICE COSTS

Table 3 Costs of the electronic components used to assemble the device.

Item	Material	Code	Amount	Costs	Electronic Catalog
1	Development Board	Arduino Uno	1	\$22.00	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Arduino/A000066?qs=sGAEpiMZZMurtJ7VwBT10XiUIZoreDo05Suo49voq1Q%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Arduino/A000066?qs=sGAEpiMZZMurtJ7VwBT10XiUIZoreDo05Suo49voq1Q%3d</a>
2	Potentiometric electrode	Glass - pH	1	\$35.10	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Extech/601500?qs=sGAEpiMZZMs4AFwHyzhTmykx5FJi9LfqBE5dfIUvgY%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Extech/601500?qs=sGAEpiMZZMs4AFwHyzhTmykx5FJi9LfqBE5dfIUvgY%3d</a>
3	Opamp	LMC6041	1	\$2.27	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/LMC6041AIM?qs=sGAEpiMZZMtCHixnSjNA6JKxGj6zye%252bU21%252b8PZEhTE%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/LMC6041AIM?qs=sGAEpiMZZMtCHixnSjNA6JKxGj6zye%252bU21%252b8PZEhTE%3d</a>
4	9V-Battery	6LR61	2	\$4.76	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Panasonic-Battery/6LF22XWA-B12?qs=sGAEpiMZZMuXcNZ3lnzYhXYswiW5VD0xuMcyEUy4HRl%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Panasonic-Battery/6LF22XWA-B12?qs=sGAEpiMZZMuXcNZ3lnzYhXYswiW5VD0xuMcyEUy4HRl%3d</a>
5	9V Battery Snaps	Snap	2	\$1.48	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Keystone-Electronics/232?qs=sGAEpiMZZMs53hqUvtGaal96fsGiPnZgh58Eickijk%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Keystone-Electronics/232?qs=sGAEpiMZZMs53hqUvtGaal96fsGiPnZgh58Eickijk%3d</a>
6	Female audio jack	STX-3200-3NB	1	\$1.09	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Kycon/STX-3200-3NB?qs=sGAEpiMZZMv0W4pxf2HiVwWP6ujO54M5nmxE4N8IBHs%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Kycon/STX-3200-3NB?qs=sGAEpiMZZMv0W4pxf2HiVwWP6ujO54M5nmxE4N8IBHs%3d</a>
7	Breadboard	GS-400	1	\$5.65	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Global-Specialties/GS-400?qs=sGAEpiMZZMtm36YkO3IqkxGFatzh1vVg">https://www.mouser.com/ProductDetail/Global-Specialties/GS-400?qs=sGAEpiMZZMtm36YkO3IqkxGFatzh1vVg</a>
8	Resistor	1.0 ohm	1	\$0.20	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity-">https://www.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity-</a>

					Neohm/CBT25J1R0?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda2%2fwGMz2hofsMiGYdifYzSiI%3d
9	Resistor	8.2 ohm	1	\$0.36	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Kamaya/RC1-48R2JB?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda260u%252bQsOF0S4y1mwKh4nZ7g%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Kamaya/RC1-48R2JB?qs=sGAEpiMZZMuDPtTs5Gda260u%252bQsOF0S4y1mwKh4nZ7g%3d</a>
10	Jumper wires	ZW-MM-10 Male-Male	40	\$4.43	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/BusBoard-Prototype-Systems/ZW-MM-10?qs=sGAEpiMZZMvh1pRuiUVjFZ0aAJXGPyuN92Sy29RqEiiz7sGtW7I80A%3d%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/BusBoard-Prototype-Systems/ZW-MM-10?qs=sGAEpiMZZMvh1pRuiUVjFZ0aAJXGPyuN92Sy29RqEiiz7sGtW7I80A%3d%3d</a>
11	BNC Connector	Female	1	\$5.60	<a href="https://www.mouser.com/ProductDetail/Amphenol-RF/034-1065-12G?qs=sGAEpiMZZMsNqjma29dfSkoxpWW8pWXBm1gU3udOMmU%3d">https://www.mouser.com/ProductDetail/Amphenol-RF/034-1065-12G?qs=sGAEpiMZZMsNqjma29dfSkoxpWW8pWXBm1gU3udOMmU%3d</a>
12	Headphone	Earbud	1	\$2.56	<a href="https://www.amazon.com/Wicked-Audio-Brawl-Earbud-Headphones/dp/B01DZ975X2/ref=sr_1_17?s=aht&amp;ie=UTF8&amp;qid=1539118100&amp;sr=1-17&amp;keywords=headphone&amp;refinements=p_36%3A100-300">https://www.amazon.com/Wicked-Audio-Brawl-Earbud-Headphones/dp/B01DZ975X2/ref=sr_1_17?s=aht&amp;ie=UTF8&amp;qid=1539118100&amp;sr=1-17&amp;keywords=headphone&amp;refinements=p_36%3A100-300</a>
Total				\$85.50	

## ACCESSIBILITY SOURCE CODE FOR ARDUINO SOFTWARE (IDE)

95/\*

```
# Codes for Aecessibility-pHmeter V1.0.
# Author: Samuel C Costa and Julio Cesar B Fernandes
# Date: 2018.10.11
# Version: 1.1
```

100\*/

```
/*Variables declaration and Pins from Arduino*/
#include <math.h>
#define OutputOpAmpPin 0 //Output OpAmp LMC6041 to Arduino Analog Input 0
unsigned long int AverageValue; //Store the average value of the glass electrode
```

105/\*Integer variables declaration\*/

```
int Buf[10]; //Data array
int Temporary; //Variable to temporary storage
int Headphone = 12; //Define pin 12 from Arduino (digital output) to use with Headphone
int Count1; //Variable for counting
```

110int Count2; //Variable for counting

```
/*Float point variables declaration*/
float MillivolValue;
```

---

```
float pHValue;
float LogSoundFrequency;
115 float SoundFrequency;
void setup()
{
  pinMode(Headphone,OUTPUT); //Define digital pin 12 from arduino as output
  Serial.begin(9600); //Define data acquisition rate from serial input
120 Serial.println("Ready"); //Test the serial monitor
}
void loop()
{
  for(Count1=0;Count1<10;Count1++) //Take 10 values of potential from interface OpAmp-Glass electrode for smooth the value
125 {
    Buf[Count1]=analogRead(OutputOpAmpPin); //Reading of the Analog-to-Digital Input from Arduino
    delay(10); //Waiting 10 ms
  }
  for(Count1=0;Count1<9;Count1++) //Sort the analog from small to large
130 {
    for(Count2=Count1+1;Count2<10;Count2++)
    {
      if(Buf[Count1]>Buf[Count2])
      {
135 Temporary=Buf[Count1];
        Buf[Count1]=Buf[Count2];
        Buf[Count2]=Temporary;
      }
    }
  }
140 }
  AverageValue=0;
  for(Count1=2;Count1<8;Count1++) //Take the average value of 6 center sample
  AverageValue+=Buf[Count1];
  MillivoltValue = (float)AverageValue*5200/1024/6; //Convert the average digital value into millivolt. 10 bits A/D converter (2^10=1024)
145 MillivoltValue = MillivoltValue - 360; //Adjust to correct summing circuit since arduino do not measure negative values
  Serial.print(" mV:");
```

---

```
Serial.print(MilivoltValue,2);  
LogSoundFrequency=2.46803 - 0.0008462*MilivoltValue; //Convert potential of the glass electrode from millivoltage to logarithm of the sound frequency  
SoundFrequency=pow(10,LogSoundFrequency); //Convert logarithm of the sound frequency to sound frequency in Hertz  
150 {  
    if (SoundFrequency > 130 and SoundFrequency <= 134)  
        SoundFrequency = 131;  
    if (SoundFrequency > 134 and SoundFrequency <= 143)  
        SoundFrequency = 139;  
155 if (SoundFrequency > 143 and SoundFrequency <= 150)  
        SoundFrequency = 147;  
    if (SoundFrequency > 150 and SoundFrequency <= 160)  
        SoundFrequency = 156;  
    if (SoundFrequency > 160 and SoundFrequency <= 170)  
160 SoundFrequency = 165;  
    if (SoundFrequency > 170 and SoundFrequency <= 180)  
        SoundFrequency = 175;  
    if (SoundFrequency > 180 and SoundFrequency <= 190)  
        SoundFrequency = 185;  
165 if (SoundFrequency > 190 and SoundFrequency <= 201)  
        SoundFrequency = 196;  
    if (SoundFrequency > 201 and SoundFrequency <= 213)  
        SoundFrequency = 208;  
    if (SoundFrequency > 213 and SoundFrequency <= 227)  
170 SoundFrequency = 220;  
    if (SoundFrequency > 227 and SoundFrequency <= 240)  
        SoundFrequency = 233;  
    if (SoundFrequency > 240 and SoundFrequency <= 254)  
        SoundFrequency = 247;  
175 if (SoundFrequency > 254 and SoundFrequency <= 269)  
        SoundFrequency = 262;  
    if (SoundFrequency > 269 and SoundFrequency <= 285)  
        SoundFrequency = 277;  
    if (SoundFrequency > 285 and SoundFrequency <= 302)  
180 SoundFrequency = 294;
```

---

```
if (SoundFrequency > 302 and SoundFrequency <= 320)
  SoundFrequency = 311;
if (SoundFrequency > 320 and SoundFrequency <= 340)
  SoundFrequency = 330;
185 if (SoundFrequency > 340 and SoundFrequency <= 360)
  SoundFrequency = 349;
  if (SoundFrequency > 360 and SoundFrequency <= 381)
    SoundFrequency = 370;
  if (SoundFrequency > 381 and SoundFrequency <= 403)
190 SoundFrequency = 392;
  if (SoundFrequency > 403 and SoundFrequency <= 427)
    SoundFrequency = 415;
  if (SoundFrequency > 427 and SoundFrequency <= 453)
    SoundFrequency = 440;
195 if (SoundFrequency > 453 and SoundFrequency <= 480)
  SoundFrequency = 466;
  if (SoundFrequency > 480 and SoundFrequency <= 508)
    SoundFrequency = 494;
  if (SoundFrequency > 508 and SoundFrequency <= 539)
200 SoundFrequency = 523;
  if (SoundFrequency > 539 and SoundFrequency <= 570)
    SoundFrequency = 554;
  if (SoundFrequency > 570 and SoundFrequency <= 604)
    SoundFrequency = 587;
205 if (SoundFrequency > 604 and SoundFrequency <= 640)
  SoundFrequency = 622;
  if (SoundFrequency > 640 and SoundFrequency <= 660)
    SoundFrequency = 659;
  }
210 LogSoundFrequency= log10(SoundFrequency);
  MillivoltValue = (LogSoundFrequency - 2.46803)/(- 0.0008462);
  pHValue = 7 - 0.01923*MillivoltValue; //Convert potential of the glass electrode from millivolt to pH using Nernst equation
  Serial.print("  pH:");
  Serial.print(pHValue,4);
```

---

```
215 Serial.print(" Sound Frequency:");  
    Serial.print(SoundFrequency,6);  
    Serial.println(" ");  
    tone(Headphone, SoundFrequency); // Play the musical note that corresponds measured pH  
    delay(1000);  
220 noTone(Headphone);  
    delay(5000);  
}
```