



Sistemas miniaturizados basados em papel: Uma alternativa de instrumento didático para o ensino de Química
Sistemas miniaturizados en papel: una herramienta didáctica alternativa para la enseñanza de la Química
Paper-based miniaturized systems: An alternative didactic tool for teaching Chemistry

Lucas da Costa Duarte¹
Alessandro Silva de Oliveira²

Resumo

Este trabalho descreve aspectos relacionados ao uso de dispositivos analíticos baseados em papel, como alternativa instrumental para atividades experimentais do laboratório de Química. Devido a diversos obstáculos, as escolas do Brasil encontram-se com muitas limitações para explorar a abordagem prática no Ensino de Química. Baseado nisso, propomos um instrumento miniaturizado que foi desenvolvido pelo Laboratório de Microfluídica e Eletroforese voltado para a educação, explorando a utilização das ferramentas alternativas de dispositivos microfluídicos baseados em papel. O objetivo foi desenvolver experimentos relacionados a análise de pH em uma proposta pedagógica para o Ensino de Química. Com a realização da atividade, os estudantes puderam aprender a fabricar sua própria ferramenta analítica utilizando recursos presentes no seu cotidiano. A partir do desenvolvimento do instrumento podemos inferir que a interação dos alunos e educadores nas atividades abriu a perspectiva de que os sistemas miniaturizados podem ser empregados em uma abordagem alternativa para o Ensino de Química.

Palavras-chave: Ensino de Química, plataformas alternativas, μ PADs, pH.

Resumen

Este trabajo describe aspectos relacionados con el uso de dispositivos analíticos en papel, como una alternativa instrumental para las actividades experimentales en el laboratorio de Química. Debido a varios obstáculos, las escuelas en Brasil tienen muchas limitaciones para explorar el enfoque práctico en la Enseñanza de la Química. Con base en esto, proponemos un instrumento miniaturizado que fue desarrollado por el Laboratorio de Microfluídica y Electroforesis dirigido a la educación, explorando el uso de herramientas alternativas a los dispositivos microfluídicos basados en papel. El objetivo fue desarrollar experimentos relacionados con el análisis de pH en una propuesta

¹ Doutor em Química. Técnico Administrativo Educacional no Instituto Federal de Goiás – Campus Inhumas – Brasil. Membro *Pós-doc* do Laboratório de Microfluídica e Eletroforese, UFG -Brasil. E-mail: lucascduarte1@gmail.com

² Doutor em Ciências Ambientais. Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil. Orientador nos Programas de Mestrado Profissional em Educação Profissional e Tecnológica (ProfEPT) e Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Educação (PPGE/IFG). Líder do Núcleo de Pesquisas e Estudos na Formação Docente e Educação Ambiental – NUPEDEA. E-mail: alessandro.oliveira@ifg.edu.br



pedagógica para la Enseñanza de la Química. Con la realización de la actividad, los estudiantes pudieron aprender a fabricar su propia herramienta analítica utilizando recursos presentes en su vida diaria. Del desarrollo del instrumento, podemos inferir que la interacción de estudiantes y educadores en las actividades abrió la perspectiva de que los sistemas miniaturizados pueden ser utilizados en un enfoque alternativo a la Enseñanza de la Química.

Palabras clave: Enseñanza de la Química, plataformas alternativas, μ PADs, pH.

Abstract

This work describes aspects related to the use of paper-based analytical devices, as an instrumental alternative for experimental activities in the Chemistry laboratory. Due to several obstacles, schools in Brazil have many limitations to explore the practical approach in Chemistry Teaching. Based on this, we propose a miniaturized instrument that was developed by the Laboratory of Microfluidics and Electrophoresis aimed at education, exploring the use of alternative tools of paper-based microfluidic devices. The objective was to develop experiments related to pH analysis in a pedagogical proposal for Teaching Chemistry. With the completion of the activity, students were able to learn to manufacture their own analytical tool using resources present in their daily lives. From the development of the instrument, we can infer that the interaction of students and educators in the activities opened the perspective that miniaturized systems can be used in an alternative approach to Chemistry Teaching.

Keywords: Teaching Chemistry, alternative platforms, μ PADs, pH.

Introdução

A Química como componente curricular tem sido considerada uma das áreas de grandes dificuldades para os estudantes do Ensino Básico e Ensino Médio no Brasil. De natureza experimental, as práticas em laboratório são importantes no processo de ensino-aprendizagem para a formação de conceitos em aspectos abstratos aos estudantes (BARATIERI, 2008; BORGES, 2002, FERNANDEZ, 2018; ROCHA, 2016). Apesar de simples, estas práticas exigem o uso de laboratório de ciências, que infelizmente, não é uma realidade para a maioria das escolas brasileiras, principalmente quando se trata do ensino público.

Neste âmbito, o uso de tecnologias vem mostrando-se uma ferramenta pedagógica importante e desperta o interesse de estudantes e professores. Para isso tem sido desenvolvidos softwares, aplicativos de celular e equipamentos remotos diversos que mostram como o uso da tecnologia para fins educacionais possibilitam uma aprendizagem dinâmica (LEITE, 2014; SALLES et al., 2014). Como algumas ferramentas estão



presentes em nosso cotidiano, explorar suas aplicabilidades no processo de ensino-aprendizagem é importante para a divulgação e popularização da ciência em sala de aula.

Nesse sentido, os estudos sobre sistemas miniaturizados com dimensões micrométricas e suas aplicações têm obtido grande destaque nos últimos anos. Esta tecnologia pode ser explorada para uma variedade de aplicações e diferentes abordagens. Devido sua simplicidade e baixo custo de fabricação, os dispositivos microfabricados também vem sendo utilizados em regiões que possuem recursos limitados (MARTINEZ et al., 2007; MARTINEZ; PHILLIPS; WHITESIDES, 2008).

Os dispositivos microfluídicos baseados em papel (do inglês, *microfluidic paper-based devices*, μ PADs) destacam-se na classe de sistemas microfabricados por serem instrumentos analíticos miniaturizados com grande caráter inovador, uma vez que permitem substituir ensaios tradicionalmente realizados em laboratórios por processos controlados em microescala utilizando um material simples e acessível (AHMED; BUI; ABBAS, 2016; COLTRO et al., 2014). Tais dispositivos apresentam excelentes vantagens para ensaios químicos incluindo a redução do tempo de análise, o baixo consumo de amostra (da ordem de μ L), o alto desempenho analítico, e a portabilidade, permitindo seu uso fora do ambiente de laboratório (CATE et al., 2013, 2015; NOGUEIRA et al., 2019).

Esses dispositivos podem ser utilizados em experimentos voltados para o Ensino de Química com diversas aplicações, que incluem como análise de biomarcadores do organismo, análise de poluentes ou até mesmo de práticas instrumentais de fabricação desses dispositivos (Figura 1) (JAYAWARDANE et al., 2014; KOESDJOJO et al., 2015; LAI et al., 2019; SMITH; CHEN1; LAND, 2015; WANG; LIN; WANG, 2015; XU et al., 2015). Além, desta variedade de aplicações, o custo médio de cada dispositivo é de 10 centavos, o que o torna cada vez mais atrativo, e uma ótima alternativa para a aplicação de diversas técnicas de química analítica, incluindo as medidas de pH e de titulação.

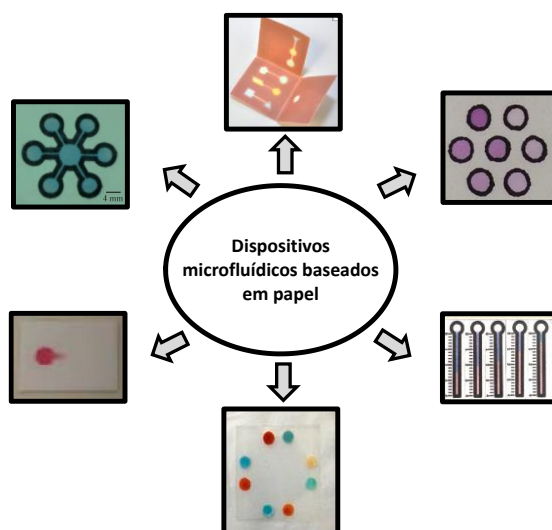


Figura 1. Ejemplos de dispositivos microfluídicos basados en papel utilizados para fins educacionais. Adaptado de Smith e colaboradores, 2015; Xu e colaboradores, 2015; Jayawardane e colaboradores, 2014; Lai e colaboradores, 2019; Koesdjojo e colaboradores, 2015 e Wang e colaboradores, 2015.

Metodologia

Apesar de muito contextualizada em teoria, as práticas volumétricas não são tão recorrentes no Ensino Médio devido a requisição instrumental, exigindo um gasto significativo de reagentes, amostras e instrumentação nos laboratórios para realizar as técnicas. Com base nisso, selecionamos algumas abordagens relacionadas à volumetria de neutralização, utilizadas nas disciplinas práticas de química de uma escola pública do Brasil. Os μ PADs são comumente utilizados em aplicações que envolvem a detecção colorimétrica de determinadas substâncias químicas. A detecção colorimétrica pode ser realizada com instrumentações variadas como scanners, fotocolorímetros, espectrofotômetros, entre outros. Essas ferramentas, apesar de precisas, podem implicar um gasto significativo, não ser tão acessíveis e tão pouco portáteis. Assim, o uso de smartphones representa uma alternativa de baixo custo e portabilidade (HELFER et al., 2017). A combinação de smartphones e dispositivos microfluídicos apresentou-se como uma alternativa para desviar as limitações da instrumentação usual.

O objetivo das abordagens estipuladas foi aplicá-las em eventos envolvendo alunos de escolas públicas e privadas. Essa aplicação ocorreu em dois eventos: o "Espaço das Profissões" realizado pela Universidade Federal de Goiás em Goiânia em 2016, e o



"ENQA nas escolas" realizado em Caldas Novas como parte do Encontro Nacional de Química Analítica em 2018.

A pesquisa foi de natureza qualitativa, e a coleta de dados foi realizada por meio de observações com anotações em um diário de campo (BOGDAN e BIKLEN, 1994; FLICK, 2009). Para a análise dos dados, o método da observação participante foi escolhido.

Resultados e Discussão

Os μ PADs geralmente são fabricados com diferentes materiais que criam barreiras na superfície do papel para confinar uma solução dentro da região delimitada por essa barreira. Atualmente, na literatura, é possível encontrar uma grande variedade de abordagens diferentes para fabricação de μ PADs. Na Tabela 1 estão pontuadas algumas das técnicas que podem ser utilizadas para fabricar esses dispositivos e sua correlação para abordagens em práticas de campo ou em sala de aula.

Tabela 1. Exemplos de métodos de fabricação de μ PADs que podem ser utilizados nas escolas

	Impressão à laser ou jato de tinta	Impressão à cera	Corte manual	Desenho Manual	Estampagem	Jateamento
Instrumentação requerida	Impressora à laser ou jato de tinta e fita adesiva	Impressora à cera, fonte de calor para aquecimento, fita adesiva	Cortadora manual	Canetas ou plotters preenchidos com materiais	Carimbos personalizados	Spray de lacquer ou de cola
Tempo de fabricação	1 – 5 minutos	5 – 10 minutos	> 1 minuto	1 – 5 minutos	> 1 minuto	5 – 10 minutos
Custo médio comparativo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Requer energia	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não



Viabilidade no uso nas escolas	Todo processo pode ser feito na escola	O processo de fabricação deve ser feito em local com impressora à cera	Todo processo pode ser feito na escola	Todo processo pode ser feito na escola	Todo processo pode ser feito na escola	Todo processo pode ser feito na escola
Referência	(WANG; MAHONEY; MEYERHOFF, 2017)	(CARRILHO; MARTINEZ; WHITESIDES, 2009a)	(NIE et al., 2013)	(NIE et al., 2012)	(CURTO et al., 2013)	(CARDOSO et al., 2017)

Dentre os métodos descritos na Tabela 1, os métodos de impressão têm uma ligeira vantagem devido a sua capacidade de fabricar vários dispositivos de uma só vez. Os dispositivos que fazem o uso da barreira de cera têm vantagem devido a esse material ter propriedades químicas e físicas mais interessantes para confinar a solução dentro do papel (CARRILHO; MARTINEZ; WHITESIDES, 2009a; OZER; MCMAHON; HENRY, 2020a). Assim, os μ PADs foram fabricados previamente utilizando a estrutura do Laboratório de Microfluídica e Eletroforese, para serem distribuídos entre os alunos no ambiente escolar. O método permitiu a fabricação de um lote de vários dispositivos sem gasto excessivo de materiais. Para fabricação dos μ PADs foram utilizados: papel filtro quantitativo modelo JP40 que foram impressos em impressora a cera Xerox ColorQube 8570 (Xerox Corporation, Rochester, NY, EUA). (CARRILHO; MARTINEZ; WHITESIDES, 2009b). Os μ PADs foram confeccionadas contendo doze microzonas distribuídas em duas colunas e seis linhas, como pode ser visto na Figura 2. Cada microzona possui 5 mm de diâmetro. Os dispositivos foram desenhados utilizando o software Corel Draw para garantir um design preciso. Em seguida, o design é transferido para o papel através de impressão em cera. Essa etapa é seguida pelo aquecimento dos dispositivos a 150° C por 2 min, onde a cera impressa é derretida e permeia as fibras do papel, formando barreiras hidrofóbicas que têm como objetivo confinar a amostra na região delimitada pela cera. Por fim, para assegurar a integridade do dispositivo e evitar vazamentos de soluções, os dispositivos são cuidadosamente selados, no verso, contra uma folha de poliéster utilizando uma laminadora de documentos. A Figura 2 demonstra como são fabricados esses dispositivos através da impressão.



Figura 3. Representação esquemática do processo de fabricação de μ PADs utilizando a impressão à cera.

Para detecção colorimétrica foram utilizados os próprios aparelhos celulares dos alunos. Eles foram orientados a baixar o aplicativo PhotoMetrix (Figura 4) previamente. O uso dessa ferramenta de detecção pode auxiliar na demonstração prática da utilização das tecnologias atuais, para aplicações variadas que fogem às vezes, apenas do uso cotidiano. Como dito anteriormente, essa contextualização além de ser estimulada pelo proposto na LDB, também é uma alternativa de ferramenta de articulação didática no Ensino de Ciências Naturais.

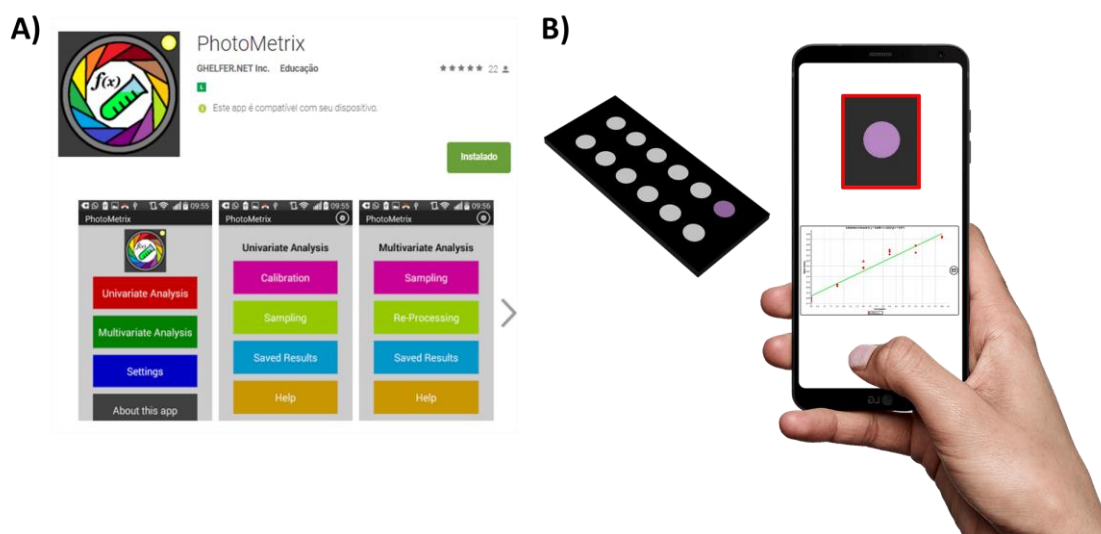


Figura 4. Em (A) aplicativo PhotoMetrix na PlayStore. Em (B) representação esquemática do dispositivo de substrato de papel impresso e o procedimento de captura de imagem pelo smartphone.

Os valores de pH de uma solução aquosa podem ser medidos com o auxílio de indicadores ácido-base. Estes indicadores possuem a propriedade de mudarem de cor em função do pH de uma solução. Os indicadores de acidez podem ser sintéticos ou naturais. Os indicadores naturais se destacam por causar menos impactos ao meio ambiente, uma vez que apresentam menor toxicidade em relação aos sintéticos.

Neste sentido, foram selecionados reagentes químicos que não apresentassem riscos para os alunos. Por isso eles auxiliaram no preparo de um indicador natural a base de extrato de casca de jabuticaba e repolho roxo. As antocianinas presentes nesses frutos e folhas são responsáveis pelas diferentes colorações destes. Esses compostos são derivados do cátion flavilium (Figura 5) bastante reativo. Além disso, as antocianinas apresentam mudança de cores dependendo do pH do meio. Esses compostos presentes na maioria dos tecidos vegetais, possuem fácil obtenção e podem ser descartados sem causar risco considerável ao meio ambiente (FERREIRA, 2016).

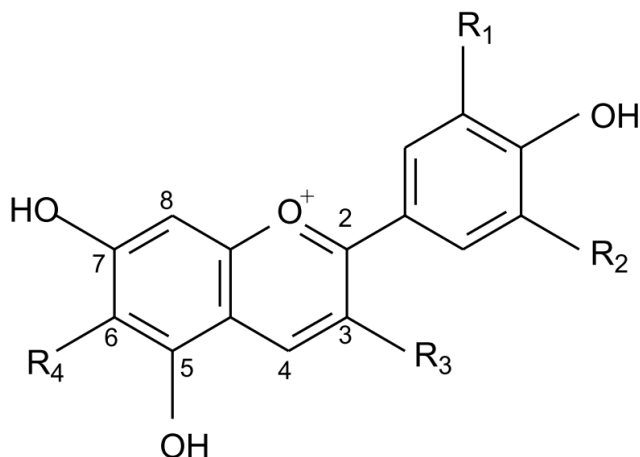


Figura 5. Estructura molecular do cátion flavilium

De acordo com o observado na Figura 6 o indicador de casca de jabuticaba é incolor em soluções neutras e apresenta coloração roseada em valores de pH mais ácidos. Em soluções alcalinas o indicador apresenta coloração esverdeada (até o pH 10). Da mesma forma, o indicador de repolho roxo é incolor em soluções com valores de pH entre 6 e 7. Para valores de pH mais baixos o indicador apresenta coloração rósea, enquanto para valores mais altos é observado tons de verde.

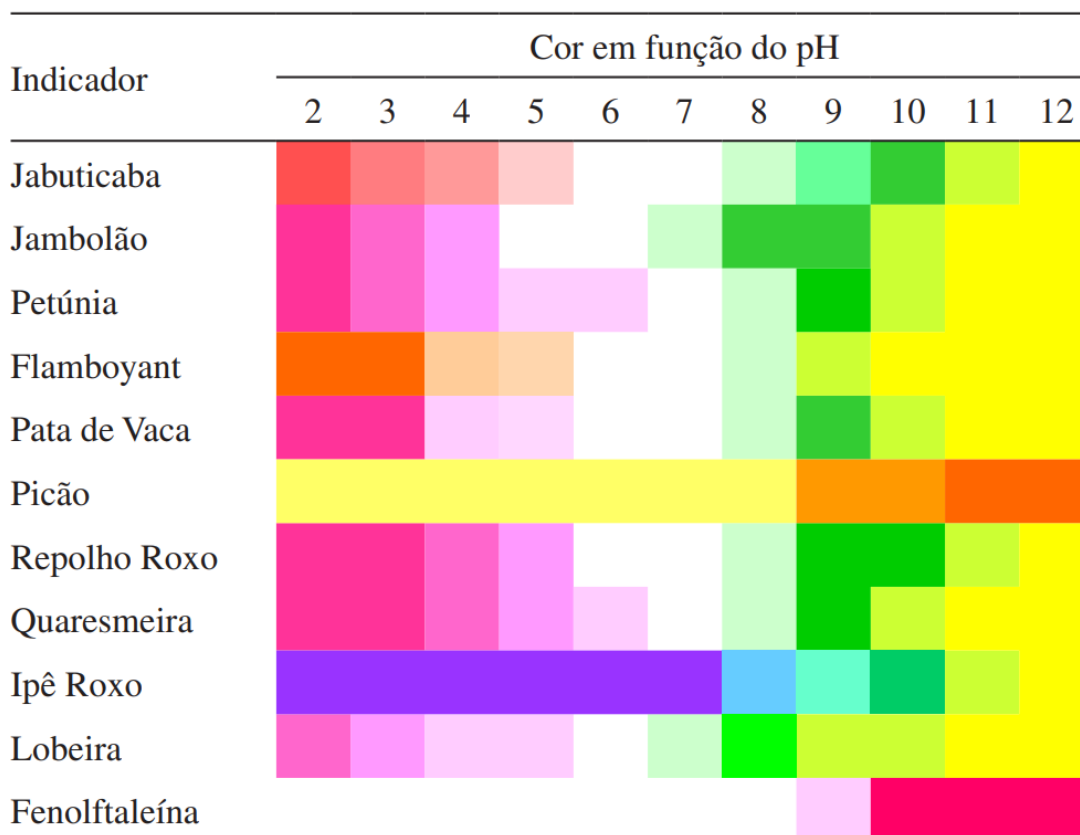


Figura 6. Ilustração da variação de cor dos extratos das espécies de plantas investigadas em função do pH. Adaptado de Guimarães e colaboradores, 2003

O monitoramento de pH foi realizado utilizando as microzonas impressas com cera e os indicadores de jabuticaba e de repolho roxo. Primeiramente a resposta colorimétrica para cada valor de pH foi analisada para definir um padrão de cor como referência, de acordo com a metodologia descrita por anteriormente (DOI). A Figura 7 apresenta a variação de coloração de acordo com a mudança de pH para valores entre 1 a 12 realizada no dispositivo de papel. Os valores de pH analisados no uPAD estão rotulados em cada microzona de detecção. Os valores da relação entre a intensidade de cor e a mudança de pH podem ser vistos na Figura 7B.

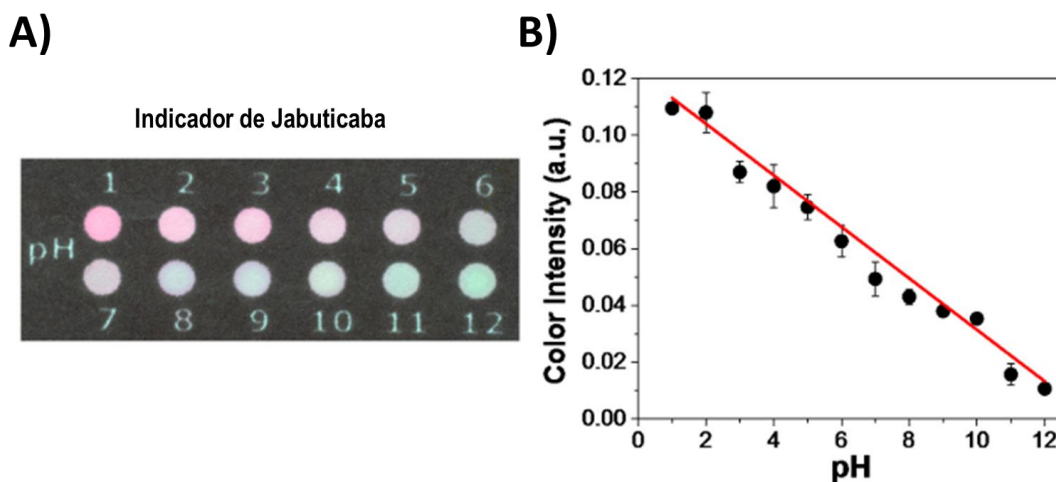


Figura 7. Imagem do uPAD após a realização das reações colorimétrica utilizando soluções com valores de pH variando de 1 a 12. Relação entre a intensidade de cor e a variação de pH. Retirado e adaptado de Nogueira e colaboradores, 2017.

A análise então, ocorreu adicionando 5 μL do indicador natural às microzonas impressas. Após a solução do indicador preencher toda a zona, o dispositivo foi seco em temperatura ambiente durante 5 minutos. Em seguida foi adicionado a amostra de interesse e pode-se observar a mudança de coloração. Posteriormente foi capturada as imagens das zonas utilizando o aplicativo Photometrix o qual permitiu a aquisição da curva de pH em função da concentração das soluções. Produtos comerciais de limpeza e alimentos que fazem parte do cotidiano dos alunos foram selecionados como amostras para o experimento conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Materiais utilizados para análise de pH

Material	pH
Água sanitária	11
Café	5,5
Vinagre	3,5
Suco	4
Água	6,5
Shampoo	6
Leite	6,8

A metodologia empregada proporcionou informações analíticas e valores quantitativos com precisão similar às metodologias convencionais, usando a intensidade de cor de forma prática. Os dados são facilmente obtidos através de uma interface simples



de aplicativo, agilizando a análise de imagens em comparação com dispositivos como scanners.

Essa abordagem reduziu drasticamente a quantidade de amostra e reagentes em cerca de 1000 vezes em relação aos métodos volumétricos clássicos, resultando em baixa geração de resíduos. Essa economia é crucial, especialmente para instituições com recursos limitados, pois muitas vezes os reagentes químicos podem ser caros, pouco disponíveis comercialmente e até tóxicos. Portanto, essa redução de uso contribui para o princípio da Química Verde e proporciona maior segurança no ambiente laboratorial.

Devido à mínima necessidade de equipamentos, todos os alunos puderam participar ativamente e discutir a prática em conjunto com seus colegas. De forma geral, os alunos enfrentaram poucas dificuldades ao manusear os reagentes, já que esses faziam parte do seu cotidiano. Ao aplicarem os conceitos teóricos e ao observarem as mudanças de coloração com ferramentas comuns, perceberam que estudar química pode ser uma experiência descomplicada e altamente relevante para suas vidas.

Conclusões

A experimentação é uma sugestão presente na LDB que estipula a comunicação entre teoria e prática na Química e outras ciências naturais. As aulas experimentais fazem parte de um conjunto de recursos didáticos que podem contribuir para melhoria da aprendizagem do conteúdo por facilitar a compreensão e permitir uma nova perspectiva do que se está sendo trabalhado. Aliado aos mecanismos práticos, o uso de tecnologias usuais e de recursos lúdicos possibilitaram despertar ainda mais o interesse do aluno no que se está sendo trabalhado. Diante disso o uso de plataformas microfluídicas, em especial os μ PADs permitiram que os alunos explorassem todas essas alternativas com uma visão dinâmica de instrumentação alternativa no processo de aprendizagem dos conceitos da Química.

REFERENCIAS

- BARATIERI, M.; BASSO, S.; BORGES, R. **Opinião dos estudantes sobre a experimentação em química no ensino médio.** 2008.
- BORGES, A. **Novos rumos para o laboratório escolar de ciências.** 2002.
- CARRILHO, E.; MARTINEZ, A. W.; WHITESIDES, G. M. **Understanding Wax Printing: A Simple Micropatterning Process for Paper-Based Microfluidic.** v. 81, n.



16, p. 7091–7095, 2009. a.

FERNANDEZ, C. **Formação de professores de Química no Brasil e no mundo.** v. 32, n. 94, p. 205–224, 2018.

JAYAWARDANE, B. M.; WEI, S.; MCKELVIE, I. D.; KOLEV, S. D. **Microfluidic paper-based analytical device for the determination of nitrite and nitrate.** v. 86, n. 15, p. 7274–7279, 2014.

KOESDJOJO, M. T.; PENG PUMKIAT, S.; WU, Y.; BOONLOED, A.; HUYNH, D.; REMCHO, T. P.; REMCHO, V. T. **Cost effective paper-based colorimetric microfluidic devices and mobile phone camera readers for the classroom.** v. 92, n. 4, p. 737–741, 2015.

LAI, H.; LI, Z.; ZHU, S.; CAI, L.; XU, C.; ZHOU, Q. **Naked-eye detection of aluminum in gastric drugs on a paper-based analytical device.** 2019.

LEITE, B. S. **M-learning: o uso de dispositivos móveis como ferramenta didática no Ensino de Química.** v. 22, n. 03, p. 55, 2014.

MARTINEZ, A. W.; PHILLIPS, S. T.; BUTTE, M. J.; WHITESIDES, G. M. **Patterned Paper as a Platform for Inexpensive , Low-Volume , Portable.** v. 46, p. 1318–1320, 2007.

MARTINEZ, A. W.; PHILLIPS, S. T.; WHITESIDES, G. M. **Three-dimensional microfluidic devices fabricated in layered paper and tape.** v. 105, p. 19606–19611, 2008.

OZER, T.; MCMAHON, C.; HENRY, C. S. **Advances in Paper-Based Analytical Devices.** v. 13, n. 1, p. 1–25, 2020. a.

OZER, T.; MCMAHON, C.; HENRY, C. S. **Advances in Paper-Based Analytical Devices.** v. 13, p. 85–109, 2020. b.

ROCHA, J. S.; VASCONCELOS, T. C. **Dificuldades de aprendizagem no ensino: algumas reflexões.** p. 10, 2016.

SALLES, M. O.; MELONI, G. N.; DE ARAUJO, W. R.; PAIXÃO, T. R. L. C. **Explosive colorimetric discrimination using a smartphone, paper device and chemometrical approach.** v. 6, n. 7, p. 2047–2052, 2014.

SMITH, S.; CHEN, K. M. U. G. H.; LAND, S. N. S. K. P. M. H. C. M. B. M. S. P. T.-



H. J. K. Paper-based smart microfluidics for education and low-cost diagnostics. v. Volume 111, n. Number 11/12, p. 1–10, 2015.

WANG, B.; LIN, Z.; WANG, M. Fabrication of a paper-based microfluidic device to readily determine nitrite ion concentration by simple colorimetric assay. v. 92, n. 4, p. 733–736, 2015.

WANG, X.; MAHONEY, M.; MEYERHOFF, M. E. Inkjet-Printed Paper-Based Colorimetric Polyion Sensor Using a Smartphone as a Detector. v. 89, n. 22, p. 12334–12341, 2017.