

INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE QUÍMICA: O PROTÓTIPO DE HIDROGÊNIO VERDE COMO RECURSO DIDÁTICO À LUZ DA ABORDAGEM CTSA

Calliu C. Barbosa¹; Caroline de G. Sampaio²; Manuel B. dos S. Neto³

^{1, 2} Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

³ Universidade Estadual do Ceará – UECE

calliu.barbosa04@aluno.ifce.edu.br; carolinesampaio@ifce.edu.br; manuel.bandeira@uece.br

Palavras-Chave: formação docente, energias renováveis, eletrólise da água.

Introdução

As mudanças climáticas têm intensificado debates entre as grandes potências mundiais, sobretudo em relação à necessidade de transições na matriz energética global, visando mitigar os impactos da queima de combustíveis fósseis. Entre os principais efeitos destacam-se os desequilíbrios ambientais, a elevação das temperaturas médias dos oceanos e do degelo polar, o aumento da ocorrência de incêndios em florestas tropicais e as ameaças à segurança alimentar, entre outros. Os hidrocarbonetos de origem fóssil, como carvão mineral, gás natural, óleo diesel, gasolina e querosene, permanecem amplamente utilizados nos setores econômicos e sociais, liberando gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera e agravando o aquecimento global (IPCC, 2023; Mello; Malerba; Tupinambá, 2024).

O hidrogênio (H_2), quando obtido por processos limpos, configura-se como uma fonte renovável de energia com elevado potencial ambiental e econômico. Entre as rotas de produção, destaca-se a eletrólise da água, na qual energias renováveis, como a solar e eólica, são utilizadas como fonte elétrica para promover a dissociação da molécula de água, resultando na geração dos gases oxigênio e hidrogênio. Esse processo, segundo a taxonomia das cores do hidrogênio, é classificado como a produção de hidrogênio verde (H_2V), por não emitir GEE durante sua obtenção (EPE, 2022; Kumar; Himabindu, 2019).

Os três tipos de eletrolisadores mais utilizados para a produção de hidrogênio de baixo carbono, são: alcalinos (AWE – *Alkaline Water Electrolysers*), de óxido sólido (SOE – *Solid Oxide Electrolysers*) e de membrana de troca de prótons (PEM – *Polymer Electrolyte Membrane*). Esses dispositivos diferenciam-se principalmente pelas condições operacionais, pelos íons transportados e pelo tipo de eletrólito empregado no processo de eletrólise (Kumar; Himabindu, 2019).

A implementação desses equipamentos no contexto educacional, especialmente em sala de aula, enfrenta desafios relacionados tanto à complexidade dos aparatos e mecanismos tecnológicos quanto aos elevados custos envolvidos. Um estudo recente de Chiovitti (2025) investigou as diversas nuances do H_2V em ambiente escolar, ainda que com foco no Ensino Médio. Nesse cenário, a prototipação de baixa fidedignidade, conforme discutido por Manzo e seus colaboradores (2022), apresenta-se como uma alternativa viável e estratégica, possibilitando a demonstração, em escala laboratorial, dos processos de síntese do hidrogênio verde de maneira acessível e didática.

Inserir a temática da produção de hidrogênio e o conjunto de conhecimentos que compõem esse arcabouço tecnológico na formação de professores de Química é de suma importância, uma vez que se torna urgente prepará-los para discutir problemáticas de caráter “glocal” – termo que abrange contextos do planeta, regionais, nacionais e locais. Exemplos

claros são as mudanças climáticas e os desafios decorrentes desse cenário (Pedrosa, 2018). Além disso, é essencial que as propostas voltadas à formação docente despertem a criticidade e a reflexão de forma holística, articulando teoria e prática, reflexão e ação, planejamento e pesquisa (Ribeiro et al., 2024).

Nessa perspectiva, a abordagem Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) reforça a criticidade necessária ao processo formativo, ao evidenciar que a ciência e a tecnologia não possuem um papel exclusivamente benéfico ou neutro, podendo também gerar impactos negativos significativos sobre a sociedade e o meio ambiente (Santos; Mortimer, 2002; Angotti; Auth, 2001; Vaciloto et al., 2019). Dessa forma, o enfoque CTSA contribui também para o desenvolvimento do pensamento crítico dos professores em formação inicial, ou continuada, ao inseri-los em debates que articulam dimensões sociais, políticas, ambientais e econômicas vinculadas à ciência e à tecnologia (Akahoshi et al., 2018).

A partir desse preâmbulo, formulou-se a seguinte questão norteadora: Como a elaboração de um protótipo de H_2V , aliado a abordagem CTSA, pode contribuir para a capacitação de futuros professores(as) da disciplina de Química?

Diante disso, este trabalho teve como objetivo analisar a construção de um protótipo de eletrólise, similar ao modelo alcalino (AWE), elaborado com materiais de fácil acesso, para a produção de H_2V em escala laboratorial. O dispositivo pode ser utilizado também em aulas de Química da educação básica, articulado a conteúdos, tais como: reações de oxirredução, pilhas e eletrólise, eletroquímica, termodinâmica, além do estudo dos gases.

Material e Métodos

A construção do protótipo inspirado em um eletrolisador alcalino para a produção de H_2V , foi realizada com materiais específicos para garantir eficiência e durabilidade. Os eletrodos foram confeccionados a partir de barras roscadas de aço inoxidável, com três eletrodos por semi-célula, utilizando porcas e arruelas de metal inoxidável de 6mm de diâmetro interno, sendo que as arruelas apresentavam 25mm de diâmetro externo para facilitar a superfície de contato com o eletrólito.

Os dois potes de vidro, com capacidade de 1.650 mL, foram adaptados com tampas de bambu vedadas com borracha, perfuradas com o auxílio de broca para madeira, possibilitando a fixação dos eletrodos e dos *nipples* de 1/4" destinados à saída de gás (um por tampa). Aos *nipples*, foram acopladas mangueiras flexíveis de 1/4" de diâmetro interno, responsáveis por interligar os potes maiores aos menores, de 250 mL, utilizados para o borbulhamento dos gases. Eventuais folgas resultantes dos furos foram vedadas com cola de silicone, evitando vazamentos de gás, assim como o cano de PVC empregado na interligação entre os dois potes, assegurando a estanqueidade da solução.

O sistema foi desenvolvido com base no princípio dos vasos comunicantes, assegurando a distribuição uniforme da solução eletrolítica entre os recipientes. Essa solução foi preparada com água deionizada ou ultrapura e hidróxido de potássio (KOH, da marca Dinâmica®, 85% de pureza, densidade 2,11 kg/L), dissolvido a uma concentração de 5 M. Essa configuração previne precipitações e minimiza reações indesejadas com partículas de impurezas dissolvidas.

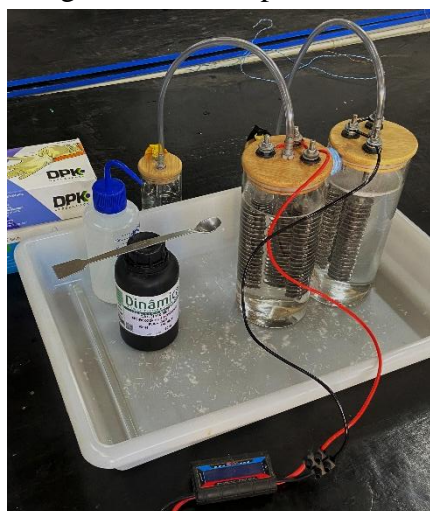
Durante a operação, foram monitorados parâmetros elétricos fundamentais fornecidos por um painel solar de 250 W (modelo ZSH-250P6, marca Zatech®; dimensões: 1640 mm x 992 mm x 40 mm), operando sob plena incidência solar, para alimentar o eletrolisador. A condução da corrente elétrica foi realizada por fios de 2,5 mm de diâmetro, nas cores vermelho

e preto. Foram registrados os seguintes valores: corrente de 4,96 A, tensão de 29,38 V e uma potência consumida de 145,7 W. Esses dados são essenciais para a avaliação da eficiência do processo de eletrólise.

Ademais, é fundamental observar medidas de segurança, como o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), como jaleco, luvas, máscara e óculos de proteção. Adicionalmente, o manuseio cuidadoso do eletrólito e a garantia de boa ventilação no ambiente experimental.

Assim, inclui-se a este resumo, duas imagens: a primeira mostrando o protótipo educacional montado e o aparato experimental (Figura 1), enquanto a segunda exibe o multímetro digital, indicando amperagem (A), voltagem (V) e potência (W), juntamente com o painel solar policristalino utilizado (Figura 2).

Figura 1 – Protótipo de H₂V



Fonte: Autores (2025)

Figura 2 – Painel solar e multímetro digital



Fonte: Autores (2025)

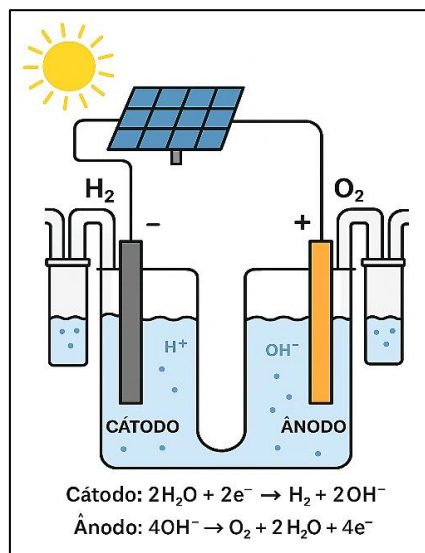
A construção e aplicação do protótipo tiveram como foco principal contribuir para a formação de futuros professores de Química. Essa experiência foi realizada com uma turma de 12 (doze) licenciandos do 5º semestre do curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), *campus* Maracanaú, no contexto da disciplina de *Didática do Ensino de Química*. O protótipo foi utilizado como recurso didático para a observação e compreensão do processo de síntese do H₂V e de como essa fonte energética está relacionada a questões contemporâneas de cunho CTSA.

Resultados e Discussão

O protótipo de eletrólise alcalina da água para produção de hidrogênio verde, baseia-se na dissociação da molécula de água (H₂O) em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂), promovida por uma fonte elétrica externa renovável (painel fotovoltaico ou reator eólico). Nesse processo, emprega-se um eletrólito alcalino, geralmente uma solução de hidróxido de potássio (KOH), ou hidróxido de sódio (NaOH), que favorece a condução iônica entre os eletrodos fabricados comumente de aço inoxidável, níquel ou cobalto. No cátodo (eletrodo negativo), ocorre a redução, com formação de gás hidrogênio (H₂) e íons hidroxila (OH⁻). Já no ânodo (eletrodo positivo), os íons hidroxila sofrem oxidação, liberando oxigênio (O₂) e regenerando moléculas de água (Palhares, 2016; Kumar; Himabindu, 2019).

Assim, o hidrogênio é coletado no cátodo e o oxigênio no ânodo. A relação entre os gases produzidos é de dois volumes de hidrogênio para um volume de oxigênio (2:1), o que é característico da eletrólise da água. Este processo, bem como as semirreações envolvidas nos eletrodos podem ser verificados no desenho ilustrativo (Figura 3), a seguir:

Figura 3 – Esboço do protótipo e semirreações nos eletrodos

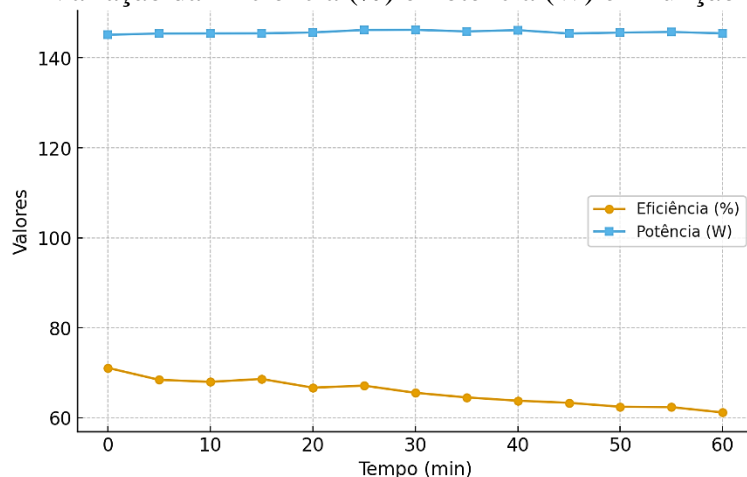


Fonte: Autores (2025).

Durante o funcionamento do protótipo em questão, observou-se que as bolhas formadas no ânodo apresentavam maior diâmetro e se desprendiam da solução mais lentamente, enquanto as bolhas geradas no cátodo eram menores, mais voláteis e apresentavam aspecto esbranquiçado. Essa diferença está associada à proporcionalidade entre as quantidades de moléculas liberadas de cada gás no processo eletrolítico.

Com o intuito de compreender melhor o desempenho do sistema, avaliou-se o parâmetro de eficiência ao longo de um período de 60 minutos (Gráfico 1), analisando-se a conversão de energia elétrica em hidrogênio. Tal análise é fundamental, uma vez que a eficiência influencia diretamente o custo e a viabilidade da produção. Quanto maior a eficiência, menor o desperdício energético, tornando o processo mais sustentável e economicamente vantajoso (Silva; Vasconcellos; Ferraz, 2023). Isso também permite identificar pontos de melhoria, resistividade, deficiências e comparativos com outras criações (Sousa, 2013).

Gráfico 1 - Variação da Eficiência (%) e Potência (W) em função do tempo



Fonte: Autores (2025).

Recorrendo ao Gráfico 1, percebe-se que a eficiência, definida como a razão entre a energia química do H₂ produzido e a energia elétrica consumida, multiplicado por 100, é desenvolvida pelas Equações 1, 2 e 3, adaptadas de Bailón, Rodriguez e Woocay (2021):

$$E_{química} = V_{H_2} \times PCI_{H_2} \quad (Eq. 1)$$

$$E_{elétrica} = V \times I \times t \quad (Eq. 2)$$

$$\eta (\%) = \frac{E_{química}(H)}{E_{elétrica}} \times 100 \quad (Eq. 3)$$

Onde (V_{H_2}) corresponde ao volume de hidrogênio produzido, expresso em litros, e (PCI_{H_2}) representa o poder calorífico inferior do gás hidrogênio, cujo valor é 120 MJ/kg (Equação 1). Na equação seguinte, (V) indica a tensão em volts, (I) a intensidade da corrente em amperes e (t) o tempo de operação em segundos.

Nos primeiros 25 minutos o percentual de eficiência, manteve-se relativamente estável, atingindo seu valor máximo entre 65% e 73%. Após esse período, houve uma leve queda neste parâmetro, possivelmente devido ao acúmulo de gases no sistema e a variação da intensidade de luz solar. A potência consumida, por sua vez, manteve-se em torno de 145W durante todo o experimento com pequenas oscilações, sugerindo que o sistema funcionou de forma constante, mesmo com variações na eficiência.

Esses dados demonstraram que o protótipo é viável para produção de H₂V, mas ajustes adicionais, como o controle da temperatura e melhorias no sistema de ventilação e pressão, além de testes com concentrações distintas do eletrólito, podem otimizar o seu desempenho (Sousa, 2013).

No tocante a formação dos licenciandos, com enfoque na abordagem CTSA, trouxemos pontos e contrapontos relacionados ao uso dessa fonte de energia renovável, com ênfase nas controvérsias socio-científicas e nos impactos ambientais que envolvem a síntese, prospecção, consumo energético, estocagem e transporte do hidrogênio. Entre os aspectos considerados, incluem-se a biodegradação de turbinas, cataventos e painéis solares; a poluição sonora oriunda dos parques eólicos; perdas de habitat para a fauna marinha decorrentes da instalação de usinas eólicas *offshore* em áreas costeiras e, como consequência, os prejuízos à atividade pesqueira (Mello; Malerba; Tupinambá, 2024).

Os alunos foram incentivados a debater esses assuntos mencionados, analisando os entraves e propondo possíveis soluções para as situações-problema apresentadas. Imbricado a essa dinâmica, muitos recorreram a exemplos de sua própria realidade, o que favoreceu um diálogo mais interdisciplinar e contextualizado. Esse processo possibilitou, ainda, o aprofundamento científico e tecnológico, sustentado pela consulta à literatura acadêmica, incluindo artigos de periódicos e trechos de *e-books*.

Finalmente, os discentes em formação inicial, relataram a importância de vivenciar momentos como este para aprofundar o conhecimento e a reflexão acerca das fontes de energia renováveis na atualidade, considerando a relevância desses esclarecimentos em suas práticas pedagógicas futuras. Ressaltaram, ainda, a necessidade de uma formação que transcenda a disciplina de Química e a práxis pedagógica tradicionalmente abordadas no curso de licenciatura em Química, concentrando também a dimensão tecnológica e seus contributos para o processo educativo.



Conclusões

Observamos que o protótipo de eletrólise alcalina para a produção de H_2V , embora tenha apresentado resultados promissores, possui algumas limitações que merecem atenção. Primeiramente, a vedação das tampas dos potes não foi ideal, resultando em possíveis perdas de gás e comprometendo a eficiência do sistema. A inclusão de um mecanismo de travamento nas tampas poderia mitigar esse problema.

Para aprimorar o protótipo, futuras pesquisas poderiam focar na melhoria da vedação, na inclusão de diafragmas, na testagem de outras concentrações do eletrólito e na otimização do distanciamento dos eletrodos. Além disso, investir em fontes de energia renovável, materiais alternativos e em técnicas que reduzam o consumo energético seria essencial para a viabilidade do H_2V como recurso didático-pedagógico e sustentável.

Do mesmo modo, esta investigação primou pela valorização da democratização, disseminação e equidade do conhecimento, ao colocar em pauta um avolumado de compreensões claras e acessíveis sobre o hidrogênio verde, contemplando seus aspectos teóricos, tecnológicos, sociais e empíricos.

Assim, o protótipo serve como uma base para futuros avanços, contribuindo tanto para a formação de professores quanto para a discussão sobre sustentabilidade. Ao passo que desenvolveu habilidades e competências cruciais ao professorado, através de um olhar crítico e reflexivo que lança mão de atividades experimentais totalmente arraigadas no tradicionalismo das aulas de Química, mas trazem sobretudo, o viés social e ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento e incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa (Processo nº 88887.975456/2024-00). Estendem, igualmente, seus agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), pelo apoio institucional.

Referências

- AKAHOSHI, L. H.; SOUZA, F. L.; RIBEIRO MARCONDES, M. E. Enfoque CTSA em materiais instrucionais produzido por professores de química. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, Curitiba, v. 11, n. 3, 2018. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/6728>. Acesso em: 15 set. 2025.
- ANGOTTI, J. A. P.; AUTH, M. A. A contextualização no ensino de ciências. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 13, p. 9-11, 2001.
- BAILÓN, R.; RODRÍGUEZ, J.; WOOCAY, A. Energy Efficiency Analysis of a PEM Electrolyzer and a PEM Hydrogen Fuel Cell. In: **Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM**, Pachuca, 22-24 set. 2021. 10 p. Disponível em: https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A4_114.pdf. Acesso em: 23 set. 2025.
- CHIOVITTI, S. L. **Hidrogênio Verde**: uma abordagem CTS no ensino de Química. 2025. Texto (Produto Educacional) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP). Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1000258>. Acesso em: 16 set. 2025.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂)**. Brasília: EPE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mmeapresenta-aocnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-dohidrogenio-pnh2>. Acesso em: 15 set. 2025.
- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Relatório Longo 2023** (versão em português). Brasília: MCTI / Sirene, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.



KUMAR, S; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Material Science for Energy Technologies*, v.2, 3, p442-454, dez. 2019.

MANZO, B. F.; CALDAS, M. M.; ALVES, T. F.; TOURINHO, F. S. V.; PREIS, L. C. Prototipação e validação: não é só ciência, é experiência, facilidade e dinamismo. In: TOURINHO, F. S. V.; CALDAS, M. M.; FERMO, V. C.; ALVES, T. F.; SCHUELTER, P. I. (org.). **Desenvolvimento de tecnologias em pesquisa e saúde: da teoria à prática**. 1. ed. São Paulo: Editora Científica Digital, 2022. p. 122–137. DOI: 10.37885/220408593.

MELLO, C. C. A.; MALERBA, J.; TUPINAMBÁ, S. **Da transição energética à transição ecológica: a contribuição da justiça ambiental e um convite ao debate**. Rio de Janeiro: FASE, 2024. ISBN 978-65-87197-13-5. Disponível em: <https://fase.org.br/pt/biblioteca/da-transicao-energetica-a-transicao-ecologica-a-contribuicao-da-justica-ambiental-e-um-convite-ao-debate/>. Acesso em: 25 set. 2025.

PALHARES, D. D. F. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21286/1/Produ%C3%A7%C3%A3oHidrog%C3%A9nioEletr%C3%B3lise.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

PEDROSA, M. A. Educação para a sustentabilidade, educação em ciências, formação e desenvolvimento de professores de ciências. *Revista Extensão & Sociedade*, [S. l.], 2018. DOI: 10.21680/2178-6054.2018vn0ID14731. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/extensaoesociedade/article/view/14731>. Acesso em: 20 set. 2025.

RIBEIRO, Z. L. S.; SUART, R. C.; SUART JR, J. B.; SOUZA, J. A.; RESENDE, E. Processo de elaboração de sequências de aulas contextualizadas e investigativas por professores em formação inicial de química. *Indagatio Didactica*. [s/l]. v. 16. n.3, 2024. Disponível em: <https://proa.ua.pt/index.php/id/article/view/38625/25188>. Acesso em: 16 set. 2025.

SANTOS, W.L.P.; MORTIMER, E.F. Uma análise de pressupostos teóricos da abordagem C-T-S (Ciência – Tecnologia – Sociedade) no contexto da educação brasileira. *Revista Ensaio*, v.02, p.110-132, 2002.

SILVA, J. V. de A.; VASCONCELLOS, K. R.; FERRAZ, R. S. C. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: PLANEJAMENTO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NAS EMPRESAS. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 9, n. 5, p. 1076–1094, 2023.

SOUSA, A. B. **Estudo de um eletrolisador bipolar alcalino visando a produção de H₂**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/bitstream/riufcg/6272/3/A%C3%89CIO%20BARBOSA%20SOUSA%20-%20TESE%20PPGEQ%202013.pdf>. Acesso em: 20 set. 2025.

VACILOTO, N. C. N.; AYRES-PEREIRA, T. I.; AKAHOSHI, L. H.; MARCONDES, M. E. R. **Contextualização e CTSA no Ensino de Química**: compreensões e propostas de professores. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS (XII ENPEC), 2019, Natal. Anais... Natal: UFRN, 2019. p. [número da página ou intervalo, se houver]. Disponível em: <https://abrapec.com/enpec/xii-enpec/anais/resumos/1/R0300-1.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.