

A QUÍMICA DE ALTO IMPACTO E A INOVAÇÃO: QUAIS PESQUISAS TÊM GANHADO DESTAQUE?

Paola B. Abih^{a,*,ID}, Flávia M. de Freitas^{a,*,ID}, Bruno dos S. Pastoriza^{a,*,ID} e Fábio A. Sangiogo^{a,*,ID}^aCentro de Ciências, Química, Farmacêuticas e de Alimentos, Universidade Federal de Pelotas, 96010-900 Capão do Leão – RS, Brasil

Recebido: 22/10/2024; aceito: 16/05/2025; publicado online: 25/06/2025

HIGH-IMPACT CHEMISTRY AND INNOVATION: WHICH RESEARCH IS GAINING PROMINENCE? This article includes a bibliographic review that allowed us to write an essay on the main topics that can be considered innovative in scientific research recently developed in the field of Chemistry. Therefore, we selected the three journals with the highest impact factor in the area: *Chemical Reviews*, *Chemical Society Reviews*, and *Nature Materials*. From these, we selected and analyzed the 5 articles with the highest number of citations in the years 2018, 2019, and 2020. The analysis allowed for the identification and presentation of themes arranged in 8 categories: structures containing metals, chemical catalysis, nanomaterials, electrochemistry, batteries/capacitors/supercapacitors, solar cells and photovoltaic systems, carbon-based structures and materials, among others. We also discussed the desired possibilities of application and potential of the study themes in the fields of medicinal chemistry, new and reformulated materials, and chemistry for sustainability and meeting energy demands. This allowed us to establish relationships between innovation, science, technology, and society, providing elements for training and encouraging discussions.

Keywords: scientific innovations; chemical research; current trends.

INTRODUÇÃO

As pesquisas realizadas no campo da Química representam um avanço significativo na compreensão de fenômenos que impulsionam o desenvolvimento científico e tecnológico, assim como a busca por soluções aos desafios atuais da sociedade.¹ Nesse contexto, a inovação surge como um termo amplamente discutido nessa área e inúmeras outras, o qual suscita questionamentos sobre o que está sendo investigado nesse campo.²⁻⁵ Isso leva ao debate e à importância de compreender/identificar como o desenvolvimento da Ciência, especificamente no contexto das pesquisas científicas da área de Química e do que vem sendo desenvolvido, está articulado à inovação e à sua polissemia conceitual.

O termo inovação, partindo de uma definição introdutória de dicionário, deriva do latim *innovatio* e refere-se ao ato ou efeito de inovar, indicando tudo o que é novidade ou que resulta em uma coisa nova.⁶ Nesse campo semântico, outros termos também se alinham ao de inovação, aportando definições similares, como invenção, atualização, modificação, modernização, renovação, dentre outros. Uma vez que a definição aportada pelo dicionário não é suficiente, ao considerar o termo a partir de um contexto histórico, ele acabou se tornando amplo e polissêmico,⁷ assumindo distintos significados, conforme o cenário inserido. Por exemplo, no período do renascimento, a inovação estava associada ao desenvolvimento artístico, enquanto que, na revolução industrial, a ideia de inovação remetia à revolução tecnológica.⁸ Além disso, ao longo dos séculos, pesquisadores pioneiros, em diversas áreas do conhecimento, contribuíram com considerações relevantes acerca da inovação, as quais possibilitaram traçar definições diversificadas sobre o conceito, que variam de acordo com o contexto, mas que, de maneira geral, designam um processo de constante transformação, elaboração e ressignificação.^{7,9,10}

As produções em literatura especializada também vêm expressando as definições de inovação, articuladas aos inúmeros campos do conhecimento, explicitados, por exemplo, no contexto

econômico, através da teoria de Schumpeter, na qual a “inovação seria a introdução comercial de um novo produto ou uma nova combinação de algo já existente”.⁹ Ainda, como apresenta a literatura, em relação à economia e ao setor produtivo, a inovação está atrelada à competitividade, à produtividade e aos lucros.³ Destaca-se também o Manual de Oslo, que visa mensurar as atividades científicas, tecnológicas e de inovação, fornecendo diretrizes específicas para a coleta e a utilização de dados sobre a inovação.¹¹ Segundo a própria definição do manual, a inovação “é um produto ou processo novo ou aprimorado (ou uma combinação de ambos) que difere significativamente dos produtos ou processos anteriores da unidade e que foi disponibilizado para potenciais usuários (produto) ou implementado pela unidade (processo)”.¹¹

Ao compreender as diversas definições que foram sendo (re)construídas com o passar do tempo, as inferências sociais corroboraram para que essa polissemia se ampliasse a cada novo contexto. Everett Rogers, sociólogo reconhecido por sua teoria de Difusão da Inovação, mencionou que a “inovação é uma ideia prática, ou objeto que um indivíduo percebe como novo [...] Se a ideia parece nova ou diferente do indivíduo, é uma inovação”.¹² Logo, a dispersão do termo inovação reiteradamente se vincula a essa compreensão de pensar, modificar, reconstruir e renovar algum conceito, produto, serviço, pensamento ou ideia, que consequentemente é organizada dentro de uma sociedade.

Da dispersão geral ao contexto educacional e do Ensino de Ciências/Química, é importante marcar que as definições de inovação enfatizam a busca por respostas às necessidades de qualificar os processos de ensino e aprendizagem.¹³ Conforme define Carbonell, a inovação pode ser compreendida “como um conjunto de intervenções, decisões e processos, com certo grau de intencionalidade e sistematização, que tratam de modificar atitudes, ideias, culturas, conteúdos, modelos e práticas pedagógicas”.¹⁴ Para o autor, as inovações, por apresentarem um caráter sólido, envolvem referências a um pensamento crítico e transformador, não se limitando a uma mudança superficial ou tecnológica.¹⁴

Nesse mesmo campo, Maceno e Guimarães comentam que as abordagens inovadoras para o Ensino de Química destacam a importância de práticas pedagógicas voltadas a promover uma

*e-mail: fabiosangiogo@gmail.com

Editor Associado responsável pelo artigo: Nyuara A. S. Mesquita

aprendizagem significativa e contextualizada, inclusive a partir de estratégias avaliativas alinhadas a metodologias inovadoras.¹⁵ Com sutis diferenças, produções voltadas à Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), têm evidenciado pressupostos e tendências sobre a inovação que se desdobram e se aproximam de uma perspectiva de inovação curricular.^{16,17} No campo do Ensino de Física, é possível evidenciar trabalhos que apresentam um olhar para a formação continuada de professores, destacando que as inovações surgem da própria necessidade docente, visando qualificar sua prática profissional por meio da introdução de novas práticas de ensino, sem necessariamente advir de ações institucionais.¹⁸

Esses trabalhos são exemplos que evidenciam a importância das discussões acerca da inovação educacional, especialmente no campo das Ciências. Ao promover novas abordagens pedagógicas, metodológicas e tecnológicas, as ideias assumidas de inovação visam contribuir para o aprimoramento e a qualificação do ensino e da aprendizagem, tornando os processos educativos mais dinâmicos, contextualizados e alinhados às demandas contemporâneas.

A pesquisa científica inovadora é estimulada por órgãos governamentais e acordos que buscam aprimorar o desenvolvimento e o progresso na área de Química,¹⁹ caracterizando-se, nacional e internacionalmente, como uma área em constante desenvolvimento dentro do campo científico e tecnológico. Os processos em que a inovação se constitui objetivam criar utilidade, avanços, modernização e desenvolvimento, não somente no campo científico, mas também no social. Entretanto, para que a inovação tenha realmente um caráter social,²⁰ necessita alcançar, efetivamente, a sociedade. É necessário ter cautela quanto às mobilizações decorrentes dela, pois embora seja socialmente necessária, atende a determinados interesses e valores,²¹ que movimentam, em um contexto industrial, a própria mercantilização da Ciência.²² E esse movimento pode ser explicado a partir do Inovacionismo,²² que salienta o fato de que as inovações são os objetivos primordiais da pesquisa.

Assim como em outras áreas, a pesquisa em Química busca inovações que ocupam uma posição estratégica de competitividade no campo científico e tecnológico, resultando, consequentemente, em lucratividade,²¹ especialmente através da criação de patentes,³ por meio de novos fármacos, materiais etc. No entanto, além de atender às demandas do mercado e enfrentar problemáticas sociais, o campo da Química busca aprofundar o conhecimento químico, desempenhando um papel essencial no desenvolvimento e no avanço científico e tecnológico. Em sua maioria, essas pesquisas ocorrem dentro das universidades e instituições de pesquisa,²³ de modo que são o alicerce para o desenvolvimento econômico que, consequentemente, alimenta a nova geração de inovações produzidas pela comunidade científica e que pode contribuir no meio social.

Nesse sentido, é possível destacar brevemente alguns exemplos que envolvem a inovação e sua abordagem em diferentes contextos, como nas atividades pedagógicas e de divulgação científica ocorridas na Argentina;²⁴ nas estratégias de aprendizagem de Química Orgânica adotadas no Ensino Superior, na Colômbia;²⁵ e na análise da rede de inovação, no setor farmacêutico do México, que promoveu o desenvolvimento das pesquisas em Química Orgânica e de medicamentos.²⁶ Cabe citar também a utilização de metodologia de aprendizagem baseada em projetos em cursos de Ciências Químicas, implementada no Chile;²⁷ a investigação da estabilidade estrutural e condutividade iônica na formação do $Y_xBi_{2-x}O_3$ na África do Sul;²⁸ e a síntese, a caracterização e a otimização de polímeros a partir de anti-inflamatórios não esteroides.²⁹ Eis alguns exemplos de pesquisas desenvolvidas e divulgadas que abordam o campo do conhecimento associado à Química, atrelados a contextos variados.

As ideias até aqui expressas evidenciam a polissemia, já mencionada na literatura, que envolve o termo inovação, apropriado

de diferentes modos, às vezes similares, às vezes específicos, devido aos espaços e contextos. Dadas tais características, o termo inovação, neste estudo, é compreendido em seu sentido dinâmico, que impulsiona transformações ao introduzir novas ideias, produtos, serviços ou métodos, podendo gerar impacto tanto na produção de conhecimento, quanto no contexto econômico, social e educacional; e que pode envolver também a criação de algo inédito ou a melhoria significativa de algo que já existe, conforme as demandas contemporâneas.

Diante dessa conjectura, são analisados, no presente trabalho, artigos de revisão de periódicos com alto fator de impacto na área de Química. O objetivo é identificar e categorizar quais os temas e/ou conteúdos, presentes em artigos científicos de revistas internacionais de Química, no período de 2018 a 2020, estão sendo produzidos e consequentemente compartilhados, discutidos e apropriados por sua comunidade no desenvolvimento de materiais, produtos, teorias e práticas. Por essa razão, a noção de inovação aqui assumida será operada por meio da análise dessas produções com vistas a contribuir com o debate em nível nacional, tendo em vista a importância de o país fortalecer suas próprias estruturas e condições de estabelecimento da relação entre o conhecimento e a sociedade,³⁰ considerando a lógica internacional que ainda rege parcialmente o desenvolvimento e a produção científica que circundam a inovação.³¹

Diante do exposto, isto é, das noções apontadas de inovação propriamente, os materiais aqui analisados podem ser percebidos como inovadores, pois apresentam um forte fator de impacto na produção e divulgação do conhecimento científico globalmente. Isso indica a relevância da produção nessa área em âmbito internacional, que atende, por sua vez, a uma parcela importante da produção científica de base e/ou aplicada que poderá convergir em desenvolvimento tecnológico e inovação, atingindo o meio social.^{30,31}

METODOLOGIA

Organizado como uma pesquisa bibliográfica,^{32,33} este estudo atendeu aos procedimentos de: (a) escolha do tema; (b) levantamento bibliográfico preliminar; (c) formulação do problema; (d) elaboração do plano provisório do assunto; (e) busca das fontes; (f) leitura do material; (g) fichamento; (h) organização lógica do material; e (i) redação do texto.³³ Por meio dos procedimentos iniciais, a introdução abriu com uma discussão que problematiza aspectos da inovação na Química para, na sequência, estabelecer um ensaio analítico de artigos científicos da área. A análise iniciou em novembro de 2021, na base *Web of Science*, no *Journal Citation Reports* (JCR) 2020, em que foi possível identificar os três periódicos com maior fator de impacto (FI) e com elevado número de citações na área da Química em 2020, analisando, para tanto, seus artigos nos anos de 2018 a 2020. A escolha pela limitação a três periódicos de maior FI foi arbitrária, uma vez que a pesquisa tem seu foco qualitativo, mas orientada tanto pelo tempo do estudo quanto pela proposta de analisar uma dispersão em uma amostra limitada e legitimada pela comunidade científica. Os artigos aqui analisados somam 35.838 citações (nas respectivas datas de consulta), o que mostra sua circulação massiva na comunidade. Foram selecionados, então, 45 artigos, todos de revisão. Ainda que os critérios iniciais não tenham limitado a esse tipo de material, esse resultado evidencia que a tipologia de texto que mais se alinha aos critérios utilizados é a de revisão. Assim, se, por um lado, no quesito quantitativo de seleção há um possível limite da pesquisa, por outro se evidencia que os textos analisados tanto têm grande aceitação pela comunidade quanto também, abordam e reúnem em suas discussões outros textos. Nesse sentido, fica a possibilidade para estudos futuros na própria comunidade confrontarem as discussões aqui propostas.

Uma vez que na estratégia metodológica adotada um dos critérios centrais é o FI, cabe explicitá-lo. Sua definição é dada como a “razão entre o total de citações recebidas, naquele ano, pelos artigos publicados nos dois últimos anos e o número de artigos publicados nesses dois anos. Entretanto, a janela temporal do cálculo do FI pode ser calculada para períodos maiores, como três ou cinco anos”.³⁴ Dessa forma, o FI foi escolhido por ser um dos indicadores mais utilizados quando a finalidade é mensurar o destaque e a visibilidade de periódicos científicos, comumente reconhecidos como importantes ferramentas para aferir e disseminar a pesquisa e o desenvolvimento, caracterizando-se, assim, como uma das vertentes da inovação.^{30,35,36} Além disso, é um importante parâmetro que costuma interferir na distribuição de recursos para a pesquisa e na avaliação do conhecimento produzido pela Ciência, inclusive em nível internacional.^{36,37}

No processo de busca das revistas de maior FI, foram selecionadas as seguintes categorias: *chemistry, analytical*; *chemistry, applied*; *chemistry, inorganic & nuclear*; *chemistry, medicinal*; *chemistry multidisciplinary*; *chemistry, organic*; *chemistry, physical*. Essa metodologia resultou na seleção dos periódicos *Chemical Reviews* (FI 60,622)³⁸ *Chemical Society Reviews* (FI 54,564)³⁹ e *Nature Materials* (FI 43,841).^{37,40} Na sequência, com a intenção de selecionar os cinco textos mais citados nos anos de 2018 a 2020, em cada um dos três periódicos de maior FI, foram identificados 45 artigos de revisão, conforme representado no Esquema 1. O marco temporal de 2018 a 2020 foi determinado em função do período inicial da pesquisa bibliográfica, considerando ademais que a inovação necessita um tempo de reconhecimento por parte do processo científico para a avaliação de sua relevância. Além disso, a delimitação da amostra de 45 artigos científicos, a partir do recorte historicamente situado, ocorreu em função do tempo disponível de análise e da complexidade das constantes reorganizações dos resultados.

Por fim, de modo complementar, e articulada à estratégia metodológica, houve a leitura do material, seu fichamento e organização. Na etapa de fichamento, foram determinados os pontos relevantes de observação em cada texto: (i) conhecer os principais temas abordados; (ii) compreender o que existe e pode ser considerado inovador; e (iii) as possibilidades de contribuição para as pesquisas em Química e de aplicação em questões emergentes à/na sociedade.

Nesse sentido, a partir da análise dos títulos, resumos, introduções e considerações finais (apresentadas, muitas vezes, como perspectivas

futuras relacionadas aos campos investigados nos estudos de revisão analisados), procedeu-se à identificação dos principais temas e enfoques dos artigos. Em função da variedade de relações temáticas, por fim, considerou-se como critério a busca por palavras e termos comuns presentes nos títulos dos artigos, como forma de organização do material, o que possibilitou a criação de oito categorias: estruturas contendo metais; catálise química; nanomateriais; eletroquímica; baterias, capacitores e supercapacitores; células solares e sistemas fotovoltaicos; estruturas e materiais à base de carbono; e outros (vide Figura 1).



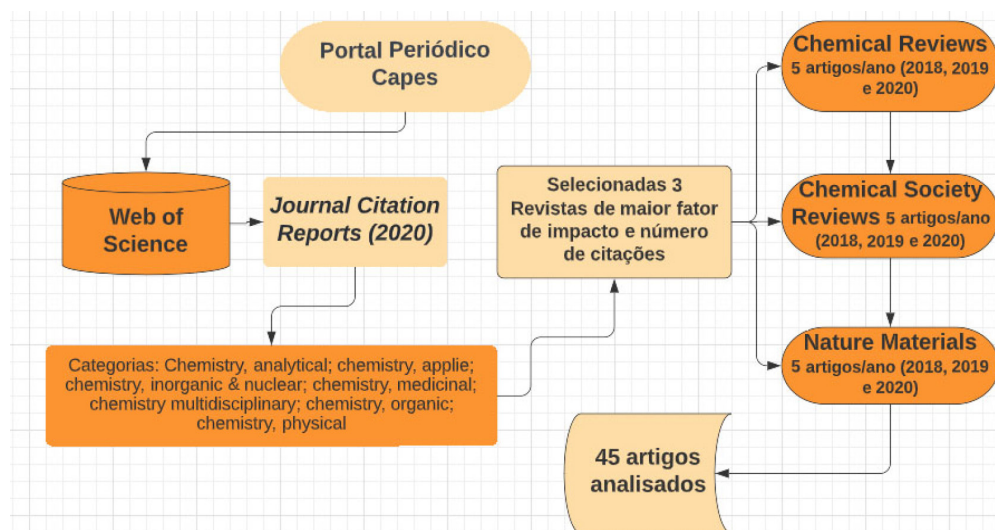
Figura 1. Categorias de temas identificadas na análise dos artigos de revisão (fonte: elaborada pelos autores)

Ainda que os artigos analisados fossem de revisão, o que lhes atribui uma grande complexidade (em termos de extensão e entendimento) e diversidade (em relação aos ramos de estudo, aos conceitos e assuntos abordados e associados aos temas), foi possível identificar quatro áreas de associação (vide Figura 2) relacionadas às temáticas abrangentes, por meio da recorrência de alguns tópicos nos 45 artigos. Nesse sentido, apresenta-se, a seguir, o contexto dos periódicos de maior FI identificados por meio de seus escopos, para, na sequência, apresentar os resultados acerca das temáticas.

O contexto dos periódicos e os artigos selecionados

Os três periódicos selecionados, *Chemical Reviews*, *Chemical Society Reviews* e *Nature Materials*, têm elevado fator de impacto e alto número de citações, conforme consta no Quadro 1.

O periódico *Chemical Reviews* apresenta o maior número total de citações (224.417) e o maior fator de impacto (60,622) relacionados à área geral da Química, em 2020.³⁸ É indexado nas bases de dados: Web of Science, SCOPUS, CAS, PubMed,



Esquema 1. Ilustração sobre o procedimento de busca de periódicos e artigos mais citados na área de Química nos anos de 2018, 2019 e 2020 (fonte: elaborado pelos autores)

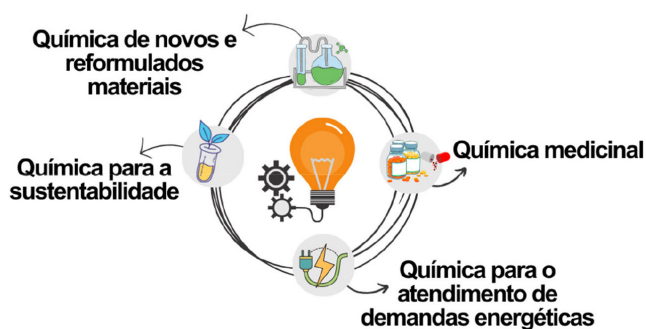


Figura 2. Áreas exploradas nos artigos de revisão entre 2018 e 2020 (fonte: elaborada pelos autores)

SwetsWise, Proquest, EBSCOhost, CABI e British Library, e publica duas edições por mês sobre artigos de revisão em temas específicos.³⁸ É possível considerá-lo um dos mais conceituados em Química. Centra-se em publicações capazes de realizar revisões abrangentes de temas relevantes e que possam contribuir com pesquisas recentes e inovadoras nas áreas de química orgânica, inorgânica, analítica, física, teórica e biológica.³⁸

O segundo periódico com maior fator de impacto (54,564) e número total de citações (173.170) em 2020 foi o *Chemical Society Reviews*.³⁹ É a principal publicação de revisões científicas lançada pela Royal Society of Chemistry, uma organização que acredita que, ao reunir e socializar ideias e informações científicas, contribui para grandes descobertas e inovações na Ciência.³⁹ Publica duas edições mensais e, ocasionalmente, edições temáticas. É destinada às Ciências Químicas, com tópicos interdisciplinares, que podem incluir: química inorgânica, química analítica, biomateriais, bioorgânica/química medicinal, catálise, química de coordenação, biologia química, engenharia de cristais, energia, química verde, sustentabilidade, materiais inorgânicos, química do grupo principal, nanociência, química orgânica, materiais orgânicos, organometálicos, físico-química, química supramolecular, metodologia sintética, química teórica e computacional.³⁹

O terceiro periódico com o terceiro maior fator de impacto (43,841) e elevado número de citações (112.429) foi o *Nature Materials*.⁴⁰ De periodicidade mensal, reúne pesquisas relevantes sobre a Ciência e a Engenharia de Materiais, área que apresenta um grande impacto na construção dos conhecimentos de Química, Física e Biologia.⁴⁰ Publica investigações que descrevem os avanços relacionados à síntese, processamento, estrutura, composição, propriedades e desempenho de materiais, os quais apresentam novos constituintes químicos, projetados e manipulados para fins de inovação e tecnologia, a fim de impulsionar novas descobertas e o aprimoramento de conceitos, contribuindo assim, para o desenvolvimento da sociedade.⁴⁰ As áreas que fazem parte do escopo do periódico são: engenharia e estrutura da matéria, materiais orgânicos, materiais biomédicos e biomoleculares, materiais ópticos, fotônicos e optoeletrônicos, materiais magnéticos, materiais supercondutores, materiais catalíticos e de separação, materiais e processos em nanoescala, computação, modelagem e teoria dos materiais, superfícies e filmes finos, técnicas de *design*, síntese, processamento e caracterização. Em suas páginas, estampa

artigos primários, de revisão, comentários, notícias e outras formas de expressão da comunidade científica.⁴⁰

A partir dos três periódicos foram selecionados os cinco artigos mais citados em cada um deles, nos anos de 2018, 2019 e 2020, totalizando 45 artigos analisados. Cada artigo é codificado por meio da inicial do periódico e de um numeral (vide Quadro 2).

A descrição de temáticas inovadoras em artigos da área de Química

A partir das revisões desenvolvidas, identificaram-se diferentes temas classificados em categorias contendo assuntos inovadores (Figura 1), presentes em destaque nos 45 artigos de revisão analisados. Trata-se de temas amplamente citados pela comunidade científica de Química, apresentados em oito categorias: estruturas com metais; catálise química; nanomateriais; eletroquímica; baterias, capacitores e supercapacitores; células solares e sistemas fotovoltaicos; estruturas e materiais à base de carbono; dentre outras. Os artigos classificados em mais de uma categoria de análise são brevemente apresentados por meio do relato de seus problemas e dos campos de estudo que compõem suas temáticas, os quais constituem alvo de novos estudos e inovações no campo da Química e áreas correlatas. E apenas dois artigos não apresentavam aspectos relacionados diretamente ao conhecimento químico, já que tratavam de estudos voltados à Física Quântica e à Computação, tendo sido categorizados em “outros temas”.

No processo de categorização, observou-se que, dentre as temáticas exploradas nas revisões, um possível agrupamento emergiu com o intuito de relacionar os elementos comuns e característicos do que se entende por “inovação”.¹¹ No contexto atual, esses temas abordam assuntos assaz contemporâneos, a ponto de terem sido objetos de estudo recorrentes e um grande foco de discussão na comunidade química e nas demais, tendo como perspectiva futura o alcance da sociedade (Figura 2). Dessa forma, os temas descritos na Figura 1 podem ser agrupados de um modo geral, conforme estudos que englobam: a Química de novos e reformulados materiais; a Química para a sustentabilidade; a Química medicinal; e a Química para o atendimento de demandas energéticas (Figura 2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temas inovadores na química: elaboração de materiais novos e reformulados, atendimento de demandas energéticas, abordagens sustentáveis e implicações para a saúde

É inegável que as pesquisas em Química buscam atender às necessidades da comunidade científica, além de abordarem questões econômicas,²² sociais²⁰ e ambientais.⁴¹ Dessa forma, os artigos analisados visam divulgar/discutir temas contemporâneos e emergentes, com o propósito de solucionar problemáticas ou, pelo menos, apontar possíveis soluções relacionadas ao meio ambiente, à saúde e ao desenvolvimento da Ciência⁴² como um todo. Sendo assim, as revisões buscaram abordar questões pertinentes às áreas apontadas na Figura 2.

Quadro 1. Três periódicos com maior fator de impacto e número de citações em 2020, segundo o JCR

Nome do periódico	ISSN	eISSN	Categoria	Total de citações	2020 fator de impacto do periódico (JIF)
<i>Chemical Reviews</i> (CR)	0009-2665	1520-6890	<i>Chemistry, multidisciplinary-scie.</i>	224.417	60,622
<i>Chemical Society Reviews</i> (CSR)	0306-0012	1460-4744	<i>Chemistry, multidisciplinary-scie.</i>	173.170	54,564
<i>Nature Materials</i> (NM)	1476-1122	1476-4660	<i>Chemistry, physical-scie.</i>	112.429	43,841

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 2. Artigos selecionados, analisados e codificados de cada periódico

Revista	Citações	Referência do artigo	Título	País de origem	Código
Chemical Reviews (CR)	1618	Liu, L.; Corma, A.; <i>Chem. Rev.</i> 2018 , <i>118</i> , 4981. [Crossref]	Metal Catalysts for Heterogeneous Catalysis: From Single Atoms to Nanoclusters and Nanoparticles	Espanha	CR01
	1154	Shao, Y.; El-Kady, M. F.; Sun, J.; Li, Y.; Zhang, Q.; Zhu, M.; Wang, H.; Dunn, B.; Kaner, R. B.; <i>Chem. Rev.</i> 2018 , <i>118</i> , 9233. [Crossref]	Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors	Inglaterra Estados Unidos China	CR02
	958	Zhang, G.; Zhao, J.; Chow, P. C. Y.; Jiang, K.; Zhang, J.; Zhu, Z.; Zhang, J.; Huang, F.; Yan, H.; <i>Chem. Rev.</i> 2018 , <i>118</i> , 3447. [Crossref]	Nonfullerene Acceptor Molecules for Bulk Heterojunction Organic Solar Cells	China	CR03
	913	Jin, H.; Guo, C.; Liu, X.; Liu, J.; Vasileff, A.; Jiao, Y.; Zheng, Y.; Qiao, S. Z.; <i>Chem. Rev.</i> 2018 , <i>118</i> , 6337. [Crossref]	Emerging Two-Dimensional Nanomaterials for Electrocatalysis	Austrália	CR04
	872	Artz, J.; Müller, T. E.; Thenert, K.; Kleinekorte, J.; Meys, R.; Sternberg, A.; Bardow, A.; Leitner, W.; <i>Chem. Rev.</i> 2018 , <i>118</i> , 434. [Crossref]	Sustainable Conversion of Carbon Dioxide: An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment	Alemanha	CR05
	1090	Xue, J.; Wu, T.; Dai, Y.; Xia, Y.; <i>Chem. Rev.</i> 2019 , <i>119</i> , 5298. [Crossref]	Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials and Applications	Estados Unidos China	CR06
	973	Jena, A. K.; Kulkarni, A.; Miyasaka, T.; <i>Chem. Rev.</i> 2019 , <i>119</i> , 3036. [Crossref]	Halide Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects	Japão	CR07
	956	Gandeepan, P.; Müller, T.; Zell, D.; Cera, G.; Warratz, S.; Ackermann, L.; <i>Chem. Rev.</i> 2019 , <i>119</i> , 2192. [Crossref]	3d Transition Metals for C–H Activation	Alemanha	CR08
	918	Nitopi, S.; Bertheussen, E.; Scott, S. B.; Liu, X.; Engstfeld, A. K.; Horch, S.; Seger, B.; Stephens, I. E. L.; Chan, K.; Hahn, C.; Norskov, J. K.; Jaramillo, T. F.; Chorkendorff, I.; <i>Chem. Rev.</i> 2019 , <i>119</i> , 7610. [Crossref]	Progress and Perspectives of Electrochemical CO ₂ Reduction on Copper in Aqueous Electrolyte	Estados Unidos Dinamarca Alemanha Inglaterra	CR09
	771	Huang, Y.; Ren, J.; Qu, X.; <i>Chem. Rev.</i> 2019 , <i>119</i> , 4357. [Crossref]	Nanozymes: Classification, Catalytic Mechanisms, Activity Regulation, and Applications	China	CR10
	547	Wang, Q.; Domen, K.; <i>Chem. Rev.</i> 2020 , <i>120</i> , 919. [Crossref]	Particulate Photocatalysts for Light-Driven Water Splitting: Mechanisms, Challenges, and Design Strategies	Japão	CR11
	539	Geng, K.; He, T.; Liu, R.; Dalapati, S.; Tan, K. T.; Li, Z.; Tao, S.; Gong, Y.; Jiang, Q.; Jiang, D.; <i>Chem. Rev.</i> 2020 , <i>120</i> , 8814. [Crossref]	Covalent Organic Frameworks: Design, Synthesis, and Functions	Singapura Japão	CR12
	538	Wang, Q.; Astruc, D.; <i>Chem. Rev.</i> 2020 , <i>120</i> , 1438. [Crossref]	State of the Art and Prospects in Metal-Organic Framework (MOF)-Based and MOF-Derived Nanocatalysis	França	CR13
	490	Zhu, J.; Hu, L.; Zhao, P.; Lee, L. Y. S.; Wong, K.-Y.; <i>Chem. Rev.</i> 2020 , <i>120</i> , 851. [Crossref]	Recent Advances in Electrocatalytic Hydrogen Evolution Using Nanoparticles	China França	CR14
	354	Du, Y.; Sheng, H.; Astruc, D.; Zhu, M.; <i>Chem. Rev.</i> 2020 , <i>120</i> , 526. [Crossref]	Atomically Precise Noble Metal Nanoclusters as Efficient Catalysts: A Bridge between Structure and Properties	China França	CR15
Chemical Society Reviews (CSR)	955	Li, J.; Wang, X.; Zhao, G.; Chen, C.; Chai, Z.; Alsaedi, A.; Hayat, T.; Wang, X.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2018 , <i>47</i> , 2322. [Crossref]	Metal-organic framework-based materials: superior adsorbents for the capture of toxic and radioactive metal ions	China Arábia Saudita	CSR01
	923	Schutyser, W.; Renders, T.; Bosch, S. V. D.; Koelewijn, S. F.; Beckham, G. T.; Sels, B. F.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2018 , <i>47</i> , 852. [Crossref]	Chemicals from lignin: an interplay of lignocellulose fractionation, depolymerisation, and upgrading	Bélgica Estados Unidos	CSR02
	807	Dubal, D. P.; Chodankar, N. R.; Kim, D. H.; Gomez-Romero, P.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2018 , <i>47</i> , 2065. [Crossref]	Towards flexible solid-state supercapacitors for smart and wearable electronics	Espanha Coreia do Sul	CSR03
	774	Sambiagio, C.; Schönbauer, D.; Blicke, R.; Dao-Huy, T.; Pototschnig, G.; Schaaf, P.; Wiesinger, T.; Zia, M. F.; Wencel-Delord, J.; Besset, T.; Maes, B. U. W.; Schnürch, M.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2018 , <i>47</i> , 6603. [Crossref]	A comprehensive overview of directing groups applied in metal-catalysed C-H functionalisation chemistry	Bélgica Áustria França	CSR04
	712	Wu, J. B.; Lin, M. L.; Cong, X.; Liu, H. N.; Tan, P. H.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2018 , <i>47</i> , 1822. [Crossref]	Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices	China	CSR05

Quadro 2. Artigos selecionados, analisados e codificados de cada periódico (cont.)

Revista	Citações	Referência do artigo	Título	País de origem	Código
Chemical Society Reviews (CSR)	1139	Wu, J.; Wang, X.; Wang, Q.; Lou, Z.; Li, S.; Zhu, Y.; Qin, L.; Wei, H.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2019 , <i>48</i> , 1004. [Crossref]	Nanomaterials with enzyme-like characteristics (nanozymes): next-generation artificial enzymes (II)	China	CSR06
	987	Liu, Y.; Bhattarai, P.; Dai, Z.; Chen, X.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2019 , <i>48</i> , 2053. [Crossref]	Photothermal therapy and photoacoustic imaging via nanotheranostics in fighting cancer	Estados Unidos China	CSR07
	848	Wang, Z.; Li, C.; Domen, K.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2019 , <i>48</i> , 2109. [Crossref]	Recent developments in heterogeneous photocatalysts for solar-driven overall water splitting	Japão China	CSR08
	759	Ding, M.; Flaig, R. W.; Jiang, H. L.; Yaghi, O. M.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2019 , <i>48</i> , 2783. [Crossref]	Carbon capture and conversion using metal-organic frameworks and MOF-based materials	China Estados Unidos Arábia Saudita	CSR09
	718	Pang, J.; Mendes, R. G.; Bachmatiuk, A.; Zhao, L.; Ta, H. Q.; Gemming, T.; Liu, H.; Liu, Z.; Rummeli, M. H.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2019 , <i>48</i> , 72. [Crossref]	Applications of 2D MXenes in energy conversion and storage systems	Alemanha China Polônia	CSR10
	440	Wang, H.; Chen, L.; Pang, H.; Kaskel, S.; Xu, Q.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2020 , <i>49</i> , 1414. [Crossref]	MOF-derived electrocatalysts for oxygen reduction, oxygen evolution and hydrogen evolution reactions	Japão China Alemanha	CSR11
	436	Wu, F.; Maier, J.; Yu, Y.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2020 , <i>49</i> , 1569. [Crossref]	Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries	China Alemanha	CSR12
	393	Song, J.; Wei, C.; Huang, Z.; Liu, C.; Zeng, L.; Wang, X.; Xu, Z. J.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2020 , <i>49</i> , 2196. [Crossref]	A review on fundamentals for designing oxygen evolution electrocatalysts	China Singapura	CSR13
	351	Xiao, X.; Zou, L.; Pang, H.; Xu, Q.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2020 , <i>49</i> , 301. [Crossref]	Synthesis of micro/nanoscaled metal-organic frameworks and their direct electrochemical applications	China Japão	CSR14
	279	Wang, Z.; Zhang, S.; Chen, Y.; Zhang, Z.; Ma, S.; <i>Chem. Soc. Rev.</i> 2020 , <i>49</i> , 708. [Crossref]	Covalent organic frameworks for separation applications	China Estados Unidos	CSR15
Nature Materials (NM)	1589	Hou, J.; Inganas, O.; Friend, R. H.; Gao, F.; <i>Nat. Mater.</i> 2018 , <i>17</i> , 119. [Crossref]	Organic solar cells based on non-fullerene acceptors	China Suécia Inglaterra	NM01
	921	Akkerman, Q. A.; Rainò, G.; Kovalenko, M. V.; Manna, L.; <i>Nat. Mater.</i> 2018 , <i>17</i> , 394. [Crossref]	Genesis, challenges and opportunities for colloidal lead halide perovskite nanocrystals	Itália Suíça	NM02
	893	Wang, F.; Borodin, O.; Gao, T.; Fan, X.; Sun, W.; Han, F.; Faraone, A.; Dura, J. A.; Xu, K.; Wang, C.; <i>Nat. Mater.</i> 2018 , <i>17</i> , 543. [Crossref]	Highly reversible zinc metal anode for aqueous batteries	Estados Unidos	NM03
	749	Wang, Y. M.; Voisin, T.; Mckeown, J. T.; Ye, J.; Caltà, N. P.; Li, Z.; Zeng, Z.; Zhang, Y.; Chen, W.; Roehling, T. T.; Ott, R. T.; Santala, M. K.; Depond, P. J.; Matthews, M. J.; Hamza, A. V.; Zhu, T.; <i>Nat. Mater.</i> 2018 , <i>17</i> , 63. [Crossref]	Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility	Estados Unidos	NM04
	672	Sahli, F.; Werner, J.; Kamino, B. A.; Brauningner, M.; Monnard, R.; Paviet-Salomon, B.; Barraud, L.; Ding, L.; Diaz Leon, J. J.; Sacchetto, D.; Cattaneo, G.; Despeisse, M.; Boccard, M.; Nicolay, S.; Jeangros, Q.; Niesen, B.; Ballif, C.; <i>Nat. Mater.</i> 2018 , <i>17</i> , 820. [Crossref]	Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency	Suíça	NM05
	4535	Thouin, F.; Valverde-Chávez, D. A.; Quarti, C.; Cortecchia, D.; Bargigia, I.; Beljonne, D.; Petrozza, A.; Silva, C.; Kandada, A. R. S.; <i>Nat. Mater.</i> 2019 , <i>18</i> , 349. [Crossref]	Phonon coherences reveal the polaronic character of excitons in two-dimensional lead halide perovskites	Estados Unidos Bélgica Itália	NM06
	533	Spaldin, N. A.; Ramesh, R.; <i>Nat. Mater.</i> 2019 , <i>18</i> , 203. [Crossref]	Advances in magnetoelectric multiferroics	Suíça Estados Unidos	NM07
	502	Famprikis, T.; Canepa, P.; Dawson, J. A.; Islam, M. S.; Masquelier, C.; <i>Nat. Mater.</i> 2019 , <i>18</i> , 1278. [Crossref]	Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes for batteries	França	NM08
	425	Xia, Q.; Yang, J. J.; <i>Nat. Mater.</i> 2019 , <i>18</i> , 309. [Crossref]	Memristive crossbar arrays for brain-inspired computing	Estados Unidos	NM09

Quadro 2. Artigos selecionados, analisados e codificados de cada periódico (cont.)

Revista	Citações	Referência do artigo	Título	País de origem	Código
Nature Materials (NM)	370	Özdemir, S. K.; Rotter, S.; Nori, F.; Yang, L.; <i>Nat. Mater.</i> 2019 , <i>18</i> , 783. [Crossref]	Parity–time symmetry and exceptional points in photonics	Estados Unidos Áustria Japão	NM10
	450	Sindhwani, S.; Syed, A. M.; Ngai, J.; Kingston, B. R.; Maiorino, L.; Rothschild, J.; Macmillan, P.; Zhang, Y.; Rajesh, N. U.; Hoang, T.; Wu, J. L. Y.; Wilhelm, S.; Zilman, A.; Gadde, S.; Sulaiman, A.; Ouyang, B.; Lin, Z.; Wang, L.; Egeblad, M.; Chan, W. C. W.; <i>Nat. Mater.</i> 2020 , <i>19</i> , 566. [Crossref]	The entry of nanoparticles into solid tumours	Estados Unidos Canadá	NM11
	311	Simon, P.; Gogotsi, Y.; <i>Nat. Mater.</i> 2020 , <i>19</i> , 1151. [Crossref]	Perspectives for electrochemical capacitors and related devices	França Estados Unidos	NM12
	242	Li, Y.; Shao, H.; Lin, Z.; Lu, J.; Liu, L.; Duployer, B.; Persson P. O. A.; Eklund, P.; Hultman, L.; Li, M.; Chen, K.; Zha, X.; Du, S.; Rozier, P.; Chai, Z.; Raymundo-Piñero, E.; Taberna, P.; Simon, P.; Huang, Q.; <i>Nat. Mater.</i> 2020 , <i>19</i> , 894. [Crossref]	A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte	China França Suécia	NM13
	221	Jung, E.; Shin, H.; Lee, B.; Efremov, V.; Lee, S.; Lee, H. S.; Kim, J.; Antink, W. H.; Park, S.; Lee, K.; Cho, S.; Yoo, J. S.; Sung, Y.; Hyeon, T.; <i>Nat. Mater.</i> 2020 , <i>19</i> , 436. [Crossref]	Atomic-level tuning of Co–N–C catalyst for high-performance electrochemical H ₂ O ₂ production	Coreia do Sul	NM14
	213	Liu, C.; Wang, Y.; Li, H.; Wu, Y.; Li, Y.; Li, J.; He, K.; Xu, Y.; Zhang, J.; Wang, Y.; <i>Nat. Mater.</i> 2020 , <i>19</i> , 522. [Crossref]	Robust axion insulator and Chern insulator phases in a two-dimensional antiferromagnetic topological insulator	China Japão	NM15

Fonte: elaborado pelos autores.

Nesse cenário, será discutido e apontado o que de inovador os estudos aportaram em suas revisões, desde temáticas que envolvem: a construção de materiais novos e reformulados; as novas possibilidades e a otimização de sínteses e processos químicos; o desenvolvimento de sistemas de conversão e o armazenamento de energia; a nanociência aplicada no tratamento oncológico; a funcionalização dos processos industriais a partir da produção de novas estruturas e compostos químicos; além de outras aplicações.

Categoria 1 - estruturas com metais

Um número significativo de estudos (20 artigos) explorou a temática das estruturas organometálicas (MOFs, do inglês: *metal-organic framework*), comumente estudadas e utilizadas como catalisadores (CR13). Essas estruturas são empregadas também em processos de eletrocatalise para reduzir os danos causados ao meio ambiente (CSR11); na produção de hidrogênio como combustível livre de fósseis, em processos de decomposição da água (CR13) para captura e conversão de carbono, atuando na redução de CO₂ (CSR09); e na adsorção de metais tóxicos ou resíduos radioativos (CSR01). Ademais, a síntese das MOFs, em micro e nano escala, traz discussões acerca das estratégias sintéticas para o controle morfológico dessas espécies químicas e de sua utilidade em dispositivos eletroquímicos (CSR14), dentre outras possíveis aplicações futuras.

Para compreender melhor o interesse científico pelas MOFs, cabe destacar que apresentam uma “arquitetura” perfeitamente definida com poros específicos, o que permite a introdução seletiva de substratos, algo que pode ser considerado uma vantagem em relação aos demais catalisadores (CR13). De maneira geral, os estudos evidenciam questões importantes sobre o desenvolvimento e a otimização na conversão e armazenamento de energia, a partir da síntese de novos catalisadores (CSR11, CSR13 e CSR14). Percebe-se uma preocupação quanto aos avanços na síntese dessas novas estruturas químicas à base de MOFs (CSR11, CSR13 e CSR14), principalmente por evidenciarem propriedades significativas de acordo com suas aplicações, que variam entre “sensores químicos baseados em suas propriedades óticas, magnéticas e elétricas, separação seletiva, purificação e armazenamento de gases,

troca iônica, detector de radiação, mostradores eletroluminescentes”.⁴³

Além dos artigos que tratam especificamente das MOFs, outros estudos (seis artigos) abordaram a utilização de metais (de maneira geral) na composição química de catalisadores, espécies utilizadas para a ativação e/ou funcionalização de determinadas ligações químicas, incluindo a obtenção de diversas estruturas nesse segmento. Conforme descrito em CR01, essas estruturas poderiam estar em forma de átomos únicos, *nanoclusters* e nanopartículas, auxiliando, por exemplo, na “ativação” de espécies químicas em diversos processos de reações de síntese.

Em outra revisão, os autores descrevem os estudos acerca da utilização de catalisadores de Co–N–C para a produção de peróxido de hidrogênio (NM14). A grande vantagem observada na utilização de metais de transição está associada à abundância dessas espécies na natureza, o que gera a redução de custos e uma menor toxicidade a essas espécies (CR08 e NM04). No estudo de CR09, os autores investigam a ação catalítica à base de cobre em reações de “reciclagem” de carbono, minimizando os problemas causados pela emissão de CO₂.

Dentre os estudos sobre metais, há também sobre os *nanoclusters* (NCs), que são nanoaglomerados de metais nobres empregados em funções catalíticas (CR15). Neles se buscou elucidar questões referentes à relação entre as estruturas químicas dos materiais e suas propriedades, o que poderia contribuir para aprimorar os conhecimentos e ter um maior controle acerca de certas características dos materiais (CR15). Em outro estudo mais recente, a estrutura e as aplicações dos NCs foram postas em destaque, sendo classificadas em metálicas (metais nobres e metais de transição, como Au, Ag, Pt e Cu) e não metálicas (a partir de derivados de metais, como: óxidos, fosfetos e sulfetos).⁴⁴ Então, através de estudos sobre NCs, o meio científico busca o aprimoramento de materiais por exemplo, com possibilidades de uso em sensores e biossensores utilizados em determinados contextos, como na agricultura, meio ambiente, alimentação e monitoramento de doenças, o que pode vir a contribuir significativamente para o desenvolvimento de inovações em diferentes campos.⁴⁴

Outros dois estudos (NM13 e CSR10) abordam os *MXenes*, estruturas que se caracterizam como materiais inorgânicos bidimensionais, com camadas de carbonetos e nitretos de metais de transição, e que são preparadas por um ataque seletivo dos elementos da camada A nos precursores da fase MAX, onde M representa um elemento de metal de transição inicial (Ti, V, Nb e etc.), A um elemento sobretudo dos grupos 13-16 (Al, Si e assim por diante) e X um carbono e/ou nitrogênio. Essas estruturas químicas são investigadas quanto à perspectiva de capacitores eletroquímicos (NM13) em sistemas de conversão e armazenamento de energia (CSR10), de modo que se enquadram nessa categoria por apresentarem átomos metálicos diversos.

E assim como no caso dos *MXenes*, outros três artigos adentram o campo da Ciência dos Materiais, abordando a utilização do ferro e das ligas metálicas no desenvolvimento de novos materiais ou no aprimoramento de outros utilizados em diversos segmentos da indústria, setores que precisam de melhores desempenhos. Um dos estudos, que apresenta o progresso de novos materiais multiferroicos (NM07), evidencia que as estratégias comumente consideradas nesse setor envolvem a combinação de um mecanismo magnético e um ferroelétrico, tal como o desenvolvimento de nanocompósitos (NM07). Os artigos discorrem também sobre os avanços em caracterização e modelagem por meio da implementação de novas ferramentas experimentais, em aplicações e dispositivos eletrônicos, a exemplos de dispositivos de rádio e de alta frequência, incluindo a memória de sistemas operacionais (NM07). Conforme indica um dos estudos, a produção de novos materiais, no caso dos multiferroicos que apresentam características de ordem magnética e elétrica, representa uma classe de elementos desenvolvida devido à sua multifuncionalidade, com aplicações tecnológicas, industriais e informáticas (NM07).

Dando continuidade ao que vem sendo desenvolvido no campo da Ciência dos Materiais, ocorre nele a discussão sobre novas matérias quânticas topológicas e transições de fase topológicas, o que tem sido um tema central na investigação do transporte quântico de cristais em massa e flocos de MnBi_2Te_4 esfoliados em uma geometria de transistor de efeito de campo (NM15). A combinação de ordem antiferromagnética intercamada (AFM) e a topologia de banda não trivial, torna, segundo a pesquisa, o MnBi_2Te_4 um material promissor para encontrar novas fases topológicas e transições de fase, seja controlando a estrutura da camada, seja aplicando um campo magnético (NM15).

Destacando ainda mais especificamente a produção de materiais que envolvem ferro e ligas metálicas, um dos artigos traz uma abordagem combinada de modelagem e de experimentos para identificar os parâmetros relacionados às aplicações de aço inoxidável (SS, do inglês: *stainless steel*) austenítico 316L (NM04). Como resultado, os autores do estudo salientam características de “uma nova classe de 316L SS impressa em 3D que exibe uma combinação excepcional de resistência e ductilidade, superando as contrapartes convencionais” (NM04, p. 69, tradução nossa). Nessa perspectiva, de ampla aplicação, nas indústrias química, petroquímica, farmacêutica, alimentícia e de biotecnologia, dessa nova classe de materiais em aço pode contribuir significativamente para a produção na área, devido às propriedades de resistência à corrosão e à ductilidade, que são determinantes em suas aplicações.

Além dos estudos antes mencionados, outros dois também mencionam elementos metálicos utilizados na composição química de baterias. Na revisão, traçam algumas perspectivas acerca das baterias mais atuais e em desenvolvimento no mercado, como as baterias que usam cátodos de alta tensão, eletrodos de fluoreto de metal, eletrodos de calcogênio, ânodos de metal-lítio e ânodos de alta capacidade, assim como as soluções eletrolíticas úteis, principalmente pela busca por baterias com maior vida útil, de menor custo, com segurança e

maior capacidade de energia (CSR12). Nessa mesma perspectiva, o estudo subsequente se centra na utilização do zinco metálico em baterias aquosas e suas principais características (NM03). Além desses, outros dois mencionam a existência de halletos de chumbo em cristais de perovskitas, que podem ser utilizados em sistemas de conversão de energia (NM02 e NM06).

Categoria 2 - catálise química

A categoria “catálise química” foi identificada pela quantidade expressiva de revisões (13 artigos) que explicitam, em sua maioria, os seguintes tópicos: “catalisadores”, “catálise”, “nanocatálise”, “eletrocatalisadores”, dentre outros. As estruturas químicas que contêm metais são muito estudadas em funções de catálise, conforme já evidenciado na categoria anterior. Ou seja, alguns dos estudos mencionados anteriormente também são contemplados nessa categoria (CR01), que fala das influências causadas pelas estruturas eletrônicas e geométricas de espécies contendo metais em relação à sua utilização como catalisadores na síntese de diversas estruturas químicas. Estas, por sua vez, podem representar igualmente o desenvolvimento de outros produtos ou metodologias inovadoras (CR01), ou ainda, o aprimoramento de técnicas que deverão contribuir na construção de rotas sintéticas simples, eficientes e econômicas para moléculas de interesse, mediante a utilização de metais e organometálicos (CSR04 e CR13). Ademais, na revisão que aborda as MOFs (CSR11), menciona-se o atual progresso dos materiais à base de carbono derivados de MOFs para a eletrocatalise em reações de conversão, a redução de oxigênio, a reação de evolução de oxigênio e a reação de evolução de hidrogênio (CSR11). E comenta-se também sobre a obtenção de eletrocatalisadores à base de carbono, a partir da pirólise de precursores de MOFs, que ocorre quando a parte orgânica se transforma em materiais de carbono e a porção metálica evapora em altas temperaturas ou permanece na matriz do carbono, incluindo sítios atômicos dispersos e nanopartículas contendo metal (CSR11). Embora os estudos discutam a aplicação dos eletrocatalisadores, ainda é necessário diminuir o sobrepotencial e a melhora da estabilidade (CSR11), o que justifica a importância de prosseguir com pesquisas que avaliem e otimizem o desenvolvimento de estruturas contendo metais em sua composição para a catálise química, pois, ao apontarem limitações, indicam novas questões a serem estudadas em busca de superar as lacunas e as problemáticas que envolvem o tema.

Seguindo na mesma linha, no estudo CSR13, os autores reúnem o progresso recente na compreensão dos mecanismos de reação do oxigênio. Esse processo trata-se da reação de oxidação do ânodo cineticamente mais lenta, quando ocorre a transferência de quatro elétrons, desde que comparada à reação de hidrogênio, que se trata da redução no cátodo, com a transferência de dois elétrons (CSR13). Nesse sentido, buscam os fundamentos a fim de desenvolver eletrocatalisadores para a reação de oxigênio, considerando os materiais à base de carbono derivados das MOFs. Conforme afirmam, as MOFs são construídas por íons metálicos ou aglomerados com ligantes orgânicos, exibindo propriedades como estrutura cristalina aberta, porosidade e flexibilidade estrutural (CSR13).

Ademais, o desenvolvimento de catalisadores para a reação de oxigênio é considerado um dos campos com grande visibilidade em investigações, pois se trata de projetar catalisadores constituídos de materiais robustos, eficientes e de baixo custo que poderão facilitar o armazenamento de energia elétrica na forma de gás hidrogênio (CSR13).

Nessa perspectiva, percebe-se a inovação presente no movimento de progresso em favor da atualização e de novas perspectivas quanto aos eletrocatalisadores em atividades catalíticas, o que poderá contribuir para o desenvolvimento de sistemas, ambientalmente

controlados e de baixo custo, com melhorias no desempenho de armazenamento e conversão de energia, e para a síntese de outros produtos químicos. No entanto, os desafios ainda persistem, devido a possíveis limitações na condutividade, na estabilidade e no desenvolvimento de novas tecnologias com morfologia e propriedades adequadas aos processos químicos (NM14).

Na área de Química, a sustentabilidade pode, por exemplo, além de produzir novos meios de interagir no ambiente, otimizar o modo como os recursos naturais são utilizados em prol de atender às necessidades humanas que envolvem produtos químicos, evitando danos ambientais, eliminando ou reduzindo os problemas de emissões e exposição a substâncias perigosas.^{41,45} E tudo isso, minimizando o uso de recursos esgotáveis ou poluentes e, ainda assim, beneficiando a economia.⁴¹ Nesse sentido, a busca por inovações relacionadas ao surgimento de uma química mais sustentável aumentou no mundo todo, desencadeando a construção de novos conhecimentos.⁴⁵ Isso se evidencia por meio dos diversos artigos (CR04, CR11, CSR08 e CR14), de sua ampla divulgação e, consequentemente, das diversas citações no meio acadêmico. Os textos citados fazem compilados, apresentando possibilidades e destacando problemáticas que demandam atenção sobre temáticas referentes à sustentabilidade e à necessidade de produzir mudanças inovadoras, capazes de transformar a realidade mundial que preocupa a sociedade contemporânea em função do meio ambiente.^{41,45}

Corroborando a perspectiva, o estudo (CR04) sobre a eletrocatalise heterogênea é um processo capaz de acelerar as reações eletroquímicas na superfície dos materiais. Por isso, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de investigar os eletrocatalisadores de alto desempenho para os ciclos da água e do carbono, os quais podem ser aplicados em vários dispositivos de energia limpa. E para que seja possível a comercialização dessas tecnologias, é preciso o desenvolvimento de uma série de eletrocatalisadores de alto desempenho, com elevada cinética de reação e alto rendimento (CR04), para fortalecer a concepção de que um dos grandes temas inovadores da atualidade está atrelado à necessidade de substituir combustíveis fósseis por novas formas de obter energia limpa, através da utilização de recursos renováveis que prezam pela sustentabilidade.

Ademais, outro estudo (CR11), ao fazer um apanhado geral dos principais desafios encontrados em relação à fotocatalise e à decomposição da água, apresenta estratégias e possíveis mecanismos. A revisão fornece diretrizes que auxiliam na elaboração e aplicação prática de sistemas que utilizam partículas fotocatalisadoras para realizar a separação da água movida a energia solar. Isso porque, até o momento desta investigação, essa técnica é insuficiente em função de valores de eficiência necessários à sua ampla implementação prática, o que ainda demonstra uma limitação (CR11).

Cabe destacar que a energia solar é uma substituição renovável muito atraente para os combustíveis fósseis, porque é uma fonte abundante, inesgotável e amplamente distribuída, conforme apontam os textos que tratam da temática (CR11). Como a irradiação solar é difundida de forma intermitente, a energia deve ser convertida em combustíveis químicos, os quais devem ser armazenados, transportados e utilizados sob demanda de forma adequada e eficiente. Isso impulsiona a busca por processos fotocatalíticos artificiais que se utilizam da decomposição da água para a produção de hidrogênio, considerado um combustível bastante atrativo em função de não gerar poluentes em sua combustão e da densidade energética produzida (CR11). Nessa mesma direção, outro estudo reporta a utilização de fotocatalisadores heterogêneos para a decomposição da água, ressaltando que esse processo movido a energia solar pode ser chamado de fotossíntese artificial (CSR08).

Já o estudo CR14, ao abordar também a substituição de combustíveis fósseis por outras fontes de energia limpa, e relacioná-la

sobretudo ao desenvolvimento de novas formas de obtenção energética por meio do hidrogênio, realiza um compilado sobre o tema. Segundo os autores do artigo, a evolução eletrocatalítica de hidrogênio, a partir da eletrólise da água, pode representar uma alternativa eficiente e sustentável para a produção de energia limpa. Entretanto, o processo requer catalisadores adequados para produzir hidrogênio, o que configura como um desafio e uma demanda fundamental para reduzir o uso de metais nobres, como a platina (muito utilizada nesse processo), por outros elementos químicos mais abundantes na natureza. Por isso, recentemente, diversas nanopartículas (várias delas à base de metais de transição e de nanopartículas livres de metal) vêm sendo divulgadas como uma possibilidade eficiente de eletrocatalisadores (CR14).

A partir da apresentação desses artigos que relatam o uso de catalisadores, destaca-se ainda a recorrência, em cinco artigos (CSR11, CSR13, CR11, CSR08 e CR14), de um novo agrupamento voltado à temática da perspectiva de separação da molécula de água e ao estudo de potenciais espécies químicas que poderiam auxiliar em reações de obtenção de oxigênio e hidrogênio. Isso tudo, com vistas a uma futura aplicabilidade de metodologias que possam possibilitar a produção de hidrogênio em grande escala, como fonte energética, por exemplo. A maior fonte de obtenção de hidrogênio é a queima de combustíveis fósseis que tendem a se esgotar a longo prazo, sobretudo com o crescente aumento da população mundial e da consequente demanda por energia.⁴⁶ Ao vislumbrar a possibilidade de que a maioria dos recursos renováveis pode ser usado para produzir eletricidade gerada pela decomposição da água, novas e criativas soluções vêm sendo investigadas para melhorar a relação custo-benefício e otimizar o processo, a fim de promover sua implementação prática, o que justifica o grande empenho dos pesquisadores acerca do tema.⁴⁶

Um dos estudos que aborda as possibilidades voltadas às questões ambientais na Química trata da conversão do dióxido de carbono (CO₂) como uma maneira de desenvolver uma gama de produtos, de combustíveis a produtos químicos, até possíveis fármacos dotados de estruturas químicas com grandes propriedades biológicas (CR05). De acordo com essa proposta, não é suficiente reduzir apenas as emissões de CO₂, mas também descobrir viabilidades de explorá-lo como uma matéria-prima na produção de combustíveis idênticos aos utilizados atualmente, ou então, de novos compostos dotados de outras características, talvez mais eficientes. Sendo assim, seria possível converter boa parte dos problemas em soluções, e essa inovação ajudaria na resolução de diversas questões relacionadas à energia e ao meio ambiente (CR05).

Nesse contexto, é possível associar a perspectiva de inovação à busca constante pela invenção ou reformulação de ideias e propostas que sejam dotadas de originalidade, criatividade e intencionalidade, à procura de melhorias que possam representar um significativo ganho de qualidade.³⁰ Dessa maneira, o processo de inovação é cercado por temas pertinentes, por desafios que estimulam novas questões a serem estudadas, que geram a superação de limitações e que podem contribuir para a humanidade e a conscientização da comunidade científica e da sociedade em geral,^{30,35} corroborando a proposta do estudo (CR05).

Por fim, outros dois artigos (CR10 e CR15) compõem a categoria temática sobre os catalisadores. Um deles investiga as nanoenzimas como uma alternativa à utilização de enzimas naturais, em decorrência do baixo custo, alta estabilidade, fácil preparação e durabilidade, as quais vêm sendo bastante utilizadas na área industrial, médica e biológica, e no tratamento ambiental, antibacteriano e antioxidante (CR10). Por apresentarem uma menor atividade catalítica e seletividade do substrato em comparação às enzimas naturais, ainda se espera que os avanços futuros na pesquisa científica possam atribuir às nanoenzimas novas aplicações, por meio de investigações

que busquem compreender mais sobre seus mecanismos catalíticos (CR10). Já o artigo subsequente aborda o uso de *nanoclusters* como catalisadores que podem ser empregados em diferentes processos, incluindo a eletrocatalise, a fotocatalise, a catálise em reações orgânicas, dentre outros (CR15). Esses dois estudos também integram a próxima categoria, a dos nanomateriais.

Categoria 3 - nanomateriais

Esta categoria (12 artigos) contempla a temática dos nanomateriais, já mencionada ao longo da análise. O estudo que aponta o avanço tecnológico e científico destaca a capacidade de produzir técnicas de modelagem molecular e outras relacionadas à possibilidade de mimetizar o comportamento de determinadas estruturas químicas, no intuito de contribuir para o prosseguimento de novas atribuições científicas referentes à síntese de novos compostos, ou então, no aprimoramento e otimização de rotas sintéticas relacionadas a nanomateriais (CR01). Ademais, outros artigos abordam perspectivas em nanocatálise baseada e derivada de MOFs (CR13), descrevem nanomateriais bidimensionais utilizados na eletrocatalise (CR04) e relatam a utilização de nanopartículas na evolução eletrocatalítica do hidrogênio (CR14).

No estudo sobre as nanoenzimas, as enzimas artificiais surgem como uma proposta alternativa às limitações apresentadas pelas enzimas naturais (CSR06). Com isso, diversos novos nanomateriais de alto desempenho estão sendo desenvolvidos para regular as atividades nanoenzimáticas, elucidar mecanismos catalíticos e ampliar potenciais aplicações, como o sensoriamento médico e a remediação ambiental (CSR06). Outro artigo que remete à produção de novos nanomateriais apresenta um compilado sobre nanofibras e inovações consideradas avançadas no estudo de suas estruturas e em seus métodos de produção, como a eletrofiliação (CR06). As nanofibras eletrofiladas podem apresentar composições, estruturas e propriedades diversas, devido ao progresso de pesquisas realizadas nas últimas décadas. Os nanomateriais podem ser utilizados em membranas de filtração, suportes catalíticos, dispositivos eletrônicos e outras aplicações ambientais, assim como em componentes de captação, conversão e armazenamento de energia (CR06). Essa aplicação também seria possível para nanocristais de perovskitas de haleto de chumbo (NM02).

Os nanomateriais são igualmente relevantes no campo da saúde humana (CSR07 e NM11), pois as pesquisas que os abordam, falam da entrega bem-sucedida de anticancerígenos em tumores. Como o câncer é uma das principais causas de mortalidade no mundo, o que coloca a doença como um problema que assola a humanidade (CSR07), as novas tecnologias e o progresso constante da Ciência têm auxiliado no surgimento de novas alternativas para o tratamento da doença. Segundo a revisão, esses estudos abordam a utilização de nanomateriais como agentes de transdução fototérmicos que são capazes de coletar a energia da luz e convertê-la em calor, aumentando assim a temperatura do ambiente circundante e promovendo o desencadeamento da morte de células cancerígenas (CSR07). Dessa maneira, o uso dessas estruturas químicas, para o tratamento do câncer, pode apresentar algumas vantagens, como o uso de irradiação externa a laser, com a dosagem ajustável, o que permitiria o direcionamento com maior precisão nos tumores, minimizando danos aos tecidos saudáveis. Além de auxiliar no tratamento da doença, o efeito fototérmico pode gerar ondas acústicas que poderiam ser detectadas e convertidas em sinais de imagem – a imagem fotoacústica –, permitindo uma modalidade alternativa de imagem, que também poderia contribuir no diagnóstico de tumores. Os agentes de transdução fototérmicos podem ser orgânicos (incluindo polímeros semicondutores) e inorgânicos (materiais de metais nobres, calcogenetos de metais, nanomateriais à base de carbono, dentre outros) (CSR07).

Outro estudo destaca as investigações sobre a entrada de nanopartículas em tumores (NM11), desenvolvidas a partir de experimentos em camundongos com três tipos de tumores semelhantes aos de humanos, que foram simulados por modelagem, estudos matemáticos e duas técnicas de imagem distintas, para evidenciar o processo de entrada de nanopartículas em tumores em processo ativo, por meio de células endoteliais nos vasos sanguíneos do tumor (NM11). Nas tecnologias voltadas ao campo da saúde, percebe-se um grande avanço em relação às novas aplicações para o tratamento do câncer, conforme discorrem os estudos supracitados. A inserção da nanotecnologia, a partir sobretudo da aplicação de nanomateriais, traz novas possibilidades para o diagnóstico e o tratamento. Contudo, são necessários estudos constantes, o desenvolvimento de protocolos e o aprimoramento das formulações em nanomateriais para que essa aplicação seja bem-sucedida.⁴⁷

Na revisão que trata do controle morfológico em micro e nanoescalas 1D, 2D e 3D, aplicadas em eletrodos de baterias de íon-lítio, enxofre-lítio, ar-lítio e íon-sódio-potássio, e também, em supercapacitores e na eletrocatalise (CSR14), salienta-se a combinação de micro/nano MOFs com morfologias especiais e materiais condutores (grafeno, espumas metálicas e outros suportes funcionais). Logo, esses suportes podem se tornar uma abordagem viável, ao facilitar o transporte rápido de elétrons, a difusão do eletrólito e melhorar a durabilidade e a estabilidade (CSR14). Especialmente em baterias e supercapacitores, no uso de um eletrólito adequado, a estabilidade do eletrodo MOF pode aumentar significativamente, influenciando diretamente na estabilidade dos materiais MOFs e no surgimento de MOFs condutores como eletrólito de estado sólido em baterias, o que já demonstrou ser um grande avanço em eletrodos (CSR14). O estudo (CSR14), ao mesmo tempo que fala sobre nanomateriais, aborda igualmente as aplicações relacionadas à eletroquímica, tema que compõe a próxima categoria.

Categoria 4 - eletroquímica

Uma das temáticas de estudo da Química evidenciada nas revisões, trata-se da eletroquímica, com dez artigos, nos quais se exploram tópicos como: estruturas organometálicas (MOFs); baterias, capacitores e supercapacitores; células solares e sistemas fotovoltaicos; e a perovskita e suas aplicações no campo da eletroquímica. Um deles discute as MOFs e a síntese para fins de eletrocatalise, sendo que a utilização de derivados das MOFs surgiu como uma precursora na fabricação de eletrocatalisadores à base de carbono, pois seus derivados apresentam alta condutividade elétrica e sítios ativos uniformemente distribuídos (CSR11). Outro estudo apontou os diferentes mecanismos de reação eletrocatalítica da evolução do oxigênio dos catalisadores heterogêneos baseados em metais de transição, visto que alguns materiais dispõem de reservas limitadas e um alto custo (CSR13). Já em outra revisão, os autores descrevem a utilização de catálise para a produção eletroquímica de peróxido de hidrogênio com alto desempenho (NM14).

Ademais, nos estudos da eletroquímica, destacam-se aquelas investigações que versaram sobre os nanomateriais bidimensionais empregados em eletrocatalise (CR04), sobre a perspectiva da eletroquímica através da evolução eletrocatalítica do hidrogênio e os avanços nessa área (CR14), e que apresentaram progressos e perspectivas relacionadas à “reciclagem” do carbono, por meio da redução eletroquímica de CO₂ utilizando catálise de cobre (CR09). Novas pesquisas devem contribuir de forma a impulsionar essa inovação tecnológica e possibilitar sua comercialização, pois, a partir da conversão de CO₂, seria possível a produção de combustíveis e diversos produtos químicos, o que poderá promover um impacto substancial na sustentabilidade da economia global de energia (CR09).

Ainda sobre os processos eletroquímicos inovadores, outro estudo

apresenta um compilado acerca das perspectivas para os capacitores eletroquímicos (NM12), ao comentar sobre os capacitores elétricos de dupla camada (EDLCs, do inglês: *electrical double-layer capacitors*) baseados em carbonos de alta área de superfície, os materiais pseudocapacitivos como óxidos, os compostos inorgânicos bidimensionais conhecidos como *MXenes* e os microdispositivos emergentes para a Internet das Coisas (NM12). Os EDLCs armazenam carga eletrostaticamente através da adsorção reversível de íons eletrólitos em materiais de carbono, e por apresentarem certas características, como o fato de não realizarem processos redox (pois armazenam energia por meio eletrostático) e terem longa vida útil, alta potência e ampla faixa de temperatura de operação, tornam-se uma possibilidade de tecnologia importante de armazenamento de energia. E também, servem como novos materiais pseudocapacitivos e do mecanismo de reação pseudocapacitiva de intercalação em massa que ocorre em eletrólitos não aquosos (NM12). Em outra revisão (NM13), os autores, ao relatarem uma rota de síntese de sal fundido para preparar *MXenes* em eletrólito não aquoso, evidenciam que os *MXenes* preparados têm potencialidades como eletrodos negativos em dispositivos de armazenamento de energia eletroquímica (baterias e capacitores de íons de lítio).

Na mesma linha, o estudo NM08 buscou discutir a compreensão das propriedades materiais de eletrólitos sólidos inorgânicos em baterias de estado sólido, sobretudo por meio das propriedades dos eletrólitos sólidos abordadas nas áreas de transporte de íons em multiescala, das estabilidades eletroquímicas e das mecânicas e sua dependência dos métodos de processamento disponíveis. De maneira geral, o artigo propõe estudos futuros acerca de novos compostos capazes de suportar a rápida condutividade dos íons e que possam estabelecer novas abordagens experimentais para monitorar a operação da bateria de estado sólido e as reações interfaciais de sondagem e da evolução da pressão, a otimização da dopagem química, das novas rotas de síntese, do processamento e da preparação de filmes finos densos (NM08).

Alguns artigos, como os mencionados anteriormente na categoria correspondente à eletroquímica e afins (NM08 e NM12), compõem igualmente a próxima categoria.

Categoria 5 - baterias, capacitores e supercapacitores

Esta categoria discute sobre estruturas químicas que podem ser utilizadas em baterias, capacitores e supercapacitores destacadas nos artigos analisados (seis artigos). No artigo CSR03 aborda-se o uso de supercapacitores de estado sólido flexíveis e sua utilização para o armazenamento de energia com diversas possibilidades de aplicações tecnológicas inovadoras. Alguns exemplos da aplicação desses sistemas consistem em eletrônicos vestíveis, dispositivos médicos implantáveis e sistemas integrados de células solares, que podem ser incorporados a relógios, sensores, celulares etc. (CSR03).

Um panorama semelhante é evidenciado em outro estudo (CR02) que versa sobre a utilização de supercapacitores assimétricos como uma opção para o armazenamento de energia, com uma elevada densidade de potência. A abordagem dessas temáticas é relevante a ponto de convergir com ideias voltadas à produção de energia em função do atendimento das demandas globais, obtidas por meio de fontes renováveis, as quais, uma vez postas em prática, precisam de novas alternativas de armazenamento (CR02), para que seja possível o desenvolvimento de produtos cada vez mais eficientes.

Outros estudos relacionados ao armazenamento de energia apontam as tendências e as diretrizes para as baterias/pilhas recarregáveis (NM03, NM08 e CSR12). O estudo em questão objetivou demonstrar que um eletrólito aquoso, à base de zinco e sais de lítio em altas concentrações, pode ser muito eficaz em resolver o crescimento de dendritos (NM03). Nesse sentido, as baterias de zinco

têm demonstrado grande segurança e ciclabilidade, com aplicações em algumas condições extremas, como a área aeroespacial, em aviões, submarinos, veículos de pesquisa em oceano profundo e aplicações militares (NM03).

Estudos que buscam compreender e investigar os avanços referentes aos diferentes tipos de baterias/pilhas evidenciam a relevância do tema relacionado à crescente demanda de eletrônicos por parte da sociedade, o que destaca o interesse da população em se “conectar” com os produtos portáteis que possam oferecer um maior armazenamento de energia. Nesse sentido, o desafio da inovação não se limita a produzir baterias/pilhas, mas também em buscar o menor custo, uma maior longevidade, o aumento da capacidade de armazenagem, o tempo de recarga adequado e um melhor desempenho para os aparelhos. Ao mesmo tempo, isso traz complicações ambientais devido à geração de resíduos eletrônicos, o que tende a preocupar os cientistas e a sociedade.⁴⁸

Categoria 6 - células solares e sistemas fotovoltaicos

Ao refletir e buscar ainda novas alternativas energéticas que possibilitem considerar o meio ambiente e atender às demandas globais, outra temática, destacada em quatro artigos, diz respeito às novas tecnologias para a produção e o aperfeiçoamento de células solares e sistemas fotovoltaicos.

O desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas representa uma promissora alternativa para o enfrentamento dos desafios relacionados ao fornecimento de energia, a fim de abrandar a carga de eletricidade advinda de fontes tradicionais e a poluição ambiental produzida por elas.⁴⁹ Na sequência dos estudos sobre o armazenamento e a conversão de energia, mas com um foco voltado às células solares (CR03 e NM01), os estudos apresentam um compilado acerca dos materiais receptores de não-fulerenos (NF OSCs, do inglês: *non-fullerene organic solar cells*), que não são derivados do fulereno, mas que são muito utilizados em células solares para a produção de energia limpa. Recentemente, diversas moléculas pequenas e oligômeros vêm sendo estudados como uma alternativa capaz de substituir os derivados de fulereno em células fotovoltaicas orgânicas, em função do menor custo e da maior facilidade de sua obtenção (CR03).

Segundo afirmam no estudo, o desenvolvimento quanto à eficiência da conversão de energia em NF OSCs aumentou, considerando os OSCs à base de fulereno (NM01). Como resultado, os autores apontam quatro fatores importantes: os aceitadores de NF apresentam excelente solubilidade em diversos solventes, possibilitando a seleção de solventes verdes; a aplicação em grande escala; as investigações quanto à estabilidade, considerando fatores como o oxigênio, a umidade e as temperaturas elevadas; e que os novos materiais precisam ser desenvolvidos, devido ao custo das rotas de síntese das NF OSCs (NM01).

Nesse mesmo sentido, CR07 e NM05 discutem as pesquisas que envolvem a utilização de haleto de perovskita na produção de tecnologias fotovoltaicas e no desenvolvimento da perovskita, considerada um importante material semicondutor, principalmente por sua utilização em células solares. Ainda que possua outras aplicações, como em detectores de raios-X e em dispositivos de detecção de imagens, os estudos apontam o baixo custo desse material como uma das principais vantagens de sua aplicação em células solares (CR07). Na revisão (NM05) que tratou dos dispositivos de perovskita e silício combinados para células solares, indica-se a composição como promissora para a conversão de energia, uma vez que desenvolve um processo de deposição de células superiores que atinge o crescimento de vários compostos com propriedades optoeletrônicas controladas diretamente nas pirâmides de tamanho micrométrico de silício monocristalino texturizado.

Os dois últimos artigos (CR07 e NM05) também foram classificados na temática da perovskita e de suas aplicações, além dos estudos anteriormente mencionados (NM02 e NM06). Essa classe de estruturas químicas é discutida em diversas variações, como perovskita de haleto de chumbo na forma de nanocristais ou na forma de cristais coloidais (LHPs NC, do inglês: *lead halide perovskites nanocrystals*) (NM02), tandem (ou multijunção) de perovskita e silício (NM05) e perovskita de haleto de chumbo bidimensionais (NM06).

Diante do exposto, destaca-se a eficiência das células de terceira geração, pois são à base de materiais orgânicos, corantes, pontos quânticos ou perovskitas, e que englobam estruturas mais complexas, como as células tandem, visto que sua conformação, ao invés de utilizar uma única camada absorvedora formada por silício ou perovskita, é composta por filmes finos emergentes: uma organização que funciona de forma cooperativa, aproveitando uma maior faixa do espectro solar.⁵⁰

O estudo NM02 destaca a relevância das pesquisas em LHPs, devido à sua versatilidade óptica, pelos altos rendimentos quânticos de fotoluminescência e pela facilidade em sua síntese, além de apresentarem uma alta resistência estrutural (NM02). E complementa, ao enfatizar que a “geração eficiente de cor pura ou luz branca com LHPs ganhará crescente interesse científico e, muito provavelmente, se transformará em uma grande oportunidade comercial (em displays, iluminação e outras aplicações)” (NM02, p. 403, tradução nossa).

A revisão NM06 aborda os semicondutores híbridos orgânico-inorgânicos. Ao considerar a dinâmica estrutural de uma perovskita de iodeto de chumbo bidimensional prototípica, justifica a coexistência de diversas ressonâncias excitônicas, cada uma delas com um grau de caráter polarônico e com acoplamentos de rede distintos. Para a análise, fez-se uso da espectroscopia Raman e dos cálculos de teoria funcional de densidade, no intuito de identificar os pacotes de ondas vibracionais e as diferentes coordenadas de configuração para os éxcitons e os fotoprotutores (NM06).

Categoria 7 - estruturas e materiais à base de carbono

Nesta categoria estão presentes oito artigos que abordam pesquisas desenvolvidas com o carbono, seja em sua estrutura, seja em materiais à base de carbono, incluindo a funcionalização e a ativação das ligações com carbono, os polímeros orgânicos e as estruturas covalentes orgânicas (COFs).

Sobre as revisões que abordam a temática das células solares (CR03 e NM01), há pesquisas que se ocupam também dos materiais à base de carbono, as quais apontam para a produção de dispositivos a partir de moléculas livres de fulerenos como uma alternativa viável ao aprimoramento de células solares, por exemplo. Isso porque, em muitos casos, utiliza-se, para a produção de células solares orgânicas, uma mistura de materiais doadores e aceitadores que derivam do fulereno (em virtude dos satisfatórios valores de eficiência quanto à conversão de potência).⁵¹ Por isso, nessa temática, são descritas as pesquisas que envolvem o carbono e/ou a substituição de materiais à base desse elemento químico, por apresentarem termos que remetem ao carbono (grafeno, fulereno) (CR03, NM01 e CSR05).

A utilização da tecnologia é fundamental para a geração de inovação, logo, a inovação também é essencial para impulsionar novas tecnologias, a exemplo da espectroscopia Raman utilizada para fornecer informações sobre o número de camadas, a ordem de empilhamento, as bordas, a tensão e o mecanismo de crescimento dos flocos de grafeno (CSR05). Sendo assim, a técnica foi utilizada para a caracterização e o monitoramento de propriedades ou funções projetadas sob demanda dos materiais de grafeno, que podem ser aplicados em diversos dispositivos de armazenamento de energia, células solares, dentre outras possibilidades (CSR05).

Na revisão que aborda a funcionalização da ligação C–H, as reações se configuram pela conversão de uma ligação C–H em uma outra ligação envolvendo carbono e outros átomos, como C–O, C–N, C–C, ou então, outras possibilidades. Ressalta-se que investigar novas formas de promover essas reações químicas é um fator importante, tendo em vista o potencial que vem demonstrando os grupos direcionadores e a catálise metálica nesses processos, o que justifica seus estudos (CSR04). No artigo se destaca também a importância de utilizar, por exemplo, catalisadores à base de ferro, cobre e níquel, que são menos tóxicos e facilmente obtidos em função de sua ocorrência natural. Outro estudo que considera a conversão de ligações que envolvem átomos de carbono e hidrogênio (CR08) destaca a utilização de metais de transição 3D como um possível modo de auxiliar na ativação de ligações desse tipo, tendo em conta a relevância que esses processos de síntese apresentam frente à química, em virtude da obtenção de compostos com potencial farmacêutico, na proteção de cultivos, na ciência de materiais, dentre outros. Os artigos CSR04 e CR08, além de compor a categoria referente às estruturas químicas compostas por metais, também se destacam por abordar o tema da funcionalização da ligação C–H, associada à categoria das estruturas e materiais à base de carbono.

Outro estudo aborda diferentes maneiras de realizar o fracionamento, a despolimerização e o aprimoramento de lignina (polímero orgânico de estrutura amorfa e de alta complexidade) (CSR02). Esses três aspectos interconectados da biorrefinaria podem indicar diversas inovações, passíveis de extrapolar o uso da lignina como matéria-prima para ser aplicada, de forma promissora, em colas, adsorventes, em nanofibras de carbono, ou então, em produtos químicos de base biológica.

Dessa forma, é importante que outros estudos sejam feitos, de modo que a indústria do papel e da biorrefinaria substituam os métodos tradicionais por outros inovadores, evitando a degradação severa da lignina (CSR02).⁵² No contexto atual, isso é relevante, já que as indústrias procuram maneiras de inovar e assim sobreviver em uma economia global que sofre mudanças constantes, em virtude das urgentes demandas ambientais. Como a procura por biomassa deve aumentar, as biorrefinarias podem ser uma parte importante para a conversão de recursos e de matéria-prima renováveis.⁵³

Outro foco temático das revisões centrou-se nas estruturas orgânicas covalentes – COFs (do inglês: *covalent organic frameworks*). Pesquisas envolvendo essas estruturas já se debruçavam sobre as futuras perspectivas acerca do desenvolvimento de novos métodos para a geração de estruturas orgânicas covalentes.⁵⁴ Isso corrobora a perspectiva de inovação, a ponto de destacar o surgimento de novas estruturas que, ao incorporarem determinadas propriedades, possam otimizar as rotas de síntese e outras aplicações em produtos e serviços, além de auxiliar no próprio desenvolvimento científico e examinar os avanços recentes em estruturas orgânicas covalentes (COFs).^{55,56}

Nesse contexto, destaca-se o potencial das estruturas poliméricas constituídas de ligações covalentes e “construídas sob medida” em representar a produção de diversos materiais com aplicações diversas, nas áreas química e biológica (CR12). Nesse caso, pesquisas recentes têm sido importantes para elucidar novos dados sobre as estruturas orgânicas covalentes e atribuir a elas um diferencial que se concentra na possibilidade de permitir a sua “pré-projeção”, com o intuito de conferir ao material características e propriedades desejadas, como a cristalinidade e a estabilidade estrutural (CR12).

Na mesma perspectiva, os autores de CSR15 abordam o surgimento das COFs como os novos materiais ideais para serem usados em aplicações avançadas de separação, devido à sua alta porosidade, com estruturas de poros definidas e tamanhos de poros ajustáveis, e também, com grandes áreas e propriedade de superfície ajustáveis, além de sua excelente estabilidade. O estudo destacou os

principais avanços feitos na síntese das COFs em diversas aplicações de separação, incluindo o tratamento de água ou a separação de misturas de gases e de moléculas orgânicas, como compostos quirais e isoméricos (CSR15). Ademais, a revisão aponta as estratégias de aplicação de COFs, a partir da adaptação de poros ou formas, da modificação da superfície ou dos grupos funcionais e da fabricação de membranas (CSR15). Contudo, um dos maiores desafios na síntese das COFs é a construção de ultramicroporos para realizar o peneiramento molecular ultrarrápido e altamente seletivo, sobretudo porque as COFs, com tamanhos de poros menores que 1 nm, ainda são raramente obtidos devido à limitação do tamanho das unidades de construção (CSR15).

Categoria 8 - outros temas

Além dos artigos de revisão, categorizados nos sete temas identificados inicialmente, presentes na Figura 1, relacionados especialmente à Química, foram identificados dois artigos que não puderam ser incluídos em nenhuma das categorias anteriores, em função da temática explorada. Contudo, embora ambos mencionem o campo da Química em suas discussões, seu foco principal se centrava em dispositivos computacionais (NM09) e em Mecânica Quântica (NM10). Ainda assim, adentram temas bastante relevantes para o campo científico, mesmo que não discutam, propriamente, o campo da Química.

A revisão NM09 analisou o progresso, os desafios e as possíveis soluções para a computação eficiente, inspirada no cérebro com implementações memristivas, tanto como aceleradores quanto como blocos de construção para as redes neurais de pico. Segundo o estudo, as redes neurais memristivas abordam problemas de velocidade e eficiência energética em *hardwares* de computação de diferentes perspectivas. Por essa razão, os materiais e os aparelhos estão concentrados na adaptação de propriedades do dispositivo para se adequar aos algoritmos de computação, embora se possa excluir facilmente alguma nova propriedade dele (NM09). Conceitualmente, um memristor (do inglês: *memory resistor*) envolve a combinação entre o resistor e a memória, sendo chamado de “quarto elemento fundamental dos circuitos eletrônicos” (ao lado do resistor, capacitor e indutor).⁵⁷ É considerado a base para as “sinapses”, isto é, para a comunicação entre as células, que influenciam na aprendizagem e memorização, podendo ser aplicado em dispositivos eletrônicos e diferentes contextos. Além disso, pode revolucionar os desenhos de circuitos digitais e os sistemas computacionais e representar um caminho inédito e possível à inteligência artificial,⁵⁸ o que evidencia a importância dos avanços acerca da classe de materiais que está presente em equipamentos de informática e telefonia.

Por fim, o artigo de revisão NM10 aborda os principais conceitos e experimentos que investigaram as propriedades fundamentais da simetria paridade-tempo (do inglês: *symmetry parity-time*), os quais demonstraram a capacidade das estruturas simétricas para controlar e manipular o transporte de luz, apontando desafios futuros. O estudo, ao tratar da interação radiação-matéria, conclui que a introdução da simetria PT (*parity-time*) e da não-hermiticidade na fotônica estabeleceu novas maneiras de usar ganho, perda e seu acoplamento para controlar o transporte de luz. Nesse sentido, ao explorar a não-hermiticidade e a simetria PT em campos já estabelecidos e emergentes, é possível melhorar o desempenho dos dispositivos, assim como obter avanços tecnológicos em fotônica e na Ciência dos Materiais (NM10). A revisão desenvolveu discussões no contexto da mecânica quântica e do campo da Física sobre a simetria paridade-tempo.⁵⁹ Nesse sentido, fornece contribuição da mecânica quântica na produção de novos avanços científicos no desenvolvimento de fenômenos fotônicos, que tratam de uma ciência da geração, emissão, transmissão, modulação e detecção da luz.⁵⁹

Algumas relações entre as temáticas e a inovação em química

Ao considerar as oito categorias que emergiram do processo de análise, por consequência da identificação de diferentes temáticas que, em muitos casos, se relacionam e se complementam em vários dos estudos, a análise permitiu identificar algumas temáticas emergentes e amplamente referenciadas na área, incluindo: as estruturas contendo metais; a catálise química; os nanomateriais; a eletroquímica; as baterias, capacitores e supercapacitores; as células solares e os sistemas fotovoltaicos; os estudos de materiais à base de carbono e as alternativas ao seu uso; dentre outras temáticas voltadas à aplicação desses estudos.

Percebeu-se por meio da análise que vários dos temas envolvem, e estão atrelados, por exemplo, a discussões relacionadas à preocupação com o meio ambiente, a uma maior sustentabilidade do planeta e à procura por novas fontes energéticas que deem conta das demandas atuais e que sejam renováveis, descartando (quiçá em um futuro distante) ou evitando o uso de combustíveis fósseis, poluentes e esgotáveis. Essa preocupação mobiliza diferentes ramos de estudo da Química que possam representar alternativas promissoras frente a novos e/ou reformulados materiais que sirvam como catalisadores em estudos sobre sistemas fotovoltaicos e em processos de obtenção de novas estruturas, de transformação propriamente dita, do gás hidrogênio em fonte energética viável em grande escala (CR13, CSR09, CR03, CSR01 e CSR11).

Indubitavelmente, a busca por tudo o que envolve a produção, a conversão e o armazenamento de energia limpa, a partir de fontes renováveis capazes de substituir ou, ao menos, diminuir ao máximo o uso de combustíveis fósseis, fornecendo uma certa segurança energética, tornou-se um dos grandes desafios inovadores para o desenvolvimento sustentável da sociedade contemporânea.⁴⁵ Nos Estados Unidos, por exemplo, no ano de 2021, foi elaborado um projeto de lei que propõe um acordo entre os líderes empresariais e os ambientalistas, prevendo uma cooperação de apoio com o intuito de promover a implementação da lei, que pretende, de um modo geral, auxiliar na promoção da inovação química sustentável.⁴¹

Esses estudos indicam o quanto o desenvolvimento tecnológico e as inovações são promissores para o progresso das ciências e na elaboração de novos materiais. A partir das pesquisas é possível explorar as potencialidades de suas aplicações e contribuir significativamente com os mais diversos setores. E o objetivo não se limita apenas a atender à demanda de geração de produtos e serviços, a exemplo dos estudos em fontes energéticas, mas também a minimizar os efeitos nocivos que o consumo de energia e o descarte causam ao meio ambiente. Além disso, quanto mais a inovação promover mudanças, novas inovações, por consequência, serão desenvolvidas.⁶⁰

A produção de novos materiais volta-se ao melhoramento de dispositivos eletrônicos já existentes em função de suas eficiências, ao barateamento no custo de produção e sua consequente obtenção, ou ainda, ao desenvolvimento de novidades que deverão atender a sociedade cada vez mais inserida na tecnologia. E isso irá impulsionar os estudos que abordam os dispositivos flexíveis, portáteis e até vestíveis, e também, os componentes de computação eficientes em relação à potência e à memória, dentre outros (CSR03, NM08 e NM09).

O desenvolvimento de novos materiais ou a sua reformulação, de modo a aperfeiçoar a utilização deles na vida cotidiana da população, reflete, de certa forma, a inovação produzida nos centros de pesquisa. Ademais, de acordo com algumas perspectivas de inovação, para que ela resulte em desenvolvimento econômico, tecnológico, comercial e social, e até mesmo auxilie na saúde humana, é fundamental que a inovação alcance, de alguma forma, a esfera da sociedade, gerando melhorias na qualidade de vida dos sujeitos.^{30,61,62} Afinal, promover melhorias relacionadas à qualidade de vida constitui também

uma justificativa das temáticas, a exemplo dos estudos voltados a aplicações na biomedicina de maneira mais geral, seja na busca por novas estruturas químicas que possam possibilitar a entrega de medicamentos em diferentes e específicas regiões do corpo humano, seja ao compilar estudos que possam auxiliar no diagnóstico e no tratamento de câncer (CR06, CSR07 e NM11).

Além da preocupação com as aplicações já mencionadas, há o desejo de possibilitar o avanço do conhecimento científico, da Ciência de base, orientando futuros estudos nas mesmas linhas de pesquisa descritas nos artigos de revisão analisados (CR02, CR08 e CR12). Isso poderá ser possível com o avanço tecnológico e científico, o que irá contribuir na busca pela inovação, que tem uma estreita relação com esses conhecimentos,³¹ com as demandas da sociedade e com o planeta. O ato de inovar implica empregar os conhecimentos em prol da inovação como uma forma de promover transformações. Sendo assim, a compreensão e o domínio sobre as inovações tecnológicas e suas implicações representam fatores importantes para o desenvolvimento da própria Ciência, da sociedade, das empresas, das indústrias e do país,^{55,61} e também um compromisso ético e responsável com a sustentabilidade do planeta.

Ainda assim, não é possível considerar apenas uma visão ingênua do processo científico, pois a ideia de um conceito autônomo, livre de interferências internas e externas, deixou de existir ao longo do tempo, dando espaço ao entendimento de uma Ciência em contato com o mundo real, que assume responsabilidades acerca das implicações de suas atividades para o planeta, sejam elas positivas ou negativas. A produção e a avaliação da atividade científica passam a ser entendidas como um misto de elementos que engloba academia, iniciativa privada, políticas públicas, demandas empresariais e sociais.³¹ Em virtude disso, existem reflexões importantes sobre a influência do inovacionismo na ciência²² e da tecnologia social,⁶³ nas quais se destaca a prioridade de interesses mercadológicos em detrimento de pesquisas fundamentais, o que acaba por limitar a autonomia científica.²² Inclusive, a integração entre a academia e o setor empresarial poderia avançar quanto às discussões, ao explorar estratégias para equilibrar a inovação tecnológica e a tecnologia social,⁶³ promovendo um modelo de pesquisa que atenda não só às demandas do mercado, mas também às necessidades da sociedade, geradas, indiscutivelmente, a partir de políticas públicas e de participação da sociedade.⁶³

É importante salientar que os conhecimentos necessários ao impulsionamento das pesquisas em inovação no campo científico advém de um conjunto de fatores orientadores,³¹ sobretudo os legislatórios, responsáveis por regulamentar as universidades e as instituições de ensino em seus currículos. Contudo, ainda vigora, para o exercício da profissão de químico, uma legislação inadequada aos atuais avanços científicos e tecnológicos que a Ciência vem alcançando. Por isso, é preciso uma legislação que contemple a Química no ramo computacional e da modelagem molecular, da química medicinal, verde, ambiental e de materiais, assim como da biotecnologia, nanotecnologia, sustentabilidade, inovação, ética, dentre outros.^{35,64}

O olhar sobre as temáticas demonstra o que se produz em centros de pesquisa, com o suporte da ciência e da tecnologia. Isso indica elementos que podem se refletir na sociedade por meio de aplicações do conhecimento construído (Figura 3). Nesse processo, os conhecimentos científicos e tecnológicos, assim como os conhecimentos advindos da inovação, interferem diretamente entre si, na e com a sociedade, de modo que acabam “exigindo a produção de novos conhecimentos e saberes, em busca de proposições que atendam às necessidades e demandas dos novos tempos e cenários”.⁶¹ Contudo, é importante destacar a influência direta das políticas públicas nesses segmentos do conhecimento, uma vez que a forma

como são estruturadas e implementadas pode tanto impulsionar quanto limitar os avanços científicos, tecnológicos e de inovação.⁶⁵ Assim, ao integrar ciência, tecnologia e inovação de maneira colaborativa e estratégica, é possível consolidar um sistema dinâmico que pode favorecer o desenvolvimento sustentável e a resolução de desafios sociais emergentes. Concorde-se com a perspectiva de que há um processo em que a Ciência e as suas aplicações podem se transformar em desenvolvimento tecnológico e inovação, o qual pode ser difundido e promover o crescimento social.³¹ Porém, todo esse processo de construção da Ciência e suas interlocuções com a tecnologia, a inovação e a sociedade, não é mais compreendido como algo linear, e sim, como algo que conecta esses elos entre si, de forma a não haver separação iminente entre eles, em função de ser um processo historicamente e culturalmente construído e situado.³¹

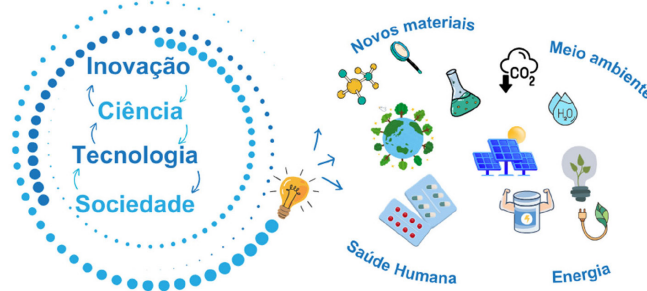


Figura 3. Relação cíclica entre os eixos inovação, ciência, tecnologia e sociedade que estimulam a produção em diversas áreas de estudo da Química (fonte: elaborada pelos autores)

Como a Ciência, a Tecnologia e a Sociedade interferem na Inovação, promovem a influência no processo científico e tecnológico e, consequentemente, afetam a sociedade, isso leva a crer que não é possível compreender esses quatro conceitos ligados de maneira linear e unidimensional, pois a relação que se estabelece entre eles é mais adequadamente compreendida como um círculo que os conecta sem demarcações sobre seu início ou fim. Dessa forma, o processo de produção do conhecimento acontece, pode chegar e/ou resultar de uma demanda da sociedade, com uma maior responsabilidade com o planeta.⁶⁶

CONCLUSÕES

A partir da busca por contemplar um ensaio, que proporcionou uma maior compreensão sobre o que existe e pode ser tomado como uma inovação química em um contexto mais recente, a análise sobre os artigos possibilitou a formulação de algumas considerações, especialmente a de que existem algumas temáticas amplamente citadas pela comunidade científica. Essa é uma característica própria da Ciência, a de utilizar como base as teorias e os conhecimentos já descritos para formular novas inferências e constatações, construindo, assim, novos conhecimentos, ou ainda, corroborando, reformulando, aprimorando ou até mesmo refutando conhecimentos científicos existentes.⁴²

Nesse contexto, as temáticas emergem das demandas, oriundas do meio social, ambiental ou científico (para a resolução de problemáticas, por exemplo), e da própria inovação que propicia a elaboração de outros materiais ou serviços com finalidades específicas, por meio da elaboração de novos conhecimentos e produtos que, de alguma forma, têm impacto no desenvolvimento da tecnologia e na inovação para a Ciência. Em outras palavras, ao influenciar e sofrer influências “na” e “da” comunidade científica e social, percebe-se que gradualmente a inovação passa a não ter apenas o caráter de atender demandas, uma vez que também influencia no

processo de construção da Ciência (por meio do direcionamento a programas de pesquisa), sendo que, em alguns casos, não gera apenas produtos e métodos, mas novas demandas.⁶⁶

A partir dos 45 artigos analisados, foi possível identificar temáticas e discussões relevantes na atualidade, impulsionados por investigações que se centram no intuito de promover melhorias e estudos relacionados ao ambiente e à sustentabilidade, ao avanço e ao desenvolvimento tecnológico, à saúde humana, ao mercado e ao próprio progresso do conhecimento científico em si. Portanto, as inovações surgem não apenas para gerar novas aplicações práticas à sociedade, ou então, para contribuir com a economia e responder a demandas estabelecidas, mas também para contribuir em novos direcionamentos da pesquisa científica e tecnológica, produzindo e aprimorando novos saberes.

Dessa forma, é possível concluir que a inovação não está presente apenas na criação de novos produtos, já que se ocupa também de temas e questões que há muito são estudados, mas que ainda são discutidos em função de sua relevância científica. Surge atrelada, principalmente, ao desenvolvimento de novas, criativas e originais metodologias, ao aprimoramento de (novas) rotas sintéticas, capazes de potencializar as propriedades desejáveis de produtos e/ou métodos, e também, ao aprimoramento de técnicas e métodos que possibilitam o avanço científico sobre o que já é parcialmente conhecido.

Nesse sentido, o progresso e a inter-relação constante da Ciência e da Tecnologia leva a inter-relações com e na sociedade,³¹ e no futuro do planeta, e que pode (ou não) resultar em melhorias na qualidade de vida, no meio ambiente e na saúde humana, assim como em novas tecnologias e em meios para torná-las mais acessíveis. Nesse contexto, quando esses impactos produzidos são passíveis de avaliação e certa validação por parte da sociedade e/ou comunidade científica, pode-se dizer que a inovação se concretiza e se torna palpável. Isso implica na relevância das temáticas, brevemente apresentadas neste artigo, que constituem propostas de formação de nível escolar a universitário e/ou de divulgação científica, e que buscam viabilizar a inserção da sociedade no debate, nas escolhas e na compreensão sobre como a ciência química funciona no cotidiano e como pode impactar o planeta.

Por fim, vale destacar um ato reflexivo: a inovação, que pode ser definida como a introdução de novidades a determinados sistemas, métodos, técnicas ou produtos, com a intencionalidade de aprimorá-los, atribui melhorias ao setor onde costuma se estabelecer, pois surge através do avanço científico e tecnológico, com impacto na sociedade.^{61,62,67} No entanto, ao mesmo tempo que surge em função da Ciência, da Tecnologia e da Sociedade, também as influencia, a ponto de se inter-relacionarem,³¹ ao que cabe à Inovação se resguardar a fim de não comprometer a autonomia da Ciência, sobretudo quando embasada apenas no impacto proveniente da geração de capital e da economia.^{15,22,68} Por isso, sugere-se cautela quando se busca analisar o que pode ser considerado, de fato, uma inovação, ou então, um legítimo avanço científico capaz de auxiliar no desenvolvimento de melhorias. Logo, saber diferenciar essas contribuições é necessário, sobretudo quando o termo “inovação” é usado apenas como uma forma de deslumbramento pelo mercado.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS

Afirmamos que todos os dados estão disponíveis no texto, mas os autores ficam à disposição para maiores informações.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro de bolsas de incentivo à pós-graduação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal

de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), do edital Universal (projeto No. 408649/2023-2), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

REFERÊNCIAS

- Guarieiro, L. L. N.; Pereira, P. A. P.; Vieira, P. C.; Lopes, N. P.; de Andrade, J. B.; *Quim. Nova* **2018**, *41*, 1226. [Crossref]
- Politzer, K.; *Quim. Nova* **2005**, *28*, S76. [Crossref]
- Sinisterra, R. D.; Speziali, M. G.; Guimarães, P. P. G.; da Silva, A. M.; *Quim. Nova* **2013**, *36*, 1527. [Crossref]
- Galembeck, F.; *Quim. Nova* **2013**, *36*, 1600. [Crossref]
- Galembeck, F.; *Quim. Nova* **2017**, *40*, 630. [Crossref]
- Dicionário Michaelis, *Inovação*, <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/inova%C3%A7%C3%A3o/>, acessado em junho 2025.
- Godin, B.; *Innovation Contested: The Idea of Innovation over the Centuries*, 1st ed.; Routledge: New York, 2015. [Crossref]
- Audy, J.; *Estudos Avançados* **2017**, *31*, 75. [Crossref]
- Schumpeter, J. A.; *Capitalismo, Socialismo e Democracia*; Fundo de Cultura: Rio de Janeiro, 1961. [Link] acessado em junho 2025
- Rogers, E. M.; *Diffusion of Innovations*, 3rd ed.; The Free Press: New York, 1971. [Link] acessado em junho 2025
- OECD/Eurostat; *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*, 4th ed.; OECD Publishing: Paris, Eurostat: Luxembourg, 2018. [Crossref]
- Rogers, E. M.; *La Difusión de Innovaciones: Elementos de Difusión*; Seminário sobre Aspectos Sociológicos de la Extensión Rural - La Reforma Agraria y el Desarrollo Rural, 1969.
- Rossi, E. R.; *Educar em Revista* **2021**, *37*, e78885. [Crossref]
- Carbonell, J.; *A Aventura de Inovar: a Mudança na Escola*; Artmed: Porto Alegre, 2002.
- Maceno, N. G.; Guimarães, O. M.; *Quim. Nova Escola* **2013**, *35*, 48. [Link] acessado em junho 2025
- Ritter, J.; Maldaner, O. A.; *Praxis & Saber* **2015**, *6*, 195. [Link] acessado em junho 2025
- Leal, M. C.; Mortimer, E. F.; *Ciência & Educação* **2008**, *14*, 213. [Link] acessado em junho 2025
- Gama, M. E.; Terrazzan, E. A.; *Form. Doc.* **2012**, *04*, 126. [Link] acessado em junho 2025
- Senise, P.; *Quim. Nova* **2007**, *30*, 1397. [Link] acessado em junho 2025
- Monteiro, A.; *Dados* **2019**, *62*, e20170009. [Crossref]
- Plonski, G. A.; *Estudos Avançados* **2017**, *31*, 7. [Crossref]
- de Oliveira, M. B.; *Scientiae Studia* **2011**, *9*, 669. [Crossref]
- Antunes, A. M. S.; *Quim. Nova* **2013**, *36*, 1491. [Link] acessado em junho 2025
- Pérez, C.; Farah, E.; *Educación* **2023**, *47*, 01. [Crossref]
- Arteaga Fuertes, D. A.; Chavarro Cordoba, M.; Lenis Velasquez, L. A.; *Educación Química* **2023**, *34*, 59. [Crossref]
- Reséndiz, R. G.; Pastrana, P. A.; Aceves, L. S.; *Historia Mexicana* **2022**, *72*, 251. [Crossref]
- Muñoz-Roa, M.; Negroni-Rehel, M.; Hechenleitner-Carvalho, M.; *FEM* **2022**, *25*, 169. [Crossref]
- Kiefer, M. A.; Billing, C.; Erasmus, R. M.; Mogodi, W. M.; Billing, D. G.; *S. Afr. J. Chem.* **2022**, *76*, 111. [Link] acessado em junho 2025
- Nkosi, S. M.; Mahlambi, P. N.; Chimuka, L.; *S. Afr. J. Chem.* **2022**, *76*, 56. [Link] acessado em junho 2025
- CAPES, *GT Inovação e Transferência de Conhecimento – Relatório Final das Atividades do Grupo de Trabalho*, <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/2020-01-03-relatorio-gt-inovacao-e-transferencia-de-conhecimento-pdf>, acessado em junho 2025.
- Velho, L.; *Sociologias* **2011**, *26*, 128. [Link] acessado em junho 2025

32. Garcia, E.; *Línguas e Letras* **2016**, *17*, 291. [Link] acessado em junho 2025
33. Gil, A. C.; *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*, 4^a ed.; Atlas: São Paulo, 2002.
34. Almeida, C. C.; Gracio, M. C. C.; *Encontros Bibli* **2019**, *24*, 62. [Link] acessado em junho 2025
35. de Freitas, F. M.; Abib, P. B.; Sangiogo, F. A.; *Revista Debates em Ensino de Química* **2024**, *10*, 234. [Link] acessado em junho 2025
36. Albuquerque, E. M.; *Revista de Economia Política* **1996**, *16*, 387. [Link] acessado em junho 2025
37. Clarivate; *Journal Citation Reports*, <https://clarivate.com/webofsciencelibrary/solutions/journal-citation-reports/>, acessado em junho 2025.
38. Chemical Reviews; *Chemical Reviews: About the Journal*, <https://pubs.acs.org/page/chreay/about.html>, acessado em junho 2025.
39. Chemical Society Reviews; *Chemical Society Reviews: Journals, Books & Databases*, <https://www.rsc.org/journals-books-databases/about-journals/chem-soc-rev/>, acessado em junho 2025.
40. Nature Materials; *Nature Materials: Aims & Scope*, <https://www.nature.com/nmat/aims>, acessado em junho 2025.
41. Anastas, P. T.; *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2021**, *9*, 5250. [Crossref]
42. Labarca, M.; Bejarano, N.; Eichler, M. L.; *Quim. Nova* **2013**, *36*, 1256. [Crossref]
43. Ramos, A. L. D.; Tanase, S.; Rothenberg, G.; *Quim. Nova* **2014**, *37*, 123. [Crossref]
44. Nasrollahpour, H.; Sánchez, B. J.; Sillanpää, M.; Moradi, R.; *ACS Appl. Nano Mater.* **2023**, *6*, 12609. [Crossref]
45. Epicoco, M.; Oltra, V.; Jean, M. S.; *Technological Forecasting and Social Change* **2014**, *81*, 388. [Crossref]
46. Tee, S. Y.; Win, K. Y.; Teo, W. S.; Koh, L.-D.; Liu, S.; Teng, C. P.; Han, M.-Y.; *Adv. Sci.* **2017**, *4*, 1600337. [Crossref]
47. Cancino, J.; Maragoni, V. S.; Zucolotto, V.; *Quim. Nova* **2014**, *37*, 521. [Crossref]
48. de Lima, R. B.; Silva, C. M. L. F.; *Experiências em Ensino de Ciências* **2018**, *13*, 198. [Link] acessado em junho 2025
49. Hao, D.; Qi, L.; Tairab, A. M.; Ahmed, A.; Azam, A.; Luo, D.; Pan, Y.; Zhang, Z.; Yan, J.; *Renewable Energy* **2022**, *188*, 678. [Crossref]
50. Raphael, E.; Silva, M. N.; Szostak, R.; Schaivon, M. A.; Nogueira, A. F.; *Quim. Nova* **2018**, *41*, 61. [Crossref]
51. Silva, B. P. P.; *Estudo e Caracterização de Células Solares de Heterojunção Livres de Fulereno: PBTPD/N2200*; Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil, 2020. [Link] acessado em junho 2025
52. Rodrigues, J. S.; Carmo, K. P.; Freitas, R. R. M.; Silva, J. O.; Lima, V.; Botaro, V. R.; *Rev. Virtual Quim.* **2020**, *12*, 867. [Crossref]
53. Bauer, F.; Coenen, L.; Hansen, T.; McCormick, K.; Palgan, Y. V.; *Biofuels, Bioprod. Biorefin.* **2017**, *11*, 534. [Crossref]
54. Waller, P. J.; Gándara, F.; Yaghi, O. M.; *Acc. Chem. Res.* **2015**, *48*, 3053. [Crossref]
55. de Moura, A. F.; *Quim. Nova* **2000**, *23*, 851. [Crossref]
56. Miron, M. V. G.; Cavalcanti, F. C. B.; Wongschowski, P.; *Quim. Nova* **2005**, *28*, S86. [Crossref]
57. Pissardini, R. S.; *Memcomputação: Características e Aplicações em Computação Paralela*, <https://www.ime.usp.br/~amaris/mac-5742/reports/MemComputacao.pdf>, acessado em junho 2025.
58. Berrios, L. V. M.; Couto, C. C. C. R.; Cury, Y. D.; Rezende, P. H. O.; *XVII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, Brasil, 2019. [Link] acessado em junho 2025
59. Julião, C.; Albuquerque, S. S.; *Rev. Bras. Ensino Fis.* **2021**, *43*, e20210107. [Crossref]
60. Mattos, J.; Guimarães, L.; *Gestão da Tecnologia e Inovação: Uma Abordagem Prática*; Saraiva: São Paulo, 2005.
61. Morés, A.; *Educação Temática Digital* **2018**, *20*, 176. [Crossref]
62. Capes, Ministério da Educação; *Documento de Área 04: Química*; Brasília, 2019. [Link] acessado em junho 2025
63. Dagnino, R.; *Tecnologia Social: Contribuições Conceituais e Metodológicas [on-line]*; EDUEPB: Campina Grande, 2014. [Link] acessado em junho 2025
64. Machado, S. P.; Cortes, C. E. S.; Almada, R. B.; *Quim. Nova* **2023**, *46*, 126. [Crossref]
65. Cavalcante, P.; *Inovação e Políticas Públicas: Superando o Mito da Ideia*, 1^a ed.; Ipea: Brasília, 2019. [Link] acessado em junho 2025
66. Mota, R.; Scott, D.; *Educando para Inovação e Aprendizagem Independente*, 1^a ed.; Elsevier: Rio de Janeiro, 2014.
67. Sangiogo, F. A.; Kohn, P. B. A.; de Freitas, F. M.; *Expressa Extensão* **2022**, *27*, 63. [Crossref]
68. Eichenberger, H. V.; *História da Ciência e Ensino* **2019**, *19*, 2. [Crossref]