



CONCEITOS E ADOÇÃO DE QUÍMICA VERDE: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

DOI: 10.19177/rgsa.v8e12019248-264

Paola Graciano Souza¹

RESUMO

O objetivo deste artigo foi identificar, descrever e analisar as publicações científicas sobre química verde. Foi realizada uma revisão bibliográfica nas bases de dados do Portal Capes, tendo sido selecionados periódicos de classificação A1, nos quais foi realizada posterior consulta de artigos sobre o tema publicados entre 1998 e 2017. Os resultados mostraram afinidades entre as perspectivas dos principais autores. De maneira geral, a química verde é considerada agente fundamental na busca por uma sociedade mais sustentável, ainda que as pesquisas do setor necessitem de uma maior interdisciplinaridade, especialmente entre as áreas de química, engenharia e administração, em que se encontram poucas publicações transdisciplinares sobre o tema.

Palavras-chave: Química verde. Eco materiais. Eco design.

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Bacharel em Administração pela UFRGS (2008-2013). Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ). E-mail: lolagraciano@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A difusão da sustentabilidade no meio acadêmico envolve o confronto entre diferentes conceitos da terminologia, bem como seus aspectos práticos, muitas vezes tomados como antagônicos. Dentro de cada esfera do chamado Triple Bottom Line (ELKINGTON, 1999), destacam-se iniciativas importantes em cada um dos tripés, estando o presente artigo a cargo de descrever um dos principais desdobramentos dos pilares sustentabilidade ambiental e econômica – a química verde.

Segundo Nidumolu et al. (2009) “não há alternativa ao desenvolvimento sustentável”. Embora essa nova proposta de produção seja ainda encarada como um limitador de competitividade, que oferece mais custos do que benefícios, os autores apontam o caminho contrário: tornar-se ambientalmente amigável diminui custos pelo uso mais consciente de recursos, além de criar um ambiente favorável para novos modelos de negócios. Uma das formas de tornar os processos mais eficientes é reduzir a utilização de componentes químicos pesados que ofereçam altos custos de conservação e segurança (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Outro princípio fundamental defendido por Anastas (MULTINATIONAL MONITOR, 2009) é a testagem exaustiva das inovações desenvolvidas pela indústria química. Processos de baixa testagem podem ganhar uma curva de difusão demasiado rápida devido à corrida competitiva de determinados setores (TEECE, 1986). Em contrapartida a essa rápida difusão, a retirada de um produto ou componente do mercado, uma vez constatado um grau considerável de toxicidade, pode demorar até três décadas (MEYBECK, 2003).

Segundo Newton (2005), “em doses relativamente baixas, pesticidas e produtos de limpeza já podem afetar nossa capacidade reprodutiva”. Há também uma preocupação crescente com os resíduos gerados pelas novas tecnologias, especialmente na indústria alimentícia e farmacêutica. A dioxina, substância de frequente utilização pela indústria automobilística, foi recentemente encontrada em alta concentração no rio Cape Fear Basin, na Carolina do Norte. Trata-se de um cancerígeno não-biodegradável, cujo processo de eliminação da água é dificultoso e

delicado (RICHARDSON e KIMURA, 2017). Já o politetrafluoretileno (Teflon®), com múltiplas aplicações que vão desde a indústria têxtil até embalagens de alimentos, foi encontrado em concentração de 20% no sangue de indivíduos que consumiram um pacote de pipocas de micro-ondas ao mês em pesquisa realizada nos EUA durante o ano de 2015 (BEGLEY et al. apud RICHARDSON e KAMURA, 2017).

Diante da alta concentração de substâncias potencialmente tóxicas e a distribuição assimétrica de informações acerca das práticas dessas indústrias, o presente artigo busca conceituar o atual estado da arte nos estudos de químicos menos agressivos e poluentes através de uma revisão de literatura que apresente os principais conceitos e exemplos do emprego da chamada química verde na prática de diferentes indústrias, propondo-se, por fim, a discussão do tema no contexto atual.

2 QUÍMICA VERDE: CONCEITO E HISTÓRICO

Conforme a *Environmental Protection Agency* (EPA, 2107), a química verde pode ser definida como: “o design de produtos químicos e processos que reduzem ou eliminam o uso ou geração de substâncias perigosas. Química verde se aplica ao longo do ciclo de vida de um produto químico, incluindo a sua concepção, fabricação, utilização e descarte”. Isoladamente, o termo “química” é aplicado à estrutura e transformação da matéria, tornando sua adoção extremamente ampla (ANASTAS e LANKEY, 2000).

A iniciativa teve origem no *Pollution Prevention Act* de 1990, em que os Estados Unidos colocariam pela primeira vez diretrizes antipoluição em uma lei federal. Dentre as medidas principais, constava a prevenção e redução de poluentes, aspecto em que a química verde seria decisiva. Essa abordagem foi firmada na academia principalmente pelo trabalho de Anastas e Warner (1998): *Green Chemistry Theory and Practice*, obra que disseminou os doze princípios da química verde, adotados como premissas nas abordagens posteriores ao tema (EPA, 2017).

Um dos maiores desafios da química verde são as implicações toxicológicas dos químicos disponíveis no mercado. Segundo Newton (2005), “apenas uma

pequena porcentagem dos químicos existentes hoje foi extensivamente pesquisada para que se entendessem quaisquer efeitos danosos à saúde ambiental.”. Para o autor, antes que se possa investir em uma química mais benigna, é necessário entender os mecanismos da toxicidade.

2.1 Os doze princípios da química verde

As 12 diretrizes da química verde (Tabela 1) preconizam a utilização eficiente de recursos com significativa diminuição de resíduos e a proposição de substâncias que contribuam para a transformação de matéria. Também estão incluídas as inovações tecnológicas (como a nanotecnologia biomolecular), que deveriam ser projetadas de forma a não ameaçar o meio ambiente e a vida humana (ANASTAS & ZIMMERMAN, 2003).

Tabela 1 – Os 12 princípios da química verde (continua)

1. Prevenir	Evitar a produção de resíduo é melhor do que tratá-lo ou “limpá-lo” após sua geração.
2. Economia de átomos	Desenhar metodologias sintéticas que possam maximizar a incorporação de todos os materiais de partida no produto final.
3. Síntese de produtos menos perigosos	A síntese de um produto químico deve utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente.
4. Desenho de produtos seguros	Os produtos químicos serem desenhados de tal modo que realizem a função desejada e ao mesmo tempo não sejam tóxicos.
5. Solventes e auxiliares mais seguros	O uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes de separação, secantes, etc.) precisa sempre que possível, tornar-se desnecessário e, quando utilizadas, essas substâncias devem ser inócuas.
6. Busca pela eficiência de energia	A utilização de energia pelos processos químicos deve ser minimizada. Preferência por processos conduzidos à temperatura e pressão ambientes.
7. Uso de fontes renováveis de matéria-prima	Sempre que for técnica e economicamente viável, a utilização de matérias-primas renováveis deve ser priorizada em relação às não-renováveis.

8. Evitar a formação de derivados	Evitar derivação desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária por processos físicos e químicos).
9. Catálise	Reagentes catalíticos devem ser priorizados em relação a reagentes estequiométricos.
10. Design para a degradação	Projetar os produtos para que ao final de sua utilização se fragmentem em substâncias de degradação inócua que não persistam no ambiente. Desenvolvimento de tecnologias analíticas que monitorem em tempo real a formação de substâncias nocivas.
11. Análise em tempo real para a prevenção da poluição	
12. Química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes	Selecionar substâncias que minimizem o potencial de acidentes químicos (vazamentos, explosões, incêndios).

Fonte: Adaptado de Lenardão et al. (2003)

2.2 Inovações químicas sustentáveis e competitividade

A comissão Bruntland (1987), definiu a sustentabilidade como um conjunto de medidas que visam prover as necessidades humanas atuais sem comprometer as gerações seguintes. A partir da ecoeficiência, um dos principais pressupostos do desenvolvimento sustentável, as firmas repensam seus modelos produtivos de forma a reduzir impactos ambientais, em oposição à inovação de produto, em que o valor ambiental é meramente incorporado ao *output* comercial gerado pela firma (HELLSTRÖM, 2007).

Para Clark (1998), o desenvolvimento sustentável foi legitimado como uma meta necessária para o atingimento de demandas societais, econômicas e ambientais, estando a química verde em um papel central em melhorar a qualidade de vida, a competitividade da indústria química e o ambiente natural. Ainda segundo Gonzales e Smith (2003), em acordo com Clark (1998), tais mudanças no modelo produtivo atual para uma química mais segura, incluiriam a atuação efetiva de químicos e engenheiros de processo capazes de monitorar, reportar e minimizar desperdícios despejados no ar, água e sólidos provenientes de experimentos ou processos. As empresas que tratarem com seriedade a sustentabilidade hoje, irão se sobressair com relação a seus concorrentes à medida que forem desenvolvendo

competências (Tabela 4) que seus competidores serão fortemente pressionados a adotar futuramente. Esse vanguardismo colocará as companhias que adotarem as tecnologias sustentáveis mais cedo em uma posição estratégica confortável, uma vez que a sustentabilidade será sempre uma parte integral do desenvolvimento (NIDUMOLU et al., 2009).



Tabela 2 – Desafios, competências e oportunidades da sustentabilidade

ESTÁGIO 1 – Ver <i>compliance</i> como oportunidade	ESTÁGIO 2 – Tornar a cadeia de valor mais sustentável	ESTÁGIO 3 – Desenhar produtos e serviços sustentáveis	ESTÁGIO 4 – Desenvolver novos modelos de negócios	ESTÁGIO 5 – Criar plataformas de práticas inovadoras
<p>DESAFIO CENTRAL</p> <p>Garantir que o cumprimento de normas se torne uma oportunidade para a inovação</p> <p>COMPETÊNCIAS NECESSÁRIAS</p> <p>A habilidade de antecipar e formatar regulações.</p> <p>A capacidade de trabalhar com outras companhias, incluindo as rivais, para implementar soluções criativas.</p> <p>OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO</p> <p>Usar o <i>compliance</i> para induzir a companhia e seus parceiros a experimentarem tecnologias sustentáveis, materiais e processos.</p>	<p>DESAFIO CENTRAL</p> <p>Aumentar a eficiência através de toda a cadeia de valor.</p> <p>COMPETÊNCIAS NECESSÁRIAS</p> <p>Expertise em técnicas como manipulação do carbono e análise de ciclo de vida.</p> <p>A habilidade de redesenhar operações para utilizar menos energia e água, produzir menos emissões e gerar menos desperdício. A capacidade de garantir que fornecedores e distribuidores tornem suas operações ambientalmente amigáveis</p> <p>OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO</p> <p>Desenvolver fontes sustentáveis de matéria-prima e componentes.</p> <p>Aumentar o uso de fontes de energia limpa como eólica e solar.</p> <p>Encontrar finalidades inovativas para produtos retornados,</p>	<p>DESAFIO CENTRAL</p> <p>Desenvolver ofertas sustentáveis e redesenhar as existentes para se tornar eco amigável.</p> <p>COMPETÊNCIAS NECESSÁRIAS</p> <p>A habilidade de identificar quais produtos e serviços são menos amigáveis ao meio-ambiente.</p> <p>A habilidade de gerar apoio público para ofertas sustentáveis e não ser considerado “green washing”.</p> <p>O know-how de gerenciamento para equilibrar tanto o suprimento de materiais verdes quanto a manufatura de produtos.</p> <p>OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO</p> <p>Uso de biomímese no desenvolvimento de produtos.</p> <p>Desenvolvimento de embalagens compactas e ambientalmente amigáveis.</p>	<p>DESAFIO CENTRAL</p> <p>Encontrar novas maneiras de entregar e capturar valor, o que irá mudar as bases da competição.</p> <p>COMPETÊNCIAS NECESSÁRIAS</p> <p>A capacidade de entender o que os consumidores querem e assimilar diferentes maneiras de absorver essas demandas.</p> <p>A habilidade de entender como os parceiros podem aprimorar o valor dos produtos oferecidos.</p> <p>OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO</p> <p>Desenvolver novas tecnologias de entrega que mudem consideravelmente as relações na cadeia de valor.</p> <p>Criar modelos de monetização que se relacionem mais com serviços do que com produtos.</p> <p>Elaborar modelos de negócio que combinem infraestruturas físicas e digitais.</p>	<p>DESAFIO CENTRAL</p> <p>Questionar através das lentes da sustentabilidade a lógica dominante por trás dos negócios de hoje.</p> <p>COMPETÊNCIAS NECESSÁRIAS</p> <p>Conhecimento sobre o quanto recursos renováveis e não-renováveis afetam o ecossistema dos negócios e indústrias.</p> <p>A expertise para sintetizar modelos de negócio, tecnologias e regulações em diferentes indústrias.</p> <p>OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO</p> <p>Construir plataformas de negócios que permitam aos consumidores e fornecedores utilizarem energia de modo radicalmente diferente. Diminuir o consumo de água nos processos. Utilizar a energia gerada como subproduto.</p>

Fonte: Adaptado de Nidumolu et al. (2009).

2.3 Aplicação de química verde em inovações industriais

Anastas e Eghbali (2009) apontam avanços da indústria no uso de processos mais limpos e desenvolvimento de substâncias menos danosas, conforme os casos descritos na Tabela 3:

Tabela 3 – Avanços da química verde na indústria

Produto	Organização	Processo	Output
Rota sintética mais verde	Eastman	Biocatalítico. Ocorre sob condições amenas.	Economia de energia e eliminação de centenas de litros de solventes orgânicos utilizados no processo anterior.
Pesticidas verdes (Spinetoram)	Dow AgroSciences	Entendimento das relações de estrutura-atividade de biopesticidas naturais como esforço para prever produtos análogos mais ativos	Expectativa de eliminar cerca de 1,8 milhões de quilos de inseticidas de organofosfato durante seus primeiros 5 anos de uso.
Sintético verde para Sitagliptin (aminoácido derivativo usado para o tratamento de diabetes tipo 2)	Merck	Nova catálise assimétrica de hidrogenação de enaminas desprotegidas evitando derivação desnecessária	Redução significativa de desperdício, diminuindo sensivelmente os custos do processo.
Reformulação do Paclitaxel (ingrediente ativo do anticancerígeno Taxol®)	BMS	Através de avanços na biotecnologia, foi possível extrair o Paclitaxel diretamente de culturas de células de plantas.	Eliminação de todos os solventes orgânicos, reagentes tóxicos e demais passos do processo anterior.
Sintético verde para a sertralina (ingrediente ativo usado no tratamento de depressão)	Pfizer	Diminuição das três etapas anteriores do processo para uma. Corte de matéria prima para que todo o processo pudesse ser feito em etanol.	Eliminação de toda a matéria prima previamente utilizada e de quatro solventes considerados tóxicos.
Novas rotas para aminas aromáticas (utilizadas como bases para corantes)	Solutia, Inc.	Elimina o gás de cloro da síntese da 4-aminodifenilamina	Eliminar resíduos aquosos contendo altos níveis de sais inorgânicos e diminuir o risco oferecido pela estocagem e transporte do gás de cloro

Fonte: Adaptado de Anastas e Eghbali (2009)

Scruggs e Ortolano (2011) mostram medidas de prevenção (Tabela 4) identificadas em uma pesquisa com 20 companhias utilizadoras a jusante, isto é, empresas ou trabalhadores individuais que utilizam substâncias químicas em seus processos (EUROPEAN CHEMICALS AGENCY, 2017) sobre a redução na utilização de químicos pesados.

Tabela 4 – Utilizadores à jusante quanto à redução de químicos altamente tóxicos em seus produtos (continua)

Ação	Nº de companhias	Abordagem geral dos utilizadores à jusante
Desenvolve listas de substâncias pesadas	18	Entrega licenças a todos os fornecedores, que assinam declarando que eles (e seus fornecedores) irão corroborar com as restrições.
Realiza testes e auditorias	12	Laboratórios terceirizados testam amostras de fornecedores para verificar a presença de certos químicos. Fábricas são auditadas para garantir sistemas adequados que sigam as exigências da companhia.
Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental		
Exige transparência total nos materiais	6	Exigem que os fornecedores declarem quais químicos estão contidos em seus produtos. Permite à companhia controlar os químicos presentes em seus produtos e manter um banco de dados.
Elimina químicos/produtos	17	Ativamente define químicos alvo ou produtos de maior preocupação para serem eliminados sempre que houver substitutos aceitáveis. Pode demorar tempo considerável a depender se a companhia tem vanguarda no setor.
Trabalha em conjunto com fornecedores	14	Trabalha com fornecedores para encontrar substitutos mais seguros para certos químicos ou os treina para manuseá-los.
Avalia fornecedores	6	Monitora o desempenho de fornecedores em exigências relacionadas a químicos para decidir sobre incentivos em futuros contratos.
Desenvolve banco de dados de químicos	13	Desenvolve um banco de dados de todos os químicos usados em seus produtos, incluindo informações sobre propriedades e

Tabela 4 – (conclusão)

Avalia químicos/produtos com ferramentas de análise	8	Prevê riscos associados a químicos e/ou determina quais produtos contêm químicos críticos usando ferramentas internas ou softwares e ferramentas disponíveis comercialmente.
---	---	--

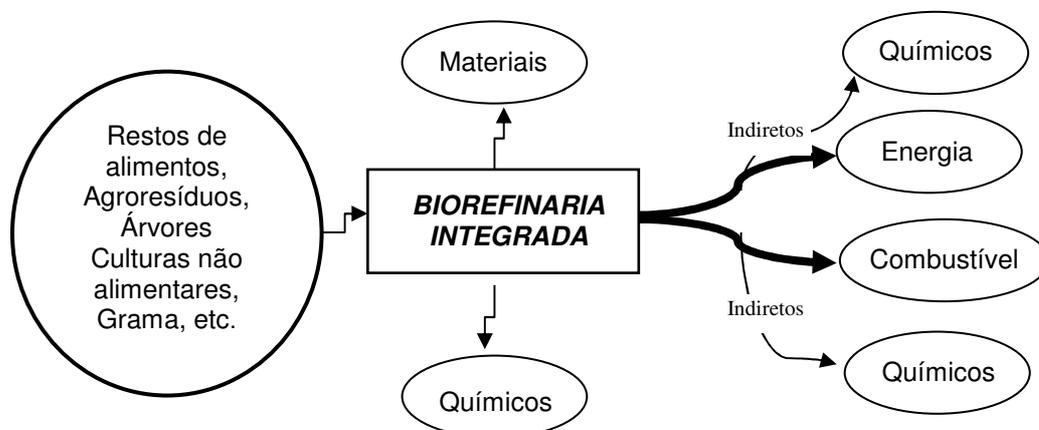
Fonte: Adaptado de Scruggs e Ortolano (2011).

2.4 Aproveitamento de subprodutos e biorefinarias

Alguns exemplos importantes da aplicação de processos químicos mais verdes se encontram nas chamadas biorefinarias. Adsorventes de carbono de alta qualidade extraídos de resíduos vegetais de processos agrícolas e industriais já foram identificados como potentes despoluidores de água, atuando com eficiência sobre poluentes orgânicos como fenol, benzeno, tolueno e xileno (PREDEANU et al., 2008). Esses resíduos são especialmente eficientes para as biorefinarias (Figura 1).

Resíduos orgânicos da agricultura e restos de alimentos não podem mais ser aterrados devido aos riscos à saúde humana, o que faz com que se opte tradicionalmente pela queima dessas substâncias. Um processo alternativo e mais sustentável seria gasificá-los, utilizando-os como propulsores de turbinas a gás para a produção de eletricidade (CLARK et al., 2005).

Figura 1 – Biorefinaria integrada com fontes mistas de matérias-primas de químicos, energia, combustíveis e materiais



Fonte: Adaptado de Clark et al. (2005).

Resíduos alimentares também são particularmente ricos em sílica, insumo com múltiplas aplicações. A palha de trigo é um forte exemplo de subproduto agrícola de grande volume e baixo valor agregado que pode se tornar a base de uma biorefinaria (CLARK et al., 2005).

Na indústria farmacêutica tem sido aplicado o conceito de “repropósito”, isto é, material eco amigável (Tabela 5) capaz de ser moldado em uma nova forma que tenha outro propósito farmacêutico como alternativa à poluição ambiental do material de embalagens (SINGH e MALVIYA, 2011).

Tabela 5 – Categoria de substâncias com base na origem (continua)

Proteínas derivadas de plantas		Proteínas derivadas de animais	
Tipo	Descrição	Tipo	Descrição
Glúten	Proteína de armazenamento principal em trigo e milho. Alto brilho, resistente à água. Usado como plástico termo endurecido para rotulagem de garrafas de água, mas absorve água durante a imersão, tem baixo preço. Usado em filmes comestíveis, adesivos, moldados biodegradáveis, filmes termoplásticos para uso agrícola, janelas em envelopes, revestimentos superficiais em papel, sacos solúveis em água como fertilizantes, detergentes, cosméticos.	Caseína	Proteína de armazenamento principal em trigo e milho, o plástico exibe proteína derivada de caseína e leite, facilmente processável
Proteína de soja	Comercialmente disponível como concentrado de soja, a farinha de soja e o isolado de soja têm um teor de proteína diferente. São usados como adesivos ou plásticos biodegradáveis produzidos por processo de termo moldagem como tintas, revestimentos de papel, óleo para lubrificação, filmes de soja e materiais de revestimento para preservação de substâncias.	Queratina	Proteína estrutural extraída de fluxos de resíduos como cabelo, unhas e penas, propriedades mecânicas pobres, proteínas mais baratas. Usado para produzir plástico insolúvel em água.

Trigo	Subproduto da indústria do queijo, rico em-lacto globulina que constitui a base para o seu uso na como revestimentos e filmes comestíveis.	Colágeno	Proteína fibrosa, flexível e estrutural com unidade comum de repetição: prolina, glicina e hidroprolina, encontrada em tecidos animais, particularmente tendões, pele e ossos. Usado como material de embalagem com diversas aplicações farmacêuticas.
-------	--	----------	--

Tabela 5 – (conclusão)

Zein	Compreende um grupo de proteínas solúveis em álcool (Prolaminas) encontradas no endosperma do milho. Filmes à base de Zein são utilizados como biomaterial de embalagem e em revestimentos farmacêuticos.	Gelatina	Obtido da pele e dos ossos. Usado como material de embalagem para melhorar a sensibilidade à umidade, como matéria-prima para filmes fotográficos, para aromas microencapsulantes, vitaminas e edulcorantes e filmes de gelatina na indústria farmacêutica para fabricar comprimidos e cápsulas
------	---	----------	---



Fonte: Adaptado de Singh e Malviya (2011).

3 METODOLOGIA

O presente estudo reuniu uma revisão de literatura especializada no período de 1998 a 2017. Foram realizadas consultas em periódicos de classificação A1 identificados com o tema sustentabilidade conforme listagem da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2015), a notar *Clean Technologies And Environmental Policy, Environmental Monitoring And Assessment, Environmental Progress & Sustainable Energy, Environmental Science & Policy, Environmental Technology, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*. A fim de construir visões diferenciadas sobre o tema, foram consultadas publicações ampliadas para a área de Administração como um todo, como *Harvard Business Review, International Business Review,*

International Journal Of Production Research e Journal Of High Technology Management Research.

A busca também abrangeu o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SBUFRGS, 2017), em que foram encontrados três bancos de dados importantes para a pesquisa: *Business Source Complete*, *Cambridge Core*, *E-books Atheneu*, *Springer e Zahar* e Google Acadêmico. As palavras-chave utilizadas foram “química verde”, “eco materiais” e “eco design”, aplicadas em português e inglês.

As consultas retornaram 100 artigos, cujos resumos foram lidos para a seleção de publicações relevantes para os objetivos da pesquisa. O critério de seleção se definiu pela relação dos estudos com a área de Administração, excluindo-se publicações especializadas em Química, Química Industrial e Engenharia, cujas complexidades e particularidades fogem à proposta do presente estudo.

Em seguida, buscaram-se obras seminais no tema através do número de citações nos artigos selecionados. Foram definidos, a partir dessa observação, dois livros-base para a compreensão conceitual de química verde e seus desdobramentos mais recentes: *Green Chemistry: principles and practice* e *Innovation in Green Chemistry and Green Engineering*.

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Embora as aplicações industriais da química verde tenham exemplos positivos e haja considerável progresso e aceitação, ainda é nebulosa a construção de um conceito e conjunto de métricas que definam, de fato, o que é “ser verde” (LAPKIN e CONSTABLE apud Winterton, 2016). Para Clark (2005), a ascensão de organizações em prol da química verde em países como os Estados Unidos, Reino Unido e Itália se deve ao fato de que a educação é colocada em paridade com a pesquisa em termos de importância, pois o futuro sustentável depende das próximas gerações.

Em contrapartida, Winterton (2016) afirma que a prática dos princípios propostos por Anastas e Zimmermann (2003) são auto evidentes e não apresentam nada novo em comparação com os desafios que a indústria sempre enfrentou. O autor também aponta para a complexidade do tema e a necessidade de que ele

ganhe amplitude para além da química, pois não seria adequado que a disciplina abandonasse seus conceitos basilares para se dedicar a discussões sobre tecnologia sustentável.

Nos EUA, uma ação importante na direção de legitimar a química verde se deu através dos prêmios distribuídos pelo Presidential Green Chemistry Challenger como o principal veículo de circulação de avanços na química verde e fomento de iniciativas dentro do tema (CLARK, 2005). No entanto, o próprio Anastas nota que as iniciativas envolvendo química verde partem majoritariamente de pequenas organizações ou empreendedores individuais (MULTINATIONAL MONITOR, 2009).

A difusão lenta dos princípios, segundo Winterton (2016), tem a ver com a total impossibilidade prática de substituir combustíveis de transporte por biomassa, conhecido por “ilusão do biocombustível”. Tais considerações apontam para um questionamento central: até que ponto é possível replicar descobertas e inovações baseadas nos doze princípios em uma escala industrial?

São também desafiadoras as relações políticas implicadas na elaboração de normas que favoreçam um futuro mais sustentável, dadas evidências de que os legisladores pouco conhecem o estado da arte no assunto e ignorem o grande número de acadêmicos envolvidos na área (NILSSON et al., 2015).

Também se destacam os riscos associados à nanotecnologia verde. Embora tida como alternativa para diversos problemas ambientais, essa tecnologia oferece incertezas que põem em risco a saúde humana e o meio ambiente. As nanopartículas possuem o potencial de se dispersarem no ambiente, além de apresentarem alto grau de toxicidade para os organismos vivos (morte celular, alteração de DNA, problemas respiratórios), tendência à persistência – habilidade de permanecer no ambiente - bioacumulação e reversibilidade (PATIL et al., 2016).

Os avanços da química verde, embora bastante sustentados pela teoria desenvolvida por Anastas e Eghbert, ainda enfrenta desafios significativos quanto à aplicação na indústria. Embora existam procedimentos, formulações e solventes menos agressivos ao ambiente e à saúde humana, tais inovações encontram barreiras econômicas, temporais e, principalmente, a ausência de uma combinação estruturada de stakeholders que permitam uma integração transdimensional entre as áreas envolvidas (WELP et al., 2006).

Conforme aponta Winterton (2016), o ensino de química nos moldes clássicos já exige considerável dedicação dos alunos, estando uma proposição curricular da química verde muito longe da realidade cognitiva do ensino de química. Além disso, a toxicologia é relativamente recente na trajetória dos experimentos químicos (HAYES e LAWS, 1991), o que alicerça a disciplina em princípios de incerteza, ainda muito aquém da testagem exaustiva sugerida por Anastas (MULTINATIONAL MONITOR, 2009).

O presente levantamento, ainda que aponte um desenvolvimento lento da química verde na maioria das indústrias, mostra avanços importantes na indústria farmacêutica, em que as inovações se devem a diminuição de custos e segurança do trabalho.

CONCEPTS AND ADOPTION OF GREEN CHEMISTRY: A LITERATURE REVIEW



The aim of this article was to identify, describe and analyze scientific publications on green chemistry. A bibliographic review was carried out in the Portal Capes databases, where periodicals classified as A1 were selected, in which the author consulted articles about the topic published between 1998 and 2017. The results showed similarities between the perspectives of the main authors. In general, green chemistry is considered a fundamental agent in the search for a more sustainable society, although the researches in the sector are still in need of a greater interdisciplinarity, especially between the areas of chemistry, engineering and administration, in which few transdisciplinary publications on the theme could be found.

Keywords: Green chemistry. Eco materials. Eco design

REFERÊNCIAS

ANASTAS, Paul T.; LANKEY, Rebecca L. Life cycle assessment and green chemistry: the yin and yang of industrial ecology. *Green Chemistry*, v. 2, n. 6, p. 289-295, 2000.

ANASTAS, Paul T.; ZIMMERMAN, Julie B. Peer reviewed: design through the 12 principles of green engineering. 2003.

CLARK, James H. et al. Green chemistry and the biorefinery: a partnership for a sustainable future. Green Chemistry, v. 8, n. 10, p. 853-860, 2006.

ANASTAS, Paul; EGHBALI, Nicolas. Green chemistry: principles and practice. Chemical Society Reviews, v. 39, n. 1, p. 301-312, 2010.

CLARK, James H. Green chemistry: challenges and opportunities. Green Chemistry, v. 1, n. 1, p. 1-8, 1999.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES). Plataforma Sucupira. Qualis Periódicos. Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>>. Acesso em 19-mai-2017.

ELKINGTON, John. Triple bottom-line reporting: Looking for balance. AUSTRALIAN CPA, v. 69, p. 18-21, 1999.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Green Chemistry. Disponível em: <<https://www.epa.gov/greenchemistry>> Acesso em 20-mai-2017

GONZALEZ, Michael A.; SMITH, Raymond L. A methodology to evaluate process sustainability. Environmental progress, v. 22, n. 4, p. 269-276, 2003.

HAYES, Wayland J.; LAWS, Edward R. Handbook of pesticide toxicology. In: Handbook of pesticide toxicology. Academic Press, 1991.

HELLSTROM, Tomas. Dimensions of environmentally sustainable innovation: the structure of eco-innovation concepts. SUSTAINABLE DEVELOPMENT-BRADFORD, v. 15, n. 3, p. 148, 2007.

LENARDÃO, Eder João et al. Green chemistry: the 12 principles of green chemistry and its insertion in the teach and research activities. Química Nova, v. 26, n. 1, p. 123-129, 2003.

MEYBECK, Michel et al. Global freshwater quality; a first assessment, Global Environment Monitoring System. OMS, 1990.

MULTINATIONAL MONITOR. The Green Chemistry Revolution – An Interview with Paul Anastas. Disponível em : <<http://www.multinationalmonitor.org/mm2009/032009/interview-anastas.html>>. Acesso em 23-mai-2017.

NEWTON, Benjamin W. Synthesizing a Sustainable Future through Visions of Greener Processes: The 2005 Green Chemistry and Engineering Conference. Environmental Practice, v. 7, n. 04, p. 214-215, 2005.

NIDUMOLU, Ram; PRAHALAD, Coimbatore K.; RANGASWAMI, Madhavan R. Why sustainability is now the key driver of innovation. Harvard business review, v. 87, n. 9, p. 56-64, 2009.

NILSSON, Andreas et al. Public acceptability towards environmental policy measures: Value-matching appeals. Environmental Science & Policy, v. 61, p. 176-184, 2016.

PATIL, Sayali S. et al. Nanoparticles for environmental clean-up: a review of potential risks and emerging solutions. Environmental Technology & Innovation, v. 5, p. 10-21, 2016.

PREDEANU, Georgeta et al. Innovative ecomaterials and technology for wastewaters purification. BALWOIS, 2008.

SCRUGGS, Caroline E.; ORTOLANO, Leonard. Creating safer consumer products: the information challenges companies face. Environmental science & policy, v. 14, n. 6, p. 605-614, 2011.

SINGH, Anupama; SHARMA, Pramod Kumar; MALVIYA, Rishabha. Eco friendly pharmaceutical packaging material. World Applied Sciences Journal, v. 14, n. 11, p. 1703-1716, 2011.

TEECE, David J. Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy. Research policy, v. 15, n. 6, p. 285-305, 1986.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Biblioteca Central. Sistema de Bibliotecas da UFRGS. Disponível em::
<<https://www.ufrgs.br/bibliotecas/pesquisa-2/pesquisa/>>. Acesso em: 10-maio-2017.

WELP, Martin et al. Science-based stakeholder dialogues in climate change research. Stakeholder dialogues in natural resources management, p. 213-240, 2006.

WINTERTON, Neil. Green chemistry: deliverance or distraction?. Clean Technologies and Environmental Policy, v. 18, n. 4, p. 991-1001, 2016.