

Desenvolvimento da química verde no cenário industrial brasileiro

Development of green chemistry in the Brazilian industrial scenario

Gomes, Rachel Novaes¹; Lima, Paula e Siqueira¹; Kuriyama, Sergio Noboru¹; Fidalgo Neto, Antonio Augusto¹.

¹Instituto SENAI de Inovação em Química Verde, Serviços tecnológicos, R. Morais e Silva, 53 - Bloco 9 030, Maracanã, CEP 20271-030, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

*Correspondência: mgomes@firjan.com.br; aaneto@firjan.com.br

Resumo

A preocupação com as questões ambientais tem influenciado diretamente o desenvolvimento de novas tecnologias. A busca por um desenvolvimento sustentável tem levado a busca por metodologias que empreguem o conceito de Química Verde nos diferentes setores das Indústrias Brasileiras. Nesta revisão, fazemos um breve relato da aplicação da Química verde no setor industrial Brasileiro.

Palavras-chave: Química Verde. Sustentabilidade. Indústria.

Abstract

Concern about environmental issues has directly influenced the development of new technologies. The search for sustainable development has led to the search for methodologies that employ the concept of Green Chemistry in the different departments of Brazilian Industries. In this review, we make a brief report on the application of green chemistry in the Brazilian industrial sector.

Keywords: Green chemistry. Sustainability. Industry.

Introdução

A indústria química tem um importante papel no mercado econômico mundial, em virtude dos diversos setores que contempla (produtos químicos industriais, fármacos, fertilizantes, cosméticos, alimentos, defensivos agrícolas, tintas, entre outros). De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a indústria química brasileira simboliza a 4^a maior participação no Produto Interno Bruto (PIB) industrial (ABIQUIM,2001). Nas últimas décadas, a indústria química vem ganhando destaque nos cenários nacional e mundial. No entanto, apesar de sua competência, os impactos ambientais oriundos de seu crescimento se tornaram uma questão mundial relevante. Uma das principais ações no sentido de minimizar o impacto ambiental causado por atividades industriais é o tratamento adequado do resíduo industrial (Lenardão, 2003). Esta nova visão do problema, trouxe a proposição de novas e desafiadoras soluções, buscando alternativas que evitem ou

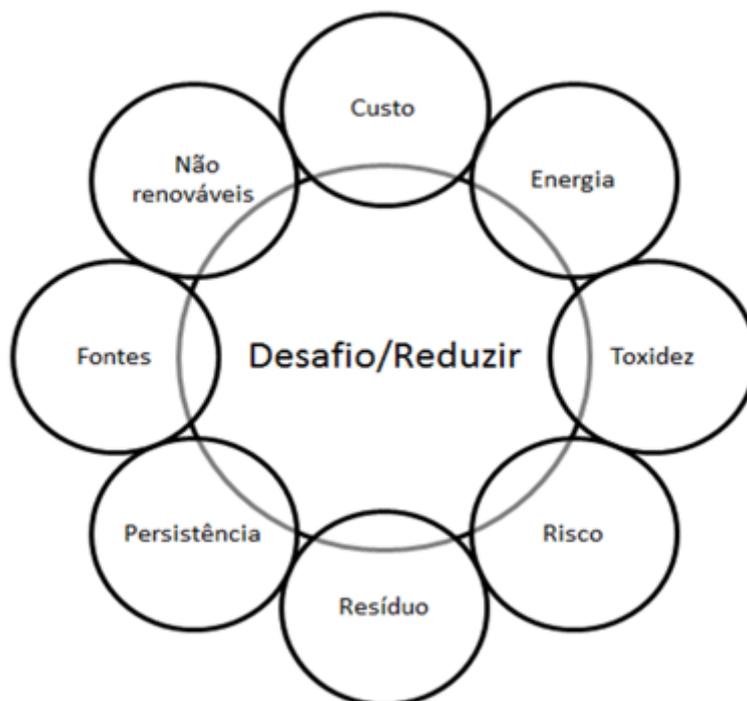
minimizem a produção de resíduos, em detrimento da preocupação exclusiva com o tratamento do resíduo no fim da linha de produção. Este novo direcionamento na questão da redução do impacto da atividade química ao ambiente vem sendo chamado de “*Green Chemistry*”, Química Verde ou ainda, Química sustentável (Tundo, et al., 2000).

O desafio verde: definição e breve histórico

No princípio da década de 90, os químicos Paul Anastas e John Warner, pesquisadores da Environmental Protection Agency (EPA), através do programa conhecido como “Rotas sintéticas alternativas para prevenção de poluição”, propuseram a utilização de tecnologias químicas que visam prevenir a contaminação (Casullo e Soubión, 2012). A partir deste momento, nasce a Química Verde, definida como planejamento, desenvolvimento e aplicação de produtos e processos químicos, tendo como objetivo reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas. Com isso, muitos dos desafios da Química Verde estão pautados em reduzir a poluição e os problemas ambientais sobre os seres vivos; eliminar os processos químicos prejudiciais ao ambiente e substituí-los por outros menos agressivos, sustentáveis, recicláveis e não persistentes; implementar métodos sintéticos para substâncias de alta eficácia com reduzida toxicidade para a saúde humana e para o meio ambiente e ainda, minimizar o uso de energia e usar reagentes preferencialmente na escala catalítica (**FIGURA 1**).

Em 1996, o governo americano instituiu o programa de premiação “*The Presidential Green Chemistry Challenge*” (PGCC), com o objetivo de premiar inovações tecnológicas que permitam reduzir o impacto ambiental dos processos químicos, focando-se em três áreas-chave: vias sintéticas, condições de reação e desenvolvimento de produtos ambientalmente mais aceitáveis.

FIGURA 1: Desafios da Química Verde.



No ano seguinte, assistiu-se à criação do Green Chemistry Institute (GCI), reunindo diferentes pessoas provenientes da indústria, do governo e da academia, para promoção e desenvolvimento da Química Verde. Desde 2001, o GCI atua em parceria com a American Chemical Society para promover interesses comuns na descoberta e no desenvolvimento de produtos e processos que eliminem a formação e a utilização de substâncias perigosas. Na Europa e noutros países desenvolvidos, foram criadas organizações científicas e incentivos similares. Na Inglaterra, por exemplo, a Royal Society of Chemistry (RSC), com o apoio de setores industriais e governamentais, instituiu em 2001 os UK Green Chemistry Awards, para premiar empresas e jovens investigadores que desenvolvam processos, produtos e serviços que levem a um ambiente mais sustentável, limpo e saudável. Em 1998, a RSC financiou a criação da Green Chemistry Network (GCN), com o objetivo de facilitar a educação, a formação e a prática da química verde na indústria, na academia e nas escolas, bem como promover a consciencialização governamental para esta área. Outra importante iniciativa da RSC foi a criação, em 1999, da revista *Green Chemistry*, dedicada à publicação de artigos inéditos na área, que constitui hoje uma referência de topo na publicação de trabalhos de investigação neste domínio.

No Brasil, os conceitos da Química Verde começaram a ser difundidos mais recentemente, seja no meio acadêmico, governamental ou industrial. Em janeiro de 2007, o Instituto de Química da Universidade de São Paulo promoveu a primeira Escola de Verão em Química Verde (Basito, 2009).

Com uma simplicidade brilhante, Anastas e Warner (1998) condensaram os conceitos, objetivos e linhas orientadoras da química verde em doze princípios derivados de uma linha básica de orientação que se traduz resumidamente na concepção de produtos e processos ambientalmente benignos. Embora alguns destes princípios pareçam ser pouco mais do que a aplicação do senso comum aos processos químicos, a verdade é que a sua implementação combinada requer um esforço tremendo no design e no desenvolvimento dos produtos e processos. Apesar da existência dos doze princípios, não há ainda uma definição concreta e largamente aceita de “síntese verde”. Existe, contudo, uma concordância geral de que ela deve ser alcançada através da aplicação de várias estratégias e tecnologias: reações com elevada economia atômica (maximização da utilização dos reagentes); melhor uso da catálise, incluindo catálise orgânica (catalisadores não-metálicos) e biocatálise (com enzimas ou micro-organismos); meios reacionais alternativos à utilização de solventes orgânicos (água, líquidos iônicos, fluidos supercríticos, solventes fluorados ou mesmo reações na ausência de solvente); novos métodos energeticamente eficientes (irradiação fotoquímica, ultrassons, micro-ondas ou tecnologia de microrreatores); vias sintéticas alternativas que evitem o uso de reagentes tóxicos; redução do número de passos sintético. Os doze princípios norteadores são:

1. Prevenção de resíduos. Evitar a produção de resíduos e desperdícios é preferível ao seu tratamento após a formação;
2. Economia atômica. Os métodos sintéticos devem ser desenvolvidos no sentido de maximizar a incorporação de todos os materiais de partida no produto final;
3. Síntese de produtos menos perigosos. Sempre que possível, a síntese de um produto deve utilizar e originar substâncias de pouca ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e o ambiente;

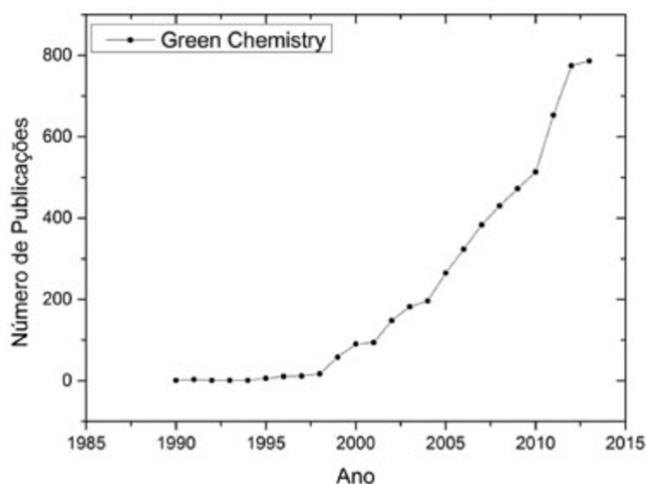
4. Desenvolvimento de produtos seguros. Os produtos devem ser desenvolvidos no sentido de poderem realizar a função desejada e, simultaneamente, não serem tóxicos;
5. Solventes e auxiliares químicos mais seguros. O uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes de separação, soluções aquosas salinas, etc.) deve ser evitado, sempre que possível. Quando utilizadas, estas substâncias devem ser inócuas e utilizadas na menor quantidade necessária;
6. Eficiência energética. As necessidades energéticas devem ser consideradas ao nível do seu impacto económico e ambiental, e devem ser minimizadas. Os processos químicos devem ser o menos agressivo possível, e, idealmente, realizados à temperatura e pressão ambiente;
7. Fontes renováveis de matéria-prima. Sempre que seja técnica e economicamente viável, a utilização de matérias-primas renováveis deve ser escolhida em detrimento de fontes não renováveis;
8. Evitar a formação de derivados. A derivatização desnecessária (por exemplo, estratégias de proteção e desproteção) deve ser minimizada ou, se possível, evitada, porque estas etapas requerem reagentes adicionais e tendem a aumentar a geração de resíduos;
9. Catálise. Os reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são melhores do que os reagentes estequiométricos, uma vez que são utilizados em quantidades relativamente reduzidas. Sempre que possível, deve promover-se a reciclagem e reutilização dos catalisadores;
10. Desenvolvimento no sentido da degradação. Os produtos devem ser desenvolvidos de modo a, após exercerem a sua função, se degradarem em produtos inócuos e não persistirem no ambiente;
11. Prevenção da poluição. É necessário desenvolver metodologias analíticas que viabilizem a monitorização e o controlo dos processos, em tempo real, antes da formação de substâncias nocivas;
12. Química intrinsecamente segura. As substâncias, bem como o modo como são utilizadas no processo, devem ser escolhidas a fim de minimizar potenciais acidentes, incluindo derrames, explosões e incêndios.

FIGURA 2: Os 12 princípios norteadores da Química Verde.



Química verde e a indústria brasileira: tomada de consciência

Se tomarmos como ponto de partida a gênese da Química Verde em 1980 é importante ressaltar uma importante mudança de postura dos pesquisadores e acadêmicos da área, com ampliação de consciência sob o ponto de vista de difusão do conhecimento acerca do assunto. Na **FIGURA 3**, podemos observar através de um indicador simples que é o número de publicações na área, que a partir dos anos 2000, houve um aumento exponencial do número de publicações, indicando com isso, novos estudos e desenvolvimento de processos em torno da Química Verde. Essa crescente tomada de consciência ampliou e também foi absorvida pela Indústria Química, com a crescente demanda a respeito da resolução do problema da poluição e dos resíduos industriais induziram a uma série de atitudes inovadoras que culminaram na aplicação da Química Verde (Machado, 2011).

FIGURA 3: Evolução das publicações utilizando como palavra-chave “green chemistry”.

O Brasil aparece em destaque na pesquisa sobre conhecimento da biodiversidade, como sendo o país onde os consumidores detêm o maior conhecimento sobre o conceito de biodiversidade (96%), seguido pela França (95%) e China (94%). Desta forma e com essa tomada de consciência, as organizações que pretendem sobreviver no futuro não podem levar em consideração apenas fatores econômicos, mas necessitam se planejar assumindo seu papel no desenvolvimento sustentável do planeta, utilizando-se de ferramentas de gestão que contribuam para análise de dados e a tomada de decisões direcionadas para esse fim (Croston, 2014). Neste sentido, vários dos setores industriais no Brasil tentam seguir os princípios norteadores da Química verde.

No setor da construção civil, por exemplo, em 1993, foi criado o *United State Green Building Council* (USGBC). Primeiro Conselho sobre Construção Sustentável dos Estados Unidos, onde foi discutido o futuro da Construção, no contexto da sustentabilidade. A partir desta conferência foram estabelecidos 6 princípios para serem atendidos durante o processo de Construção, conforme a seguir: (1) minimizar o consumo de recursos; (2) maximizar a reutilização dos recursos; (3) utilizar recursos renováveis e recicláveis; (4) proteger o ambiente natural; (5) criar um ambiente saudável e não tóxico; (6) fomentar a qualidade ao criar o ambiente construído. Neste contexto, houve um esforço para a confecção dos produtos considerados “ecologicamente corretos”, que são aqueles materiais de construção fabricados de acordo com critérios de sustentabilidade ambiental. Essa necessidade surgiu a partir de um alerta que os produtos de construção causam um considerável impacto no ambiente, pois permitem que o Setor da Construção seja responsável por 50% dos materiais extraídos da natureza e 50% do total do lixo gerado (Anink, Boonstra e Mark, 1996). Alguns tipos de materiais considerados “amigos do ambiente”, isto é, materiais que causam menor impacto possível ao meio ambiente, já são produzidos por esse setor industrial, tais como Concreto com adição de resíduos (por exemplo, pó de pedra da indústria das rochas ornamentais, de extração de agregados e da indústria cerâmica, e os resíduos de construção e demolição); Gesso DryWall; Geopolímeros (resíduos aluminosilicatados); Tintas/Vernizes/Resinas (substituição de solventes orgânicos por água, isoparafina e delimoneno, um subproduto da laranja); Telha ecológica (com mistura de cimento com fibras naturais de eucalipto, sisal, bananeira e malva); entre outros.

No setor da cosmética, em busca de produtos inovadores, a bioprospecção de novas moléculas e princípios ativos de componentes da biodiversidade brasileira é uma atividade promissora. Há um grande interesse de várias empresas e centros de pesquisa de prospectarem os biomas brasileiros em busca de benefícios econômicos (em especial por meio da biotecnologia) e sociais. Ao observar mais atentamente o setor de cosméticos, fica claro o potencial que ele tem de demandar cada vez mais ingredientes da biodiversidade e, conseqüentemente, de influenciar positiva ou negativamente a conservação dos recursos naturais e de uma comercialização pautada em princípios éticos, principalmente das matérias-primas provenientes de comunidades tradicionais, pequenos produtores e povos indígenas como acontecem em grande parte da Amazônia brasileira (Gomes, 2014). Existe a preocupação com a utilização de ingredientes verdes através da extração e purificação sustentável, sendo benéfica para formuladores e para o consumidor, pois todos ganham ao preferir ingredientes que não põem em risco a sobrevivência de espécies em extinção ou minimizam o impacto ambiental por não utilizar processos químicos de extração e matérias primas de fontes naturais e renováveis, abrangendo também processos sustentáveis, como, por exemplo, economia de energia, e o desafio dos fabricantes é desenvolver produtos verdes sem comprometer seu desempenho. Podemos citar alguns exemplos como os cosméticos “orgânicos”, livres de parabeno e sulfato e agrotóxicos.

No setor farmacêutico, o desafio atual está na produção de fármacos e seus intermediários de síntese mais segura e eficaz, economicamente viável, sem os efeitos colaterais adversos para o ambiente. Neste contexto, é essencial o uso de catalisadores, matérias-primas renováveis, solventes alternativos/reações sem solventes e a utilização sustentável de energia, entre outras abordagens inovadoras no âmbito da engenharia. Este conjunto de tecnologias ambientalmente benignas tem sido explorado e integrado em investigação e desenvolvimento de fármacos, para atingir a prevenção/redução de impactos ambientais na sua produção (Dunn, Wells e Williams, 2010). A título de exemplo salienta-se a síntese da sitagliptina, desenvolvida pela Merck em colaboração com a Solvias e que foi distinguida, em 2009, pela **EPA** com o *Greener Synthetic Pathways Award* por incorporar princípios da Química Verde. A obtenção deste fármaco, utilizado no tratamento da *diabetes mellitus* tipo 2, inclui um passo sintético determinante que consiste na hidrogenação catalítica assimétrica de uma enamina intermediária desprotegida, utilizando como catalisador um complexo de Rh/t-Bu JOSIPHOS (EPA, 2010). Esta hidrogenação é altamente eficiente, permite o isolamento final da sitagliptina com elevada pureza óptica e química e reduz significativamente os resíduos gerados, com eliminação completa de efluentes aquosos. Portanto, a adoção de medidas de prevenção em processos industriais, para além de promover um ganho ambiental significativo, apresenta-se como uma solução viável em termos econômicos (Hansen, 2009).

No setor petroquímico, têm-se buscado alternativas que envolvam menores impactos ambientais, utilizando fontes renováveis, plásticos biodegradáveis e bioplásticos, apesar de ser uma indústria que utiliza insumos de origem fóssil, não renováveis. Há, nesse setor, necessidades e oportunidades emergentes, relacionadas ao desenvolvimento de produtos e à utilização de processos ambientalmente mais amigáveis. Os temas sustentabilidade e eco eficiência (ecoeficiency) têm estimulado o desenvolvimento de novos materiais, produtos e processos; a química verde vem catalisando esforços em torno do desenvolvimento de plásticos biodegradáveis - biopolímeros, por exemplo - e a busca pela utilização de insumos de fontes renováveis (Mohanty, Misra e Drzal, 2002). Um exemplo aplicado no Brasil é o da Braskem, uma companhia especializada em resinas termoplásticas que vem consolidando o “plástico verde”, ou polietileno (PE) “verde”, um produto que utiliza a rota do álcool (etanol) de cana de açúcar, ao invés da rota a partir da nafta. O objetivo primordial da Química Verde combinado com uma Biorrefinaria é produzir produtos químicos

genuinamente verdes e sustentáveis. O produto final deve ser atóxico, degradável em produtos inócuos e com a geração de pequenas quantidades de resíduos. As metodologias e técnicas empregadas pela Química Verde para atingir tais objetivos envolvem solventes não tóxicos e de pouca inflamabilidade como CO₂ supercrítico, líquidos iônicos, ultrassom, micro-ondas e principalmente fermentação de biomassas. Muitos polímeros naturais diretamente disponíveis pela biomassa apresentam potencial de gerarem produtos valiosos, através de modificações químicas e físicas. Entre estes se incluem amidos, celulose, hemicelulose, lignina, proteínas e lipídeos. A modificação de polímeros naturais é interessante uma vez que podem substituir polímeros derivados de fontes fósseis como plásticos e têxteis (Sheldon, Arends e Hanefeld, 2007; Gronnow et al., 2005).

O futuro do “esverdeamento” na indústria brasileira

Passados cerca de vinte e seis anos do surgimento da química verde, apesar de inúmeras iniciativas dos setores industriais e de pesquisa no avançar do conhecimento acerca de tecnologias e processos inovadores na área, ainda existem muitas lacunas a serem discutidas. Uma delas se resume ao primeiro princípio da química verde, embora simplista, indica o caminho a ser seguido: *prevenir é melhor do que remediar*. Aplicar os princípios da química verde pode parecer, em um primeiro momento, algo muito distante da realidade atual observada na maioria dos laboratórios de pesquisa e no parque industrial brasileiro. Entretanto, é importante ressaltar que há alternativas verdes viáveis e que, com investimento em pesquisa é possível buscar alternativas autossustentáveis. Já se observa uma mudança de paradigma de gestão das medidas para proteção ambiental desenvolvida pela indústria, da postura reativa para a preventiva. Além disso, essa tomada de consciência envolveu a conjugação de um conjunto de fatores exteriores à Química, que se estendem para o campo tecnológico, ambiental e “societal”. Observa-se, embora casuisticamente, que a prática da Química Industrial ao longo do tempo deu passos importantes que possibilitaram uma evolução em questões voltadas para a sustentabilidade.

Estima-se que, em 2020, haverá uma participação da Química Verde de pelo menos 10% no conjunto da oferta de produtos petroquímicos (que poderá alcançar, no caso específico das resinas termoplásticas, 240 milhões de toneladas). O Brasil poderá deter, se forem viabilizados os investimentos necessários, uma fatia relevante da oferta total. Complementar à ideia de investir em pesquisa e desenvolvimento em áreas em que o Brasil tem debilidades, a proposta será de investir para potencializar a contribuição de setores em que o País tem uma vocação natural. Existem, ademais, inúmeros produtos químicos que podem ser produzidos (e alguns, de fato, já o são) a partir de fontes renováveis (Química Verde no Brasil 2010-2030, 2010).

O Brasil se encontra em uma posição privilegiada para assumir a liderança no aproveitamento integral das biomassas pelo fato de possuir a maior biodiversidade do planeta; possuir intensa radiação solar; água em abundância; diversidade de clima e pioneirismo na produção de biocombustíveis da biomassa em larga escala, com destaque para a indústria canavieira, o etanol. As microalgas despontam como um novo recurso renovável com potencialidades diversas em termos de bioenergia e produtos químicos. O país reúne, ainda, condições para ser o principal receptor de recursos de investimentos provenientes do mercado de carbono no segmento de produção e uso de bioenergia, por ter no meio ambiente a sua maior riqueza e possuir enorme capacidade de absorção e regeneração atmosférica.

Referências

- ABIQUIM, 2001. *Online. Associação Brasileira da Indústria Química*. Disponível em: [\[Link\]](#). Acesso em: nov. 2016.
- Anastas PT, Warner JC. 1998. **Green Chemistry: Theory and Practice**. Oxford University Press, New York.
- Anink D, Boonstra C, Mark J. 1996. **Handbook of Sustainable Building**. James & James, London.
- Bazito RC. Introdução à Química Verde. Instituto de Química da USP. 2009. 90 p. Disponível em: [\[Link\]](#). Acesso em: dez. 2016.
- Casullo P, Soubirón E. 2012. Química Verde: Metas, Desafíos y Formas de Contribuir a su Desarrollo desde La Enseñanza Media. In: Moyna P, et al., **Aportes de La Química al Mejoramiento de La Calidad de Vida**, p. 15-45. Montevideú.
- CGEE. **Química Verde no Brasil: 2010-2030**. Centro de Estudos e Gestão Estratégico. Brasília. 2010.
- Croston G. Consumo e sustentabilidade no setor de higiene pessoal perfumaria e cosméticos. **III Caderno de Tendências 2014-2015: Higiene Pessoal-Perfumaria e Cosméticos**. BB Editora, São Paulo. 2014.
- Dunn PJ, Wells AS, Williams MT. 2010. Future Trends for Green Chemistry in the Pharmaceutical Industry. In: Dunn PJ, Wells AS, Williams MT. (eds), **Green Chemistry in the Pharmaceutical Industry**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co: KGaA, Weinheim, Alemanha.
- EPA, online. 2010. Disponível em: [\[Link\]](#). Acesso em: nov. 2016.
- Gomes PC. A indústria de cosméticos e a sustentabilidade da cadeia produtiva. 2014. Disponível em: [\[Link\]](#). Acesso em: nov. 2016.
- Gronnow MJ, White RJ, Clarck JH, Macquarrie DJ. 2005. Energy Efficiency in Chemical Reactions: A Comparative Study of Different Reaction Techniques. [Organic Process Research & Development](#), 9: 516-518. [\[CrossRef\]](#)
- Hansen KB, Hsiao Y, Xu F, Rivera N, Clausen A, Kubryk M, et al. 2009. Highly efficient asymmetric synthesis of sitagliptin. [Journal of the American Chemical Society](#), 131: 8798-804. [\[CrossRef\]](#)
- Lenardão EJ, Freitag RA, Dabdoub MJ, Batista ACF, Silveira CC. "Green chemistry" - Os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, 26(1): 123-29, 2003. [\[Link\]](#)
- Machado AASC. 2011. Da Gênese ao ensino da Química Verde. **Química Nova**, 34(3): 535-543. [\[CrossRef\]](#)
- Mohanty A, Misra M, Drzal L. 2002. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment**, 10(1-2): 19-6. [\[Link\]](#)
- Sheldon RA, Arends I, Hanefeld U. 2007. **Green Chemistry and Catalysis**. Wiley-VCH, Weinheim.

Tundo P, Anastas P, Black DS, Breen J, Collins T, Memoli S, et al. Synthetic pathways and processes in green chemistry. Introductory overview. **Pure and Applied. Chemistry**, 72:1207-12. 2000. [[CrossRef](#)]

Conflito de interesses: O presente artigo não apresenta conflitos de interesse.

Como citar este artigo: Gomes RN, Lima PS, Kuriyama SN, Fidalgo Neto AA. Desenvolvimento da química verde no cenário industrial brasileiro. **Revista Fitos**. Rio de Janeiro. 2018; (Ed. especial): 80-89. e-ISSN 2446.4775. Disponível em: <<http://revistafitos.far.fiocruz.br/index.php/revista-fitos/article/view/580>>. Acesso em: dd/mm/aaaa.

Licença CC BY 4.0: Você está livre para copiar e redistribuir o material em qualquer meio; adaptar, transformar e construir sobre este material para qualquer finalidade, mesmo comercialmente, desde que respeitado o seguinte termo: dar crédito apropriado e indicar se alterações foram feitas. Você não pode atribuir termos legais ou medidas tecnológicas que restrinjam outros autores de realizar aquilo que esta licença permite.
