



## Contribuições da Catálise na Busca pela Sustentabilidade

### Contributions of Catalysis in the Search for Sustainability

Mario Roberto Meneghetti,<sup>a</sup> Paulo Anselmo Ziani Suarez,<sup>b</sup> Simoni Margareti Plentz Meneghetti<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Química e Biotecnologia, Grupo de Catálise e Reatividade Química, CEP 57072-900, Maceió-AL, Brasil.

<sup>b</sup> Universidade de Brasília, Instituto de Química, Laboratório de Materiais e Combustíveis, CEP 70910-900, Brasília-DF, Brasil.

\*E-mail: [simoni.plentz@iqb.ufal.br](mailto:simoni.plentz@iqb.ufal.br)

Recebido em: 15 de Janeiro de 2022

Aceito em: 5 de Abril de 2022

Publicado online: 27 de Abril de 2022

The strategic role played by the Catalysis to achieve a sustainable development is crucial and is reflected by the fact that it is involved, directly or indirectly, in at least nine of the seventeen sustainable development goals (SDGs) of the ONU and by constituting one of the twelve Principles of Green Chemistry. Thus, the exercise of rethinking several premises in the sense of designing catalytic systems that can transform renewable resources into products of interest to society, acting in the areas of energy or environmental remediation is already underway. In this context, the examples presented here illustrate the contributions of Catalysis in the pursuit of sustainability, showing that it contributes and will greatly contribute to sustainable development.

**Keywords:** sustainability; sustainable development; green chemistry; catalysis; biorefinery.

## 1. Introdução

A nossa civilização está passando por grandes e importantes desafios na busca de um progresso sustentável, não só pela crescente demanda energética e de insumos, mas também nos aspectos ambiental e social, face a um cenário que prevê que em 2050 nosso planeta passará dos atuais 7,9 bilhões para cerca de 9,2 bilhões de habitantes.<sup>1</sup> Esse aumento populacional que se dá de forma exponencial, é influenciado pela crescente atividade e demanda humana e, sem dúvida, provoca fortes consequências sobre os ecossistemas, o que já se traduz na perda de biodiversidade, poluição, mudanças climáticas, entre outros.

Evidentemente, para a evolução de um efetivo desenvolvimento sustentável, várias áreas do conhecimento científico devem ser abordadas de forma multi- e interdisciplinar, tais como a Biologia, Física, Engenharia, Ciências Humanas e Sociais, Química etc.<sup>2</sup> Entretanto, a Química tem um papel central neste contexto, pois constituindo um dos pilares básicos de sustentação da ciência, aparece frequentemente associada às palavras “sustentável” e “verde”, isto é, Química Sustentável e Química Verde. Assim, o principal desafio de uma química sustentável, e que atenda também os princípios da química verde, é o de desenvolver e delinear processos e produtos competitivos de forma sustentável, empregando matérias-primas de origem renovável ou mesmo fóssil. Assim, se houver a necessidade de aperfeiçoar processos baseados no uso de recursos fósseis, tal ação deve obrigatoriamente estar associada à reciclagem dos produtos resultantes (como por exemplo, a reciclagem de polímeros no final de seu ciclo de uso ou emprego de fontes de energia fóssil sem carbono, como o hidrogênio obtido em refinarias de petróleo ou de gás natural). Já no caso da introdução de fontes renováveis de carbono (biomassa, resíduos orgânicos ou CO<sub>2</sub>) em processos químicos, se faz mandatária a busca de competitividade baseada em premissas econômicas, ambientais e sociais.<sup>1</sup>

Mas é importante enfatizar que os desafios para não comprometer o futuro do planeta e da sociedade humana são enormes, pois um produto somente pode ser considerado totalmente sustentável se atender completamente os seguintes critérios: (i) não ser tóxico no que diz respeito aos ecossistemas e ao ser humano e ser biodegradável ou reciclável; (ii) ser sintetizado usando um processo seguro e ambientalmente amigável (grande economia de átomos, empregando pouca água, gerando poucos resíduos e gases de efeito estufa, baixa demanda energética etc.); (iii) trazer avanços científicos ou tecnológicos na área de aplicação pretendida, integrando desafios da competitividade global (desempenho, segurança, impacto ambiental, impacto social etc.); (iv) apresentar viabilidade econômica (em termos de investimentos, custos operacionais etc.); (v) ser aceito pelo consumidor; (vi) ser preferencialmente de origem renovável ou reciclada e suas cadeias de suprimentos devem ser sustentáveis; (vii) ser comercializado a um

preço que esteja em consonância com sua aplicação, de tal forma que o consumidor possa fazer tanto uma escolha econômica quanto ecológica; e (viii) ter um uso nobre e não deve prejudicar a humanidade (armas químicas, drogas, terrorismo etc.).

Nesse ponto, vale lembrar que os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), ver Tabela 1, que segundo a ONU, “...são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.”,<sup>3</sup> trazem em seu escopo a indissociabilidade das dimensões econômica, ambiental e social, como já foi mencionado. Já a Química Verde traz no contexto de seus 12 princípios, ver Tabela 1,<sup>4</sup> um elenco de ações que, quando consideradas, sem dúvida contribuem na viabilização de um desenvolvimento sustentável.

Considerando que mais de 90% dos processos químicos industrialmente aplicados envolvem o uso de catalisadores, a catálise desempenha um papel essencial e constitui o 9º princípio da Química Verde, ver Tabela 1, o qual envolve a ideia de que podemos reduzir o tempo de processamento de uma reação e a energia envolvida por meio do uso de catalisadores. Catalisadores ideais tornam possível reduzir os tempos reacionais, acompanhado do aumento na seletividade dos produtos desejados, limitando a formação de subprodutos e efluentes, com redução do gasto de energia no processo. Todos esses aspectos tem forte impacto nos cálculos de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a produção de um determinado produto, tornando os catalisadores uma ferramenta única para atingir a sustentabilidade. Quando se analisa os 17 ODS, pode-se mencionar a aplicação da catálise de forma direta ou indireta

em muitos deles, conforme destaque em negrito na Tabela 1: 6, 7 e de 9 a 15.<sup>3,4</sup>

## 2. Sistemas Catalíticos e o Desenvolvimento Sustentável

Durante muito tempo, o desenvolvimento de catalisadores para a indústria química esteve focado no propósito de converter hidrocarbonetos leves, que são insumos básicos facilmente obtidos a partir de fontes de carbono fóssil (como o petróleo), em produtos quimicamente mais funcionalizados e de maior interesse. Estes catalisadores deveriam ser capazes de ativar moléculas com baixa funcionalidade, tais como alcanos, alquenos e compostos aromáticos, e oxidá-las seletivamente para criar complexidade e diversidade molecular.<sup>5</sup>

Entretanto, a introdução de matérias-primas de origem renovável ou reciclada mudou radicalmente este cenário, pois as moléculas presentes em tais insumos têm estruturas químicas mais diversificadas, complexas e com alto conteúdo de oxigênio (polifuncionais).<sup>6</sup> Desta forma, os catalisadores a serem empregados nestes processos de transformação de biomassa devem, por exemplo, ser mais robustos face à complexidade química da matéria-prima empregada, isto é, devem manter sua atividade e seletividade na presença de impurezas, água e das várias funcionalidades presentes na estrutura dos substratos. Portanto, em muitos casos, a catálise deve passar gradualmente de um padrão de ‘oxidação’ para um padrão de ‘redução’, visando em particular eliminar total ou parcialmente funções químicas, geralmente oxigenadas. Porém, mesmo com o uso de

**Tabela 1.** Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e os 12 Princípios da Química Verde.<sup>3,4</sup> Em destaque estão os itens fortemente relacionados com a área de Catálise

ODS	Princípios da Química Verde
1. Erradicação da pobreza	1. Prevenção
2. Fome zero e agricultura sustentável	<b>2. Economia de átomos (eficiência atômica)</b>
3. Saúde e bem-estar	3. Redução da toxicidade
4. Educação de qualidade	4. Desenvolvimento de produtos seguros
5. Igualdade de gênero	5. Diminuição do emprego de solventes e auxiliares
<b>6. Água potável e saneamento</b>	<b>6. Eficiência energética e otimização da energia</b>
<b>7. Energia acessível e limpa</b>	<b>7. Uso de matérias-primas renováveis</b>
8. Trabalho decente e crescimento econômico	<b>8. Evitar derivações (reação química em mais de uma etapa)</b>
<b>9. Indústria, inovação e infraestrutura</b>	<b>9. Catálise</b>
<b>10. Redução das desigualdades</b>	10. Geração de produtos degradáveis
<b>11. Cidades e comunidades sustentáveis</b>	11. Análise dos processos em tempo real
<b>12. Consumo e produção responsáveis</b>	12. Segurança
<b>13. Ação contra a mudança global do clima</b>	
<b>14. Vida na água</b>	
<b>15. Vida terrestre</b>	
16. Paz, justiça e instituições eficazes	
17. Parcerias e meios de implementação	

matérias-primas renováveis, ainda haverá a necessidade de oxidação seletiva para criar novas funcionalidades e, portanto, novos catalisadores e processos. Desta forma, o uso de fontes de carbono renovável e reciclado na indústria química requer uma mudança estratégica de concepção fundamental na área de catálise, isto é, desde a adequação da matéria-prima até o processamento e purificação do(s) produto(s) final(is).<sup>6</sup>

No caso da transformação de recursos renováveis provenientes da biomassa, considerando o cenário atual e os conceitos de biorrefinaria, o emprego dos catalisadores químicos e os biocatalisadores (enzimas) existentes não conduz, na maioria dos casos, a uma boa competitividade econômica. No caso dos catalisadores químicos, estes se mostram poucos seletivos com relação aos produtos formados, necessitando, em muitos casos, de difíceis processos de purificação. Já com relação aos biocatalisadores, estes são de custos elevados, pois requerem concentrações significativas no meio reacional (normalmente <5-10% em peso de substrato) e longos tempos de reação.<sup>7</sup> Portanto, no cenário atual, o custo de produção de insumos químicos a partir da biomassa é frequentemente maior do que por via de carbono fóssil, pois, este último, ao longo de várias décadas, conta com processos catalíticos que passaram por várias etapas de aperfeiçoamento e otimização, garantidos por constantes investimentos.

Fica evidente que a sociedade ainda tem um longo caminho pela frente até que todas as premissas de sustentabilidade sejam atendidas para um determinado produto. Porém, o caminho já começou a ser trilhado, sendo que as principais contribuições da catálise para um mundo mais sustentável já consideram o desenvolvimento estratégico de novos sistemas catalíticos que se adequem às características dos insumos provenientes de biomassa ou resíduos, como também a adaptação e otimização de processos industriais consolidados ou emergentes, aumentando sua adequação às premissas de sustentabilidade.<sup>8</sup>

Em relação à otimização de processos industriais já existentes, diversas estratégias podem ser concebidas empregando a catálise, ou seja, o planejamento de catalisadores mais eficientes em termos de rendimento do produto desejado, que conduzam a menores tempos de reação, com redução de etapas de purificação e possibilidade de reuso do catalisador, entre outros. É possível exemplificar parte do exposto acima, pelo desenvolvimento de sistemas catalíticos que sejam empregados em processos industriais cujas reações não sejam catalisadas. Outra vertente consiste na concepção de novos catalisadores que sejam mais baratos, ativos, seletivos e tolerantes à presença de impurezas de diferentes naturezas (radicais, íons, compostos orgânicos, água etc.), também com possibilidade de recuperação e reuso. Em comparação aos catalisadores já empregados, as novas propostas de catalisadores devem atuar no sentido de diminuir o consumo de energia com a maximização do rendimento ao produto desejado. Ainda, com relação ao desenvolvimento de catalisadores com base

em metais nobres e já raros, as novas estratégias devem obrigatoriamente incluir sua recuperação ou mesmo a sua substituição por metais mais abundantes.<sup>9</sup> Ainda, a associação entre a catálise química com a biocatálise para a concepção de catalisadores químicos bioinspirados podem gerar sistemas mais robustos e mais seletivos, abrindo possibilidades importantes no que diz respeito à redução do número de etapas reacionais em um processo e limitando a formação de subprodutos.<sup>1</sup>

Mais recentemente, tem ganhado destaque a catálise assistida, que consiste no emprego de catalisadores convencionais associado a tecnologias de ativação não térmica (ultrassom, plasma atmosférico, moagem, eletroativação, fotoquímica etc.) ou via uso de meios reacionais não convencionais (líquidos iônicos, sistemas eutéticos, solventes de base biológica etc.). Os obstáculos a esta estratégia residem principalmente no consumo de energia dessas tecnologias emergentes, bem como o impacto e implementação das mesmas em uma maior escala.<sup>6,7</sup>

Cabe destacar que a biocatálise tem atraído atenção de pesquisadores preocupados com o desenvolvimento de processos catalíticos eficazes e sustentáveis. Os biocatalisadores de modo geral, ao contrário dos catalisadores químicos, são capazes de realizar transformações de forma muito seletiva e são bem adaptadas para uso de substratos com uma estrutura molecular complexa. No entanto, a biocatálise também deve superar obstáculos importantes, tais como problemas de disponibilidade, estabilidade e atividade das enzimas. Além disso, sua grande especificidade pode ser uma barreira para um desenvolvimento mais amplo. Assim, exceto para processos já consolidados, tais como a sacarificação do amido, hidrólise da celulose, isomerização da glicose e hidrólise do acrilonitrila, a biocatálise é atualmente empregada basicamente para produzir produtos de alto valor agregado. Neste caso, novas estratégias biotecnológicas podem gerar novas enzimas e dar acesso a uma infinidade de produtos com várias aplicações comerciais. Porém, é importante salientar que para tanto, muitos estudos devem ser realizados, pois a utilização de organismos geneticamente modificados pode, em alguns casos, ter repercussões negativas no grau de aceitação pelos cidadãos, aspecto que deve ser considerado.<sup>6,7</sup>

A catálise também contribui com geração de energias alternativas, como é o caso da dissociação da água fotocatalisada para a geração de hidrogênio renovável. Outras importantes iniciativas são àquelas que empregam catalisadores na área de transformação de resíduos em produtos com valor agregado e de remediação ambiental. Nestes processos, resíduos provenientes da indústria, agricultura ou mesmo urbanos substituem insumos virgens ou são transformados em compostos de menor impacto ambiental, contribuindo para a busca da sustentabilidade.<sup>10</sup>

A seguir serão apresentados, de forma resumida, alguns exemplos que representam esforços no desenvolvimento de sistemas catalíticos para aplicação na área de desenvolvimento sustentável. O objetivo principal aqui é

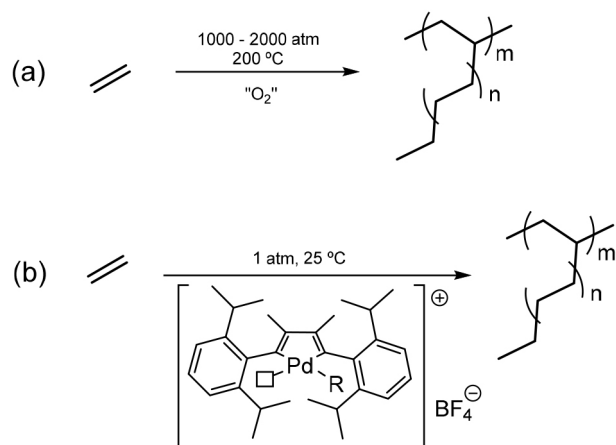
de demonstrar como a catálise pode, de fato, contribuir nessa área, sendo importante mencionar que tais ilustrações não são de forma alguma exaustivas do tema, pois muito tem sido realizado em busca da sustentabilidade.

### 3. Exemplos de Contribuição da Catálise na Área de Desenvolvimento Sustentável

O uso de sistemas catalíticos para aumentar a sustentabilidade da indústria química busca, principalmente, diminuir o tempo e a energia envolvidos durante as reações químicas, a geração de resíduos e o uso de solventes orgânicos voláteis. Além disso, a catálise também é usada como ferramenta para a transformação de rejeitos ou resíduos urbanos, industriais e agrícolas em materiais com menor ou nenhum impacto ambiental, ou ainda, empregar tais rejeitos como matérias-primas para a obtenção de produtos com valor agregado. A seguir, são apresentados exemplos que ilustram tais estratégias.<sup>11</sup>

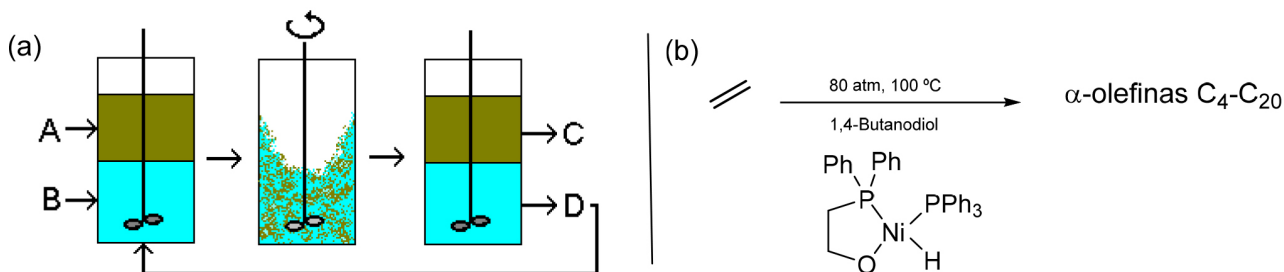
O primeiro diz respeito ao polietileno de baixa densidade, ou seja, altamente ramificado, que é largamente usado para a fabricação de filmes plásticos, devido às suas propriedades únicas tais com a transparência. O primeiro processo desenvolvido na década de 1930, e ainda hoje usado na indústria, envolve a formação de um radical alquil, a partir de uma molécula de olefina e traços de oxigênio como iniciador, seguido de reações radiculares em cadeia até a obtenção do polímero altamente ramificado, conforme Figura 1a. As condições para que ocorra a reação são bastante drásticas, com altas temperaturas e pressões, consumindo uma quantidade significativa de energia. Estudos mostraram que o uso de complexos de paládio (ou níquel) permite obter poliolefinas altamente ramificadas em condições amenas, conforme ilustrado na Figura 1b.<sup>12,13</sup> Nesse exemplo, fica evidente a aderência ao princípio da química verde, que diz respeito à economia de átomos, característico desse tipo de polimerização, assim como o de evitar etapas adicionais, pois não há necessidade da adição de outros reagentes durante o processo reacional, conduzindo evidentemente a uma maior eficiência energética.

Como segundo exemplo, é importante mencionar o emprego de sistemas bifásicos em transformações catalíticas



**Figura 1.** Obtenção de poliolefinas ramificadas: (a) via radicalar; (b) empregando complexo de Pd

de substratos orgânicos, que tem se mostrado como excelente alternativa aos processos catalíticos homogêneos e heterogêneos, visando diminuir o uso de solventes orgânicos voláteis ou a energia requerida.<sup>14</sup> Na Figura 2a pode ser visualizado um esquema geral de um processo catalítico bifásico, no qual dois líquidos imiscíveis, um contendo o catalisador e o outro o(s) substrato(s), são colocados em contato. A reação catalítica ocorre então numa das fases, nas duas ou ainda na interface destas.<sup>15</sup> No final da reação ocorre separação das mesmas, sendo o catalisador encontrado dissolvido em uma delas e os produtos na outra, podendo então haver reutilização da fase que contém o catalisador. Como solventes da fase contendo o catalisador são utilizados a água, compostos orgânicos polares e, mais recentemente, líquidos iônicos. Destaca-se aqui que a estabilidade térmica e química desses solventes nas condições reacionais em que são empregados permitem que os mesmos sejam reutilizados inúmeras vezes, minimizando a geração de resíduos. Um dos exemplos mais conhecidos é o do processo SHOP para produção de  $\alpha$ -olefinas a partir de etileno utilizando catalisadores de níquel (com ligantes fosfinoenolato ou carboxilato) que utiliza como solvente o butanodiol, como ilustrado na Figura 2b.<sup>16</sup> Tal exemplo contempla, além dos princípios gerais de catálise sustentável, àquele relativo à eficiência energética e à otimização da energia por meio de um processo com menor número de etapas.



**Figura 2.** (a) Processo catalítico bifásico, contendo uma fase inicial com o substrato (A), uma fase inicial contendo o catalisador (B); uma fase final com o produto (C) líquido 1, contendo o produto; uma fase final contendo o catalisador (D). (b) Esquema reacional do processo SHOP

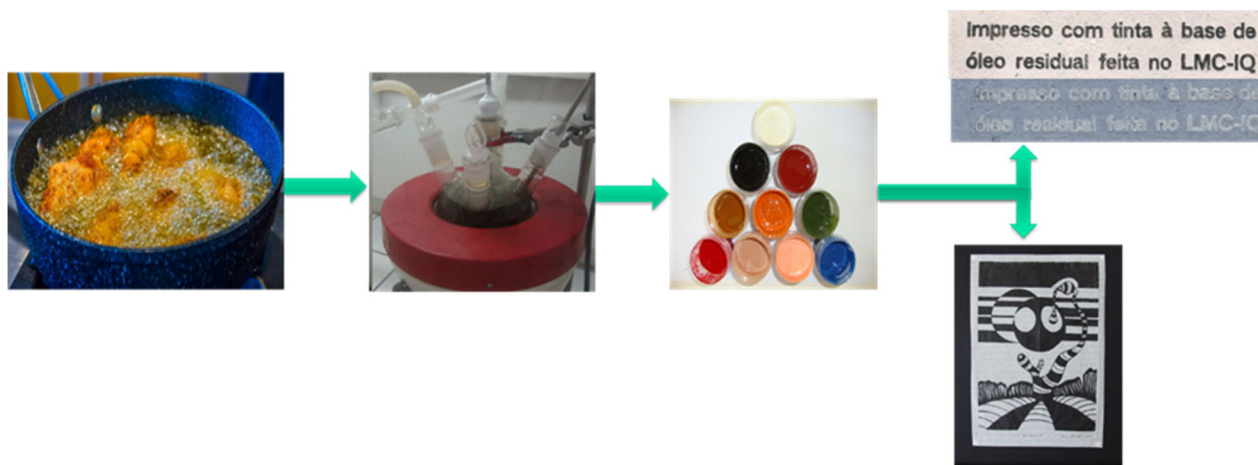
A biomassa é potencial candidata a ser utilizada como matéria-prima que facilite a transição da indústria fóssil para as biorrefinarias, já que é abundante e constitui fonte promissora para obtenção de uma ampla gama de produtos de interesse industrial. Nesse contexto, os carboidratos oriundos da biomassa são considerados importantes plataformas visando à produção de insumos químicos tais como glicose, 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), gliceraldeído, piruvaleído, ácido láctico, dihidroxiacetona, ácido fórmico, ácido acético e ácido levulínico.<sup>17,18</sup> Assim, o desenvolvimento de sistemas catalíticos robustos, ativos e reutilizáveis na conversão desses carboidratos é estratégico, além do que a sua natureza define as possíveis rotas na transformação, levando a reações com alta seletividade ao produto desejado.<sup>19</sup> Uma excelente perspectiva é o emprego de óxidos de metais (puros ou mistos) que apresentam estabilidade térmica e química, possuindo tipicamente sítios ácidos de Lewis e/ou Brønsted.<sup>17</sup> Assim, um exemplo consiste no desenvolvimento de óxidos mistos à base de estanho e nióbio, sintetizados pelo método Pechini, no qual o etilenoglicol foi substituído por glicerol, um insumo químico renovável. Os materiais obtidos apresentaram altas áreas superficiais e uma diversidade de sítios ácidos de Brønsted e Lewis, o que levou a altas conversões de frutose em meio aquoso, com grande seletividade ao 5-HMF. Além disso, tais catalisadores se mostraram robustos, podendo ser recuperados e reutilizados sem sofrer alteração estrutural.<sup>17,18</sup>

Os óleos e gorduras residuais (OGRs) são apontados hoje como o principal problema dos sistemas de coleta e tratamento de efluentes urbanos, bem como um dos principais poluentes urbanos dos sistemas limnóticos (ecossistemas das águas doces, que são os rios, riachos, lagos, lagoas, represas e outros). Os usos tradicionais desses resíduos, como matéria-prima, consistem na produção de sabões de baixa qualidade e massa de vidraceiro, que são produtos de reduzido valor agregado. Recentemente os OGRs vêm sendo usados para a produção de biodiesel em sistemas de transesterificação usando como catalisadores

bases fortes de Brønsted, como alcóxidos de metais alcalinos. O tratamento térmico de OGRs na presença de complexos de níquel também pode ser usado para obtenção de macromoléculas de alto peso molecular, quando realizado a temperaturas entre 300 e 350 °C, ou a hidrocarbonetos leves, quando realizado acima de 350 °C. As macromoléculas obtidas podem ser usadas como veículo de tintas de impressão (Figura 3) e os hidrocarbonetos leves como combustíveis líquidos semelhantes aos obtidos no refino de petróleo.<sup>20</sup>

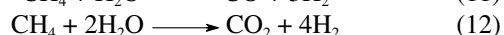
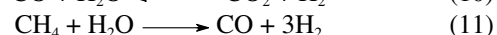
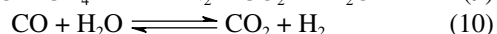
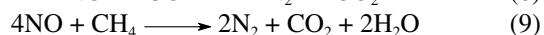
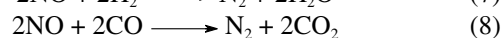
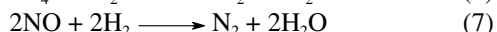
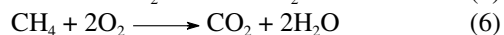
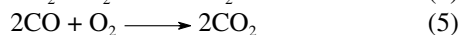
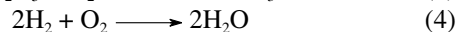
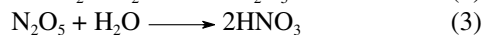
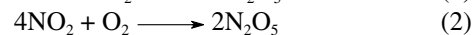
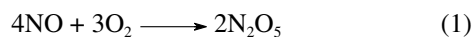
É importante salientar que os dois últimos exemplos estão diretamente relacionados ao princípio da química verde que preconiza o uso de matérias-primas renováveis.

No uso de catálise para promover a sustentabilidade também se podem citar os processos catalíticos desenvolvidos para a redução e controle de emissão de poluentes, conhecida por remediação ambiental. Um exemplo são as emissões de motores movidos pela queima de diesel, gasolina ou gás natural (GNV), compostas por CO, hidrocarbonetos não queimados e NO<sub>x</sub> (mistura de NO e NO<sub>2</sub>), sendo os primeiros tóxicos para o ser humano. Já o NO<sub>x</sub>, após algumas reações que ocorrem na atmosfera, é um dos responsáveis pela chuva ácida (veja equações de 1 a 3). Para reduzir o impacto ambiental dos motores a combustão interna, diversos catalisadores são usados nos escapamentos dos veículos, os quais não reduzem a “pegada” de carbono, mas tornam as emissões menos poluentes, portanto, mais sustentáveis. Por exemplo, nos escapamentos de carros movidos a GNV, muito populares em táxis em grandes cidades brasileiras, a principal tecnologia usada são os catalisadores de três vias (*three-way catalyst*, TWC), os quais convertem CO, CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub> em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub> (veja equações de 4 a 12). Os catalisadores mais comumente usados nos TWC são compostos por uma mistura de óxido de cério e de paládio contendo uma fase de paládio metálico, cuja fórmula poderia ser representada por Pd/(PdO)<sub>x</sub>(CeO<sub>2</sub>)<sub>y</sub>. Alternativamente, alumina é usada em substituição à céria, obtendo-se catalisadores com fórmula Pd/(PdO)<sub>x</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>y</sub>. Também é comum adicionar pequenas quantidades de

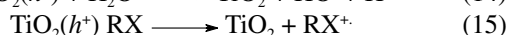
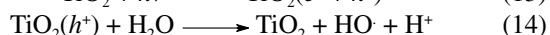
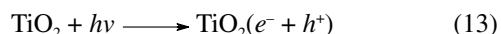


**Figura 3.** Reciclagem de OGRs para a produção, em presença de catalisador de Ni, de macromoléculas com aplicação em formulação de tintas gráficas

platina e ródio, em substituição ao paládio, com vistas a melhorar o desempenho dos TWC.<sup>21</sup>



Outro exemplo do uso da catálise para a remediação ambiental baseia-se nos processos de oxidação avançada (POA) para tratamento de efluentes. Neste caso, diversas moléculas persistentes, ou seja, de difícil degradação, tais como fármacos e corantes, são oxidadas por processos fotocatalíticos em substâncias que não agridem o meio ambiente. Os princípios ativos ingeridos para tratamento de doenças são parcialmente metabolizados pelo homem, sendo excretados em sua forma original de 40 a 90% da dose administrada. Ou seja, a maioria dos medicamentos consumidos pelo homem acaba no esgoto e, por serem de difícil degradação (principalmente os antibióticos), passam pelas estações de tratamento sem sofrer alteração. Assim, chegam ao sistema límnico, causando problemas ambientais, tais como mortandade de peixes, deformações genéticas, entre outros. Para a decomposição destas moléculas são usados radicais orgânicos e hidroxila gerados na superfície de catalisadores heterogêneos ativados, em sua maioria, por luz ultravioleta (UV). Os catalisadores mais empregados são semicondutores como o óxido de titânio, que ao serem ativados com UV passam a um estado excitado, em que elétrons são transferidos para a banda de condução, gerando “buracos” de elétrons ( $h^+$ ) na banda de valência (veja equação 13). Nesta condição, moléculas orgânicas e de água, adsorvidas na superfície do catalisador, são oxidadas, gerando radicais orgânicos e hidroxila (veja equações 14 e 15). Estes radicais formados são extremamente reativos e pouco seletivos, atacando todo tipo de moléculas, transformando as estruturas químicas responsáveis pela poluição em compostos menos agressivos ao meio ambiente.<sup>22</sup>



Em tais exemplos de remediação ambiental ficam evidentes esforços que aliam a catálise à redução da toxicidade de efluentes gasosos ou líquidos.

O último exemplo refere-se ao uso da energia solar, que já é realidade e está em ampliação em vários países para uso doméstico ou industrial e evidencia o papel da catálise aliada à busca de eficiência energética. A energia solar é altamente dependente da luz do dia e do clima, portanto, um dos maiores desafios para sua consolidação é o desenvolvimento de sistemas catalíticos que permitam o armazenamento de energia.<sup>23</sup> Os catalisadores de decomposição da água apresentam uma potencial solução para esse problema, pois o excesso de energia elétrica proveniente da energia solar pode ser empregado para transformar a água em hidrogênio e oxigênio, que pode ser então recombinado mais tarde em uma célula de combustível, a fim de produzir eletricidade. O catalisador, nesse caso, deve ser capaz de reduzir a energia necessária para impulsionar a reação de geração de água, buscando outro caminho reacional com menor energia de ativação e seletivo para reduzir as perdas com a ocorrência de reações paralelas. Um exemplo recente é baseado em um fotocatalisador à base de nanopartículas de platina dispersas em oxinitreto de bário e tântalo,  $\text{BaTaO}_2\text{N}$ , que é ativado pela luz solar (região do espectro visível) e que foi capaz de realizar a reação de decomposição da água com grande eficiência.<sup>24</sup>

## 4. Conclusão

A partir das considerações e exemplos apresentados, fica evidente o papel estratégico representado pelas pesquisas, desenvolvimentos e inovações na área de catálise, quando se vislumbra a necessidade de trilharmos o caminho da sustentabilidade. Apesar de muitas conquistas já alcançadas, existe um longo percurso que necessita ser pavimentado, por um lado com a formação de pessoal capacitado e por outro com recursos adequados que permitam constantes avanços nessa área.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Código de Financiamento 001), FAPEAL, FAPDF, CNPq, FINEP e INCT Catálise (444061/2018-5) pelo apoio. MRM, PAZS e SMPM agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa.

## Referências Bibliográficas

1. Marion, P.; Bernela, B.; Piccirilli, A.; Estrine, B.; Patouillard, N.; Guilbot, J.; Jérôme, F.; Sustainable chemistry: how to produce better and more from less? *Green Chemistry* **2017**, *19*, 4973. [Crossref]
2. Lang, D. J.; Wiek, A.; Bergmann, M.; Stauffacher, M.; Martens, P.; Moll, P.; Swilling, M.; Thomas, C. J.; Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. *Sustainability Science* **2012**, *7*, 25. [Crossref]

3. Sítio das Nações Unidas – Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2022.
4. Sítio da American Chemical Society. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>>. Acesso em: 12 janeiro 2022.
5. Deuss, P. J.; Barta, k.; de Vries, J. G.; Homogeneous catalysis for the conversion of biomass and biomass-derived platform chemicals. *Catalysis Science & Technology* **2014**, *4*, 1174. [[Crossref](#)]
6. Whitesides, G. M.; Reinventing Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition in English*. **2015**, *54*, 3196. [[Crossref](#)]
7. Lange, J.-P.; Catalysis for biorefineries – performance criteria for industrial operation. *Catalysis Science & Technology* **2016**, *6*, 4759. [[Crossref](#)]
8. Prieto, G.; Schuth, F.; The Yin and Yang in the Development of Catalytic Processes: Catalysis Research and Reaction Engineering. *Angewandte Chemie International Edition in English*. **2015**, *54*, 3222. [[Crossref](#)]
9. Ding, Y.; Zhang, S.; Liu, B.; Zheng, H.; Chang, C.-C.; Ekberg, C.; *Resources, Conservation and Recycling* **2019**, *141*, 284. [[Crossref](#)]
10. Wang, Z.; Li, C.; Domen, K.; Recent developments in heterogeneous photocatalysts for solar-driven overall water splitting. *Chemical Society Reviews* **2019**, *48*, 2109. [[Crossref](#)]
11. McCarthy, S.; Braddock, D. C.; Wilton-Ely, J. D. E. T.; Strategies for sustainable palladium catalysis. *Coordination Chemistry Reviews* **2021**, *442*, 213925. [[Crossref](#)]
12. Ittel, S. D.; Johnson, L. K.; Brookhart, M.; Late-Metal Catalysts for Ethylene Homo- and Copolymerization. *Chemical Reviews* **2000**, *100*, 4, 1169. [[Crossref](#)]
13. Meneghetti, S. M. P.; Kress J.; Peruch, F.; Lapp, A.; Duval, M.; Muller, R.; Lutz, P. J.; Solution and bulk rheological behavior of poly(ethylenes) based on VERSIPOL™ catalysts. *Polymer* **2005**, *46*, 8913. [[Crossref](#)]
14. Cornils, B.; Herrmann, W. A.; Aqueous-Phase Organometallic Catalysis, Concepts and Applications, 2nd ed., Wiley-VCH: Weinheim, 2006.
15. Darensbourg, D. J.; Stafford, N. W.; Joó, F.; Reibenspies, J. H.; Water-soluble organometallic compounds. 5. The regio-selective catalytic hydrogenation of unsaturated aldehydes to saturated aldehydes in an aqueous two-phase solvent system using 1,3,5-triaza-7-phosphaadamantane complexes of rhodium. *Journal of Organometallic Chemistry* **1995**, *488*, 99. [[Crossref](#)]
16. Parshall, G. W.; Ittel, S. D.; *Homogeneous Catalysis: The Applications and Chemistry of Catalysis by Soluble Transition Metal Complexes*, 2nd ed., John Wiley & Sons: Nova Iorque, 1992, chap. 3.
17. dos Santos, T. V.; Avelino, D. O. S.; Meneghetti, M. R.; Meneghetti, S. M. P.; Mixed oxides based on SnO<sub>2</sub> impregnated with MoO<sub>3</sub>; A robust system to apply in fructose conversion. *Catalysis Communications* **2018**, *114*, 120. [[Crossref](#)]
18. dos Santos, T. V.; Pryston, D. B. A.; Assis, G. C.; Meneghetti, M. R.; Meneghetti, S. M. P.; Tin, niobium and tin-niobium oxides obtained by the Pechini method using glycerol as a polyol: Synthesis, characterization and use as a catalyst in fructose conversion. *Catalysis Today* **2021**, *379*, 62. [[Crossref](#)]
19. Zaera, F.; Nanostructured materials for applications in heterogeneous catalysis. *Chemical Society Reviews* **2013**, *42*, 2746. [[Crossref](#)]
20. Montenegro, M. A.; Pereira, R. C.; Hofmann-Gatti, T.; Martins, G. B. C.; Suarez, P. A. Z.; Aproveitamento de Óleos e Gorduras Residuais para Obtenção de Produtos de Alto Valor Agregado: Formulação de Tinta de Impressão a Partir de Oleo Residual de Fritura. *Revista Virtual de Química* **2013**, *5*, 26. [[Crossref](#)]
21. Huang, C.; Shan, W.; Lian, Z.; Zhang, Y.; He, H.; Recent advances in three-way catalysts of natural gas vehicles. *Catalysis Science & Technology* **2020**, *10*, 6407. [[Crossref](#)]
22. Melo, S. A. S.; Trovó, A. G.; Bautitz, I. R.; Nogueira, R. F. P.; Degradação de fármacos residuais por processos oxidativos avançados. *Química Nova* **2009**, *32*, 188. [[Crossref](#)]
23. Thackeray, M. M.; Wolverton, C.; Isaacs, E. D.; Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* **2012**, *5*, 7854. [[Crossref](#)]
24. Wang, Z.; Luo, Y.; Hisatomi, T.; Vequizo, J. J. M.; Suzuki, S.; Chen, S.; Nakabayashi, M.; Lin, L.; Pan, Z.; Kariya, N.; Yamakata, A.; Shibata, N.; Takata, T.; Teshima, K.; Domen, K.; Sequential cocatalyst decoration on BaTaO<sub>2</sub>N towards highly-active Z-scheme water splitting. *Nature Communications* **2021**, *12*, 1005. [[Crossref](#)]