

# Química e Desenvolvimento sustentável

QV, QUIVES, QUISUS

ADÉLIO A. S. C. MACHADO\*

## Resumo

Apresenta-se uma reflexão sobre as relações entre a Química e o Ambiente ao longo do século XX, que começaram pela Geoquímica e conduziram à Química Verde (QV), e aponta-se a preocupação actual de ligar a Química ao Desenvolvimento Sustentável (ou Sustentabilidade)

– traduzida pela introdução muito recente da Química Verde e Sustentável (QUIVES) ou Química Sustentável (QUISUS). Discutem-se sumariamente as dificuldades de pôr em prática uma Química Industrial compatível com a Sustentabilidade e fazem-se algumas reflexões sobre a estratégia de ensino da Química para este fim.

## Química, Ambiente e Química Verde

Um das grandes áreas multidisciplinares do conhecimento que merece presentemente muito interesse é a da *Química e Ambiente*, que versa as relações entre o Ambiente e a Química, especialmente a química que tem origem antropogénica – a química das substâncias provenientes da actividade da Química Industrial. Quando se estudam as ligações entre a Química e o Ambiente, podem-se discernir diversas posturas, distinguidas pelas diferentes preposições que podem ser usadas para exprimir a ligação entre as duas palavras, nomeadamente:

1) *Química do Ambiente*: o estudo dos modos de existência das substâncias químicas no ambiente, dos processos por que se formaram, do seu comportamento e mobilidade, das reacções em que intervêm, etc. Classicamente, esta química restringia-se às substâncias naturais e designava-se por *Geoquímica*, mas o alcance deste estudo alargou-se muito quando se começou a incluir nele as substâncias de origem antropogénica que se lançavam ou iam parar ao ambiente (poluentes e resíduos), em consequência da actividade industrial crescente.

2) *Química no Ambiente*: embora a diferença para o anterior seja subtil, este termo sugere uma maior conotação com substâncias lançadas no ambiente pela actividade humana, em especial a decorrente da Química Industrial, e o modo como se transformam nele – quando se desenvolveu muito, a Química Industrial acarretou a presença no ambiente de muitas novas substâncias sintéticas e fez emergir uma "nova química" a ocorrer **no** ambiente. Com este sentido, também se usa trivialmente o termo *Química Ambiental*.

3) *Química para o Ambiente*: este termo, em contraste com os anteriores, transmite uma ideia de esforço deliberado para protecção do ambiente por parte de quem pratica a química – procurar que esta seja realizada de modo a conservar o ambiente, por exemplo, com limitação ou, preferivelmente, impedimento da dispersão de poluentes e contaminantes tóxicos por parte da Química Industrial e actividades a jusante (por exemplo, por retenção e confinamento, de modo a impedir a disseminação de poluentes e resíduos, e seu eventual tratamento químico apropriado); e mesmo, actuar mais directa e activamente

sobre o ambiente por via química, por exemplo estabelecendo e pondo em execução processos químicos para a remoção de poluentes e contaminantes nele espalhados.

No âmbito da *Química para o Ambiente*, o esforço superlativo de protecção do ambiente é de natureza proactiva – consiste em praticar a química de tal forma que evite a produção de poluentes e resíduos tóxicos, o uso alargado de substâncias perigosas para a saúde humana e dos restantes seres vivos, etc, em vez de ter de remediar *a posteriori* os efeitos nocivos dos mesmos, por exemplo, por retenção de substâncias nocivas à saída das fontes, seguida de tratamento e deposição segura no ambiente. Este tipo proactivo de *Química para o Ambiente* é que constitui a:

4) *Química Verde (QV)*: este termo refere-se à prática da química, nomeadamente da Química Industrial, com objectivos de obter *a priori* protecção intencional do ambiente e da saúde da biosfera, incluindo os humanos, por exemplo: (i) fabricar e lançar no mercado para utilização apenas substâncias que não sejam nocivas para a saúde humana e dos restantes seres vivos, e que não deteriorem o ambiente; (ii) usar processos de fabrico de substâncias

\*LAQUIPAI, Faculdade de Ciências, R. do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto (amachado@fc.up.pt)

que não dispersem poluentes nem produzam resíduos tóxicos, que acabam quase sempre por ter de ser depositos no ambiente; (iii) usar preferencialmente como matérias primas substâncias provenientes de recursos naturais renováveis, de modo a poupar os recursos não renováveis; (iv) usar preferivelmente energias renováveis, etc. Os dois últimos objectivos fazem sentir o problema de a Química ter de ir buscar ao Ambiente os ingredientes físicos com que é feita (a matéria e a energia) – ou seja, acrescentaram à relação **Química e Ambiente** a relação inversa, **Ambiente e Química** (e evidenciam que a relação é biunívoca).

O trajecto implícito nas ideias anteriores e resumido esquematicamente na figura 1, da Geoquímica, que surgiu nos princípios do Séc. XX<sup>1</sup>, até à Química Verde, que emergiu há cerca de uma década<sup>2</sup>, levou cerca de um século a ser percorrido. Este facto é mais um exemplo de que o processo de aquisição de conhecimento e a sua utilização prática pelo Homem é lento e, às vezes, doloroso – frequentemente o conhecimento que vai sendo obtido é parcial e incompleto, e o futuro traz a necessidade de o complementar, rever e corrigir (a crescente especialização científica também tem contribuído para acentuar este tipo de problemas: o especialista num campo tem muitas vezes dificuldade em apreciar as implicações do novo conhecimento adquirido nos outros campos). A aquisição de saber e a sua aplicação técnica é um processo dinâmico, não linear, frequentemente caótico, mas esta característica é quase sempre ignorada quando se ensina ciência e tecnologia – estas são apresentadas "muito arrumadinhas", a evoluir para a frente, sem curvas, de forma determinística, etc., o que contribui para distorcer a mente do formando quanto à percepção e compreensão do que se passa no mundo real, afinal o objectivo primitivo e fundamental da ciência (ver também Conclusões no fim).

### Química e Desenvolvimento Sustentável

Em duas conferências recentes<sup>3,4</sup>, a designação Química Verde foi alterada no

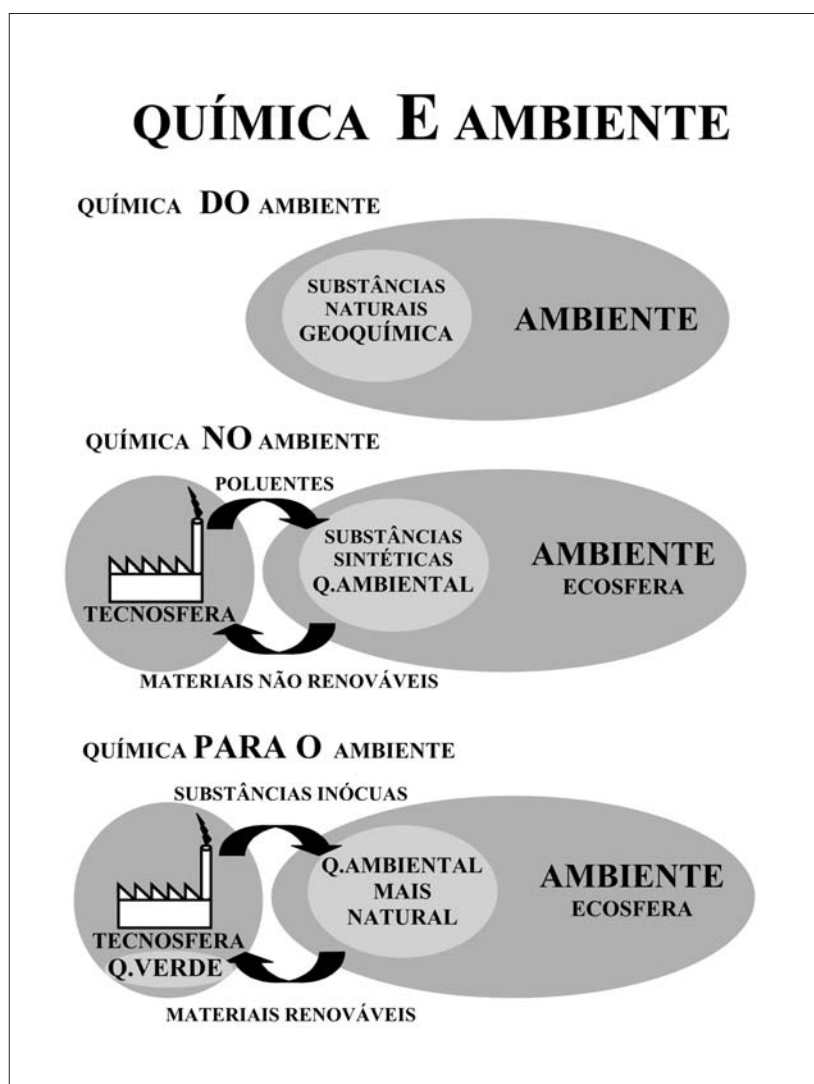


figura 1 Da Geoquímica à Química Verde

sentido de vincar a importância da Química Industrial para a Sustentabilidade, tendo sido propostas duas novas designações alternativas. Em 2003, foi proposta uma mudança de designação da Química Verde para *Química Verde e Sustentável*, implícita no nome escolhido para a Primeira Conferência sobre Química Verde e Sustentável, realizada em Tóquio em 2003<sup>3,5</sup>. A mudança proposta é oportuna porque vinca o papel fulcral das ideias base do Desenvolvimento Sustentável em todos os campos da actividade humana e, especialmente, faz sobressair a importância da Química e da Engenharia Química para a sua perseguição. Este aspecto é salientado na chamada "Declaração de Tóquio" subscrita e divulgada pelos participantes do referido congresso (ver Caixa 1, tradução do texto da Declaração transcrito em<sup>5</sup>).

Em português, o acrónimo para **Química Verde** e **Sustentável** seria naturalmente QVS, mas, numa época em que os acrónimos são tão abundantes que se prestam a confusões, poderá ser mais sugestivo usar uma abreviatura menos compactada, por exemplo, **QUIVES**.

Já no presente ano (2004), teve lugar na Alemanha (Dassau), sob os auspícios da OCDE e de diversas organizações estatais daquele país, uma workshop (Sustainable Chemistry – Integrated Management of Chemicals, Products and Processes)<sup>4,6</sup> em cujo título a Sustentabilidade e a Química surgem mais explicitamente associadas: **Química Sustentável** (acrónimo QS ou talvez melhor, pelas razões apontadas, **QUISUS**). O alcance desta workshop, que, como a de Tóquio, envolveu não só académicos como quadros industriais e governamentais, era

mais amplo do que o da anterior – o objectivo fundamental era discutir as relações da Química Industrial com a Sustentabilidade não só em termos científicos e técnicos mas também económico-sociais. Mais precisamente, a QUISUS visa globalmente a gestão integrada dos produtos e dos processos quí-

micos, no que respeita quer à produção quer à utilização, de modo a compatibilizar de modo definitivo a Química Industrial com o Ambiente, num horizonte temporal alargado no futuro – ou seja compatibilizar a Química com o Desenvolvimento Sustentável. Dada a enorme variedade de compostos químicos fabri-

cados pela Indústria Química e dos modos como estes são utilizados, este objectivo global envolve uma mudança drástica da trajectória seguida presentemente pela Química Industrial – e, por isso, é extremamente complexo. A sua implementação exigirá uma reflexão profunda sobre: (i) o percurso a estabelecer, que terá de ser explorado, já que é ainda quase totalmente desconhecido; e (ii) as sucessivas etapas evolutivas a concretizar para avançar com segurança ao longo dele. Na Caixa 2, sugerida pela estrutura das sessões da workshop, apresenta-se uma visão muito sumária dos fundamentos dos problemas ambientais actuais da Química Industrial, que é preciso resolver para se conseguir avançar para o desenvolvimento prático da QUISUS.

Em suma, estas conferências introduziram novas designações:

5) *Química (Verde e) Sustentável (QUIVES ou QUISUS)*: estes termos são variantes de Química Verde, que focam mais a necessidade de a Química ser praticada de modo a contribuir para colocar a civilização industrial na rota do Desenvolvimento Sustentável, para o que tem de ser ela própria sustentável – o termo põe ênfase acrescida nos objectivos (iii) e (iv) da alínea 4) acima e acrescenta-lhes outros, por exemplo: (v) usar como matérias primas para a produção de substâncias os resíduos formados na preparação de outros compostos. Esta atitude pressiona a Química Industrial a praticar a Ecologia Industrial e a Engenharia Químico-Industrial a integrar-se na Engenharia da Sustentabilidade.

### Caixa 1

#### **Declaração de Tóquio (2003) sobre Química Verde e Sustentável (QUIVES)**

Presentemente, a química e a tecnologia química são o pilar da nossa moderna civilização, porque suprem muitas das necessidades vitais da sociedade e proporcionam numerosos benefícios à humanidade. A contribuição da química para a vida das pessoas no século XXI continuará a ter um largo alcance e a envolver uma grande variedade de modos de actividade positivos. No entanto, para satisfazer este papel, reconhece-se que é da maior importância que a química e a tecnologia química sejam seguras, úteis e desfrutem da confiança das pessoas. Além disso, o respeito pelo ambiente e a atenção à disponibilidade limitada de recursos materiais e de energia têm de passar a ser componentes integrais do planeamento, desenvolvimento e aplicação das tecnologias químicas. Esta é, aliás, uma questão comum a todas as ciências neste terceiro milénio.

A Cimeira Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável realizada em 2002 em Joanesburgo, na sequência da Cimeira da Terra realizada em 1992 no Rio de Janeiro, definiu como uma prioridade a divulgação do progresso para a Sustentabilidade, e assumiu um forte compromisso de protecção da saúde, da segurança e do ambiente. A responsabilidade social foi também evocada como um contributo para o bem-estar das nações.

A QUIVES pode dar uma contribuição importante para a sociedade sustentável e proporcionar uma base para se trabalhar na procura de um futuro sustentável. A Sustentabilidade só poderá ser atingida se for promovida, com determinação e a uma escala global, por toda as pessoas associadas com a química e a tecnologia química. A QUIVES desempenhará um papel importante no esforço vital para encontrar soluções reais para melhorar e proteger quer a saúde humana quer a Terra que todos compartilhamos, pois proporciona as ferramentas necessárias para estabelecer um novo paradigma de prática da química.

As actividades da QUIVES deverão ser dirigidas à educação, investigação e desenvolvimento. A educação em QUIVES deverá embutir nos cientistas jovens as competências éticas e práticas requeridas para reorientar a tecnologia química no sentido da Sustentabilidade. A I&D em QUIVES visará implementar processos, produtos e métodos que minimizem os efeitos adversos das substâncias químicas, ao longo de todo o seu ciclo de vida, sobre a saúde humana e o ambiente. Esta atitude vinculará o máximo esforço possível ao desenvolvimento de práticas de gestão de risco com base científica para a fundamentação do Desenvolvimento Sustentável. A Conferência de Tóquio (2003) sobre QUIVES visa acelerar a conjugação de todos os sectores, incluindo quer a indústria, a academia e os organismos governamentais, quer as organizações não governamentais e internacionais, no sentido de coordenarem as suas actividades e compartilharem as suas competências globalmente. Esta atitude permitirá atingir o máximo nível de concretização do Desenvolvimento Sustentável.

#### **Dificuldades na Prática da Química Verde**

Sem pôr em causa o valor propagandístico das novas designações propostas e seus acrónimos (QUIVES e QUISUS), para dar bom exemplo de poupança de recursos (de escrita!), passa-se a usar o nome e abreviatura "clássicos" – Química Verde (QV).

A QV é uma nova visão da química, em que se abana a maturidade atingida por este ramo de conhecimento científico ao

longo do século XX e se persegue o seu rejuvenescimento com vista a: (i) eliminar os efeitos nocivos para o ambiente e a saúde ecológica e humana da preparação e utilização dos numerosos produtos fabricados pela Indústria Química; e (ii) permitir a recuperação da aceitação da química pela sociedade. Para isso, põe-se em causa as práticas estabelecidas que implicam danos para o ambiente (por exemplo, o uso liberal de solventes como meio de reacção e em separações, muitos dos quais são tóxicos e inflamáveis, o uso de grupos protectores nas vias de síntese, que implicam a introdução nestas de etapas adicionais de introdução e posterior remoção de tais grupos, com produção acrescida de resíduos, etc.), introduzem-se novas métricas de avaliação da química sintética com respeito à benignidade ambiental (por exemplo, a economia atómica, que mede a extensão em que os átomos aportados pelos reagentes de uma reacção são incorporados no produto desejado, não indo parar a produtos residuais indesejados), etc. – enfim, procura-se delinear e concretizar um novo estilo de fazer a Química Industrial que a torne tão compatível quanto possível com o ambiente e a biosfera, mais precisamente, com a saúde e o bem estar dos humanos e a persistência sustentada da civilização no futuro. Em termos muito gerais, a estratégia global desta mudança é traduzida pelos chamados "Doze Princípios da Química Verde" (ver Caixa 3)<sup>2,7</sup>.

A perseguição da QV envolve simultaneamente vários aspectos: (i) a definição das características específicas da química com relevância para a Sustentabilidade; (ii) a determinação de métodos, critérios e indicadores (métricas) que permitam avaliar a actividade da química do ponto de vista da Sustentabilidade; (iii) o estabelecimento de ferramentas que permitam a implementação de novos modos de praticar a Química Industrial que respeitem a Sustentabilidade, etc. Considerando, por um lado, a complexidade intrínseca da Química Industrial e, por outro, que tem de contribuir para uma economia dinâmica e competitiva, inevitável no regime de globalização em vigor, a QV tem de ser construída sobre uma base alargada de

## Caixa 2

### Problemas fundamentais da implementação da QUÍMICA

#### PASSADO: QUÍMICA INDUSTRIAL

A Química Industrial foi sendo desenvolvida sem a otimizar com respeito ao ambiente e à biosfera

**Sabe-se o que se fabrica (a nível das empresas, nem tanto a nível global), mas... não se sabe o suficiente sobre os perigos e riscos quanto a efeitos no ambiente, biosfera e saúde humana (incluindo saúde ocupacional) do que se fabrica**

**Sabe-se o que se faz, mas... não se sabe o que se pode fazer melhor**

**Usa-se o que se necessita, mas... não se sabe se de facto se necessita daquilo que se usa**

#### FUTURO: QV, QUIVIVES, QUÍMICA

Tem de se fazer o redesign da Química Industrial com vista à Sustentabilidade

**Sabe-se qual é a meta final a atingir, mas... não se sabe como alcançá-la**

conhecimento. A sustentabilidade da QV tem uma dupla dimensão: (i) em termos actuais, a da própria química, posta presentemente em causa pela sociedade porque ao longo do século XX fabricou variados compostos responsáveis por problemas ambientais, ecológicos, de saúde humana, etc. – cuja tomada de consciência tem vindo a afastar as pessoas da química; e (ii) em termos futuros, a da própria Sustentabilidade – não pôr em causa a sobrevivência das gerações vindouras – já que, presentemente, a química e actividades afins são directa ou indirectamente responsáveis por grandes perturbações nocivas do ambiente (por exemplo, extracção e consumo acelerado de recursos naturais não renováveis, dispersão global de espécies tóxicas, etc.). A respeito deste último ponto, é curial lembrar que a Cimeira Mundial para o Desenvolvimento Sustentável de Joanesburgo (2002) incluiu nos objectivos a perseguir a minimização dos impactos negativos dos produtos químicos na saúde humana e ambiental, numa etapa a concretizar até 2020.

Para se conseguir avançar para a QV, os seus introdutores começaram por preconizar uma forte acção de propaganda, de formação a nível de ensino da química, de divulgação das suas vantagens económicas a nível industrial, etc., de modo a conseguir a sua aceitação voluntária pelas empresas industriais que

fabricam produtos químicos, pelas que os utilizam, pelo público em geral, etc. Mais recentemente, tem ganho importância a ideia de que são também necessárias medidas legislativas e regulamentares para induzir a indústria a incrementar a utilização da QV, embora a via legislativa, por si só, também não assegure a mudança de estilo da prática da Química Industrial. Mais importante que tudo, será procurar estabelecer sinergias económico-ecológicas (em linguagem química, eco<sub>2</sub>-sinergias!) – usar a QV para conjugar vantagens económicas, por exemplo, aumento de competitividade da Indústria Química, com benefícios ambientais e ecológicos, o que pode ser conseguido por diversas vias, por exemplo por diminuição da produção de resíduos. Produzir resíduos significa produzir prejuízos porque envolve perda de átomos das matérias primas, gastos adicionais no seu tratamento e deposição, etc. Claro que, para contribuir para a Sustentabilidade, a QV tem de ser praticada a nível global – por exemplo, não poderão ser exportados processos menos limpos para os países em desenvolvimento.

**Dispersão de substâncias químicas no ambiente.** Nos tempos que correm é praticamente impossível abordar a QV sem considerar a legislação e regulamentação sobre o fabrico e uso dos produtos químicos e sua dispersão ambiental e, prin-

### Caixa 3

#### Os Doze Princípios da Química Verde

##### Prevenção

É melhor prevenir a formação de resíduos do que ter de tratá-los, depois de se terem criado, para eliminar as suas propriedades tóxicas

##### Economia atómica

Os métodos sintéticos devem ser planificados de modo a maximizar a incorporação no produto final de todas as substâncias usadas ao longo do processo

##### Sínteses menos perigosas

Sempre que possível, os métodos sintéticos devem ser planificados de modo a usar e produzir substâncias não tóxicas (ou pouco tóxicas) para a saúde humana e a ecossfera

##### Planificação a nível molecular de produtos mais seguros

Os produtos químicos devem ser planificados a nível molecular de modo a cumprir as funções desejadas e a minimizar a sua toxicidade

##### Solventes e outras substâncias auxiliares mais seguras

O uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes para promover separações, etc) deve ser evitado sempre que possível; quando usados, esses agentes devem ser inócuos

##### Planificação para conseguir eficiência energética

Deve-se reconhecer os impactos económicos e ambientais dos requisitos energéticos dos processos químicos e minimizá-los; quando possível, os métodos sintéticos devem ser realizados à temperatura e pressão ambientais ou próximas destas

##### Uso de matérias primas renováveis

Sempre que for técnica e economicamente praticável, devem-se usar matérias primas e recursos renováveis de preferência a não renováveis

##### Redução das derivatizações

Devem-se minimizar ou, se possível, evitar derivatizações (uso de grupos bloqueadores, de passos de protecção/desprotecção, e de modificações temporárias na molécula para permitir processos físicos/químicos) porque tais etapas requerem reagentes adicionais e podem produzir resíduos

##### Catalisadores

Devem-se preferir reagentes catalíticos (tão selectivos quanto possível) a reagentes estequiométricos

##### Planificação para a degradação

Os produtos químicos devem ser planificados a nível molecular de modo que no fim do seu uso não persistam no ambiente e se decomponham em produtos de degradação inócuos

##### Análise para a prevenção da poluição em tempo real

Deve-se procurar usar métodos analíticos que permitam monitorização directa dos processos de fabrico em tempo real e controlo precoce da formação de substâncias perigosas

##### Química inerentemente mais segura quanto à prevenção de acidentes

As substâncias usadas e as formas da sua utilização nos processos químicos de fabrico devem minimizar o potencial de ocorrência de acidentes químicos, tais como fugas, explosões e incêndios

principalmente, as estratégias que servem de base a essa legislação. Estas têm de conduzir a situações de balanço equilibrado entre requisitos de natureza diversificada – ambientais e ecológicos, mas também económicos e sociais. Por exemplo, se é preciso eliminar o uso de produtos químicos perigosos e substituí-los por benígnos, a substituição tem de ser economicamente viável, não pode afectar o nível de emprego, etc. Dada a variedade de produtos químicos em fabrico e utilização, e a complexidade e inércia da Indústria Química, a adopção da QV tem de ser feita gradualmente, mediante um processo evolutivo – um dos desafios a vencer é arranjar ferramentas simples e praticáveis para, em cada caso, definir prioridades e escolher a alternativa a seguir de entre as possíveis.

Na prática, é necessário dividir e classificar os produtos químicos com vista a definir opções para a sua gestão com respeito aos riscos que provocam – por exemplo, na figura 2, apresenta-se um modelo de hierarquização dos produtos químicos para servir de base à sua classificação. Os produtos mais desejáveis são os (i) *inerentemente seguros*, que não envolvem riscos a qualquer nível; a seguir, os de (ii) *aplicação segura*, que não envolvem riscos na sua aplicação e para o ambiente (no pós-uso), mas apenas no seu fabrico – envolvem, por exemplo, problemas de saúde ocupacional dentro da fábrica, onde podem ser mais facilmente controlados, embora este controlo exija conhecimento específico e tenha custos (as pequenas empresas têm em geral mais dificuldade em lidar eficazmente com estes problemas); finalmente, os produtos de (iii) *uso condicionado*, que envolvem riscos não só no fabrico como na aplicação – como os operadores da aplicação dos produtos químicos de utilização alargada são numerosos, dispersos e difíceis de treinar e aconselhar, a aceitação de produtos deste tipo é quase sempre problemática (veja-se, por exemplo, o elevado número de acidentes ocorridos na aplicação de pesticidas e o seu uso para fins indevidos – assassínios, suicídios, etc.). É claro que não são aceitáveis produtos químicos que provoquem efeitos maléficis residuais quando se dispersam no ambiente, no pós-uso – por

exemplo, os produtos químicos só são compatíveis com a Sustentabilidade se não exibirem as chamadas características PBT (de **P**ersistência, **B**ioacumulação e **T**oxicidade). E é ainda mais claro que os produtos químicos cuja utilização implica dispersão intencional (por exemplo, fertilizantes e produtos sanitários usados na agricultura) terão de ser objecto de controlo muito apertado – por exemplo, terão de ser degradáveis rapidamente, pouco solúveis em água para impedir o transporte pela água das chuvas, pouco voláteis para impedir o espalhamento pela atmosfera, não deverão ter toxicidade generalizada para a biosfera (um problema delicado, porque o objectivo de um pesticida, insecticida, etc., enfim, de um *biocida*, é justamente ser tóxico para uma espécie ou grupo de espécies, e a especificidade tóxica é difícil de conseguir), etc. Para não impedir o desenvolvimento e lançamento no mercado de novos produtos químicos, a tradução destas e de outras limitações num número crescente de restrições legais exige uma nova abordagem no design de novos compostos mais benignos para satisfazer às limitações acrescidas.

Na prática, dada a situação actual quanto ao fabrico e uso de produtos químicos, a via legislativa parece essencial para se conseguir a substituição e eliminação das substâncias perigosas – por causa da complexidade da Química Industrial, mesmo com informação intensiva, a consciencialização e autorregulação dos fabricantes e utentes é insuficiente para a conseguir com alcance satisfatório (embora as acções voluntárias sejam importantes). A UE tem em discussão uma nova política de controlo dos produtos químicos, conhecida pelo acrónimo **REACH** (ver significado na figura 3), cuja proposta inicial foi criticada pelas associações industriais da Química Industrial, por ser demasiado incisiva em termos ambientais e ecológicos e deprimente em termos económicos e sociais – afectará a viabilidade económica do fabrico, na Europa, de certos produtos, vigentes ou novos, empobrecendo a Química Industrial da UE, e podendo pôr em causa a saúde económica das empresas, o emprego, etc. Será desejável que a versão final do REACH envolva um balanço exequível

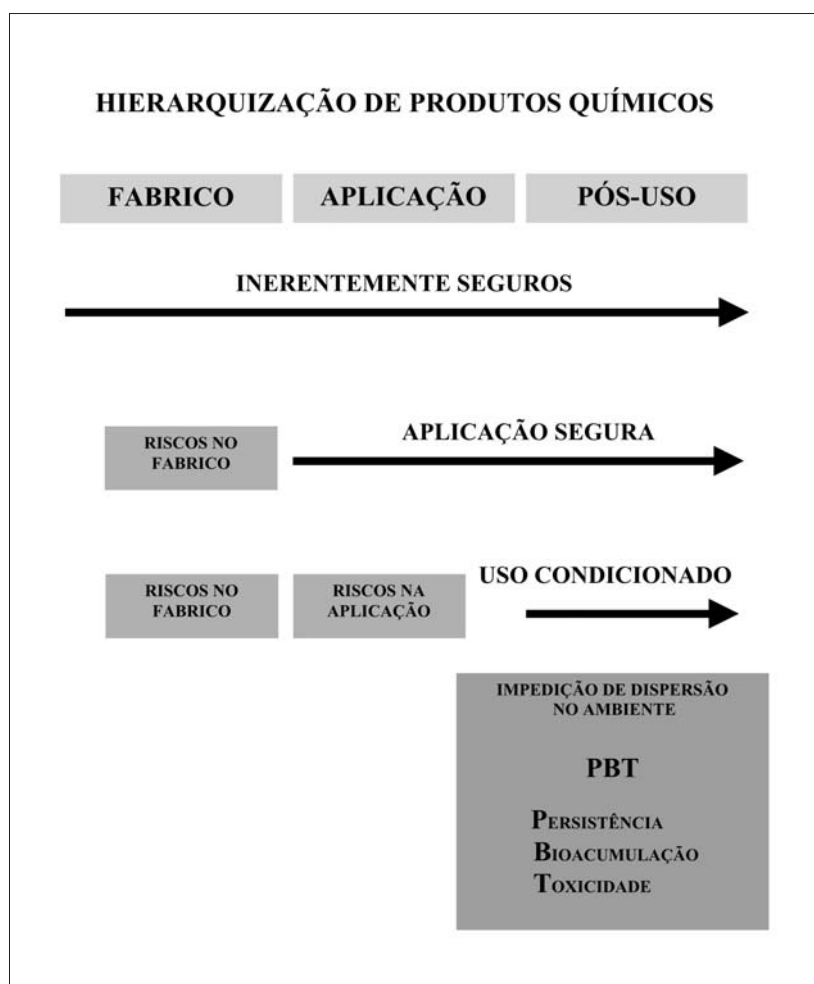


figura 2 Hierarquização dos produtos químicos para a sua classificação para fins de gestão ambiental

no presente, situado numa trajectória que permita um deslocamento progressivo para a Sustentabilidade no futuro.

Em suma, o problema da eliminação do fabrico das substâncias perigosas não é um problema estritamente químico, mas sim um problema global da sociedade industrializada, porque é extremamente complexo (provavelmente tão complexo como o do aquecimento global – ambos mexem com o "funcionamento" da civilização industrial). A sua resolução ou minoração exige suporte legislativo mas também formação dos jovens químicos especificamente dirigida à Sustentabilidade, divulgação intensa de informação, bem como incentivos a acções voluntárias por parte das empresas e do público em geral (que, porém, só terão resultados a médio prazo).

**Produtos e processos de produção.** Para se conseguir que a Química Industrial suporte a Sustentabilidade será ne-

cessário adoptar uma Política Integrada de Produto (IPP, de "Integrated Product Policy"), desde o design até ao mercado, passando pela produção. O papel do mercado é muito importante – a produção de produtos químicos sustentáveis só pode aumentar se a sua quota de mercado aumentar, pelo que as forças de mercado, o comportamento, percepções e o papel crítico do público, a sua informação, etc., têm um papel tão importante na mudança como os aspectos técnicos e económicos. A integração exige que se considere globalmente todo o ciclo de vida do produto na análise dos efeitos sobre a Sustentabilidade – exige a *avaliação do ciclo de vida* (LCA, de "Life Cycle Assessment") do produto com respeito às implicações ambientais do mesmo, bem como a *análise dos fluxos de materiais* (MFA, de "Material Flow Analysis") do processo de fabrico, para controlo do metabolismo das substâncias químicas ao longo do mesmo, com

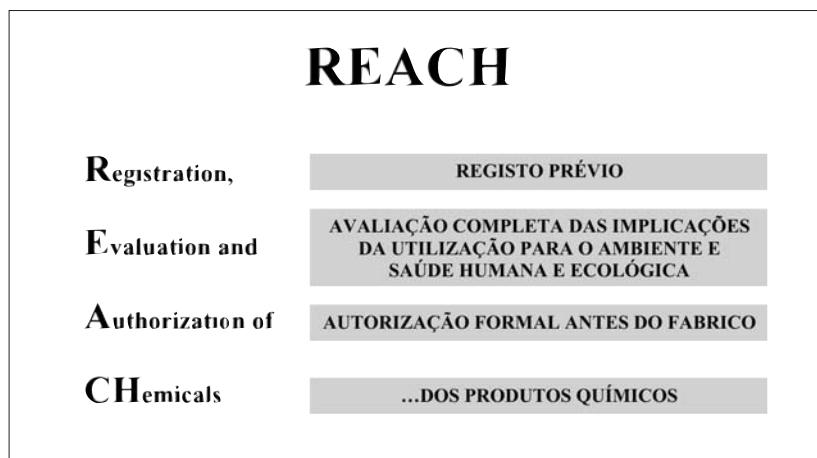


figura 3 REACH: o acrónimo da nova política da UE para os produtos químicos (em discussão)

vista a obter a conservação dos recursos naturais a nível global (a figura 2 não traduz o ciclo de vida completo de um produto químico – ignora o aprovisionamento das matérias primas a montante de fabrico). A integração envolve dimensões económicas, ecológicas e sociais, além das técnicas e tecnológicas – e deve estender-se a todos os participantes da cadeia de valor do produto.

Em termos gerais, é possível definir características gerais que os processos de produção industrial de substâncias químicas devem ter para serem compatíveis com a Sustentabilidade (ver a Caixa 4) – embora nem sempre seja fácil e imediato estabelecer processos com essas características para substituir os vigentes. Não se pretende discutir sistematicamente a Caixa 4, que aliás não é exaustiva, mas vale a pena apresentar alguns exemplos do muito que se pode fazer. Quanto à redução do dispêndio de recursos naturais, deve-se procurar substituir as matérias-primas não renováveis por renováveis – presentemente, a quota destas últimas é inferior a 10%, podendo duplicar ou triplicar a médio prazo. Quanto aos processos de síntese de compostos químicos, deve-se privilegiar o uso de vias sintéticas inovadoras com base em catalisadores e biocatalisadores (biotecnologia) em detrimento de reacções envolvendo reagentes estequiométricos, impulsionar a eliminação ou substituição de solventes tradicionais por outros menos perigosos, etc. Quanto ao modo de produção, a substituição de reactores macroscópicos por baterias de microrreactores parece muito promissora para aumentar a eficácia da In-

dústria Química sob diversos pontos de vista, incluindo a protecção ambiental.

Uma questão importante a considerar é a rapidez com que as novas tecnologias sustentáveis podem ser introduzidas – mesmo quando viável, a introdução de uma tecnologia inovadora é frequentemente lenta. Dada a complexidade da Química Industrial, é difícil dar uma resposta geral à questão. Além da omnipresente dificuldade de prever os efeitos das mudanças drásticas, dada a imprevisibilidade decorrente da sua incerteza intrínseca, há diversos factores importantes que travam a evolução para novas tecnologias sustentáveis (ver exemplos na Caixa 5). Por exemplo, no que respeita ao tempo de introdução no mercado, quando se contempla o fabrico de um novo produto químico, a tendência é para preferir um processo razoavelmente bem estabelecido para produtos similares, embora não muito limpo, que possa ser implementado rapidamente, a um processo presumivelmente mais sustentável mas que, para ser inovador, requer I&D e será mais demorado a montar. Para alterar esta situação, será necessária uma estratégia que envolva quer a definição das vias mais importantes para a transição pragmática da química tradicional para a QV, quer propaganda que permita adquirir a inércia positiva suficiente para ultrapassar as barreiras de natureza cultural, técnica, etc., que sempre se opõem à mudança.

### Ensino da Química Verde

Para se conseguir uma adopção voluntária da QV pela Indústria Química e afim, o ensino da química terá de incluir

ideias mais amplas e profundas sobre a Sustentabilidade e as suas implicações no domínio da química, quer básica (compostos e sua síntese) quer tecnológica (design e gestão dos processos) – e o embutimento activo na mente dos estudantes de modos de pensar e agir compatíveis com a Sustentabilidade.

Presentemente, dado o conhecimento sobre a QV ser ainda difuso, o seu ensino passa, talvez mais do que por mudanças de estratégias globais do ensino da Química e da Engenharia Química, pela instilação nas matérias ensinadas, a todos os níveis, dos princípios da QV, exemplificando a sua necessidade, possibilidades e vantagens da sua aplicação, bem como na apresentação de ferramentas para a sua implementação, de casos de sucesso, etc. Na Caixa 6 exemplificam-se alguns dos aspectos que devem ser incluídos neste esforço para desenvolver aptidões para o design de compostos e materiais e de processos de respectivo fabrico mais sustentáveis. É também importante a inclusão nos cursos de matérias vulgarmente não ensinadas nos cursos tradicionais, que alarguem a compreensão pelos estudantes das realidades ambientais, por exemplo: Sustentabilidade, monitorização e detecção ambiental, transporte e destino ambiental dos compostos químicos, toxicologia, política e legislação ambiental, etc.

O ensino da QV deve, sobretudo, imbuir nos alunos novas maneiras de pensar e executar – é sobretudo fundamental deixar bem interiorizada a ideia de que se tem de atender a *objectivos múltiplos*. Por exemplo, no que respeita ao modo de realizar a síntese de compostos, a

ideia de que tem de maximizar não só rendimentos e selectividades como também a incorporação dos átomos no material desejado, o embutimento de benignidade intrínseca nos compostos e respectivos processos de fabrico, etc. Também se tem de atender à importância económica da legislação e regulamentação ambiental. Por exemplo, o uso de reagentes perigosos e sujeitos a regulamentação numa síntese industrial exige precauções que custam dinheiro e a sua substituição por reagentes inócuos tem vantagens económicas – nos tempos que correm, muitas vezes, são as componentes regulamentares e ambientais que decidem se uma via de síntese é ou não economicamente viável.

A educação em QV será também particularmente importante para os engenheiros químicos que se dedicarem ao desenvolvimento de processos – design, projecto e construção da engenharia necessária para preparar compostos à escala industrial. As sucessivas fases do desenvolvimento do processo, uma actividade complexa realizada por iterações sucessivas, devem ser cumpridas com "mentalidade verde" – para se obter *Engenharia Química Verde*, tem de se praticar *design verde* do processo (tal como, a montante, no desenvolvimento da síntese, é requerido o *design verde* da molécula do produto).

### Conclusões

Em conclusão, o desenvolvimento da QV consistirá em "dar uma curva apertada" no desenvolvimento da química – aplicar o conhecimento químico para mudar a prática da Química Industrial e colocá-la numa trajectória compatível com a Sustentabilidade e que permita recuperar a sua imagem e manter a sua vitalidade. Estas mudanças de trajectória foram vulgares ao longo da História, que não é linear (p.ex.<sup>3</sup>) – e a História do Conhecimento é apenas uma parte particular da História em geral.

Um exemplo comezinho da vida real ilustra bem a dificuldade de obter e aplicar o conhecimento da melhor forma. A roda era conhecida e usada em carros já na civilização mesopotâmica, acabando por ser adoptada por todas as civiliza-

#### Caixa 4

##### **Características dos Produtos e Processos de Produção Sustentáveis**

###### **Recursos naturais**

Reduzir o dispêndio de recursos naturais (matérias primas)  
Reduzir o consumo de energia

###### **Poluentes e resíduos**

Minimizar a libertação de poluentes (para o ar e água)  
Minimizar a produção de resíduos

###### **Processos de síntese**

Reduzir/eliminar a utilização de substâncias químicas auxiliares  
Reduzir/eliminar a utilização de substâncias perigosas  
Aumentar a selectividade e a economia atómica  
Minimizar/eliminar a produção não intencional de produtos secundários

###### **Segurança e saúde ambiental**

Usar processos inerentemente seguros (quanto a acidentes)

#### Caixa 5

##### **Dificuldades na Adopção de Tecnologias Sustentáveis na Indústria Química**

###### **Económicas**

Custos tradicionalmente elevados das instalações industriais e sua especificidade  
Necessidade de reduzir o tempo entre a decisão de fabrico e a chegada ao mercado  
Inércia da indústria

###### **Científicas e técnicas**

Falta de conhecimento de base sobre novas técnicas, tecnologias, etc.  
Inércia da investigação em química (métodos de síntese) e Engenharia química (design/desenvolvimento do processo)

#### Caixa 6

##### **Tópicos a incluir no Ensino da Química para possibilitar a Adopção Generalizada da QV**

###### **Produto**

Design molecular de compostos intrinsecamente benignos  
Relações entre estrutura e a actividade

###### **Síntese e Processo**

Design de vias de síntese mais simples e directas  
Eliminação/substituição de solventes  
Catálise e biocatálise  
Adopção de métricas dirigidas à conservação (economia atómica, etc.)  
Poupança/recuperação de energia

###### **Ambiente**

Substituição de matérias-primas não renováveis por renováveis  
Atenção contínua à protecção do ambiente e da saúde da biosfera  
Mentalização contra o uso de substâncias perigosas

ções para poupar esforço, com excepção dos índios da América Central que, quando Colombo chegou à América, conheciam a roda mas só a usavam para brincar – faltou-lhes desenvolver o conceito de estrada (caminho de chão liso) para apreender a sua utilidade. No entanto, apesar desta utilização generalizada da roda, só há duas ou três décadas ela passou a ser aplicada nas malas – os humanos andaram cerca de 5000 anos a carregar com os seus pesados utensílios de bagagem, um merecido castigo porque lhes tinha escapado o pormenor de que estes podiam ser facilmente equipados com rodas para facilitar o seu transporte!

Este exemplo serve de metáfora útil por permitir aos químicos pedir clemência à sociedade pelo surgimento tardio da QV. Na realidade, a Química Industrial andou um século a poluir o ambiente, grande parte dele sem se ter consciên-

cia disso, porque os químicos não notaram que, com a base de conhecimento científico que ia sendo adquirida, a química podia ser feita de outra maneira – só há pouco tempo reconheceram que podiam realizá-la por modos alternativos benignos para a ecossfera. Agora que descobriram a QV, os químicos têm de convencer a sociedade de que podem mudar a situação – e fazer-lhe sentir que eles são os especialistas adequados para mudar a prática da química na direcção de perseguir e contribuir para a Sustentabilidade (o que, além do mais, tem grande valor prático – é importante para manterem o seu emprego!). Para isso, e para que a ciência e tecnologia química do futuro não continuem a provocar problemas dos tipos que emergiram no século XX e sejam compatíveis com o ambiente e a vida, têm de investigar, implementar e ensinar a QV.

## Referências

1. G. Faure, *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry*, MacMillan, N. Iorque, 1991 (p.4).
2. P.T. Anastas e J.C. Warner, *Green Chemistry – Theory and Practice*, Oxford U.P., Oxford, 1998.
3. M. Misono, GSC Tokyo 2003, *Green Chem.*, 5 (2003) G67 (número especial sobre a *First Conference on Green and Sustainable Chemistry – GSC Tokyo 2003*).
4. K.G. Steinhauser, S. Richter e J. Penning, *Sustainable Chemistry in Dassau – A Workshop Report*, *Green Chem.*, 6 (2004) G41.
5. P. Anastas e S.I. Murahashi, *GSC Tokyo Statement*, *Green Chem.*, 5 (2003) G74.
6. *Sustainable Chemistry – Integrated Management of Chemicals, Products and Processes*, in <http://www.sustainable-chemistry.com>, accedido em 2004.06.01).
7. S.K. Ritter, *Green Chemistry*, *Chem.Eng.News*, Jul 16 (2001) 27.
8. M. de Landa, *A Thousand Years of Nonlinear History*, Swerve, N. Iorque, 2000.

## Actualidades Científicas

### Avaliar a Qualidade do Azeite

Investigadores britânicos e italianos encetaram uma colaboração com o objectivo de desenvolver um método óptico original, baseado em nefelometria espectral, que possibilita a distinção entre azeite extra-virgem e azeite de inferior qualidade ou mesmo falsificado.

A pesquisa do especialista em fotónica Peter Smith do Departamento de Engenharia Electrónica e Eléctrica da Universidade de Loughborough, Reino Unido, e de A.G. Mignani, L. Ciaccheri, A. Ciamoto e G. Sani do CNR Instituto de Física Aplicada em Florença, e do CNR Instituto da Árvore e da Madeira em Sesto Fiorentino, Itália, inserida como parte do projecto europeu OPTIMO, teve como objectivo o desenvolvimento de uma nova técnica de dispersão de luz e de absorção que pode resultar num identificador bastante sensível. Os investigadores usaram espectroscopia de absorção e medidas de dispersão multiângulo na região do visível (designado por nefelometria espectral), comparando os resultados entre os diversos tipos de azeite. Os espectros foram analisados

através de Principal Component Analysis (PCA) possibilitando a construção de mapas tridimensionais em que os óleos foram agrupados de acordo com a região geográfica de origem. Através deste procedimento, Smith afirma que se tornou possível pela primeira vez construir uma "impressão digital" óptica que permite identificar a origem e o processo de fabrico do azeite. Esta técnica permite aos investigadores uma análise completa, fiável e de baixo custo, através da qual é possível distinguir facilmente os azeites virgens dos restantes. Por outro lado, Smith refere que esta técnica pode igualmente ser utilizada para testar a autenticidade de outros produtos alimentares, como vinho ou cerveja (*Webzine Spectral Lines* (2004) 37).

Paulo Brito

### Visão radical do processo degenerativo das proteínas

A alteração de estruturas proteicas induzida por espécies radiculares é indicada como a causa provável de várias patologias, além de influenciar o processo degenerativo que decorre durante o enve-

lhhecimento. Com o conhecimento prévio que alguns peptídeos são mais susceptíveis que outros a danos causados por espécies radiculares, um grupo de investigadores da Universidade de Basileia, Suíça, dedicou-se a estudar o assunto (M. Nold e H. Wennemers, *Chem. Commun.* (2004) **16**, 1800).

A partir de um conjunto de mais de 29000 tripeptídeos distintos, estes investigadores determinaram quais foram as sequências danificadas por radicais gerados a partir da reacção de Fenton (transferência de electrões a partir do ião  $Fe^{2+}$  para  $O_2$  ou  $H_2O_2$ ). Os resultados obtidos evidenciaram que os peptídeos "ricos em ácidos" são mais danificados que os outros. Por outro lado, os peptídeos mais danificados também apresentam uma ligação mais forte ao ião  $Fe^{2+}$ . Esta ligação implica que a formação das espécies radiculares ocorra na vizinhança destes peptídeos, tornando-os por isso mais susceptíveis (adaptado de *Chemical Science* (2004) **1**, C69).

Marcela Segundo