

CIÊNCIA DA SUSTENTABILIDADE E A QUÍMICA DENTRO DA CONJUNTURA EDUCACIONAL BRASILEIRA

Haidi D. FIEDLER, Marcelo NOME, César ZUCCO e Faruk NOME

Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina,

C.P. 88040-900 Florianópolis – SC

RESUMO: Este trabalho oferece a professores e estudantes uma reflexão crítica em relação a um novo comportamento em termos de métodos educacionais e de pesquisa em química, contemplando os princípios da química verde. Durante o período de transição de uma visão conservadora, hoje predominante, para uma de vanguarda será necessária uma nova forma de agir para superar dificuldades previstas no sistema educacional brasileiro. As barreiras que deverão ser superadas para permitir a introdução deste novo enfoque são consideradas como uma conjuntura educacional.

PALAVRAS-CHAVE: Ciência da sustentabilidade; química ambiental, química verde.

ABSTRACT: This work offers to professors and students a critical reflection on a new behaviour in educational methods and research in Chemistry, contemplating the principles of Green Chemistry. During the transition period from a conservative to a vanguard vision, the new way of acting is here described in order to serve as an analysis of the expected difficulties in the Brazilian educational system. The barriers to be surpassed to allow the introduction of this new approach are considered as an educational juncture.

KEYWORDS: sustainability science; environmental chemistry; green chemistry.

I. EDUCAÇÃO E A SUSTENTABILIDADE DA SOCIEDADE BRASILEIRA

Um dos mais importantes desafios que os professores de todos os níveis de ensino e de todas as áreas do sistema educacional brasileiro estão enfrentando é o de se manterem atualizados e instrumentalizados para a atuação diária, já que a preocupação com a qualidade da vida e com a sustentabilidade das gerações futuras passou a ser tema central em quase todas as profissões existentes. Outrossim, assuntos que não faziam parte de nosso cotidiano (como, por exemplo, ciência e tecnologia) passam a ser cada vez mais populares³, principalmente porque se sabe que a sociedade moderna mundial é movida pela geração e pela troca de informação, em altíssima velocidade. No entanto, no Brasil, uma grande parte das instituições de ensino fundamental e médio e muitas universidades encontram-se ainda à margem dessa transformação universal promovida pelo novo turbilhão digital⁶. Este atraso de grande parte da população parece estar em desacordo com a classificação do Brasil no Índice de Realização Tecnológica (IRT) do Relatório do Desenvolvimento Humano de 2001, do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). O

referido IRT é uma medida da capacidade dos países de absorver tecnologia e difundi-la entre seus habitantes e, nesse índice, o Brasil ocupa a 43^a posição, com índice de 0,311, em uma lista de 72 países⁵. Parece óbvio que esta posição intermediária está longe de ser satisfatória, já que a diminuição da distância existente entre países líderes e países intermediários requer, no Brasil, esforços para eliminar analfabetismo, implementar programas públicos de qualidade na educação fundamental e média, além de disponibilizar o ensino superior para uma parcela significativa (40-60%) dos jovens em idade escolar. Este tipo de mudança requer, certamente, um planejamento com uma visão de longo prazo.

Assim, para poder iniciar uma verdadeira transformação da sociedade, temas como ciência e sustentabilidade devem passar a fazer parte de nosso cotidiano^{9,11,12} e a maioria dos cidadãos deve conseguir acompanhar as transformações que ocorrem no mundo. Cada vez mais, é necessário introduzir na polêmica social cotidiana a questão da importância dos temas de pesquisa. Na relação Norte-Sul, devemos quebrar a clara distinção existente entre dois modelos. Isto é, parece inaceitável que enquanto os países dominantes pesquisam as questões que irão gerar conhecimento para o domínio tecnológico futuro, os países pobres ou emergentes preocupem-se apenas com as questões triviais, submetendo-se à posição de prestadores de serviço e aplicadores de tecnologias de propriedade de países ricos⁹.

Assim, uma mudança no paradigma de desenvolvimento econômico implica a necessidade de construção de uma nova maneira de crescer e distribuir riquezas, em conjunto com uma reversão das estratégias Norte-Sul para garantir a sobrevivência e a sustentabilidade de nossa sociedade.

O Brasil, por contingência ou não, aplica, internamente, os mesmos critérios de marginalização dos países ricos e, para muitos de nós (aqueles que não nasceram no núcleo do poder econômico), a educação universitária é ainda a única forma ou oportunidade para

ascender às diferentes classes sociais. Existe uma necessidade premente de a sociedade gerar novos profissionais, comprometidos com essa visão moderna de sustentabilidade, para assumirem cargos de liderança dentro e fora das instituições de ensino que hoje freqüentam. O tempo é cada vez mais escasso para elaborar e colocar em prática essa nova conduta nas universidades brasileiras, conduta que deverá ser aplicada também nas outras estruturas de ensino, como o médio e o fundamental.

Cabe à universidade brasileira preparar esse profissional, oferecendo treinamento e aprendizado voltados à identificação e/ou desenvolvimento de espírito empreendedor agregado ao conceito de crescimento sustentável. Logo nos primeiros anos da vida universitária, deve-se transmitir fatos científicos somados a condutas morais, que devem se refletir nas ações cotidianas.

O sistema de educação marginalizador é perigoso, em todos os sentidos, porque os que estão ficando marginalizados das inovações não deixam de acompanhar, mesmo à distância, os avanços tecnológicos, e esse distanciamento forçado ajuda a criar, também, uma sociedade cada vez mais rancorosa.

Muitas das mudanças que devem ser realizadas no ensino visando a equalização das camadas sociais são consideradas idealistas, mesmo nos países desenvolvidos. Entretanto, a nova sociedade deverá estar sustentada pelo conhecimento e, através dele, algumas estratégias devem ser implantadas para que sejam diminuídas as injustiças sociais estabelecidas através do tempo pelo poder econômico. É fundamental, pois, gerar uma metodologia de ensino consistente, acessível democraticamente, que estabeleça Educação, Ciência e Tecnologia como os pilares fundamentais do desenvolvimento, visando, no futuro, ensino superior ao alcance de todos.

II. QUÍMICA VERDE E O ENSINO DE QUÍMICA

No caso particular do ensino de química, chega-se a um novo paradigma de desenvolvimento sustentável, que pode servir como modelo para o problema geral da sociedade e que respeita de forma essencial o meio ambiente, usando o conjunto de idéias e tecnologias chamado de “Química Verde”, ou seja, a química industrial contemporânea, adaptada ao momento atual mas altamente relacionada com tecnologias de vanguarda, cada vez mais avançadas, adquirindo um papel fundamental para a economia mundial^{1,13}.

A química ocupa uma posição central nos diferentes processos que deverão ser atualizados nas diversas indústrias que fazem parte do sistema econômico de qualquer país competitivo no mercado atual. Nesse sentido, o químico passa a ter um papel de destaque, já que ocupa uma posição central no processo industrial moderno. Ele está à procura de soluções e/ou minimizações dos problemas ambientais ou à busca de novos processos (os denominados processos tecnológicos verdes) com tecnologias cada vez mais eficientes e sem implicações negativas para os operadores ou técnicos que as aplicam, bem como para a área de impacto dos diferentes processamentos industriais envolvidos. Atualmente, muitas universidades no Brasil e no exterior preocupam-se em criar departamentos, divisões, institutos tecnológicos com linhas de pesquisa específicas para gerar produtos e novas tecnologias que substituam, por exemplo, os compostos orgânicos voláteis (VOC, *volatile organic compounds*), poluentes aéreos perigosos (HAP, *hazardous air pollutant*) ou solventes clorados como o tricloroetileno (TCE)¹⁴. Também existe a preocupação, cada vez mais acentuada, com o descarte de efluentes líquidos contendo contaminantes e/ou micropoluentes cancerígenos e/ou tóxicos. Essa preocupação deriva, sobretudo, do medo do castigo, já que existem muitas potenciais (vinculadas à existência ou não da fiscalização nacional), cada vez mais assustadoras, para os casos de poluição dos recursos hídricos. O

investimento em mudanças dos processos industriais considerados clássicos, que tem como resultado a redução de efluentes e/ou resíduos tóxicos (sejam eles líquidos, gasosos ou sólidos), ou a substituição de solventes e/ou reagentes perigosos por substâncias químicas inócuas, demora a atrair empresários. A explicação mais provável para esse desinteresse está aliada à idéia de que a preservação da natureza e a qualidade de vida das futuras gerações não são retornos palpáveis. A Tabela 1 apresenta, entretanto, alguns resultados de empresas que se dispuseram a implementar mudanças qualitativas em seu processo produtivo, mostrando que, apesar do investimento inicial, a implementação desse tipo de conduta pode trazer benefícios em forma de redução de custos de produção^{14,18}. De fato, como está demonstrado, processos da Química Verde tendem a ser, depois de implantados, também lucrativos, tendo como beneficiários tanto os empresários quanto a natureza. Impende, pois, que esse tipo de pesquisa, ainda incipiente, seja prioritariamente implementado entre as indústrias brasileiras.

Quando é enfocado o caso particular dos estudantes de Química, espera-se que esta nova forma de trabalhar, característica da “Química Verde”, possua caráter interdisciplinar, na busca de eficiência máxima dos processos químicos, com implicações negativas mínimas, tanto às pessoas que os utilizam quanto ao meio em que estão inseridas. O novo ensino de Química deve estar voltado para o futuro sustentável, integrado com o meio ambiente e a economia do país^{2,4,7,13}. Os estudantes de Química devem ser preparados para suprir as dificuldades que as indústrias enfrentam/enfrentarão para se adaptarem aos novos mercados. Exemplos de cuidados com o ambiente, que devem ser tratados necessariamente de forma interdisciplinar, são os casos de eliminação/substituição de solventes¹⁴, de eliminação de embalagens plásticas recicláveis¹⁵, de eliminação de resíduos industriais em geral¹⁸. Um critério importante para avaliar o desempenho dos diferentes processos em

relação à geração de resíduos e que merece ser difundido é o fator-E, que foi introduzido por Shelton em 1994¹, definido como a razão entre os pesos dos resíduos e os pesos dos produtos em um determinado processo¹³. O fator-E pode ser de aproximadamente 0,1 para o caso da indústria de refino de petróleo e, de até 100 na indústria farmacêutica. É importante salientar que o fator-E não deve ser considerado de forma independente, já que a escala dos processos tem uma influência importante. Por exemplo, no caso da indústria de refino de petróleo, apesar de termos um fator que indica apenas 0,1 tonelada de resíduos por tonelada de produto, há uma escala de 10^6 - 10^8 toneladas/ano para diferentes processos. No entanto, na indústria farmacêutica, que mostra um fator-E geralmente na faixa entre 25 e 100 toneladas de resíduo por tonelada de produto, a escala de produção está entre 1 e 1.000 toneladas/ano, fato que permite maior flexibilidade de adaptação para implantação da Química Verde neste setor¹³.

A nova geração de profissionais da área de química será inserida numa realidade em que praticamente toda indústria que usa processos químicos deve superar barreiras estratégicas, já estabelecidas pelos países ricos, de comprovação e registro da qualidade dos produtos produzidos, que utiliza padrões de referência de qualidade aceitos internacionalmente, como por exemplo as normas ISO 14000¹⁷.

Nesta nova realidade, a qualidade de produtos e processos, quer seja na produção de polímeros biodegradáveis ou na maricultura ou agricultura, deverá estar comprovada e/ou registrada em redes de laboratórios de química analítica, todos já integrados às novas condutas de “Boas Práticas no Laboratório – GLP (Good Laboratory Practice)”¹⁷.

Essa forma de atuar influencia diretamente a Química que trabalha com amostras naturais e/ou relacionadas com o meio ambiente, principalmente os estudos que visam avaliar impactos ambientais, que se preocupam em obter resultados livres de erros

sistemáticos e sem dados enganosos. A segurança da qualidade dos resultados (qualidade comprovada, que exige rastreabilidade) passa a desempenhar um papel fundamental. A incerteza nas determinações analíticas de amostras naturais deu origem à busca incansável de dados exatos para as várias questões que ainda não possuem respostas.

Esses procedimentos, envolvendo exercícios entre redes de laboratórios, estão enquadrados na “Química Analítica Ambiental”, que trabalha com amostras relacionadas ao meio ambiente com a preocupação de obtenção de dados exatos, isto é, a chamada garantia do controle da qualidade de resultados, onde a rastreabilidade é realizada buscando minimizar-se os erros analíticos sistemáticos. Tal exatidão deve ser comprovada e, conseqüentemente, possibilitar o questionamento dos dados por qualquer instituição ou órgão com competência para realizar a tarefa de fiscalização^{8, 17}.

III. A FILOSOFIA DA QUÍMICA VERDE

Esta filosofia já foi expressa por muitos autores e resumida num conjunto de doze diretrizes de atuação que configuram, numa visão antropomórfica da ciência, os doze mandamentos da Química Verde^{1,13}, quais sejam: i) é melhor evitar a formação de resíduos que ter que tratar ou limpar os mesmos depois de serem formados; ii) os métodos sintéticos devem ser otimizados para maximizar a incorporação de todos os materiais usados no processo, no produto final; iii) sempre que possível, as metodologias sintéticas devem ser direcionadas para usar e gerar substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e meio ambiente; iv) os produtos químicos devem ser otimizados para preservar a eficácia da função desejada, reduzindo sua toxicidade; v) o uso de substâncias auxiliares (por exemplo: solventes e agentes de separação) deve ser eliminado ou, quando imprescindíveis, devem ser selecionadas dentre compostos inócuos; vi) os métodos

sintéticos devem ser otimizados para funcionar a temperatura e pressão ambientes, já que os requerimentos energéticos devem ser minimizados para evitar impactos ambientais e/ou econômicos; vii) as matérias-primas devem ser de origem renovável, evitando-se o uso de fontes naturais não renováveis em curto prazo; viii) evitar, sempre que possível, a formação de derivados não necessários (grupos de proteção/desproteção, modificações físicas ou químicas temporárias); ix) reagentes catalíticos, da maior seletividade possível, são melhores que reagentes estequiométricos; x) os produtos químicos devem ser desenvolvidos de tal forma que não sejam persistentes no ambiente, e se degradem em produtos ambientalmente inócuos; xi) desenvolver metodologias analíticas que permitam monitoramento em tempo-real, para poder controlar o processo e evitar a formação de substâncias perigosas; xii) as substâncias e os estados físicos nos quais as mesmas são usadas devem ser selecionados de forma a minimizar acidentes potenciais como escapes, derrames, explosões, incêndios.

É importante salientar que esta filosofia da Química Verde surgiu no meio acadêmico/científico somente no início da década de 1990 e, portanto, a indústria química não teve tempo para adaptar-se à nova situação, já que o desenvolvimento e a introdução de um novo processo químico demora aproximadamente 10 anos. No Brasil, começam a surgir os primeiros artigos dedicados ao tema da “Química Verde”^{10,16} e, é importante divulgar alguns dos conceitos fundamentais desta nova abordagem conceitual. A definição mais amplamente aceita de Química Verde na atualidade é aquela que a coloca como “a área da química que se preocupa com o desenho, o desenvolvimento e a implementação de produtos e processos químicos visando reduzir ou eliminar substâncias perigosas para a saúde humana ou para o meio ambiente”^{1,13}. Esta nova forma de focar a química nasce do

reconhecimento de que o risco de um determinado produto depende de dois fatores: perigo intrínseco do produto e grau de exposição da população ao mesmo.

$$\text{RISCO} = \text{PERIGO INTRÍNSECO} \times \text{EXPOSIÇÃO}$$

Na química clássica, o risco associado aos processos químicos foi sempre tratado por meio do controle da exposição, seja através da limitação do tempo de exposição no uso e manuseio do produto, seja através dos cuidados com o tratamento e o depósito dos compostos químicos e de seus rejeitos. De fato, a legislação existente cuida quase que exclusivamente desses aspectos. Na filosofia da Química Verde, o conjunto de diretrizes acima descrito permite visualizar um novo tipo de conduta, que cuida especialmente do perigo intrínseco do produto, simultaneamente com os problemas relacionados ao seu processo de produção e tempo de exposição.

Conclusão

O sistema educacional nacional deve adaptar-se a esta nova visão de mundo. A química apresenta sua alternativa, não por meio da dominação e do controle da natureza, mas sim por meio do respeito, da cooperação e do diálogo com os diferentes setores que trabalham com processos químicos, principalmente através da ampliação da colaboração entre a universidade, a indústria e o governo. É fundamental, neste momento, que se inicie o processo de mudança da filosofia do ensino da química, para poder formar uma nova geração de profissionais com condutas éticas fundamentadas nos princípios que regem a nova postura, resumida no pensamento de sustentabilidade do planeta. É necessário que nos cursos de graduação e pós-graduação de todas as áreas da química sejam introduzidas disciplinas dedicadas especificamente a essa filosofia de trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem: ao apoio financeiro do CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANASTAS, P.T. E WARNER, J.C. Green Chemistry. Theory and Practice. Oxford University Press Inc., New York. 2000. 135 p.
- 2 DeSIMONE, J.M. Practical Approaches to Green Solvents. *Science*, v. 297, n. 5582, p. 799-803, 2 agos. 2002.
- 3 DIEGUEZ, F. Excelência à brasileira. *Folha de São Paulo*, São Paulo, 8 setem. 2002. Caderno: Mais, p.20.
- 4 FAHRENKAMP-UPPENBRINK, J. Chemistry Goes Green. *Science*,v. 297, n.5582, p. 798, 2002.
- 5 FIGUEIREDO, O. Relatório da ONU mede realização tecnológica. *Gazeta Mercantil*, São Paulo, p. A-9, 10 jul. 2001, p. A-9.
- 6 GLEISER, M. Turbilhão digital. *Folha de São Paulo*, São Paulo,11 agos. 2002. Caderno: Mais, p. 23.
- 7 GROSS, R.A. E KALRA, B. Biodegradable Polymers for the Environment. *Science*, v. 297, n. 5582, p. 803- 807. 2 agos. 2002.
- 8 KATEMAN, G.; BUYDENS, L. *Quality Control in Analytical Chemistry*; Winefordner, J.D.; Kolthoff, I.M., Ed.; A Wiley-Interscience publications, NY, 1993. 307 p.
- 9 KATES, R.W.; CLARK, W.C.; CORELL, R. *et al.* Sustainability Science. *Science*, v.292, p.641-642, 27 abr. 2001.
- 10 LENARDÃO E. J.; FREITAG R. A.; DABDOUB, M. J.; BATISTA, A. C. F.;

- SILVEIRA, C. C. “Green Chemistry” - Os 12 princípios da Química Verde e sua inserção nas atividades de Ensino e Pesquisa. *Química Nova*, São Paulo, v. 26, n.1, p.123-129, jan./ fev. 2003.
- 11 LESHNER, A.; Science and Sustainability. *Science*, v. 297.n. 5583, p.897, 9 agos. 2002.
- 12 McMICHAEL, T. The Biosphere, Health, and “Sustainability”. *Science*,v. 297, n.5584, p. 1093, 16 agos. 2002.
- 13 POLIAKOFF, M.; FITZPATRICK, J. M; FARREN, T.R. E ANASTAS, P.T. Green Chemistry: Science and Politics of Change. *Science*, v.297, n. 5582, p. 807-810, 2 agos. 2002.
- 14 Purdue University, Clean Manufacturing Technology Institute, CMTI.
<http://www.ecn.purdue.edu/CMTI/Technology-Transfer/>, acessada em 27 de abril, 2003.
- 15 PEREIRA, R.C.C.; MACHADO, A.H. E SILVA, M.G. (Re) Conhecendo o PET. *Quím. Nova na Escola*, n.15, p.3-5, maio 2002.
- 16 SANSEVERINO, A. M. Química Verde. Uma Nova Filosofia. *Ciência Hoje*, Rio de Janeiro, v. 31, p. 20-27, agos. 2002.
- 17 SCHLESING, H. *Accreditation and Quality Assurance in Analytical Chemistry*, Günzler, H., Ed.; Springer, NY, 1996. 266 p.
- 18 University of Hertfordshire, Faculty of Natural Sciences – Division of Chemistry.
<http://www.herts.ac.uk/natsci/Cen/DIVPAGE/CleanRes.htm>, acessada em 24 de abril, 2003.

Tabela 1. Exemplos de diferentes produtos eliminados da produção, de acordo com os princípios da chamada “Química Verde”^a.

Empresa / Processos (data do início do projeto)	Redução da emissão	Economia/ano
Jupiter Aluminum Corp. (9/99)	Resíduos perigosos 11 Tons/ano Resíduos especiais 55 Tons/ano	US\$ 47.000,00
Par-Kan Company (2/98)	Total de VOC's 12 Tons/ano	US\$ 10.000,00
Solventes Halogenados (7/98)	Solventes halogenados 136 Tons/ano	US\$ 239.026,00
Teste feito na indústria de gabinetes de madeira de Indiana, com possível extensão para todas as pequenas companhias (6/96)	Xileno 6.810 Kg/ ano Tolueno 4.313 Kg/ano MIBK 2.180Kg/ano Etilbenzeno 840 Kg/ano MEK 1.453 Kg/ano Total de VOC's 15.187 Kg/ano	US\$ 36.000,00
Substituição de seladores (resinas) na indústria de fabricação de peças automotivas (6/66)	Xileno 100% Tolueno 100% Etil benzeno 100% Outros VOC's 25% Total de VOC's 90% (36Tons/ano)	US\$ 125.000,00
Nickell Moulding Copmany	Total de VOC's 80% (61 Tons/ano)	US\$ 133.500,00
Holiday Rambler (8/96)	TCA's 131 Tons/ano	US\$ 265.450,00
Lacay Lubrification & Manufacturing, Inc. (4/97)	Xileno 8,5 Tons/ano Outros VOC's 4,5 Tons/ano Total de VOC's 13 Tons/ano	US\$ 17.500,00
Middlebury Hardwood Products Inc. (3/96)	Total de VOC's 55%	US\$ 100.000,00
The Pierce Company ,Inc.(3/96)	TCE 7.264 Kg/ano	Indeterminado
Woodcrafters, Inc. (96)	Total de HAP 9.080 Kg/ano	US\$ 18.000,00
United Technologies Automotive (4/98)	Total de VOC's 80 Tons/ano	US\$ 500.000,00
Vincent Bach (4/97)	TCE (est.) 5.902 Kg/ano	US\$ 15.700,00 (estimado)
American Lifts (3/96)	Total de VOC's 3.450 Kg/ano	Inderterminado
Atlas Foundry Company, Inc. (6/96)	Total de Poluentes 1.168 Tons/ano	US\$126.084,00
Automotive Parts Company (MV003) (3/96)	Total de VOC's 23,5 Tons/ano	US\$ 3.500,00
Child Craft Industries, Inc. (9/96)	Total de VOC's 6,2 – 7,2 Tons/ano	US\$ 40.500,00
ITWMicro-Poise (4/98)	VOC's 82%, 142 Kg/ano	US\$ 1.000,00
Northen Indiana Plastics Company (12/97)	VOC's 10 Tons /ano	US\$7.000 ,00
AM General Corporation (9/96)	Xileno 0,2 Tons/ano MEK 0,1 Tons/ano Tolueno 0,1 Tons /ano Outros VOC's 1,2 Tons/ano Total de VOC's 1,6 Tons/ano	US\$76.500,00

^a Processos desenvolvidos no Clean Manufacturing Technology Institute, da Universidade de Purdue; VOC representa Compostos Orgânicos Voláteis; MEK representa butanona e TCE representa tricloroetileno.