

A Evolução da Engenharia Química - Perspectivas e Novos Desafios^[1]

Luismar Marques Porto
Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos
Universidade Federal de Santa Catarina
Caixa Postal 476, Fone: (48) 331-9448, Fax: (48) 331-9687
CEP 88040-900 Florianópolis, SC, Brasil
E-mail: luismar@enq.ufsc.br

Resumo — A sociedade moderna atual herdou mais de um século de importantes contribuições dadas pela engenharia química, desde que ela foi reconhecida como profissão por George Davis, em 1887. No Século 21, com a incorporação da biologia aos fundamentos da engenharia, importantes avanços deverão ocorrer em novas especializações capazes de encontrar novas soluções para o manuseio e fabricação de moléculas mais complexas, com ênfase nas propriedades dos materiais e melhor aproveitamento dos recursos naturais. São inúmeros os desafios da profissão de engenheiro químico. Os novos profissionais deverão ter capacidade de trabalho colaborativo, e empreendedorismo, além de contínua motivação, conhecimentos gerais e especializados, interdisciplinaridade, grandes habilidades de comunicação, e capacidade de contínuo aprendizado e realização de seus anseios pessoais.

Palavras-chave: engenharia química, educação, especialidades de engenharia, interdisciplinaridade

Introdução

Qualquer um que se aventure a fazer previsões corre sempre grande risco. Especialmente se essas previsões forem de longo prazo: um ano, uma década, um século. Para um milênio tem-se algumas vantagens. Certamente nenhum de nós será testemunha do sucesso ou fracasso de nossas previsões de tão longo prazo. Como engenheiros, no entanto, somos apaixonados por previsões. Nossas simulações são tentativas analíticas ou numéricas de prever o comportamento de produtos ou o futuro (quem sabe também o passado) do processo no qual estamos interessados, talvez para conhecer o tempo de vida útil de um catalisador, ou por que houve ou poderá haver um derramamento de petróleo na Baía de Guanabara.

Se vivêssemos no ano 2000 a.C. —sendo bem (in)formados— quem sabe poderíamos predizer com razoável certeza o que iria acontecer nos próximos mil anos. Num mundo tão dinâmico quanto o atual, no entanto, qualquer previsão para os meses seguintes é tão incerta quanto seria prever os acontecimentos cem anos à frente ao tempo dos faraós. O homem

passou mais de 10 milhões de anos vivendo sem grandes mudanças, mais ou menos da mesma maneira. Gerações, umas após as outras, transmitiram seu conhecimento de boca em boca por milhares de anos. Há mil anos atrás estávamos definindo os contornos de nossa barbárie e mergulhados em grande miséria e tirania. O homem como agente ativo da história progrediu muito no último milênio. Se seu comportamento social é ainda por vezes pré-histórico, com guerras sangrentas ao lado da tão gloriosa civilização ocidental, é inegável que ele dispõe hoje de recursos jamais imaginados pelas gerações que nos sucederam. Chegamos ao Século 21 com uma sensação desconfortável de que seremos incapazes de acompanhar a revolução promovida pela atual geração de cientistas, líderes políticos, mercados financeiros, e outros agentes sociais e econômicos. A economia globalizada e a tecnologia da informação colocam o mundo em uma situação de instabilidade constante, deixando a nós a única certeza possível: a certeza de mudanças radicais na forma de nos comunicarmos, de fazer negócios, gerenciar processos, nos educarmos, e nos relacionarmos. Qual é o papel do engenheiro neste novo contexto? Quais são as oportunidades que nos esperam? Quais os novos desafios? O que nos reserva o mercado de trabalho, e qual será nosso trabalho? A resposta a estas perguntas exige uma profunda reflexão sobre o caminho que percorremos até aqui, e sobre como devemos definir nossas metas para nos adequarmos à nova realidade imposta pelos desafios da sociedade moderna. Tentaremos abordar algumas dessas questões nas páginas seguintes, com o intuito de estimular o debate e de exercitar nossa mente. Como acontece com qualquer candidato a futurólogo de começo de século, no entanto, algumas de nossas previsões podem se confirmar, outras podem nos desmentir completamente — só o futuro dirá. Não devemos nos esquecer, todavia, que o futuro somos nós que construímos, com nosso esforço e dedicação, e —porque não? — também com nossos sonhos.

Um século de engenharia química

As origens da engenharia química moderna estão ligadas aos principais laboratórios de química alemães. As universidades de Göttingen, Giessen, e Heidelberg educaram uma geração de químicos que aplicaram ciência básica fundamental à produção em grande escala de processos de interesse da química industrial [i]. A abordagem alemã considerava a combinação de conhecimento de química com engenharia mecânica. Alguns desses químicos “industriais” migraram para os Estados Unidos, onde participaram da construção de novos laboratórios e ajudaram a formar futuros “engenheiros industriais”.

O termo “Engenharia Química” é creditado ao inglês George Davis, um ex-inspetor de fábrica de álcalis, que em 1887 proferiu um importante conjunto de palestras, posteriormente publicadas, sobre a operação das instalações químicas modernas da época. Nestes pouco mais de cem anos, a engenharia química evoluiu de uma disciplina estritamente aplicada para dar sua contribuição nas mais avançadas fronteiras da ciência dos últimos anos.

Mas, afinal, o que é um engenheiro químico? Os estudantes da Universidade de Minnesota [ii] oferecem-nos as seguintes opções:

- (a) Um *engenheiro* que fabrica produtos químicos
- (b) Um *químico* que trabalha em uma fábrica, ou

(c) Um glorioso *encanador*?

Esta questão realmente intrigante tem como resposta, como eles ressalvam, a letra (d) , ou seja, nenhuma das alternativas acima! O termo “engenheiro químico” pode realmente não ser muito apropriado e deixar em dúvida os menos esclarecidos e novatos na área. Afinal, então, o que é mesmo um engenheiro químico? Para respondermos em uma única frase, e com certo grau de arrogância, poderíamos dizer que o engenheiro químico é uma espécie de “engenheiro universal”. Por possuir uma sólida formação em matemática, física, mecânica dos fluidos, transferência de calor e de massa, termodinâmica e cinética química e, sobretudo, devido à sua forte interação com os processos oriundos da aplicação da química, está apto a abordar um número mais diversificado de problemas do que os engenheiros mecânicos, civis e eletricitistas. Estes problemas certamente vão muito além do que a palavra “químico” sugere no termo “engenheiro químico”. Em suma, o engenheiro químico é um profissional capaz de abordar e resolver problemas de engenharia onde aspectos físicos, químicos, e físico-químicos são relevantes tanto em termos de processo quanto de produto. Muito amplo? Bem, é por isso que somos “universais”.

Conquistas da engenharia química

Recentemente, o *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE), compilou uma lista das “**10 Maiores Conquistas da Engenharia Química**” deste século. Entre os *produtos* envolvidos nesta lista, alguns se destacam por caracterizar o que entendemos como sociedade moderna, e constituem verdadeiros triunfos da humanidade:

1. Isótopos radioativos

Isótopos não servem apenas para fazer bombas atômicas; sua separação e desintegração permitem que sejam utilizados amplamente na medicina para monitorar o funcionamento do organismo, identificar artérias e veias bloqueadas, identificar mecanismos metabólicos; são ainda utilizados por arqueólogos para datação de artefatos, entre outras aplicações.

2. Plásticos

Embora a química dos polímeros tenha se desenvolvido muito no Século 19, foi somente com a contribuição da engenharia química do Século 20 que se viabilizou a produção em massa e econômica de plásticos. Desde a baquelite (em 1908) até os plásticos modernos, foi essencial o desenvolvimento de operações unitárias para a produção de plásticos em larga escala.

3. Artefatos biomédicos

O conceito de operações unitárias foi também decisivo para o sucesso de órgãos artificiais (rins, corações, etc) e implantes, além do desenvolvimento de artefatos terapêuticos e de diagnóstico. Conquistas recentes incluem os “*patches*” e drogas microencapsuladas para administração controlada de princípios ativos.

4. Medicamentos

Desde a descoberta da penicilina, em 1929, foi essencial a participação da engenharia química no aumento do rendimento para a produção em massa de antibióticos e outros medicamentos a custos relativamente baixos. É indispensável a participação do engenheiro químico na produção de fármacos em escala comercial.

5. Fibras sintéticas

A utilização de fibras sintéticas na produção de colchões, travesseiros, meias de nylon, coletes a prova de balas, e uma infinidade de outros artigos de uso cotidiano, permitiu a substituição do algodão e da lã, tornando a nossa vida mais confortável e atraente.

6. Gases puros

A liquefação do ar a 160°C abaixo de zero permite a separação de seus componentes. O nitrogênio é utilizado na recuperação de petróleo, congelamento de alimentos, produção de semicondutores e como gás inerte em várias reações; o oxigênio é utilizado na fabricação do aço, na soldagem de metais, e em aparelhos de respiração artificial, entre outras aplicações.

7. Conversores catalíticos

O desenvolvimento de conversores catalíticos automotivos e o aumento da octanagem da gasolina são dois bons exemplos de como os engenheiros químicos contribuem para a redução dos problemas ambientais gerados pela vida moderna. Através de técnicas apropriadas, a redução da poluição é também alcançada com a substituição de compostos naturais por compostos sintéticos, através de processamento mais eficiente e tecnologias de reciclagem.

8. Fertilizantes

A produção de fertilizantes é uma das grandes conquistas da humanidade. A necessidade de se fixar o nitrogênio do ar e da incorporação do potássio e do fósforo na composição de produtos adequados ao solo permitiu um aumento sem precedentes na produção de alimentos, sem o qual o crescimento populacional humano teria sido freado pela escassez ou insuficiência de alimentos.

9. Produtos petroquímicos

O desenvolvimento do craqueamento catalítico, que permite a quebra de compostos oriundos do petróleo em moléculas básicas viabilizou a produção em larga escala de gasolina, óleo diesel, óleos lubrificantes, borracha e fibras sintéticas. A tecnologia petroquímica transformou a vida moderna e permitiram a fabricação a baixo custo de inúmeros bens duráveis e de consumo.

10. Borracha sintética

A produção de borracha sintética, bem como a de combustíveis líquidos, constituiu-se em um fator de fundamental importância na Segunda Guerra Mundial. O destino da

humanidade poderia ter tido outro desfecho não fosse pela capacidade de se produzir pneus e outros artefatos de borracha. Nossos meios de transporte dependem muito das borrachas sintéticas, sejam automóveis, ônibus ou caminhões, ou mesmo aviões, bicicletas e patins, sem contar o tênis nosso de cada dia.

Do século da física e da química para o século da biologia

O surpreendente desenvolvimento científico e tecnológico do Século 20 torna difícil caracterizá-lo e particularizá-lo com respeito a qualquer ramo da ciência. Não há dúvida, porém, que a física viveu seus momentos de glória com a consolidação da teoria quântica, da relatividade geral, e com as perspectivas abertas pelas possibilidades de unificação (eletrodinâmica quântica, teoria das supercordas [\[iii\]](#), etc.) e abordagens mais holísticas como as teorias dos sistemas complexos [\[iv\]](#).

No Século 20 usamos e abusamos do carvão, do petróleo, e de outras fontes não renováveis de energia. O Século 21 deverá ser o último a assistir a queima indiscriminada de combustíveis fósseis, talvez à exceção do gás natural. Será o século das tecnologias limpas. Neste novo início de milênio serão utilizadas intensamente formas de energia não poluentes como a energia solar (direta, biomassa, eólica, etc) e o hidrogênio, que já passa a ser cuidadosamente recuperado nas refinarias de petróleo [\[v\]](#). Como combustível, o hidrogênio deve tornar a dependência do petróleo obsoleta; ironicamente, o futuro do petróleo como combustível é cada vez mais dependente do hidrogênio, na medida em que se precisa processar matérias primas residuais, mais pesadas.

Nas próximas décadas veremos avanços enormes da biologia, com importantes reflexos na engenharia. De forma simplificada, pode-se dizer que o Século 20 foi o da tecnologia (sobretudo da física e da química) e o que o próximo século deverá ser mais influenciado pelos avanços da genética e da biotecnologia. Na interface do novo milênio está um fenômeno revolucionário chamado tecnologia da informação, que permeará todas as atividades humanas, conectando através de uma grande rede quase tudo que se possa imaginar, desde computadores até os mais simples equipamentos domésticos e de uso pessoal. As comunidades virtuais deverão reformular o conceito de equipes de trabalho e até mesmo de nação, reduzindo a importância das fronteiras geográficas. A comunidade de engenharia química estará unida por laços de interesse comum, a exemplo do que já acontece com a “*AICHE On-Line Community*” [\[vi\]](#), que permite o intercâmbio de idéias, acesso a recursos da rede, oportunidades de trabalho, e planejamento de carreira; ou com a “*Ei Engineering Village*” [\[vii\]](#), um serviço internet projetado para facilitar o acesso à informação técnica e profissional, e assim atender a qualquer profissional independentemente de onde ele reside ou trabalha.

Informação nos meios de comunicação

A *World Wide Web* foi talvez o acontecimento tecnológico mais marcante dos últimos anos, influenciando literalmente todas as atividades humanas. O comércio eletrônico (*e-commerce*) invade todos os ramos tradicionais; o mercado do *e-business*, especialmente o *business to business (B2B)*, ficará cada vez mais importante para as companhias químicas. As vendas de produtos petroquímicos por canais eletrônicos já ultrapassa a casa dos 10 bilhões de dólares anuais [\[viii\]](#). O mercado farmacêutico, por exemplo, que movimenta

cerca de 16 bilhões de dólares por ano, já dispõe de *e-pharmacies* que diagnosticam via internet e enviam ao cliente a receita encomendada. Por isso, inclusive, tem sido alvo dos agentes de regulamentação. Com o tempo, os padrões de comércio deverão se firmar, fortalecendo os negócios *online* [ix]. Também o monitoramento e controle de processos que hoje já se faz pela Web [x] será feito de qualquer parte, inclusive democratizando a informação, disponibilizando dados sobre níveis de poluição, áreas de risco, etc.

Informação genômica

No início de 2001, assistimos à divulgação do primeiro “draft” do Projeto Genoma Humano [xi], [xii], um marco na História da Humanidade. O sequenciamento dos genes das estruturas de DNA (ácido desoxirribonucléico) está abrindo caminho para o domínio da síntese de novas proteínas, e deverá permitir a cura de muitas doenças. À informação tradicional juntar-se-á a informação genômica, que abrirá impensáveis possibilidades para a realização humana. O domínio do código genético não é apenas uma conquista da biologia moderna. As inúmeras técnicas analíticas e instrumentais assim como os vários processos de separação e purificação envolvidos são fruto do trabalho de químicos analíticos, químicos orgânicos, engenheiros químicos e profissionais de outras áreas. Os novos processos enzimáticos/metabólicos, de produção de proteínas, tecidos, órgãos, e medicamentos, são algumas das áreas onde o engenheiro químico poderá ter papel de grande importância.

As novas tendências e os novos desafios

AS TENDÊNCIAS NA INDÚSTRIA

Em 1995, algumas das entidades mais influentes das áreas de química e engenharia química dos Estados Unidos [2], reuniram-se para elaborar um grande estudo que resultou no influente relatório “Technology Vision 2020: The U.S. Chemical Industry” [xiii].

Publicado no final de 1996, descreve o cenário da indústria química americana para os próximos 25 anos e faz recomendações técnicas e políticas para que os Estados Unidos continuem liderando o mercado de produtos químicos nas primeiras décadas deste século. A indústria química americana exportou 367,5 bilhões de dólares em 1995, cerca de 24% do mercado mundial, avaliado em 1,3 trilhão de dólares. Para manter essa liderança, o relatório identificou cinco grandes forças que deverão modelar o século 21 e influenciar os negócios da indústria química:

- O contínuo aumento da globalização dos mercados;
- Demanda da sociedade por maior desempenho ambiental;
- Demanda do mercado financeiro por maior lucratividade e produtividade sobre o capital investido;
- Maior expectativa dos clientes e consumidores; e
- Mudanças nos requisitos da força de trabalho.

Para orientar seus objetivos, o grupo definiu quatro “disciplinas técnicas”: a nova ciência e tecnologia da engenharia química, a tecnologia da cadeia de suprimentos, os sistemas de informação, e manufatura e operação. As recomendações que deveriam guiar os estrategistas industriais e de governo estão resumidas abaixo:

- Melhoria nas operações, com foco no melhor gerenciamento da cadeia de suprimentos (fornecedores, produtores e consumidores);
- Melhoria da eficiência no uso de matérias primas, reutilização de materiais reciclados, e geração e uso da energia;
- Continuidade no papel de liderança (da indústria americana) no balanço entre considerações ambientais e econômicas;
- Comprometimento agressivo com o investimento de longo prazo em pesquisa e desenvolvimento; e
- Equilíbrio entre os setores para os investimentos em tecnologia pela alavancagem das capacidades do governo, universidades, e indústria química como um todo, através de esforços colaborativos em áreas bem definidas de pesquisa e desenvolvimento.

Certamente muitas das recomendações se aplicam a outros países, como no caso do Brasil. Porém, aqui ressentimo-nos de uma política industrial clara, falta de metas de médio e longo prazos, comprometimento industrial, e maior participação do estado.

A FLEXIBILIDADE PROFISSIONAL

Os desafios para o engenheiro químico do Século 21 são muitos: deverá obter uma formação clássica de engenharia química, que inclui uma fundamentação importante em áreas da física, química e matemática, ao mesmo tempo em que expande suas fronteiras para campos interdisciplinares, para o qual deverá também obter formação básica de biologia e bioquímica em alguns casos.

Um bom exemplo de interdisciplinaridade e necessidade de trabalho em grupo é a de um novo processo que está sendo desenvolvido em conjunto pela Dow Chemical (Midland, Michigan) e a Diversa Corp. (San Diego, Califórnia) [xiv]. Na fabricação de epícloridrina a partir de hidróxido de sódio, cloro e 3-cloro-propileno, há um subproduto —o tricloropropano (TCP)— que precisa ser incinerado porque não há nenhum modo econômico de utilizá-lo. O TCP pode ser convertido a cloridrina pela adição de íons hidróxido em substituição ao halogênio, mas esta rota produz menos de 50% de cloridrina, além de propenos clorados. No novo método, uma família de enzimas dehalogenases alcançam 100% de conversão para cloridrina a 50–65°C. A meia-vida das enzimas nestas temperaturas, tipicamente de 6 minutos, foi aumentada para 80 horas através de evolução direta, uma técnica de engenharia genética. Um dos atuais problemas do novo processo é a baixa velocidade de reação, atualmente da ordem de uma molécula de halogênio substituída por íon hidroxila por segundo. Pesquisas cinéticas objetivam multiplicar este valor por dez, a curto prazo. O custo das novas enzimas é baixo (ao redor de R\$ 400,00/kg), comparável

ao das proteases utilizadas em detergentes. Este é um exemplo interessante onde o sucesso do projeto depende da colaboração de engenheiros químicos e profissionais de outras áreas (química, bioquímica, engenharia genética, cinética, avaliação econômica, etc.) Esse tipo de processo ganha importância na medida em que se impõe maior redução nos níveis de emissão provenientes de incineradores. A agência de proteção ambiental americana – EPA, pretende reduzir as emissões totais de dioxina e furanos em incineradores e outras instalações, para 12,2 gramas/ano ao invés dos atuais 40,3 gramas/ano. Individualmente, cada instalação não poderá ultrapassar o limite de 0,20 nanogramas/m³ seco padrão. Isso exige o contínuo investimento em ciência e engenharia.

As aptidões do engenheiro químico moderno

O engenheiro moderno tem que ser empreendedor, o que significa que espera-se que tenha iniciativa, capacidade de liderança e, sobretudo, motivação e entusiasmo. O perfil do engenheiro moderno ideal inclui uma ampla gama de aptidões sociais e profissionais que demonstrem capacidade de negociação, trabalho em grupos interdisciplinares, habilidades para se comunicar bem em qualquer lugar e através de qualquer meio, sobretudo oral e eletrônico. A maior disponibilidade de computadores e sistemas automatizados tornará as instalações mais fáceis de serem operadas e gerenciadas; por outro lado, será requerida uma compreensão técnica mais avançada dos processos, especialmente para problemas novos.

Profissão *versus* carreira

Os estudantes de engenharia química em geral adquirem uma formação muito variada, e são expostos a elementos básicos de engenharia elétrica, civil, mecânica, física, matemática e economia. Muitos concordam que eles estão prontos para quase todo tipo de trabalho técnico, e preparados para o sucesso em muitas carreiras diferentes. São comuns os casos de cargos executivos de grandes empresas serem ocupados por engenheiros químicos. Nestes tempos em que a palavra de ordem é empregabilidade, nada melhor do que apostar em uma profissão que amplie a chance de se atuar em diferentes áreas e funções.

Operações unitárias & processos unitários;

operações unificadas & múltiplos processos

O conceito de “operação unitária”, desde que proposto no final do Século 19, por George Davis, ampliou-se para incorporar operações mais sofisticadas. Inicialmente as operações unitárias foram formuladas sobre bases empíricas. Em 1915, Arthur D. Little propôs o conceito no Massachusetts Institute of Technology (MIT), afirmando que qualquer processo químico, qualquer que fosse sua escala de produção, poderia ser reduzido a um conjunto de operações em série, a que chamou operações unitárias. Tais operações envolviam: pulverização, tinturaria, torrefação, cristalização, filtração, evaporação, eletrólise, etc. Vemos, portanto, que essas “operações” muitas vezes envolvem verdadeiros “processos unitários”, como é o caso da eletrólise ou tinturaria.

O conceito de operações unitárias evoluiu a partir do maior conhecimento dos fenômenos de transferência. Assim, operações como absorção, destilação, extração, etc, têm em comum muitos aspectos, podendo ser tratadas genericamente como operações de

transferência de massa. O reconhecimento da “unificação” de algumas operações deu-se também com os processos. Em alguns processos químicos modernos, a idéia de serialização foi substituída por simultaneidade: surgiram assim os reatores com membranas, a destilação extrativa/reativa, entre outros, que congregam várias etapas ou vários processos em um único equipamento.

Deveremos ver um número cada vez maior de processos integrados, onde as operações e processos “unitários” estarão fundindo-se, aproveitando-se de maneira mais eficiente os gradientes internos existentes/gerados no processo como um todo.

Mudando o foco do processo para o produto

Ao longo de sua história, a engenharia química foi devota de métodos e técnicas que desenvolveram e aprimoraram os processos químicos, otimizando-os e tornando-os competitivos. Com o crescente desenvolvimento da ciência dos materiais e das estruturas moleculares, criaram-se pela primeira vez oportunidades concretas de se projetar produtos para necessidades específicas. Produtos químicos e da indústria de alimentos tais como sorvetes, margarinas, pastas de dente, cremes e loções são bons exemplos de produtos onde a microestrutura tem um papel importante na definição do produto final. Mais do que uma boa qualidade do produto, queremos agora trabalhar sobre o desempenho do mesmo, em propriedades que satisfaçam certos critérios a fim de atender certas características que farão do produto, por sua própria natureza, um item competitivo no mercado. Como resultado de estudos a nível atômico e molecular (Nanotecnologia), uma nova classe de materiais deve emergir para aplicações em tecnologia de sensores (de resposta ultra-rápida), optoeletrônicos, fotovoltaicos (fotossíntese artificial), eletrônicos (tunelamento de um único elétron) e catálise [\[xv\]](#).

O homem aplica os princípios da engenharia química há milhares de anos. Muitas atividades humanas antigas tais como fabricação de vinho, pão, sabão, sem contar as façanhas dos alquimistas, envolvem aplicações de engenharia química. Como profissão moderna, no entanto, a engenharia química só se consolidou a partir da Segunda Guerra Mundial, com a sistematização dos conhecimentos das operações comuns dos diversos processos (as operações unitárias) e o desenvolvimento adequado e unificado da mecânica dos fluidos, da transferência de calor e de massa aplicados à engenharia (os fenômenos de transferência ou fenômenos de transporte).

Dentro da engenharia química “tradicional” deverá haver maior ênfase na engenharia de produto, sem obviamente se descuidar da engenharia de processos. Do ponto de vista acadêmico, talvez o grande desafio a ser vencido seja integrar estes dois aspectos (produto e processo) no corpo das disciplinas atuais, e aprofundar as inter-relações entre as próprias disciplinas entre si. Para citar um exemplo, um dos grandes desafios dos pesquisadores da termodinâmica atual é estender o domínio dos atuais modelos a moléculas complexas de peso molecular elevado (>100) como polímeros sintéticos, proteínas, etc.

As “novas” vias da engenharia pós-química

Na maioria dos casos, estas novas vias ou especializações da engenharia moderna (pós-química, no sentido de mais abrangente do que a engenharia química) devem ser vistas

mais como campos de atuação do que propriamente profissões emergentes. Ainda sob este aspecto, o título de engenheiro químico mais soma do que divide quando se trata de buscar novas alternativas de trabalho ou um novo emprego. Esta visão parece confluyente com o pensamento atual e necessidade de se modernizar a profissão [xvi]. Profissionais mais específicos tendem também a limitar mais seu campo de atuação. Mesmo áreas recentemente revisadas, como a engenharia de bioprocessos, por exemplo [xvii], precisam ser melhor aprofundadas; do contrário, correm o risco de tentar condensar demasiadamente o que já se constitui num conhecimento enciclopédico [xviii]. Outro desses exemplos é da engenharia de tecidos, que também precisa ser devidamente “dissecada” para que possa ser dominada.

Algumas dessas *áreas de especialização* “modernas” compreendem:

Engenharia de alimentos

Em alguns países, como no Brasil, por exemplo, a engenharia de alimentos é uma especialização com direito à “cidadania” própria. Em outros, como nos Estados Unidos, em geral faz parte do currículo de engenharia química, como uma especialização adquirida durante o curso de graduação. O engenheiro de alimentos enfrenta grandes desafios ao lidar com misturas e moléculas complexas, além de preocupar-se com aspectos relativos a outras áreas tais como nutrição e saúde.

Engenharia de materiais (incluindo cerâmica, polímeros, metais, têxteis, semicondutores)

A engenharia de materiais viabiliza a substituição de materiais tais como metais, madeira, vidro e fibras naturais por polímeros sintéticos e materiais compósitos, resultando em produtos mais leves, mais eficientes energeticamente, de melhor desempenho e durabilidade, e maior flexibilidade com relação ao *design* e sua fabricação. Futuros avanços devem advir de uma maior interdisciplinaridade na ciência e engenharia de materiais, sobretudo na área da nanotecnologia.

Engenharia de interfaces

A ciência e os fenômenos de superfície, com o devido suporte de engenharia, serão capazes de definir, controlar e manipular os componentes químicos de um único sítio de adsorção e a partir das interações atômicas e inter e intramoleculares básicas. Muitos fenômenos importantes acontecem em interfaces líquido-líquido, gás-líquido, fluido-sólido, etc, e por serem mal compreendidos podem se beneficiar dos recentes avanços tecnológicos, aprimorando os atuais processos ou desenvolvendo novos processos e produtos.

Engenharia ambiental

A engenharia ambiental encarrega-se não apenas de limpar o que já foi poluído. O papel do engenheiro de processos como projetista de sistemas mais eficientes, reaproveitando matérias primas, obtendo maior seletividade, elimina a poluição e tem impacto imediato sobre o meio ambiente. Futuros avanços nesta área serão cruciais para o desenvolvimento de tecnologias limpas que garantam o desenvolvimento sustentado, permitindo que não comprometam gerações futuras e nossa qualidade de vida.

Engenharia bioquímica/de bioprocessos

Processos bioquímicos são cada vez mais utilizados para a fabricação de produtos químicos. A futura exploração de biocatalisadores deverá ampliar em muito as perspectivas da biotecnologia e o papel do engenheiro químico em processos bioquímicos industriais. O papel da engenharia bioquímica, e mais amplamente da engenharia de bioprocessos é tão importante para a indústria moderna que deverá abrir espaço para o ingresso de novas especializações, a exemplo da engenharia metabólica e da engenharia genômica.

Engenharia biológica/genômica/metabólica (inclui processos celulares, engenharia enzimática, processos fermentativos)

A engenharia metabólica preocupa-se com a produção de compostos via manipulação de metabólitos específicos ou caminhos específicos de transdução de sinais, estratégias para alterar a regulação de vias bioquímicas e processos celulares, através do uso da tecnologia do DNA recombinante (engenharia genética). Recentemente, com o grande aumento de organismos geneticamente sequenciados, e com os avanços da biologia computacional/bioinformática, o genoma considerado como um todo está abrindo caminho para o estudo de células *in silico* e engenharia genômica. Genericamente, podemos considerarmos esse conjunto de assuntos como engenharia biológica, que trata também da engenharia de tecidos.

Engenharia química médica/de tecidos

Os conhecimentos de engenharia química podem ser de grande utilidade na medicina, através, por exemplo, da formulação de modelos matemáticos de sistemas biológicos, incluindo a fisiologia de órgãos tais como olho, pulmão, coração, sistema de microcirculação do corpo, e desenvolvimento de materiais poliméricos biocompatíveis. Esses podem ser utilizados em aparelhos médicos, pesquisas cinéticas, de transporte e termodinâmica de sistemas vivos (engenharia química médica ou biológica) e no desenvolvimento de tecidos e órgãos (engenharia de tecidos).

Engenharia de petróleo e gás natural

A grande abundância de gás natural representa um grande potencial para seu uso mais intensificado como combustível e como matéria prima. A engenharia de gás natural deve ampliar suas atividades para o melhor aproveitamento deste recurso. Embora seja campo de atividade também para outros engenheiros, cabe ao engenheiro químico o desenvolvimento de processos, a exemplo do processo SMDS (Shell Oil Co.'s Middle Distillate Synthesis), para conversão do metano em gasóleo, parafinas e combustíveis líquidos livres de enxofre e nitrogênio.

Engenharia criogênica

Trata de processos que envolvem baixíssimas temperaturas, e exige um profundo conhecimento de termodinâmica e ciência dos materiais. Encontra aplicações em diversas áreas tais como refrigeração, separação de ar (He, N₂, Ar, O₂), produção de para-

hidrogênio, hélio superfluido, supercondutores, etc.

Além dessas, outras áreas de especialização da engenharia podem se beneficiar dos conhecimentos do engenheiro químico, que encontra oportunidades para pesquisa e trabalho em tópicos relacionados à *engenharia eletroquímica*, *engenharia de alta pressão* (supercrítica e outras áreas), *engenharia de segurança de processos e instalações químicas*, especialmente depois dos ataques ocorridos em solo norte-americano, em 11 de setembro de 2001.

Novos processos comerciais serão baseados ainda em processos químicos não convencionais envolvendo plasma, microondas, e fotoquímica. Sensores de análise e controle em tempo real deverão exigir a integração de engenheiros, químicos, físicos e outros profissionais.

AS MUDANÇAS NECESSÁRIAS NO ENSINO

A formação do engenheiro químico não é completa sem que aborde um conjunto mínimo de disciplinas que envolvem operações unitárias (destilação, extração, filtração, absorção, adsorção, entre outros), incluindo aí os reatores (quer eles sejam chamados fermentadores, fornos de cimento, incineradores, etc), simulação, controle e síntese de processos, economia e projeto, além, obviamente, de matemática, química e outras disciplinas básicas e aplicadas. Todavia, no centro do currículo de um bom curso, além de uma respeitável fundamentação matemática, deve estar uma sólida formação em disciplinas básicas: Fenômenos de Transferência, Termodinâmica e Cinética. Estas disciplinas são ainda as que caracterizam a “ciência da engenharia química”, e formam o núcleo de aprendizado sobre o qual se constrói a profissão. Quanto ao futuro, essas disciplinas “clássicas” deverão adequar-se aos novos desafios impostos pelo avanço da ciência e da tecnologia.

Fenômenos de Transferência

Os fenômenos de transferência (ou de transporte), que incluem a mecânica dos fluidos, a transferência de calor e a transferência de massa (não necessariamente ensinados/estudados nesta ordem), ao serem sistematizados contribuíram enormemente para o desenvolvimento da ciência da engenharia química. O livro-texto “*Transport Phenomena*” de Bird, Stewart e Lightfoot (mais conhecido no Brasil como Bird e lá fora como BSL), reconhecendo a unificação dos conceitos de transporte de momentum, calor e massa, representou um marco importante no desenvolvimento da engenharia química nos anos 50 e 60. Modernamente, a utilização intensiva da dinâmica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) tem realizado avanços importantes nos conceitos de mistura e segregação de estruturas fluidas. O grande desafio é integrar a abordagem molecular à descrição macroscópica dos fenômenos à qual estamos acostumados, envolvendo processos dinâmicos com reações químicas complexas acopladas.

Termodinâmica

Para que a termodinâmica possa dar seu apoio a uma engenharia mais orientada para o

produto, ela precisa integrar-se a outras áreas, em particular à transferência de massa. Isto não significa, todavia, que novas teorias tenham que ser inventadas. Com criatividade, imaginação e coragem, velhas teorias podem ser utilizadas com sucesso na descrição de novos problemas. Prausnitz [xix] cita alguns exemplos interessantes, entre eles o projeto de um sistema de administração de hormônios esteróides usando a teoria da solução regular de Hildebrand de 1930 em conjunto com a teoria de Flory–Huggins para soluções poliméricas, e a conhecida lei de difusão de Fick, permitindo assim a avaliação da espessura necessária para que um polímero específico atenda ao fluxo desejado de um determinado esteróide.

Cinética

A cinética (química e bioquímica), baseia-se fundamentalmente em teorias semi-empíricas. Tentativas de se prever *a priori* a velocidade de reações químicas, a partir de informações provenientes unicamente dos reagentes, catalisadores e condições de operação, falham consideravelmente. Há que se trabalhar muito para tornar a cinética mais científica e menos “artística”, apostando-se na modelagem dinâmica molecular e técnicas *ab initio*.

Novas técnicas químicas tais como a química combinatorial, que é uma ferramenta que permite a síntese de uma grande quantidade de compostos a partir de blocos de construção, analisando todas as possíveis combinações definidas por uma dada seqüência de reações, são de importância fundamental para a competitividade da indústria, especialmente a farmacêutica.

Profusão de cursos e material online

A revolução promovida pela *World Wide Web* tem reflexos diretos na educação do engenheiro. É possível encontrar inúmeras opções de cursos à distância (*online*) em diversas áreas como, por exemplo, os cursos oferecidos pelo AIChE em programas de educação continuada (www.aiche.org/education). No Brasil, cabe destacar o pioneirismo da Escola Piloto de Engenharia Química, mantida pelo Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ (www.peq.coppe.ufrj.br/piloto/). Futuras versões promoverão interação à alta velocidade e com suporte de ferramentas de realidade virtual, como já acontece em centros avançados.

O espaço do(a) engenheiro(a) químico(a)

O engenheiro químico ocupa posições de trabalho em vários ramos da economia: fábricas em geral, indústrias farmacêutica, de saúde, de segurança e ambiental, projeto e construção, papel e celulose, processamento de alimentos, produtos petroquímicos, produtos de química fina, polímeros, biotecnologia, entre outras. Além disso, profissionais de engenharia química são freqüentemente solicitados em outros ramos da atividade humana, e ocupam cargos em áreas como educação, direito, editoração, finanças, medicina, e muitas outras onde se requer treinamento técnico especializado.

Embora a engenharia química seja uma profissão que tenha atraído um número bastante elevado de mulheres (nos Estados Unidos elas são atualmente cerca de 33%) em comparação com alguns outros ramos da engenharia, ainda é muito pequeno o número de mulheres que chega ao topo das grandes empresas e mesmo no quadro docente das

universidades mais tradicionais. Com certeza deve haver uma boa correlação com o número de mulheres ocupando cargos importantes de uma maneira geral, mas isso pode ser também devido ao fato de que as mulheres têm sido pouco agressivas nas carreiras que exigem mais as aptidões da engenharia, em carreiras industriais, preferindo em muitos casos os laboratórios de análise, controle de qualidade e de pesquisa. Esse perfil deve mudar significativamente com a ampliação do papel da engenharia química nos estudos e trabalhos interdisciplinares que exigem a participação e competência da engenharia química. Boa notícia, portanto, para as mulheres, com a maior relevância de áreas como engenharia ambiental, engenharia metabólica, engenharia genômica, engenharia biológica, engenharia química médica, etc.

A carreira de engenharia química é sólida, e bastante promissora. Nos Estados Unidos, os salários iniciais anuais médios (engenheiro químico recém-formado), de acordo com o *National Association of Colleges and Employers* (NACE), em pesquisa realizada entre setembro de 1998 e abril de 1999, são:

Graduação (bacharel)	US\$ 47.705,00
Mestrado	US\$ 53.059,00
Doutorado	US\$ 67.223,00

No Brasil, os salários são bem inferiores, mas há que se levar em conta questões regionais, custo vida, pagamento de pensões e outros benefícios diretos e indiretos.

As perspectivas para as próximas gerações

O início de um novo milênio constitui-se em excelente oportunidade para refletirmos sobre nossas conquistas, limitações e desejos. Muitas são as perspectivas que se abrem à nossa frente e a humanidade, por sua natureza, sonha com o avanço da ciência e da tecnologia.

Acredita-se que o conhecimento do código genético, o sequenciamento de DNA de microorganismos e plantas de interesse industrial, permitirá novos caminhos metabólicos, otimizados e eficientes para produção em larga escala de inúmeros novos compostos; pelo menos em tese, o controle do metabolismo (e envelhecimento) celular permitirá que se estenda a vida por muitos anos; deveremos finalmente desvendar alguns dos segredos da mente humana e dos mecanismos de memória, ampliando nossa capacidade para evitar e curar doenças mentais, e mecanismos controlados pelo sistema nervoso; a ciência espacial permitirá a conquista de novas fronteiras (planetas e satélites do sistema solar). O homem sairá ainda mais de seu ambiente cotidiano para ampliar seus objetos de estudo rumo ao mundo do muito grande e do muito pequeno. A diferença de escala dos problemas forçará ao desenvolvimento de novas teorias e/ou adaptação das teorias existentes.

Novas técnicas propiciam boas oportunidades para se revisar processos, antes considerados inviáveis. Na medida em que se pode ampliar econômica e tecnicamente o intervalo das variáveis de processo, novas tecnologias podem substituir com sucesso processos convencionais, produzindo mais, com maior economia e com menor poluição. O abaixamento do custo da alta pressão, por exemplo, pode viabilizar novos processos com

base na aplicação de fluidos supercríticos. A combustão do carvão, segundo estudos do *National Institute of Materials and Chemical Research*, do Japão, pode ser realizada em um reator alimentado com carvão e oxigênio e a combustão (oxidação) é realizada em água supercrítica a 600°C e 30 MPa, gerando apenas CO₂ e mais nenhuma poluição. A Thermal Conversion Corp. (Kent, Washington) trabalha atualmente no desenvolvimento de um processo de reforma de gás natural com ICP (*Induction-Coupled Plasma*) juntamente com a Rentech (Denver, Colorado), combinando a reforma com o clássico processo Fischer-Tropsch para a produção de combustíveis líquidos em áreas remotas ricas em gás natural. [\[xx\]](#)

Os desafios da engenharia do futuro talvez dependam de nossa capacidade para entender e imitar melhor a natureza, de forma a nos permitir a fabricação de materiais “inteligentes”, com características funcionais tais como: 3

- materiais que se contraem como um músculo;
- materiais cuja viscosidade muda quando introduzidos em um campo eletromagnético;
- sistemas que se auto-regeneram (tais como ossos e pele);
- materiais que mudam de cor (devido à mudança de alguma condição físico-química do meio ambiente);
- materiais que podem processar sinais (a exemplo do tecido nervoso).

Para atingir esses propósitos, certamente serão de grande valia os atuais desenvolvimentos que se vêm fazendo nas novas áreas da ciência, entre eles a biologia computacional, a química combinatorial, a informática química e, e a teoria da informação na biologia.

Para “profetizar”, enumeramos abaixo o plano de fundo que deverá orientar a a engenharia química “tradicional” deste novo século.

Tópicos da Agenda do Século 21:

A água deverá ser o produto mais nobre deste século, com custos cada vez maiores.
O hidrogênio, produzido a partir da água e energia solar barata, deverá ser um combustível de ampla aplicação e ainda mais importante como matéria prima.
O metano (CH ₄) e o gás carbônico (CO ₂) deverão ser importantes fontes primárias de carbono.

Considerações finais

As grandes conquistas de um século de engenharia química contribuíram enormemente para moldar e caracterizar a sociedade moderna do Século 20. Profissionais e empresas devem estar preparados para enfrentar as mudanças de cenário provocadas pelos novos desafios do início do novo século: o processo de globalização deve continuar aumentando a passos largos; novos projetos têm que considerar as teses do desenvolvimento sustentado, considerando a preservação dos recursos naturais e do meio ambiente; os agentes e departamentos financeiros das empresas continuarão a explorar o aumento da lucratividade e da produtividade; o fácil acesso à informação e a maior consciência geral aumentarão a expectativa dos clientes e consumidores; finalmente, serão exigidos novos requisitos para o engenheiro. A profissão de engenheiro químico continuará usufruindo das boas oportunidades geradas nas grandes companhias, mas poderá tornar-se também uma profissão liberal, onde o engenheiro químico poderá ter o seu próprio negócio, talvez produzindo em microreatores produtos altamente especializados, ou prestando serviços *online* para indústrias e outras empresas, avaliando processos, simulando, otimizando, supervisionando, gerenciando ou mesmo projetando novos produtos.

Dos novos profissionais será exigido capacidade de trabalho colaborativo, e empreendedorismo. Os novos profissionais liberais e os que seguirão carreira em empresas devem considerar ainda os seguintes aspectos:

Requisitos profissionais:

- Motivação para o trabalho;
- Necessidade simultânea de conhecimentos gerais e especialização;
- Integração em grupos interdisciplinares.

Requisitos pessoais:

- Inter-relações pessoais, comunicação eficiente (oral, eletrônica; idiomas/culturas estrangeiras);
- Educação continuada e desenvolvimento da capacidade de aprendizagem;
- Capacidade de gerenciamento de tempo e vida pessoal.

Haverá espaço para inúmeras novas especializações. Tecnologias a serem exploradas incluem:

- sistemas de reação e separação, incluindo plasma, microondas, fotoquímica, sonoquímica, bioquímica, supercrítica, criogenia, extração e destilação com reação, reatores de membranas;
- softwares para processos e ferramentas de medição em tempo real e simulação 3-D de sistemas dinâmicos reativos.

Novos conceitos devem flexibilizar a fabricação e o gerenciamento de processos; o

desenvolvimento de materiais de mais alto desempenho poderá incluir materiais “inteligentes”, que encontrarão aplicação em novos produtos e novos processos, ajudando a resolver velhos problemas.

Especial atenção deve dada a aspectos relacionados à segurança, à saúde, e à utilização de tecnologias limpas, valorizando matérias primas e reciclando produtos. A água limpa e muito pura tornar-se-á ainda mais preciosa. A captação de forma mais econômica e eficiente de energia solar deverá viabilizar a obtenção de hidrogênio por eletrólise para fins industriais e como fonte alternativa de energia limpa. O metano e o gás carbônico deverão tornar-se no futuro as principais fontes de carbono.

Bibliografia Citada

[1] Trabalho apresentado na Palestra de Abertura do X CONEEQ, *Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Química* (atualizado), realizado em Florianópolis, SC, de 30/01 a 06/02/2000.

[2] American Chemical Society (ACS), American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Chemical Manufacturers Association (CMA), Council for Chemical Research (CCR), Synthetic Organic Chemical Manufacturers Association (SOCMA)

[i] Chen, V. History of Chemical Engineering, <http://www.ceic.unsw.edu.au/chemeng/whatisce.htm>, 14/01/2000.

[ii] University of Minnesota AIChE Student Chapter, The History of Chemical Engineering, http://www.cems.umn.edu/~aiche_ug/history/h_intro.html

[iii] Kaku, Michio, *Hyperspace*, Anchor Book, New York, 1994.

[iv] Lewin, Roger, *Complexidade. A vida no limite do caos*. Rocco, Rio de Janeiro, 1994.

[v] Ondrey, Gerald; D'Aquino, Rita. The hydrogen chase. *Chemical Engineering*, October 1999, p. 30.

[vi] AIChE On-Line Community, <http://www.aiche.org/membership/community.htm>

[vii] Ei Engineering Village, <http://www.ei.org>

[viii] E-commerce in the CPI... Still loading. *Chemical Engineering*, July 1999, p. 26.

[ix] Clinton Intervention Boosts Online Pharmacies. http://chemweb.com/alchem/2000/ecommerce/ec_000114_clinton.html

[x] Porto, L. M.; Ogeda, R. H. A Tecnologia Internet no monitoramento e controle de processos à distância. II Congresso de Engenharia de Processos do Mercosul, ENPROMER'99, 30 Agosto a 02 de Setembro de 1999, Florianópolis, SC.

[xi] International Human Genome Consortium Consortium (IHG). Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409 (15 February 2001), p. 860-921.

[xii] Venter, J. C. *et al.* The sequence of the human genome. *Science*, 291 (16 February 2001), p. 1304-1351.

[xiii] Technology Vision 2020: The U.S. chemical industry.

<http://www.ccrhq.org/vision/>, 13/02/2002.

[xiv] Enzymes convert a waste stream into a useful product. *Chementator. Chemical Engineering*, September 1999.

[xv] Kleintjens, L. A. L. Thermodynamics of organic materials, a challenge for the coming decades. *Fluid Phase Equilibria*, vol. 158–160 (1999), p. 113–121.

[xvi] Zakon, A. A expansão da engenharia química no terceiro milênio. VI Encontro de Educação em Engenharia, Petrópolis, RJ, 23/11 a 01/12/2000.

[xvii] Shuler, M. L.; Kargi, F., *Bioprocess Engineering*, Prentice-Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Englewood Cliffs, NJ, 2nd Edition, 2002.

[xviii] Villadsen, J. Book Review, "Bioprocess engineering"; Michael L. Shuler and Fikret Kargi; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2nd Edition, 2002, In Press, Available online 16 January 2002.

[xix] Prausnitz, J.M. Thermodynamics and the other chemical engineering sciences: old models for new chemical products and processes. *Fluid Phase Equilibria*, vol. 158–160 (1999), p. 95–111.

[xx] TCC Technology, <http://www.thermalconversion.com/technology.htm>, 17/01/2000.