

## IMPLANTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS QUÍMICOS E ÁGUAS SERVIDAS NOS LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA NO CENA/USP

**Glauco Arnold Tavares\* e José Albertino Bendassolli**

Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, CP 96, 13400-970 Piracicaba - SP

Recebido em 3/8/04; aceito em 4/1/05; publicado na web em 13/4/05

ESTABLISHMENT OF A MANAGEMENT PROGRAM FOR CHEMICAL RESIDUES AND WASTE WATER, GENERATED IN LABORATORIES OF THE CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA (CENA/USP). The aim of this work is to establish a program for the treatment of chemical residues and waste waters at the Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), for environmental preservation and training of staff. Five tons of stored residues and the ones currently generated in the laboratories have to be treated. Rational use of water is also part of the program. The traditional purification by distillation has been replaced by purification with ion exchange resins. Lower energy consumption and better water quality were achieved.

Keywords: waste management; laboratories; treatment of residues.

### INTRODUÇÃO

A adoção de estratégias de escopo relacionado à preservação ambiental, observada atualmente nas mais elementares atividades humanas, é resultante de uma evolução da conscientização dos cidadãos e empresas sobre os danos causados por uma verdadeira miríade de atividades, quer seja em processos industriais, quer seja nas residências. Esse avanço se fez notório, sobretudo, nas últimas duas décadas, sendo uma das preocupações principais a questão da geração de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos que, de uma maneira ou outra, têm seu destino final na atmosfera, nos solos e nos corpos d'água, lóticos e lênticos, naturais e artificiais, continentais, costeiros ou oceânicos<sup>1</sup>.

Em relação aos resíduos químicos de um modo geral, as indústrias são as maiores geradoras em termos de volume e periculosidade, onde a maior parcela está concentrada no estado de São Paulo, considerado a região mais industrializada do país<sup>2</sup>. A esse respeito, uma estimativa alarmante da ABETRE (Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos) atesta que apenas 22% dos cerca de 2,9 milhões de t de resíduos industriais perigosos gerados anualmente no país recebem tratamento adequado<sup>3</sup>.

É também verossímil que a geração de resíduos não é exclusividade das indústrias, uma vez que em laboratórios de universidades, escolas e institutos de pesquisa também são gerados resíduos de elevada diversidade e volume reduzido, mas que podem representar 1% do total de resíduos perigosos produzidos em um país desenvolvido<sup>4</sup>. Essa constatação tem levado a efeito que a questão do gerenciamento de resíduos químicos, frutos de atividades de ensino e pesquisa, seja um tema de pesquisas e discussões que vem cada vez mais ocupando espaço no meio acadêmico brasileiro, motivado também pelo importante papel que as instituições de ensino e pesquisa exercem na formação de recursos humanos acostumados às práticas de gestão ambiental<sup>5-11</sup>.

Na esteira dessa necessidade, vários trabalhos vêm sendo realizados no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) envolvendo desde o desenvolvimento de métodos analíticos mais limpos, até ações que visam a identificação, o tratamento ou reaproveitamento de resíduos químicos<sup>6,12-17</sup>. A partir de 2000, contando

com o fundamental apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por intermédio do programa de infra-estrutura para tratamento de resíduos químicos (INFRA V), foi alavancada a implantação de um amplo Programa de Gerenciamento de Resíduos Químicos na Instituição (PGRQ-CENA/USP). O mesmo abrange a adoção de práticas corretas de gestão, a realização de inventários dos resíduos ativos e passivos, o tratamento e/ou reaproveitamento de resíduos líquidos, sólidos e gasosos, e o treinamento e formação de pessoal.

Considerando também que a racionalização no uso de água e energia na Instituição deve ser observada concomitantemente à implementação de um programa de gerenciamento de resíduos, outra vertente apresentada foi a da substituição do uso de destiladores, para a purificação de água para uso em análises químicas e experimentos em casa de vegetação, pela desionização em resinas de troca iônica, através de um redimensionamento e adequações no sistema proposto por Bendassolli e colaboradores<sup>18</sup>.

O intuito do presente trabalho é enfocar detalhadamente as principais etapas da implementação do PGRQ-CENA/USP, servindo de subsídio para que outras unidades enveredem pelo mesmo caminho, o que é necessário e urgente, dando ênfase também à questão financeira, a qual costuma ser a mola propulsora das mais importantes decisões.

### DESENVOLVIMENTO

#### Práticas de gerenciamento

Na adoção de um Programa de Gerenciamento de Resíduos (PGR), seja em uma empresa ou universidade, várias ações devem ser realizadas simultaneamente, de modo a tornar a atividade gerenciadora possível e eficaz. Primeiramente, é importante que, quando da sua implantação, um programa de gerenciamento contemple dois tipos de resíduos: o ativo, que é fruto das atividades rotineiras da unidade geradora e principal alvo de um programa de gerenciamento, e o passivo, que corresponde ao resíduo estocado, geralmente não caracterizado, aguardando a destinação final adequada. Ressalta-se, no entanto, que a maioria das universidades não dispõe do passivo, o que facilita o estabelecimento de um programa de gerenciamento, mas, por outro lado, mostra o descaso

\*e-mail: gtavares@cena.usp.br

com que o assunto vem sendo tratado até os dias atuais<sup>5</sup>. Ainda segundo o mesmo autor<sup>5</sup>, no caso de uma universidade, que realiza ensino e pesquisa, deve-se dividir o PGR em duas etapas, enfocando primeiramente os resíduos (ativos) das atividades de ensino (aulas práticas de laboratório), uma vez que esses são mais facilmente inventariados, caracterizados e gerenciados. Após isso, o PGR pode ser expandido para os laboratórios de pesquisa, onde há uma maior variação na natureza e quantidade dos resíduos gerados.

Desse modo, uma das primeiras etapas desenvolvidas esteve relacionada à caracterização do passivo armazenado na Instituição, onde havia resíduos estocados há mais de 30 anos. Para isso, os volumes de procedência conhecida foram armazenados em bombonas de polietileno com capacidade entre 50 e 200 L, enquanto que cerca de 600 frascos de até 1 L de capacidade, sem rotulagem adequada, foram identificados individualmente, seguindo alguns dos procedimentos qualitativos preconizados por Jardim<sup>5</sup>. Uma ampla diversidade de resíduos foi inventariada, materializada por aproximadamente 71% de soluções ácidas e 29% de compostos alcalinos. Destacam-se nessa caracterização a elevada quantidade de frascos contendo substâncias redutoras (283), halogênios (206) e líquidos inflamáveis (159). Ressalta-se ainda que essa caracterização preliminar serviu para elencar os volumes que seriam enviados ao Laboratório de Tratamento de Resíduos (LTR-CENA/USP), sendo que os demais foram enviados para incineração, após a obtenção do Certificado de Aprovação para Destinação de Resíduos Industriais.

Paralelamente ao conhecimento detalhado do passivo, também foi inventariado o ativo da Instituição, contando com o auxílio dos funcionários dos laboratórios participantes do PGR, permitindo identificar alguns resíduos que mereceriam atenção especial imediata, para os quais dever-se-iam estabelecer métodos de tratamento e/ou reaproveitamento. Enquadraram-se nessa listagem, dentre outros, soluções residuais contendo bromo, estanho, cromo, selênio, prata e fenol, resíduos sólidos, como o óxido de cobre, bem como resíduos gasosos. A existência de uma extensa variedade de resíduos químicos gerados obrigou a adoção de ações que mitigassem, num primeiro instante, os problemas inerentes àqueles de maior volume ou periculosidade. Em termos de volume, é importante frisar que o Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP é o principal gerador, onde são produzidos resíduos de  $\text{NH}_3\text{aq}$  (150.000 L  $\text{ano}^{-1}$ ),  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (50.000 L  $\text{ano}^{-1}$ ), soluções básicas (50.000 L  $\text{ano}^{-1}$ ), soluções ácidas (1.500 L  $\text{ano}^{-1}$ ),  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (12.000 L  $\text{ano}^{-1}$ ) e  $\text{SO}_2\text{aq}$  (5.000 L  $\text{ano}^{-1}$ ). Essa particularidade deriva das características deste laboratório, que acaba por gerar volume elevado de resíduos em virtude de realizar a produção de compostos enriquecidos nos isótopos  $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$ , através da troca iônica em sistema de cascata. Entretanto, esses volumes são reaproveitados quase em sua totalidade no próprio processo produtivo<sup>6</sup>.

A principal regra a ser adotada para o gerenciamento dos resíduos é a da responsabilidade objetiva, isto é, quem gera o resíduo torna-se responsável pelo mesmo<sup>19</sup>. A Lei 6938, de 31 de agosto de 1981, mais conhecida como Política Nacional do Meio Ambiente, estabelece que a responsabilidade objetiva dispensa a prova de culpa no caso de um possível dano ao ambiente, ou seja, para que um potencial poluidor seja penalizado, basta que se prove um nexo de causa e efeito entre a atividade desenvolvida por uma organização e um dano ambiental. Em resumo, significa que um resíduo poluidor, ainda que esteja sendo emitido em concentrações que respeitem os limites estabelecidos pela legislação vigente, poderá causar um dano ambiental, e sujeitar o causador do dano ao pagamento de indenização<sup>19</sup>.

A implantação do PGRQ-CENA/USP procura obedecer uma escala de prioridades ou hierarquia, definida na Figura 1, que esti-

mule, a princípio, a prevenção da geração de resíduos, isto é, deve-se evitar, sempre que possível, a geração. Isso pode ser obtido pela modificação de um processo qualquer (ou método analítico), substituição de matérias-primas ou insumos. Para se determinar mercúrio em solos ou sedimentos, por ex., freqüentemente realiza-se a digestão ácida das amostras de interesse e utiliza-se a clássica metodologia da geração de vapor frio, na qual  $\text{Hg}^0$  é gerado na reação entre o mercúrio em solução e cloreto estano<sup>20</sup>. Esse método resulta em uma solução residual ácida contendo elevada concentração em estanho, além das sobras da solução contendo a amostra digerida. Como alternativa a esse método, Magalhães e colaboradores<sup>15</sup> desenvolveram metodologia na qual pequenas alíquotas (2 a 60 mg) dessas matrizes sofrem pirólise (1000 °C) em sistema de quartzo aquecido com lâmpadas infravermelho (15V e 150 watts) e têm suas concentrações em mercúrio determinadas através da técnica de espectrometria de absorção atômica. Essa última metodologia, além de não gerar resíduos perigosos, dispensa também custos com reagentes.

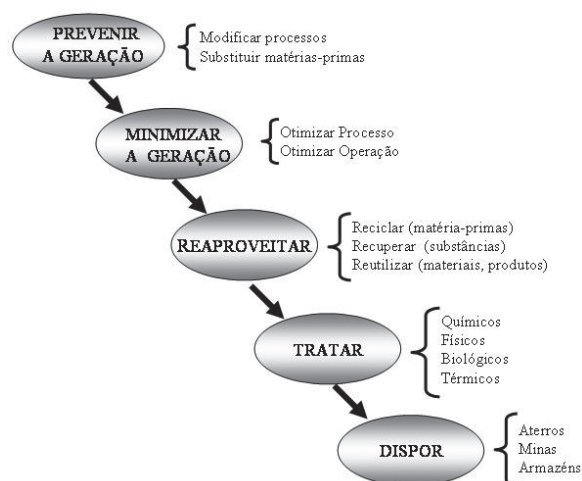


Figura 1. Escala de prioridades a ser seguida quando da implantação de um PGR

Quando não é possível prevenir a geração de resíduos, muitas vezes é possível minimizá-la. Exemplo disso é a substituição do uso de buretas de 20 e 50 mL de capacidade nas práticas de laboratório (principalmente em atividades de ensino) por técnicas em microescala, que proporcionam resultados com semelhantes exatidão e precisão, apresentando ainda vantagens de consumir menos reagente e gerar menos resíduos<sup>21</sup>. Outros exemplos são os métodos de análise por injeção em fluxo<sup>13</sup> e a elaboração de cadeias de experimentos em aulas de graduação, de modo que os produtos de uma prática sirvam de reagente noutra, sucessivamente<sup>22</sup>.

Na seqüência, deve-se estimular o reaproveitamento do resíduo inevitavelmente gerado, o que pode se dar através da reciclagem, recuperação ou reutilização. Reciclar é refazer o ciclo por completo, voltar à origem, ou seja, é quando determinado material retorna como matéria-prima ao seu processo produtivo. Recuperar é retirar do resíduo um componente energético de interesse, seja por questões ambientais, financeiras ou ambas concomitantemente. Já a reutilização ou reuso é quando um resíduo é utilizado, tal qual foi gerado, em um processo qualquer, dentro ou fora da unidade geradora.

O tratamento é a penúltima prática a ser realizada, definida na escala de prioridades, podendo ser químico, físico, biológico ou térmico. Enquanto o tratamento biológico é mais recomendado para grandes volumes de resíduos, principalmente orgânicos, o que não é o caso dos resíduos de laboratórios, e o tratamento térmico

(frequentemente a incineração) é considerado dispendioso, os métodos físicos e químicos são os mais promissores. Por fim, deve-se dispor adequadamente os resíduos, o que pode ser realizado em aterros ou outros locais apropriados. É interessante notar, entretanto, que essa hierarquia é, na maioria das vezes, observada no sentido inverso, o que geralmente inviabiliza a atividade gerenciadora.

A segregação dos resíduos em diferentes correntes ou classes de compatibilidade é outra prática importante na hierarquia do gerenciamento, tornando exequível a realização das etapas definidas na escala de prioridades. Via de regra, a definição da quantidade e natureza das correntes se dá em função das características dos resíduos da unidade. No estabelecimento das diretrizes do PGRQ-CENA/USP, decidiu-se dividir os resíduos gerados em 11 classes, nominadas de A a K. Na Tabela 1 são definidas essas classes e exemplificados alguns dos resíduos gerados na instituição que integram cada grupo.

Nos laboratórios da Instituição, quando da geração dos resíduos, prioriza-se a utilização de recipientes para armazenamento de capacidade volumétrica reduzida (até 4 L). Desse modo, visando ainda a padronização do armazenamento e transporte dos volumes gerados, respeitando-se as necessárias condições de segurança em Química, adquiriram-se recipientes especiais, produzidos em polietileno de baixa densidade, resistentes ao choque físico, no interior dos quais são acondicionados frascos de vidro devidamente rotulados, contendo os resíduos químicos gerados. A correta identificação dos resíduos gerados também é fundamental para que esses possam ser geridos, razão pela qual foi elaborado um rótulo padrão, apresentado na Figura 2, no qual as principais informações estão relacionadas ao componente principal do material residual, que pode ser aquele mais tóxico e/ou presente em maior concentração. Outra importante ciência diz respeito à concentração aproximada do resíduo gerado, embora qualquer dado adicional também deva ser considerado. Normalmente, os PGR de cada Instituição elegem os itens constantes na rotulagem de maneira distinta umas das outras, cada qual pautada nas suas peculiaridades<sup>7-10</sup>.

A estocagem ou o armazenamento temporário dos resíduos gerados, por um período que não deve ser superior a 90 dias<sup>4</sup>, vem

Figura 2. Rótulo padrão elaborado para a identificação dos volumes de resíduos químicos gerados nos laboratórios do CENA/USP

sendo realizada em um depósito para resíduos líquidos e sólidos, ilustrado na Figura 3, alocado nas dependências do CENA. Nesse local, é permitida somente a entrada de membros da equipe responsável pelo PRG, composta por pesquisadores, funcionários e estagiários devidamente treinados.

Algumas ações implementadas merecem igualmente serem destacadas, em virtude de servirem como verdadeiras ferramentas que facilitam o gerenciamento como um todo. A primeira ferramenta está relacionada à evolução da informática, que permite o acesso rápido às informações. Nesse caso, foi elaborada uma página de rede, disponibilizada na intranet e internet (<http://www.cena.usp.br/residuos/index.htm>), onde constam importantes informações sobre o programa de gerenciamento, como os principais preceitos, informações sobre a manipulação de produtos químicos, alguns procedi-

Tabela 1. Segregação dos resíduos gerados nos laboratórios do CENA/USP em correntes ou classes de compatibilidade

Classe	Discriminação	Exemplos de resíduos gerados
A	Mercúrio e resíduos de seus sais inorgânicos	mercúrio em solução, mercúrio metálico, entre outros
B	Solventes orgânicos e soluções de substâncias orgânicas que não contenham halogênios	etanol, acetona, hexano, benzeno, tolueno entre outros
C	Resíduos de sais metálicos regeneráveis	prata, ouro, platina, cobre, ósmio, entre outros
D	Solventes orgânicos e soluções orgânicas que contenham halogênios	diclorometano, clorofórmio, tetracloreto de carbono, entre outros
E	Resíduos inorgânicos tóxicos contendo metais pesados	cádmio, chumbo, níquel, cromo, zinco, arsênio, entre outros
F	Resíduos sólidos e semi-sólidos, acondicionados em sacos plásticos ou barricas	luvas, ponteiros, papel contaminado, géis, entre outros
G	Soluções salinas (pH 6 – 8)	resíduos provenientes de titulações, soluções nutritivas, entre outros
H	Soluções que contenham cianetos, nitrilas ou geradoras de cianetos	acetonitrila, soluções contendo cianeto de potássio, entre outros
I	Compostos explosivos ou combustíveis tóxicos	lítio metálico, sódio metálico, metanol, entre outros
J	Resíduos inorgânicos tóxicos não contendo metais pesados	amônia aquosa, dióxido de enxofre aquoso, entre outros
K	Outros compostos	tintas, resinas, óleo de bomba de vácuo; herbicidas, entre outros



**Figura 3.** Depósito temporário para armazenamento de resíduos líquidos e sólidos no CENA/USP

mentos simples de tratamento de resíduos, dados sobre uso adequado de EPI's e EPC's, entre outros. Entretanto, destaca-se a elaboração de um campo para envio de ordem de serviço, que permite ao usuário (docente, discente ou servidor de algum laboratório da Instituição) solicitar a retirada de um ou mais volumes de resíduos de seus laboratórios, ou qualquer outra informação pertinente. O desenvolvimento de um software para o controle de estoque dos volumes de resíduos armazenados no depósito, que possibilita a fiel identificação da disposição temporária desses materiais, bem como a elaboração de relatórios das atividades de entrada ou saída de resíduos num dado período, merece igual destaque.

O treinamento de pessoal técnico também pode ser considerado como outra ferramenta decisiva de gestão. Considerando que no CENA/USP existem 19 laboratórios constituindo três divisões científicas, foi designado um técnico de cada laboratório para participar de reuniões periódicas com a equipe de implantação, fazendo deles agentes multiplicadores do PGRQ-CENA/USP. Essa participação e contribuição são bastante relevantes, pois são esses multiplicadores que terão contato diário com os problemas referentes à geração de resíduos nos seus laboratórios, facilitando a adoção das medidas necessárias para a gestão correta.

Não se pode deixar de ressaltar, ainda, que a ampla divulgação interna e externa do PGR também deve ser estimulada, o que vem sendo realizado através de informativos, da participação em eventos científicos e de divulgação e da publicação de trabalhos e textos sobre a temática em revistas de circulação e páginas da internet. Merece menção também o oferecimento na Instituição de um curso apostilado (CD rom) intitulado "Curso de Segurança em Química e Gerenciamento de Resíduos e Águas Servidas", ministrado recentemente para técnicos e docentes de universidades circunvizinhas (UNIMEP, ESALQ/USP, FOP/UNICAMP e EEP). A divulgação vem atingindo também alunos de escolas de 2º grau de Piracicaba que realizam aulas práticas de laboratório, sendo realizado trabalho de conscientização no qual foram proferidas palestras e agendadas visitas na Instituição para a demonstração de atividades práticas de gerenciamento, tendo sido inclusive elaborado um vídeo (VHS, vídeo/CD e DVD) com duração de 17 min sobre o PGRQ-CENA/USP.

Entende-se que esse conjunto de ações, embora não representem a completa solução para todos os males inerentes à geração de resíduos químicos em laboratórios de instituições de ensino e pesquisa, podem, a médio e longo prazo, contribuir decisivamente para

uma significativa mudança no cenário atual, no qual a responsabilidade objetiva figura muito mais como teoria do que sendo colocada realmente em prática.

### Gestão de resíduos líquidos

Similarmente ao verificado na grande maioria dos laboratórios de ensino e pesquisa, no CENA/USP os resíduos líquidos também representam a maior fração dentre os resíduos químicos gerados. Na gestão destes volumes, em alguns casos, a prática da prevenção ou minimização dos resíduos gerados é inviável. Exemplo disso é o verificado no Laboratório de Isótopos Estáveis<sup>6</sup>, onde a capacidade de produção de compostos enriquecidos nos isótopos <sup>15</sup>N e <sup>34</sup>S vem sendo ampliada a cada ano, resultando na conseqüente geração de grande volume de resíduos, que já totalizam 400 mil L anuais. Nesse caso, optou-se por reaproveitar os resíduos gerados, e dentre esses, se destacam:

- soluções aquosas contendo amônia – efluente líquido gerado na linha de produção de <sup>15</sup>N, que é recebido em solução de ácido sulfúrico (reator de fibra de vidro de 2000 L), produzindo-se sulfato de amônio, que será empregado como reagente no mesmo processo produtivo;
- soluções aquosas contendo dióxido de enxofre – efluente líquido gerado na linha de produção de <sup>34</sup>S, que é recebido em solução de peróxido de hidrogênio (reator de 100 L em fibra de vidro), produzindo-se solução diluída de ácido sulfúrico, que pode ser empregada como reagente no processo de recuperação dos resíduos de amônia aquosa gerados durante a produção de <sup>15</sup>N ou mesmo no tratamento de outros volumes e
- soluções aquosas de hidróxido de sódio – efluente líquido gerado na etapa de regeneração das resinas utilizadas para o enriquecimento isotópico através da técnica de cromatografia de troca iônica, que são acondicionadas em reservatório apropriado para posterior correção da concentração da base e reutilização na eluição dos íons NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no processo de separação dos isótopos <sup>14</sup>N e <sup>15</sup>N, ou ainda para o tratamento de outros resíduos.

Há também várias outras soluções residuais sendo geradas em rotina, porém em volume mais reduzido. Uma delas é um resíduo líquido contendo bromo em meio alcalino, nas formas de brometo e hipobromito de lítio, que é gerado em volume aproximado de 50 L ano<sup>-1</sup>, sendo proveniente de uma metodologia empregada na determinação isotópica de nitrogênio<sup>23</sup>. Para recuperar o bromo contido nessa solução residual, foi desenvolvida uma linha especial em vidro, na qual a solução alcalina é acidificada, havendo a liberação do bromo na forma elementar (Br<sub>2</sub>), o qual é arrastado através de um fluxo de N<sub>2</sub> até uma solução absorvedora contendo hidróxido de lítio, na estequiometria desejada para a produção do reagente brometo e hipobromito de lítio, que será empregado em novas determinações isotópicas<sup>24-25</sup>.

Para o tratamento de soluções residuais contendo metais pesados, a precipitação química é o procedimento mais freqüentemente utilizado. Como exemplos, podem ser citados os tratamentos de diversas soluções residuais contendo estanho, mercúrio e cromo, tendo sido adquirido um filtro prensa para agilizar a filtração do material precipitado, a ser disposto como resíduo sólido. Um caso a parte refere-se às soluções residuais contendo prata, geradas em diversos procedimentos analíticos empregados em rotina na Instituição. A recuperação desse metal, de elevado valor agregado, vêm sendo efetivada<sup>26</sup> através de subseqüentes precipitações químicas utilizando cloreto e, posteriormente, hidróxido de sódio, produzindo-se o reagente óxido de prata, que é utilizado em um método de oxidação de S-orgânico a S-sulfato, objetivando a determinação de enxofre em amostras de solo e plantas<sup>27</sup>.

## Gestão de resíduos sólidos e semi-sólidos

Tanto a variedade como a quantidade de resíduos sólidos e semi-sólidos gerados nos laboratórios do CENA podem ser consideradas diminutas se comparadas aos resíduos líquidos. Enquadram-se nessa categoria, entretanto, alguns resíduos a serem evidenciados. O primeiro deles é o óxido de cobre, que é gerado no forno de redução de um analisador elemental de carbono, enxofre e nitrogênio, interfaceado ao espectrômetro de massas (ANCA-SL 20/20 e Finnigam Mat Delta Plus), no qual o cobre metálico utilizado sofre oxidação. Para reciclar o cobre presente nesse resíduo sólido, desenvolveu-se uma linha especial de vácuo, na qual o óxido de cobre é inserido no interior de um forno, à temperatura de 450 °C, na presença de hidrogênio, ocorrendo a redução do óxido de cobre a cobre metálico e a conseqüente formação de água, que é retida em armadilhas criogênicas, sendo o cobre metálico recuperado reaproveitado em novas determinações elementares<sup>28</sup>.

Em simetria ao que ocorre com o cobre, a prata é outro resíduo sólido de elevado valor comercial, sendo gerada no anteriormente citado procedimento de oxidação de S-orgânico a S-sulfato para a determinação de enxofre em amostras de solo e plantas<sup>27</sup>. A recuperação do metal gerado nesse processo é obtida após processo de calcinação à temperatura de 870 °C por 4 h, e posterior reação da prata metálica com ácido nítrico, produzindo-se nitrato de prata em solução, que será posteriormente tratada como resíduo líquido, seguindo o protocolo mencionado anteriormente<sup>26</sup>.

Outro ativo a ser gerido é representado por géis, ponteiras, luvas e papéis contaminados, que vêm sendo armazenados em sacos plásticos e barricas. Há que se ressaltar, ainda, que a preocupação para com a gestão dos resíduos não se restringe apenas àqueles resultantes de análises ou procedimentos, mas também a outros materiais, como lâmpadas, pilhas e baterias. As lâmpadas fluorescentes, que possuem significativa quantidade de mercúrio no seu interior<sup>29</sup>, estão sendo enviadas para reciclagem em uma empresa especializada, enquanto pilhas e baterias vêm sendo recolhidas e deverão ter o mesmo destino.

## Gestão de resíduos gasosos

A questão das emissões gasosas freqüentemente passa despercebida quando da implantação de um PGR, muitas das vezes porque se acaba optando por enfrentar outros desafios mais urgentes. Todavia, é de grande importância controlar as emissões gasosas, uma vez que a poluição atmosférica é tida hoje em dia como um dos maiores problemas ambientais a serem enfrentados pela sociedade moderna. De forma a contribuir para essa prevenção, foram identificados na Instituição os laboratórios onde são realizadas em rotina digestões de amostras, reações químicas ou manipulações de reagentes que liberam vapores, de modo a viabilizar a instalação de lavadores de gases para vapores ácidos e filtros de carvão ativado para vapores orgânicos, acoplados ao sistema de exaustão de capelas onde esses procedimentos são realizados. No caso da lavagem dos gases ácidos, instalou-se um total de oito equipamentos, que comportam 200 L de solução de hidróxido de sódio 0,1%. Outras três unidades instaladas foram para vapores orgânicos, baseadas na adsorção desses compostos em filtro de carvão ativado, que é periodicamente substituído quando da sua saturação. Na Figura 4 é apresentado um dos equipamentos instalados na Instituição.

Ao mesmo tempo, em um processo desenvolvido para síntese de uréia enriquecida no isótopo <sup>15</sup>N, são gerados em rotina cerca de 1,2 kg de ácido sulfídrico, que é um gás extremamente tóxico<sup>16</sup>. Esse gás está sendo tratado através da sua oxidação à sulfato, em meio alcalino, na presença de peróxido de hidrogênio. Uma outra



**Figura 4.** Lavador de gases para vapores ácidos, acoplado à capela instalada no laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do CENA/USP

alternativa seria a sua utilização no tratamento de resíduos contendo metais pesados, através da precipitação química (formação de sulfetos insolúveis).

## Gestão de águas servidas

A água é um recurso natural escasso em diversos países do mundo, razão pela qual esforços devem ser direcionados para que sua utilização ocorra de maneira racional<sup>30-32</sup>. Ao mesmo tempo, o fornecimento de energia também está comprometido em diversos países (como o Brasil), nos quais a implantação de programas de redução no consumo de energia, e também incentivos a estudos referentes a energias alternativas, estão na ordem do dia<sup>33-35</sup>. Esta situação deve então ser considerada quando da implantação de um PGR, também porque um dos seus principais objetivos é prevenir a poluição dos corpos d'água, evitando que estes se tornem ainda mais contaminados, mesmo considerando as estimativas da Unesco<sup>36</sup> (Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura) que dão conta de que 2 milhões de t de rejeitos são lançados diariamente em redes receptoras, podendo contaminar 12.000 km<sup>3</sup> de água, volume que é 50% superior a toda água armazenada em todas as represas até hoje construídas.

Destarte, considerando-se que na maioria dos laboratórios químicos a água de elevada pureza é o solvente mais empregado, e que o processo de purificação até então mais utilizado era a destilação, a qual é dispendiosa em relação ao consumo de água de refrigeração (15 L L<sup>-1</sup> de água produzida) e energia elétrica (0,7 kw L<sup>-1</sup>), optou-se por centralizar a produção de água na Instituição, substituindo a técnica até então empregada pela desionização em colunas contendo resinas de troca iônica. Para isso dimensionou-se um sistema<sup>37</sup> composto de três pares de colunas de acrílico (aniônica e catiônica – separadas), com dimensões de 1800 mm de comprimento e 183, 152 e 100 mm de diâmetro, cuja capacidade de produção aproxima-se de 5 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>. Nesse sistema, para assegurar a purificação microbiológica da água após a purificação química, instalou-se um equipamento de desinfecção UV (Trojan UV MAX) no sistema de produção. O sistema de produção, que vem

suprindo as necessidades da Instituição, fornecendo água de excelente qualidade (condutividade = 0,2 a 1  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ; pH = 6,5 a 7,5) para uso nos laboratórios da Instituição, resultando em economia nos consumos de água e energia, é ilustrado na Figura 5.



**Figura 5.** Central de purificação de água para uso em laboratórios, empregando a técnica de desionização através de resinas de troca iônica, seguida de esterilização UV

## INVESTIMENTO

É necessário transparecer, por fim, que, dentre as inúmeras necessidades intrínsecas à implantação de um PGR em instituições de ensino e pesquisa, como o apoio institucional total e irrestrito dos dirigentes, a disponibilização e treinamento de recursos humanos, dentre outras, uma questão que sempre vem à tona é a financeira. Muito pouco pode ser realizado sem um investimento inicial, principalmente no que tange a solucionar problemas acumulados ano após ano, como é o caso do passivo armazenado. Para que atingisse o atual estágio, o PGRQ-CENA/USP contou com a injeção de recursos de cerca de R\$ 900.000,00, provenientes da FAPESP, PRONEX/FINEP, CNPq, USP, CENA/USP e LIE-CENA/USP.

Porém, deve-se frisar que, além do retorno ambiental, que é imensurável, muitos dos procedimentos desenvolvidos e/ou implementados propiciam consideráveis retornos financeiros, o que em curto prazo compensa o investimento inicial. Para nortear essa afirmação, são apresentados na Tabela 2 os principais resíduos e processos que integram as ações correntes do PGRQ-CENA/USP. Como pode ser observado, tendo como principais parâmetros algumas estimativas anuais de geração e manipulação de resíduos, alguns procedimentos resultam em receitas e outros em despesas. Essa avaliação incluiu tanto os custos fixos, que se referem às

**Tabela 2.** Balanço de custos referente às estimativas de 1 ano de atividades do PGRQ-CENA/USP

Resíduos e Produtos	Quantidade	Procedimentos	Receita ou despesa (R\$) <sup>(1)</sup>
NH <sub>3</sub> aq	200.000 L	reuso na forma de (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> após reação com H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	- 20.530,00
NaOH	50.000 L	reuso na forma de NaOH na etapa de regeneração das resinas de troca iônica	+ 3.300,00
HCl	4.000 L	reuso na forma de HCl na etapa de regeneração das resinas de troca iônica	- 29,00
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	80.000 L	possibilidade de acondicionamento e reuso externo	+ 1.745,00
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	16.000 L	reuso na forma de (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> na produção de compostos enriquecidos <sup>15</sup> N	- 249,00
Solventes <sup>(2)</sup>	300 L	envio para incineração em uma prestadora de serviços	- 1.500,00
Lâmpadas <sup>(3)</sup>	800 unid.	envio para reciclagem em uma prestadora de serviços	- 505,00
Soluções c/ Ag <sup>(4)</sup>	600 L	precipitação na forma de Ag <sub>2</sub> O e reaproveitamento	+ 7.800,00
CuO	10 kg	reciclagem do cobre em linha de vácuo na forma de cobre metálico	+ 22.800,00
SO <sub>2</sub> aq	5.000 L	reuso na forma de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> após reação c/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	- 264,00
Soluções c/ metais <sup>(5)</sup>	1.000 L	tratamento químico (neutralização, precipitação, etc)	- 270,00
Vapores	*	renovação das soluções e carvão ativado dos lavadores de gases	- 100,00
Sólidos <sup>(6)</sup> contaminados	200 kg	envio para incineração em uma prestadora de serviços	- 1.000,00
EPIs	*	aquisição de luvas, máscaras, óculos, protetores auriculares, etc.	- 2.000,00
Solução c/ Br	50 L	recuperação em sistema especial desenvolvido e reaproveitamento	+ 3.200,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	500 g	separação mecânica do óxido residual e reaproveitamento	+ 7.065,00
Água e energia <sup>(7)</sup>	8100 m <sup>3</sup> e 378 MWh	minimização dos desperdícios através de mudança metodológica	+ 84.000,00
<b>Balanço Global</b>			<b>+ 103.463,00</b>

<sup>(1)</sup>valores em reais (1 US\$ = R\$ 3,00) relativos à diferença entre os custos fixos (amortizações de equipamentos, infra-estrutura física, manutenções, mão de obra) e variáveis (reagentes, análises, material de consumo em geral) e o valor comercial do produto; <sup>(2)</sup>hexano, etanol, tolueno, éter de petróleo, etc.; <sup>(3)</sup>lâmpadas fluorescentes típicas contendo Hg; <sup>(4)</sup>resíduos líquidos e sólidos solubilizados; <sup>(5)</sup>soluções contendo Cr, Sn, Hg, entre outros; <sup>(6)</sup> ponteiros, luvas, géis, papel, etc.; <sup>(7)</sup>água de refrigeração desperdiçada nos destiladores e energia elétrica necessária para produção de água destilada; \*n° variável de unidades.

amortizações de equipamentos, infra-estrutura física, manutenções e mão-de-obra, quanto os custos variáveis, representados por reagentes, análises e material de consumo em geral. Assim sendo, denominou-se receita quando a somatória desses custos foi inferior ao valor de mercado do produto a ser reaproveitado, e despesa quando o seu valor comercial não foi excedido. Nota-se na Tabela 2 que, embora algumas atividades demandem despesas elevadas, o balanço global é extremamente positivo, proporcionando uma economia anual superior a R\$ 100.000,00 para a Instituição. Embora a maior parcela desse montante advenha dos procedimentos de gestão de águas servidas e energia, a exclusão desse item na Tabela 2 ainda assim resultaria em um saldo positivo (receita) anual de cerca de R\$ 20.000,00.

## CONCLUSÃO

Os resultados alcançados durante a implementação do PGRQ-CENA/USP permitem concluir que os procedimentos adotados mostram-se perfeitamente viáveis, corroborando para a disseminação das práticas de gestão. Seria precipitada, entretanto, a compreensão de que a problemática da geração de resíduos na Instituição está devidamente equacionada, dentre outras razões, pelo dinamismo das pesquisas e pelas alterações constantes no corpo discente, o que exige o constante treinamento de pessoal e acompanhamento das atividades desenvolvidas. O sucesso de um PGR depende de um engajamento que só pode ser obtido gradualmente, desafio esse que demanda esforços continuados.

Cada exemplo de procedimento de tratamento e/ou reaproveitamento de resíduos apresentado de forma resumida nesse texto pode ser perfeitamente adaptado para a realidade de outras instituições, respeitando-se as particularidades de cada resíduo. Entretanto, deve-se enfatizar que a experiência e o conhecimento das reações químicas, bem como das boas práticas de segurança em Química, são fundamentais para a obtenção dos resultados almejados, razões pelas quais os autores eximem-se de qualquer responsabilidade em caso de eventuais acidentes ocasionados pelo uso indevido das informações.

Finalmente, entende-se que as buscas por alternativas ambientalmente mais harmoniosas, em substituição ao posicionamento incoerente até então adotado pelas universidades com relação à gestão de seus resíduos, é de grande valia em termos educacionais, na formação de recursos humanos acostumados às práticas de gerenciamento ambiental, minimizando a emissão de efluentes e produção de rejeitos, e também econômicos, visto que, no caso do CENA/USP, ainda foi possível a obtenção de uma significativa redução de custos.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido, à direção do CENA/USP pelo apoio institucional e aos funcionários deste Centro, sem a assistência dos quais não seria possível colocar em prática um trabalho dessa natureza.

## REFERÊNCIAS

- Mozeto, A. A.; Jardim, W. F.; *Quim. Nova* **2002**, 25 – supl.1, 7.
- Passos, J. A. L.; Pereira, F. A.; Tomich, S.; *Water Sci. Technol.* **1994**, 29, 105.
- [http://www.abetre.org.br/noticia\\_completa.asp?NOT\\_COD=373](http://www.abetre.org.br/noticia_completa.asp?NOT_COD=373), acessada em Julho 2004.
- Ashbrook, P. C.; Reinhardt, P. A.; *Environ. Sci. Technol.* **1985**, 19, 1150.
- Jardim, W. F.; *Quim. Nova* **1998**, 21, 671.
- Bendassolli, J. A.; Maximo, E.; Tavares, G. A.; Ignato, R. F.; *Quim. Nova*, **2003**, 26, 612.
- Cunha, C. J.; *Quim. Nova* **1998**, 24, 424.
- Amaral, S. T.; Machado, P. F. L.; Peralba, M. C.; Camara, M. R.; Santos, T.; Berleze, A. L.; Falcão, H. L.; Martinelli, M.; Gonçalves, R. S.; Oliveira, E. R.; Brasil, J. L.; Araújo, A.; Borges, A. C. A.; *Quim. Nova* **1998**, 24, 419.
- Alberguini, L. B. A.; Silva, L. C.; Rezende, M. O. O.; *Quim. Nova* **2003**, 26, 291.
- Barbosa, D. P.; Oigman, S. S.; Costa, M. A. S.; *Eng. San. Amb.* **2003**, 8, 114.
- Afonso, J. C.; Noronha, N. A.; Felipe, R. P.; Freidinger, N.; *Quim. Nova* **2003**, 26, 602.
- Bastos, A. E. R.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1995.
- Reis, B. F.; Drug, F. J.; Vieira, J. A.; Guine, M. F.; *J. Braz. Chem. Soc.* **1997**, 8, 523.
- Sartini, R. P.; Zagatto, E. A. G.; Oliveira, C. C.; *J. Chem. Educ.* **2000**, 77, 735.
- Magalhães, C. E. C.; Krug, F. J.; Fostier, A. H.; Berndt, H.; *J. Atom. Abs. Spectrom.* **1997**, 12, 1231.
- Bendassolli, J. A.; *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1988.
- Tuono, V.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1999.
- Bendassolli, J. A.; Trivellin, P. C. O.; Carneiro Jr., F.; *Quim. Nova* **1995**, 19, 195.
- Machado, P. A. L.; *Direito ambiental brasileiro*, Malheiros: São Paulo, 2002.
- Bartlett, J. N.; McNabb, W. B.; *Anal. Chem.* **1947**, 19, 484.
- Singh, M. M.; McGowan, C. B.; Szafran, Z.; Pike, R. M.; *J. Chem. Educ.* **2000**, 77, 625.
- Schneider, J.; Wiskamp, V.; *J. Chem. Educ.* **1994**, 71, 587.
- Rittenberg, D.; *The preparation and measurement of the isotopic tracers*, J. M. Edwards: Michigan, 1946.
- Tavares, G. A.; Bendassolli, J. A.; Souza, G.; Nolasco, F. R.; Bonassi, J. A.; Batagello, H. H.; *Quim. Nova* **2004**, 27, 320.
- Tavares, G. A.; *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 2004.
- Bendassolli, J. A.; Tavares, G. A.; Ignato, R. F.; Rosseti, A. L. R. M.; *Quim. Nova* **2003**, 26, 578.
- Carneiro Júnior, F.; *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1998.
- Bendassolli, J. A.; Mortati, J.; Trivelin, P. C. O.; Ignato, R. F.; Bonassi, J. A.; Tavares, G. A.; *Quim. Nova* **2002**, 25, 312.
- Raposo, C.; Windmöller, C. C.; Durão Júnior, W. A.; *Waste Managem.* **2003**, 23, 879.
- Larsen, T. A.; Gujer, W.; *Water Sci. Technol.* **1997**, 35, 3.
- Tersprta, P. M. J.; *Water Sci. Technol.* **1999**, 39, 65.
- Christen, K.; *Environ. Sci. Technol.* **2000**, 34, 23.
- Nakicenovic, N.; Grubler, A.; McDonald, A.; *Energy* **2000**, 25, 97.
- Martinot, E.; *Energy Policy* **2001**, 29, 689.
- Martinot, E.; *Energy Policy* **2001**, 29, 581.
- <http://www.unesco.org.br>, acessada em Junho 2003.
- Tavares, G. A.; Bendassolli, J. A.; Souza, G.; Nolasco, F. R.; *Analytica* **2004**, 10, 36.