

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR**

**INSERÇÃO DA QUÍMICA VERDE EM ATIVIDADES  
EXPERIMENTAIS DE GRADUAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANGÉLICA DE SOUSA HRYSYK**

**GUARAPUAVA-PR**

**2012**

**ANGÉLICA DE SOUSA HRYSYK**

**INSERÇÃO DA QUÍMICA VERDE EM ATIVIDADES  
EXPERIMENTAIS DE GRADUAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Química Aplicada, área de concentração em Ensino de Química, para a obtenção do título de Mestre.

Prof(a). Dr(a). Neide Hiroko Takata  
Orientadora

Prof. Dr. Sérgio Toshio Fujiwara  
Coorientador

GUARAPUAVA-PR

2012

Aos meus pais Roselita e Acir;  
Meus tios Terezinha e Valdir;  
Meus avós Leonor e Rafael (in memorian);  
Minha irmã Natália e ao meu noivo Herlon.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha orientadora prof.<sup>a</sup> Neide por sua amizade, paciência e dedicação e ao meu coorientador prof. Sérgio Toshio pelo apoio e disponibilidade.

A minha família por todo amor, carinho, apoio e compreensão.

A UEPG, em especial ao Prof. Celso e a Luzia, técnica do Labmut, pelas análises de infravermelho realizadas.

Aos amigos Tiago e a Hellen que me hospedaram em SP.

Aos meus colegas de pós-graduação pelo carinho e amizade.

Aos professores do curso e pós-graduação em Química.

Aos técnicos dos laboratórios da UNICENTRO Miguel e Carlos por sua ajuda durante a parte experimental do trabalho.

## SUMÁRIO

|  |     |
|--|-----|
| <b>Lista de tabelas</b> .....                                      | i   |
| <b>Lista de figuras</b> .....                                      | ii  |
| <b>Lista de símbolos e abreviaturas</b> .....                      | iii |
| <b>Resumo</b> .....  | iv  |
| <b>Abstract</b> .....  | v   |
| <br>   |     |
| <b>1. Introdução</b> .....   | 1   |
| <br>   |     |
| <b>2. Objetivos</b> .....  | 3   |
| 2.1. Objetivo Geral.....   | 3   |
| 2.2. Objetivo Específico.....                                      | 3   |
| <br>   |     |
| <b>3. Referencial Teórico</b> .....                                | 4   |
| 3.1. Os doze Princípios da Química Verde.....                      | 6   |
| 3.2. Integrando a Química Verde ao Currículo.....                  | 12  |
| 3.3. Métodos de Incorporação da Química Verde.....                 | 15  |
| 3.3.1. Experimentos da Química Verde.....                          | 16  |
| 3.4. Dificuldades para implantação da Química Verde.....           | 19  |
| 3.5. Microescala.....  | 20  |
| 3.6. A Química Verde no Brasil.....                                | 22  |
| <br>   |     |
| <b>4. Materiais e Métodos</b> .....                                | 24  |
| 4.1. Química Analítica Qualitativa.....                            | 24  |
| 4.1.1. Determinação Analítica do Grupo do Cobre.....               | 25  |
| 4.2. Química Orgânica Experimental.....                            | 29  |
| 4.2.1. Preparação e Caracterização do Butanal.....                 | 31  |
| 4.2.2. Uso de agentes oxidantes “verdes” .....                     | 32  |
| 4.2.3. Nitração da Acetanilida: Cálculo da Eficiência Atômica..... | 34  |
| 4.2.4. Experimentos em microescala.....                            | 35  |

|   |    |
|---|----|
| <b>5. Resultados e Discussão</b> .....  | 37 |
| 5.1. Determinação Analítica do Grupo do Cobre.....                              | 37 |
| 5.2. Preparação e Caracterização do Butanal.....                                | 43 |
| 5.3. Uso de agentes oxidantes “verdes”.....                                     | 47 |
| 5.4. Eficiência atômica de uma reação.....                                      | 49 |
| 5.4.1. Aplicação do cálculo de Eficiência Atômica: Nitração da Acetanilida..... | 50 |
| 5.4.1.1. Rendimento em Porcentagem.....   | 50 |
| 5.4.1.2. Economia de Átomos em uma reação.....                                  | 52 |
| 5.5. Experimentos em Microescala.....   | 55 |
| <br>  |    |
| <b>6. Conclusões</b> .....  | 60 |
| <br>  |    |
| <b>7. Referências Bibliográficas</b> .....                                      | 62 |
| <br>  |    |
| <b>Apêndice</b> .....   | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Princípios da QV no experimento de desidratação de um sal.....                  | 16 |
| <b>Tabela 2.</b> Exemplos de experimentos com abordagem na QV.....                               | 16 |
| <b>Tabela 3.</b> Número de turmas por curso da disciplina de Química Analítica Qualitativa..     | 24 |
| <b>Tabela 4.</b> Número de turmas por curso da disciplina de Química Orgânica.....               | 30 |
| <b>Tabela 5.</b> Dados de IV da oxidação do butanol com solução de dicromato de potássio.....    | 46 |
| <b>Tabela 6.</b> Dados de IV da oxidação do butanol com solução de permanganato de potássio..... | 46 |
| <b>Tabela 7.</b> Dados de IV da oxidação do butanol com solução de hipoclorito de sódio.....     | 48 |
| <b>Tabela 8.</b> Dados de IV da oxidação do butan-2-ol com solução de hipoclorito de sódio.....  | 49 |
| <b>Tabela 9.</b> Reagentes utilizados na nitração da acetanilida.....                            | 51 |
| <b>Tabela 10.</b> Rendimento obtido da nitroacetanilida.....                                     | 51 |
| <b>Tabela 11.</b> Reagentes e átomos utilizados na nitração da acetanilida.....                  | 53 |
| <b>Tabela 12.</b> Total de átomos utilizados e não utilizados na obtenção da nitroacetanilida.   | 54 |
| <b>Tabela 13.</b> Reagentes utilizados na síntese da acetanilida.....                            | 55 |
| <b>Tabela 14.</b> Reagentes utilizados na síntese da dibenzalacetona.....                        | 56 |
| <b>Tabela 15.</b> Dados de IV da acetanilida.....  | 57 |
| <b>Tabela 16.</b> Dados de IV da dibenzalacetona.....  | 58 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Reação de Síntese do ácido adípico.....  | 07 |
| <b>Figura 2.</b> Síntese do Ibuprofeno da Boots Company.....  | 08 |
| <b>Figura 3.</b> Síntese do Ibuprofeno pelo Processo da BHC Company.....  | 09 |
| <b>Figura 4.</b> Picos característicos dos compostos presentes no ar : H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar e CO <sub>2</sub> ..... | 18 |
| <b>Figura 5.</b> Esquema de descontaminação de efluentes por compósitos magnéticos.....   | 18 |
| <b>Figura 6.</b> Experimento em microescala para reações de precipitação.....   | 23 |
| <b>Figura 7.</b> Espectro de IV obtido da oxidação do butanol com solução de dicromato de potássio.....   | 45 |
| <b>Figura 8.</b> Espectro de IV do butanal obtido da oxidação do butanol com permanganato de potássio.....  | 46 |
| <b>Figura 9.</b> Espectro de IV do butanal obtido da oxidação do butan-1-ol com hipoclorito de sódio.....   | 47 |
| <b>Figura 10.</b> Espectro IV obtido da butanona da oxidação do butan-2-ol com hipoclorito de sódio.....  | 48 |
| <b>Figura 11.</b> Espectro de IV obtido da acetanilida.....   | 57 |
| <b>Figura 12.</b> Espectro de IV obtido da dibenzalacetona.....   | 58 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|                 |  |
|-----------------|--|
| QV              | Química Verde  |
| CTF             | Catalisador de transferência de fase                   |
| EPA             | Environmental Protection Agency                        |
| FISPQ           | Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos |
| HF              | Ácido fluorídrico                                      |
| T <sub>c</sub>  | Temperatura crítica                                    |
| P <sub>c</sub>  | Pressão crítica  |
| VOC             | Solvente orgânico volátil                              |
| α               | Alfa   |
| β               | Beta   |
| M               | Massa molar  |
| Z               | Número atômico   |
| USA             | United States of America                               |
| g               | Gramas   |
| mg              | Miligramas   |
| L               | Litro  |
| mL              | Mililitro  |
| USP             | Universidade de São Paulo                              |
| IQ-USP          | Instituto de Química - Universidade de São Paulo       |
| UFV             | Universidade Federal de Viçosa                         |
| cm <sup>3</sup> | Centímetro cúbico                                      |
| mol             | Quantidade de matéria                                  |
| °C              | Graus Celsius  |
| IV              | Infravermelho  |

## RESUMO

Angélica de Sousa Hrysyk. Inserção da Química Verde em atividades experimentais de graduação.

Para se planejar ou reformular rotas sintéticas de tal forma a torná-las menos, ou nada, contaminantes, a Química Verde (QV) estabelece doze princípios básicos que norteiam o planejamento de sínteses. Dessa forma, neste trabalho foram aplicados oito dos princípios da QV em alguns procedimentos experimentais das disciplinas de Química Analítica Qualitativa e Química Orgânica. Na disciplina de Química Analítica para o experimento de determinação do grupo do cobre (chumbo, cádmio, cobre, mercúrio e bismuto) foi proposta uma metodologia alternativa, esse grupo foi trabalhado de forma teórica, onde os alunos acompanham todas as etapas do experimento por fotos passo-a-passo do experimento, os demais roteiros que não envolvem metais de difícil descarte (como, por exemplo, cálcio, potássio, magnésio, ferro, entre outros) são executados normalmente. Na disciplina de Química Orgânica trabalhou-se com o experimento de síntese e caracterização do butanal. Usualmente, obtêm-se o produto butanal a partir da oxidação do butanol utilizando a solução sulfocrômica ( $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$ ) que contém o cromo VI, considerado nocivo. Neste trabalho este foi substituído por uma solução oxidante sulfopermangânica ( $KMnO_4/H_2SO_4$ ). Foi também utilizada a mistura de hipoclorito de sódio em meio ácido, considerado um agente oxidante “verde”, para obtenção do butanal e da butanona, a partir do butanol e butan-2-ol, respectivamente. Para minimizar a formação de resíduos, na preparação da acetanilida e dibenzalacetona, a quantidade de reagentes foi reduzida significativamente (experimento em microescala). O cálculo de eficiência atômica foi aplicada no experimento de nitração da acetanilida. As atividades propostas contemplam a maioria dos princípios propostos pela QV, demonstrando que, através de pequenas iniciativas é possível inserir a QV nas disciplinas do curso de Química.

**Palavras-Chave:** Química Verde; Ensino de Química.

## ABSTRACT

Angélica de Sousa Hrysyk. Insertion of green chemistry in undergraduate experimental activities.

To plan or reformulate synthetic routes so as to make them less, or nothing, contaminants, Green Chemistry provides twelve basic principles that guide the planning of syntheses. Thus, this study applied the eight principles of Green Chemistry in some experimental procedures of the disciplines of Qualitative Analytical Chemistry and Organic Chemistry. In the discipline of analytical chemistry experiment for the determination of the group of copper (lead, cadmium, copper, mercury and bismuth) proposed an alternative methodology, this group was working in a theoretical way, where students follow all steps of the experiment for photos the experiment, other routes not involving discard of difficult metals (eg, calcium, potassium, magnesium, iron, etc.) are performed normally. In the discipline of Organic Chemistry worked with the experimental synthesis and characterization of butanal. Usually, one obtains the butanal product from the oxidation of butanol using  $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$  solution containing chromium VI considered harmful. In this work this was replaced by an oxidizing solution  $KMnO_4/H_2SO_4$ . It was also used a mixture of sodium hypochlorite in acid medium, an oxidizing agent considered "green" for obtaining butanal and butanone from the butanol and butan-2-ol, respectively. To minimize the formation of residues, in the preparation of acetanilide and dibenzalacetona, the quantity of reagents was greatly reduced (in microscale experiment). The efficiency calculation was applied to the atomic experiment nitration of acetanilide. Proposed activities include most of the principles proposed by Green Chemistry, demonstrating that through small initiatives can enter the Green Chemistry in the discipline of chemistry course.

Keywords: Green Chemistry, Chemistry Teaching.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do conhecimento humano, proporcionou-se um amplo desenvolvimento das ciências e da tecnologia, que acarretaram em mudanças nos valores e modos de vida da sociedade. Com o surgimento do processo industrial e o crescimento das cidades, aumentou-se a utilização dos recursos naturais e a produção de resíduos. Fatos estes que geraram profundas mudanças na cultura, afetando principalmente a percepção do ambiente pelos seres humanos, que passaram a vê-lo como um objeto de uso para atender suas necessidades e vontades, sem se preocupar em estabelecer limites e critérios apropriados para sua utilização<sup>1</sup>.

Logo surgiram as consequências dessa cultura moderna, ou seja, o surgimento de problemas ambientais que vem afetando aos poucos a qualidade de vida das pessoas, evidenciando uma crise de relações entre a sociedade e o meio ambiente<sup>1</sup>.

A partir da década de 90 as questões ambientais passaram a receber destaque na mídia nacional e internacional. Praticamente todos os governantes contemplam em seus projetos temas envolvendo a redução de emissões ou o controle da degradação de reservas ambientais, debatem sobre o desenvolvimento autossustentável. O desenvolvimento autossustentável pode ser definido como o crescimento industrial que além de atender às necessidades do presente visa não comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem às suas próprias necessidades. Pois a atividade química é frequentemente relacionada, direta ou indiretamente, à maioria dos chamados “desastres ambientais”, embora outras atividades humanas também sejam responsáveis pela degradação e poluição ambiental<sup>2</sup>.

Conferências internacionais como a ECO-92, Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio +10) e a assinatura do Protocolo de Kyoto são exemplos de iniciativas que mostram a crescente preocupação mundial com as questões ambientais, o tratamento e a reciclagem de resíduos industriais, e daqueles gerados em laboratórios de ensino e pesquisa tem contribuído para a redução da contaminação ambiental. Entretanto, métodos de remediação em geral apresentam alto custo e a necessidade de pessoal treinado, tornando-se desvantajoso quando comparadas às técnicas de redução na fonte. Essas questões estão relacionadas direta ou indiretamente à atividade química, mas raramente são abordadas nos currículos dos cursos de graduação de Química<sup>3</sup>.

Na tentativa de tratar das questões do meio ambiente buscando o desenvolvimento autossustentável, ou seja, que atendam as necessidades do presente sem prejudicar as gerações futuras de suprir suas próprias necessidades surge a Química Verde (QV) que pode então ser vista como a associação do desenvolvimento da química à busca da autossustentabilidade.

A Química Verde pode ser definida como a utilização de técnicas químicas e metodologias que reduzem ou eliminam o uso de solventes e reagentes ou geração de produtos e subprodutos tóxicos, que são nocivos à saúde humana ou ao ambiente<sup>4</sup>.

Colocar em prática os princípios da química verde pode parecer algo muito distante da realidade atual observada na maioria das escolas, dos laboratórios de pesquisa e didático. Mas a partir de conhecimento, reflexão e pequenas iniciativas, é possível associar a química a alternativas mais verdes, desfazendo o conceito que a química está relacionada somente à poluição e degradação ambiental, esquecendo-se de todas as suas contribuições e avanços para a melhoria da qualidade de vida.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

Aplicar os princípios da Química Verde em atividades experimentais desenvolvidas no curso de Química nas disciplinas de Química Analítica e a Química Orgânica Experimental.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar e adequar os roteiros experimentais com a diminuição das quantidades de reagentes utilizados e conseqüentemente, a quantidade de resíduos gerados;
- Buscar a substituição de reagentes que possuem toxicidade por outros pouco ou não nocivos;
- Aplicar as metodologias alternativas nas aulas experimentais do curso de Química evitando a formação de resíduos de difícil descarte;
- Inserir nas aulas experimentais o cálculo de eficiência atômica descrito no princípio 2 da QV.
- Executar experimentos em microescala em aulas experimentais da graduação.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

A humanidade vem transformando o meio ambiente desde que seus antepassados surgiram na Terra. Contudo tais modificações não eram de grande expressão, pois se restringia a uma pequena interferência em algumas cadeias alimentares, devido à caça e colheita de vegetais<sup>5</sup>.

Porém com o advento da agricultura, a produção de alimentos aumentou significativamente causando maiores impactos à natureza. A partir dessa época, a degradação começou a ser notada por meio da erosão do solo, decorrente de práticas agrícolas impróprias, devastação de florestas para prática da agricultura e pecuária. Contudo foi a Revolução Industrial a responsável pelo processo de aceleração nos níveis de destruição da natureza, resultado de uma produção industrial de larga escala<sup>5</sup>.

Com o crescimento populacional acelerado, o ser humano passou a utilizar muito mais recursos da natureza do que ela era capaz de fornecer sem debilitar-se. O homem passou a utilizar não somente as fontes de alimento, mas também a usar os elementos naturais como o combustível e matéria-prima, comprometendo desse modo o equilíbrio desses elementos<sup>6</sup>.

Como exemplos podemos citar as atividades desenvolvidas pela química fina e a farmacêutica, responsáveis pela produção de uma grande quantidade de resíduos industriais e emissões de gases (que contribuem para o efeito estufa), o que vem aos poucos se tornando um grande problema ambiental, merecedor inclusive de debates mundiais<sup>6</sup>.

Diversas indústrias estão percebendo que quando seus químicos possuem conhecimento sobre prevenção à poluição, são capazes de desenvolver e executar técnicas de redução de poluição, que gera a redução de custos. Desta forma, a inserção de tópicos de Química Verde nas ementas dos cursos de Química e Engenharia Química estão relacionadas diretamente com a formação de profissionais mais preparados para as exigências do setor industrial<sup>7</sup>.

A questão do tratamento dos resíduos químicos começou a chamar atenção nos últimos anos, e essa nova dimensão do problema exigiu a proposição de novas e desafiadoras soluções, considerando como fundamental a busca por alternativas que evite ou minimize a produção de resíduos, em vez de preocupar-se exclusivamente com o tratamento do resíduo no fim da linha de produção. Este novo direcionamento na questão da redução do impacto da atividade química ao ambiente vem sendo chamado de “green chemistry”, (química verde),

química limpa, química ambientalmente benigna, ou química autossustentável<sup>8</sup>.

A Química Ambiental e a Química Verde são algumas vezes percebidas como sinônimos, pois muitas vezes não se consegue fazer uma distinção entre elas, no entanto a Química Ambiental se ocupa em quantificar e qualificar os poluentes e algumas vezes, buscar formas de atenuar os impactos ambientais. Já a Química Verde se preocupa em elaborar, ou reformular as rotas sintéticas, de tal forma a torná-las menos impactantes ao ambiente. Uma depende da outra, pois a partir da constatação de problemas ambientais gerados por rotas sintéticas, levantados pelos químicos ambientais, cabe aos químicos verdes reformular tais rotas<sup>9</sup>.

A Química Verde foi introduzida nos anos 90 nos EUA pela EPA (*Environmental Protection Agency*), agência de proteção ambiental, em colaboração com a *American Chemical Society* (ACS) e o *Green Chemistry Institute*. Esta iniciativa vem despertando o interesse de organizações governamentais e não governamentais de vários países. Na Europa, Japão e Estados Unidos foram inclusive criados prêmios para incentivar pesquisadores de Indústrias e Universidades a desenvolverem tecnologias empregando os princípios da química verde. Desde 1996, quando o *Presidential Green Chemistry Awards* (Prêmio Presidencial Desafio em Química Verde) foi criado nos EUA, mais de uma dezena de corporações e pesquisadores foram premiados<sup>8</sup>.

A Química Verde pode ser definida como a utilização de técnicas químicas e metodologias que reduzem ou eliminam o uso de solventes e reagentes ou geração de produtos e subprodutos tóxicos que são nocivos à saúde humana ou ao ambiente. Conceito este, já adotado há algum tempo em aplicações industriais, principalmente em países com controle rigoroso na emissão de poluentes. Ao longo dos anos os princípios da química verde têm sido inseridos no meio acadêmico, em atividades de ensino e pesquisa<sup>8</sup>.

Fato esse levado em consideração nas novas prioridades educacionais, ou seja, um ensino que ao mesmo tempo estuda as relações no meio ambiente com a finalidade de atingir um desenvolvimento sustentável introduzindo questões de ética voltadas para a tecnologia, onde é essencial compreender o impacto dessa atividade sobre a humanidade e seus descendentes, tanto na quantidade quanto na qualidade dos recursos físicos do planeta<sup>5</sup>.



### 3.1. Os doze Princípios da Química Verde

Para se planejar ou reformular rotas sintéticas de tal forma a torná-las menos, ou nada, contaminantes, a Química Verde estabelece doze princípios básicos que norteiam o planejamento de sínteses, que são<sup>8,10</sup>:

1. Prevenção – a prevenção é melhor do que tratamento de resíduos indesejáveis.
2. Eficiência atômica – as sínteses devem, preferencialmente, ocorrer de tal forma a produzir apenas o produto desejado, ou ainda, incorporando no produto final o máximo dos átomos dos reagentes, evitando a formação de subprodutos.
3. Síntese segura – sempre que possível, a síntese de um produto químico deve utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente.
4. Desenvolvimento de produtos seguros – produto seguro é aquele que não causa dano ao meio ambiente. A produção de composto químico deve preservar a eficácia desse composto e reduzir a sua toxicidade.
5. Uso de solventes e auxiliares seguros – evitar solventes como benzeno, clorofórmio, dentre outros ou substituí-los por outros mais seguros, de preferência água, mesmo em sínteses orgânicas.
6. Busca pela eficiência de energia – reformular ao máximo as rotas, de tal forma que a maioria possa ocorrer na temperatura e pressão ambiente, ou com um menor consumo energético.
7. Uso de fontes de matéria-prima renováveis – a utilização da biomassa como matéria prima deve ser considerada no desenvolvimento de tecnologias e rotas sintéticas. Sempre que possível, a matéria prima deve ter origem em fontes renováveis.
8. Evitar a formação de derivados – significa evitar a utilização de bloqueadores de proteção ou desproteção para substâncias envolvidas em sínteses químicas.
9. Catálise – os catalisadores, os mais seletivos possíveis, devem ser preferidos aos reagentes estequiométricos.
10. Produtos degradáveis – de preferência os produtos químicos utilizados ou produzidos não devem permanecer no meio ambiente. Devem, portanto, sofrer uma degradação em produtos não nocivos.
11. Análise em tempo real para prevenção de poluição – deve ocorrer um monitoramento e controle em tempo real antes da formação de substâncias nocivas ao meio ambiente.

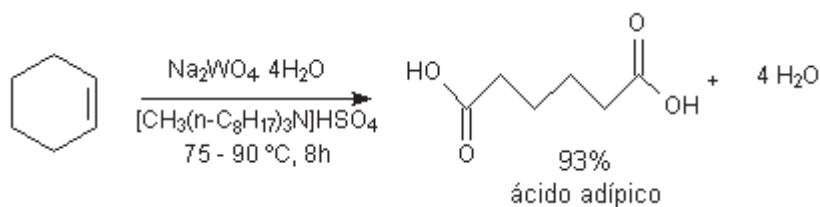
12. Química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes – as sínteses e processos químicos devem ocorrer com a minimização de risco de acidentes.

Existem vários exemplos e estudos da aplicação destes princípios, pois há um esforço da comunidade científica mundial no desenvolvimento de novas metodologias. São apresentados abaixo pontos considerados importantes.

A redução na fonte, tratado no princípio 1, é sem dúvida a maneira mais eficiente de minimizar o impacto ambiental resultante de uma atividade industrial. Atualmente, devido à legislação rigorosa que exige baixos níveis de emissão em atividades da indústria, se investe muito no tratamento de resíduos sólidos e líquidos, que nem sempre resolve satisfatoriamente o problema. A partir do momento em que se investe em tecnologias mais limpas de produção, não há necessidade de investimentos pesados no tratamento de resíduos<sup>11</sup>.

Como exemplo da aplicação do princípio 1 tem-se o experimento de Noyori, que desenvolveu um novo processo para a síntese do ácido adípico a partir da oxidação do cicloexeno (Figura 1). O processo industrial atualmente em uso emprega ácido nítrico para oxidação de cicloexanol ou uma mistura de cicloexanol e cicloexanona<sup>12</sup>.

O ácido adípico é utilizado como matéria-prima na fabricação do nylon-6,6 e a sua produção anual é de cerca de 2,2 milhões de toneladas. Um dos subprodutos desta reação é o N<sub>2</sub>O, um dos gases responsáveis pela destruição da camada de ozônio e também pela chuva ácida. Com o novo método se desenvolveu um sistema catalítico que permite a utilização de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aquoso a 30% como agente oxidante "verde". Quando se utiliza uma mistura de cicloexeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%, Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>.4H<sub>2</sub>O e [CH<sub>3</sub>(n-C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>)<sub>3</sub>N]HSO<sub>4</sub> como catalisador de transferência de fase (CTF), a reação ocorre com 93% de rendimento e o único sub-produto da reação é a água<sup>12</sup>.



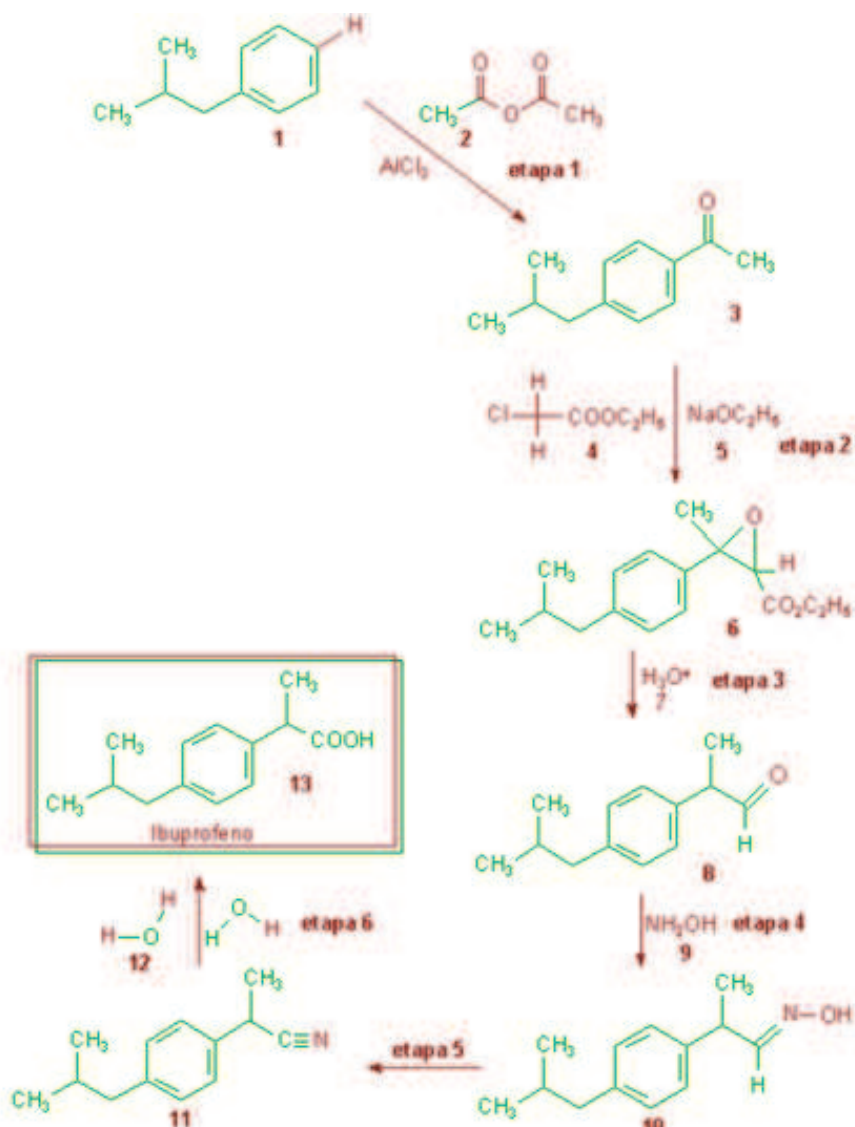
**Figura 1.** Reação de Síntese do ácido adípico<sup>12</sup>.

O conceito de eficiência atômica, tratado no princípio 2, foi introduzido em 1991 por Trost<sup>10</sup>, e é um parâmetro utilizado para medir a eficiência sintética de uma reação. De acordo

com o autor, a reação ideal seria aquela onde toda a massa dos reagentes está contida no produto, ou seja, deve-se procurar desenvolver metodologias sintéticas que possam maximizar a incorporação de todos os materiais de partida no produto final. Como consequência tem-se um melhor aproveitamento das matérias-primas e, menor geração de resíduos<sup>10</sup>.

Como exemplo de eficiência atômica tem-se a Síntese do medicamento ibuprofeno. O ibuprofeno é o ingrediente ativo de várias marcas de produtos, incluindo Advil, Motrin e Nuprin, age como um analgésico e sua produção mundial ultrapassa 13 mil toneladas por ano<sup>13</sup>.

A Boots Company de Nottingham, Inglaterra, foi a primeira a patentear o método em 1960 e este foi o principal método para a síntese deste durante muitos anos. A síntese do ibuprofeno da Boots é uma síntese em 6 etapas e é mostrada na Figura 2<sup>13</sup>.

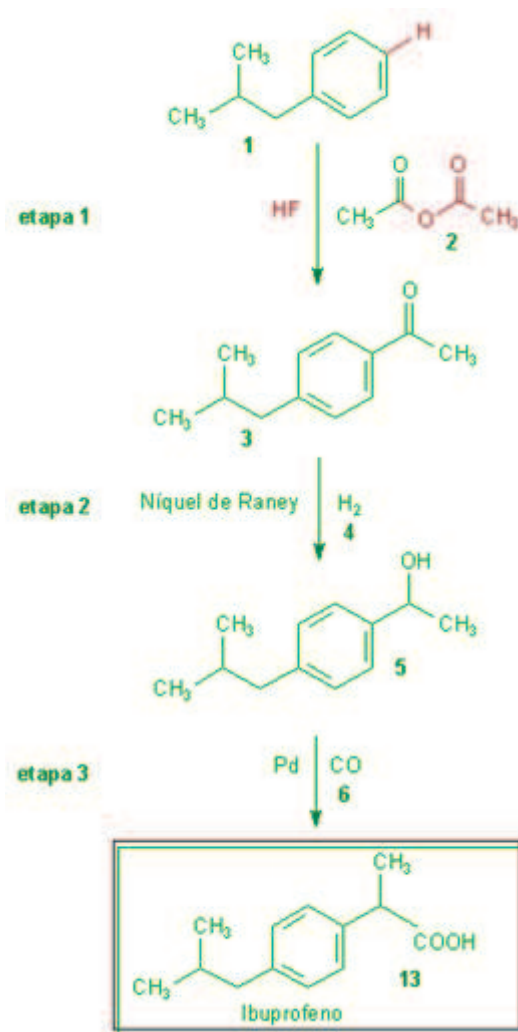


**Figura 2.** Síntese do Ibuprofeno pelo processo da Boots Company<sup>13</sup>.

Os átomos de cada reagente que estão incorporados no produto final desejado são representados em verde, enquanto que aqueles que acabam em produtos indesejados são mostrados em marrom.

Nos anos oitenta foi abolida a necessidade de receita médica para aquisição de ibuprofeno e a patente da Boots Company expirou. Reconhecendo a oportunidade financeira várias companhias investiram no desenvolvimento de novos métodos para a preparação do ibuprofeno. A Hoechst Celanese Corporation descobriu uma nova síntese, em três etapas, do ibuprofeno e juntamente com a Boots Company, foi formada a BHC Company, para preparar e comercializar o medicamento<sup>13</sup>.

A síntese da BHC Company é mostrada na Figura 3, com os átomos utilizados mostrados em verde, e os átomos não utilizados, em marrom. Na rota tradicional a economia de átomos é de 40% e com o novo método é de mais de 99%, se considerarmos que o ácido acético gerado na etapa 1 é recuperado e utilizado<sup>13</sup>.



**Figura 3.** Síntese do Ibuprofeno pelo processo da BHC Company<sup>13</sup>.

O processo da BHC Company oferece não apenas um enorme aumento na economia de átomos, mas também outras vantagens ambientais. O processo da Boots Company utiliza tricloreto de alumínio em quantidades estequiométricas, enquanto que o processo da BHC Company usa HF em quantidade catalítica, que é recuperado e reutilizado repetidamente. O tricloreto de alumínio produz grandes quantidades de tricloreto de alumínio hidratado como um produto residual, que geralmente é descartado. Os catalisadores de níquel e paládio usados nas etapas 2 e 3 do processo da BHC Company são todos recuperados e reutilizados<sup>13</sup>.

Como o processo da BHC Company requer apenas três etapas, sendo seis do processo da Boots Company, possuindo uma economia de átomos bem mais eficiente, ele não apenas leva a uma grande diminuição na quantidade de resíduo produzido, como também contribui para um maior rendimento. Estes fatores se traduzem em benefícios econômicos para a empresa, porque menos recursos financeiros são necessários para tratar os resíduos gerados e menos investimento é necessário para produzir a mesma quantidade do medicamento<sup>13</sup>.

Pelo desenvolvimento desta síntese do ibuprofeno, a BHC Company ganhou um prestigiado *Presidential Green Chemistry Awards* (Prêmio Presidencial Desafio em Química Verde) em 1997<sup>14</sup>.

Podem considerar-se complementares os princípios 3 e 4, pois relacionam tanto a toxicidade dos reagentes quanto o desenvolvimento de produtos envolvidos em um processo. Várias empresas e pesquisadores se destacaram nos últimos anos por desenvolverem produtos e processos menos agressivos ao ambiente. Como exemplo tem-se o desenvolvimento do CONFIRM<sup>TM</sup> um inseticida da família das diacil-hidrazinas, eficaz no controle de lagartas. Este inseticida foi classificado pela EPA como um produto de risco reduzido que não traz prejuízo a outras formas de vida além daquela para a qual foi desenvolvido. Criados pela multinacional Rohm and Haas envolveu o desenvolvimento de produtos menos tóxicos, mas que possuem a mesma eficácia que seus análogos no mercado<sup>15</sup>.

Uma área importante da Química Verde (QV) está na investigação do meio reacional. O princípio 5 leva em consideração o uso de substâncias auxiliares (solventes, agentes secantes, agentes de separação, etc.) que são empregadas na maioria das preparações industriais ou em atividades acadêmicas. Muitas dessas reações utilizam grandes quantidades de solventes orgânicos, que são frequentemente tóxicos e nem sempre sua reutilização é viável economicamente. Frequentemente estes solventes são descartados na água, no ar e no solo, poluindo o ambiente. Entretanto, um grande esforço está sendo feito no sentido de

substituir solventes orgânicos convencionais por solventes verdes, como fluidos supercríticos (particularmente CO<sub>2</sub> T<sub>c</sub> = 31 °C e p<sub>c</sub> = 74 atm)<sup>16,17,18</sup> e a água (T<sub>c</sub> = 374 °C e p<sub>c</sub> = 220 atm) são plenamente disponíveis como solventes (a água próxima do estado supercrítico possui características semelhantes às da acetona, em termos de capacidade de dissolução e solvatação)<sup>19</sup>, hidrocarbonetos perfluorados<sup>20</sup> e líquidos iônicos<sup>21</sup> à temperatura ambiente. Quando possível, as reações também devem ser efetuadas na ausência de solvente, o que também é bastante desejável quando se busca a redução de resíduos.

O desenvolvimento e a utilização de solventes que possuem um baixo potencial para destruição do ambiente e que servem como alternativas aos VOC (solventes orgânicos voláteis), solventes clorados e solventes que prejudicam o ambiente natural é uma das linhas da química verde que mais avançaram nos últimos anos. O uso de CO<sub>2</sub> supercrítico, H<sub>2</sub>O e líquidos iônicos como solventes em síntese orgânica são hoje uma realidade em muitos procedimentos que tradicionalmente empregam VOCs como solvente<sup>14</sup>.

O princípio 6 considera a energia necessária para realização de determinada reação. Em termos de eficiência energética, a reação ideal deve ocorrer à temperatura e pressão ambientes. Entretanto, muitos procedimentos requerem aquecimento prolongado, resfriamento ou requerem pressões diferentes da ambiente. Um dos desafios para os químicos e engenheiros químicos é o desenvolvimento de novas reações que possam ser efetuadas de maneira a minimizar o consumo de energia, já que esta em geral é obtida por meio da queima de combustível fóssil, não renovável ou energia elétrica<sup>10</sup>.

O princípio 7 da QV destaca a necessidade de utilização de fontes renováveis de matéria-prima (biomassa), ou seja, sempre que possível utilizar materiais derivados de plantas e outras fontes biológicas renováveis ou materiais reciclados. Um exemplo, considerado um ganho para o ambiente, é o aumento da produção do biodiesel<sup>22</sup> (um biocombustível, obtido por meio da alcoólise de óleos vegetais, como mamona, canola, girassol, dentre outros), pois muitos geradores de energia que hoje são movidos a derivados do petróleo poderão ser substituídos por esse combustível 'verde'. A utilização da cana-de-açúcar também é uma alternativa viável, pois por meio de seu processo de fermentação tem-se a produção de álcool, que pode ser usado como combustível em substituição a combustíveis fósseis.

O princípio 8 descreve que uma síntese ideal deve levar ao produto desejado a partir de materiais de partida de baixo custo, de fonte renovável, facilmente obtidos, em uma única etapa, simples e ambientalmente aceitável, que se processe rapidamente, com rendimento

quantitativo e alto grau de pureza. Situação que ainda é muito difícil de conseguir. Entretanto, deve-se buscar esta situação ideal, evitando etapas desnecessárias, como a derivatização excessiva<sup>11</sup>.

O princípio 9 mostra que reações catalíticas são melhores que às reações estequiométricas. Com pesquisas e o desenvolvimento de catalisadores altamente seletivos e efetivos em transformações complexas e difíceis de serem previstas, tornam as síntese mais próximas da idealidade<sup>15</sup>. São exemplos os trabalhos de K. Barry Sharpless, Ryoji Noyori e William S. Knowles, ganhadores do Nobel de Química em 2001<sup>23</sup>, que empregam catalisadores heterogêneos que conduzem a reações mais limpas e seletivas e, como o catalisador pode ser reciclado e reutilizado várias vezes, tem-se com isso redução de custos.

O princípio 10 descreve o uso de produtos degradáveis, logo após cumprirem sua função. O desenvolvimento de produtos de materiais seguros, menos tóxicos e persistentes, mais seletivos e eficientes, pode ser verificado para várias classes de compostos, desde pesticidas, corantes, polímeros até surfactantes<sup>24</sup>.

A análise em tempo real para a prevenção da poluição contempla o princípio 11, pois se torna essencial desenvolver e/ou aprimorar metodologias analíticas que possibilitem o monitoramento de processos em tempo real, em linha, com o intuito de se identificar e controlar, a priori, a formação de compostos nocivos<sup>25</sup>.

A escolha de substâncias utilizadas em um processo deve ocorrer de maneira a minimizar potenciais acidentes químicos, como vazamentos, explosões e incêndios, bem como a avaliação da toxicidade, devem ser considerados quando um produto ou processo são desenvolvidos, apresentado no princípio 12<sup>26</sup>.

Com a compreensão da QV os estudantes passarão a perceber que as questões ambientais também estão presentes em suas aulas e por meio dessas experiências estarão preparados para o desafio que a indústria e o meio acadêmico passaram a impor nos últimos anos, ou seja, a busca pela química autossustentável, além de se tornar um cidadão consciente.

### **3.2. Integrando a Química Verde (QV) ao Currículo**

A sociedade de hoje está se tornando cada vez mais ambientalmente consciente e a QV pode desempenhar um papel importante no movimento em direção a uma sociedade mais

sustentável, que através da educação oferece a solução para os problemas ambientais atuais, pois ela fornece a oportunidade de preparar futuros químicos, cientistas e líderes políticos, contribuindo para a formação de profissionais mais conscientes<sup>26</sup>.

A educação deve ser voltada para a aplicação de seus princípios, uma vez que tornam conscientes da importância de que a indústria química, que no passado (e ainda atualmente) era visto como um dos principais contribuintes para a degradação ambiental passa agora a buscar a solução desses problemas<sup>27</sup>.

O que impulsionou o desenvolvimento da QV foram questões econômicas, enquanto o objetivo da maioria das indústrias é fornecer ao público bens e serviços para ajudar a viver melhor, elas buscam também, independentemente do ramo de atividade, maximizar as suas margens de lucro. Muitas empresas estão percebendo que a adoção de seus princípios oferece vantagens financeiras, pois com o desenvolvimento de processos de síntese mais curtos, há diminuição do gasto de energia e com a redução da produção de resíduos existe menor necessidade de tratamento<sup>28</sup>.

Para apoiar a sua investigação, empresas como a Pfizer premiam seus próprios cientistas que desenvolvem "uma nova prática, tecnologia ou projeto que atenda os princípios da QV, mantendo ou aumentando a produtividade", os "benefícios ambientais" também devem ser demonstrados. O prêmio também reconheceu departamentos de química dos Estados Unidos pelos seus trabalhos. As universidades recebem apoio de grandes empresas como a Pfizer, o que indica que essas empresas estão vendo seriamente a formação como futura fontes de cientistas, que são capazes de aplicar os princípios da QV aos processos químicos<sup>29</sup>. Desde 2001 é desenvolvido no Brasil, em Guarulhos, o programa Pfizer de Educação Ambiental, que tem como objetivo conscientizar educadores e estudantes sobre a importância de adotar atitudes que preservem o meio ambiente<sup>30</sup>.

O objetivo dessa discussão é que a sociedade, incluindo a indústria, devem tomar decisões conscientes em relação ao meio ambiente, e a maneira mais fácil de garantir que essas decisões focadas na sustentabilidade são através do apoio à implantação da QV na educação presente nos currículos dos cursos das Universidades<sup>31</sup>.

Esse trabalho de implantação tem se centrado no currículo de graduação, pois existe um movimento progressivo para incluir e discutir a importância, prática e princípios no cenário de graduação<sup>32</sup>.



Com os esforços da Sociedade Americana de Química e Instituto de Química Verde, professores dedicados com presença de visão de futuro e também os programas de química em algumas faculdades e universidades nos Estados Unidos, como a Universidade do Oregon, St. Olaf College, e em todo o mundo, estão percebendo que o momento é de começar a construir. O que se tem notado é que os princípios são mais aplicáveis em química orgânica, por causa de seu foco em síntese, no entanto pode-se também tratar esse assunto já no primeiro ano do curso de Química, pois esse é um espaço nobre para discutir conceitos como economia de átomos, eficiência energética, riscos químicos, e segurança de laboratório em geral. Ao expor os alunos a estes temas no início da graduação, os princípios podem se tornar mais concretos à medida que são revistos nos anos subsequentes<sup>33</sup>.

Os educadores muitas vezes discutem como incorporar a educação em QV em um currículo do curso de Química ou mesmo no Ensino Médio se os conteúdos das disciplinas que contemplam esse currículo já estão bem definidos, o que não significa que o tema não possa ser incorporado juntamente com o conteúdo tradicionalmente trabalhado. Para isso o currículo do curso pode ser reavaliado para conter o essencial e mantê-lo relevante. Assim, a QV não deve ser percebida como um tópico a mais no currículo, mas como algo que vem dar a sua contribuição<sup>34</sup>.

A QV é mais facilmente demonstrada em laboratório onde a teoria é colocada em prática, no entanto, essa integração não deve ser isolada só para o laboratório. Como acontece com qualquer conceito químico, a melhor maneira de alcançar a compreensão do estudante é discutir a teoria, e em seguida permitir sua inserção de outras formas, como na discussão de artigos, elaboração de projetos ou atividades que permitem aos alunos relacionar a química aos problemas ambientais. Muitas vezes o método mais eficaz é levar os alunos a fazerem conexões pessoais entre os tópicos da química com a sua própria vida. Só então é que começam a compreender a relevância e a importância da QV na vida cotidiana<sup>35</sup>.

Pode ser inserida em praticamente todas as disciplinas do curso de Química, na disciplina de química orgânica, pode-se iniciar a abordagem com os seguintes temas: substituição de reagentes mais tóxicos por outros reagentes menos tóxicos nas rotas de síntese, buscar melhorias na economia de átomos, redução do volume de solvente ou seleção de solventes mais “verdes”<sup>35</sup>.

Na química inorgânica, pode se introduzir temas como a catálise (síntese, reciclagem, etc), reagentes em suportes sólidos inorgânicos (sílica gel, alumina e argilas), ácidos e bases sólidas, prata ou nanopartículas de ouro e a redução do uso de metais pesados<sup>35</sup>.

Na bioquímica, pode-se abordar a química do biodiesel, a biocatálise, biossíntese, fermentação e matérias-primas provenientes de recursos renováveis. Em química analítica, pode se focar a parte da instrumentação utilizada no processo analítico (espectroscopia no infravermelho, espectrometria de absorção atômica)<sup>35</sup>.

Na disciplina de físico-química, uma forma de se trabalhar com a QV é explorar as propriedades de dióxido de carbono, a termoquímica do biodiesel, fotoquímica, cinética e catálise, e também as vantagens da realização de estudos computacionais. Na química de polímeros pode ser discutida a minimização de resíduos em síntese de polímeros, a química de polímeros biodegradáveis<sup>36</sup>.

Dessa forma, a QV permeia praticamente todo o currículo e pode ser incorporada a todas as séries do curso de Química.

### **3.3. Métodos de Incorporação da Química Verde**

A QV defende o uso de tecnologias ambientalmente benignas, reagentes não tóxicos, bem como a utilização de reagentes que se originam a partir de recursos renováveis, procedimentos relativamente simples podem ser trabalhados.

Nas atividades de laboratório, pode-se solicitar aos alunos para consultar em Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ), através de busca em bases de dados *online*, livros e *handbook*, focando alguns tópicos como os limites de exposição, risco de explosão e precauções quanto ao manuseio, o que torna o processo menos intimidante<sup>37</sup>. Pode-se analisar os resíduos produzidos nas atividades experimentais como a compatibilidade bem como a reatividade e o seu tratamento adequado, como por exemplo, separar os oxidantes fortes dos agentes redutores e ácidos orgânicos dos ácidos inorgânicos<sup>38</sup>.

Uma sugestão de atividade é fazer o registro em tabelas das quantidades de cada produto químico utilizado, permitindo o controle da quantidade de resíduos que está sendo gerado e posteriormente, pode se estudar a eficiência atômica da reação<sup>38</sup>, mostrando que

pequenas iniciativas podem ser inseridas nas atividades rotineiras da aula, não necessitando alterar o roteiro experimental ou exigindo do professor e do aluno nenhum esforço adicional.

### 3.3.1. Experimentos da Química Verde

Alguns docentes de universidades têm se esforçado para desenvolver novos experimentos e redesenhar antigos experimentos sob a perspectiva da QV, como a substituição de reagentes químicos nocivos e/ou tóxicos por opções mais ambientalmente benignas. É importante ressaltar que quando estes procedimentos são redesenhados, os objetivos de aprendizagem original permanecem inalterados.

Com exemplo, tem-se um experimento clássico de determinação da fórmula de um sal hidratado que, originalmente, utiliza o reagente cloreto de bário diidratado, considerado tóxico, que pode ser substituído por um reagente menos tóxico como o cloreto de cobre diidratado<sup>39</sup>.

Essa troca de reagente minimizou os problemas de toxicidade e o produto formado pode ser re-idratado e reutilizado. Este experimento enfatiza dois princípios mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Princípios da QV no experimento de desidratação de um sal<sup>39</sup>.

|             |  |
|-------------|--|
| Princípio 1 | É melhor prevenir a formação de resíduos a tratá-los depois de formados.   |
| Princípio 3 | Sempre que possível, as sínteses devem ser desenhadas para usar e gerar substâncias que possuem pouco ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e meio ambiente. |

Existem diversos experimentos que tem a inserção de princípios da QV. Na Tabela 2 estão listados alguns exemplos.

**Tabela 2.** Exemplos de experimentos com abordagem na QV.

|    | <b>Título</b>  | <b>Referência</b> |
|----|--|-------------------|
| 1. | Um experimento de estequiometria da Química Verde para a Química Geral   | 40                |
| 2. | Uma abordagem mais verde para se estudar as propriedades coligativas.  | 41                |
| 3. | Espectrometria de massas   | 42                |
| 4. | Tecnologia de partículas magnéticas - uma preparação simples de compósitos magnéticos para adsorção de contaminantes na água | 43                |

Na Tabela 2, item 1, tem-se um experimento de estequiometria destinado aos alunos de ensino médio e ao primeiro ano da graduação que oferece uma oportunidade para os estudantes aplicarem três princípios, como a prevenção de resíduos, economia atômica e a utilização de produtos químicos mais seguros<sup>40</sup>.

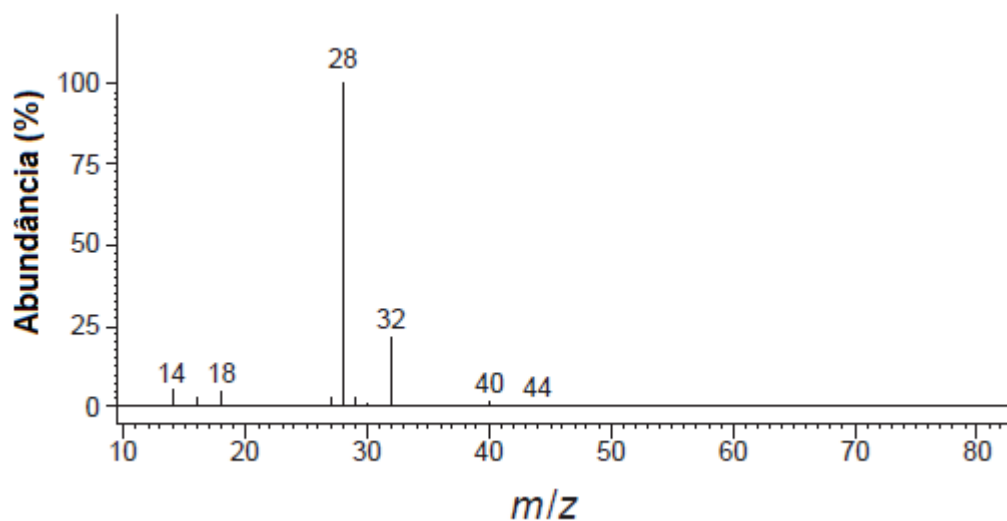
No item 2, no estudo das propriedades coligativas é proposto o desenvolvimento de experimentos de laboratório que demonstre conceitos químicos fundamentais (como constante crioscópica e pressão de vapor), ao mesmo tempo incorporando questões da QV.

Para este fim se utilizam um solvente aromático como p-diclorobenzeno devido as suas propriedades físicas, facilidade de limpeza e baixo custo. Um exemplo citado<sup>41</sup> de determinação da massa molar (M) de um composto desconhecido, no método tradicional, utiliza-se reagentes, tais como, naftaleno, bifenila, benzil, p-nitrotolueno ou benzofenona, apesar das vantagens educacionais de utilizar estas substâncias, eles apresentam significativos riscos ambientais e de segurança, particularmente associados com compostos aromáticos que incluem carcinogenicidade, bioacumulação e toxicidade<sup>41</sup>.

Em um procedimento experimental mais verde os compostos aromáticos podem ser substituídos por ácidos esteárico, mirístico, láurico, palmítico que apresentam as vantagens de não serem tóxicos e os resíduos de ácido graxo gerados podem ser reutilizados para outros fins, como fabricação de sabão, cera ou biodiesel, o que permite zero desperdício. O trabalho mostrou que é possível alcançar as metas de promover ensino sem a geração concomitante de resíduos clorados e aromáticos<sup>41</sup>.

No item 3 ( Tabela 2), é sugerido a utilização da técnica de espectrometria de massa nas aulas de laboratório. Persinger e colaboradores propuseram uma atividade experimental com a utilização de amostras de ar como analito, obtido de algumas reações químicas, tais como: combustão, oxidação, decomposição, fotossíntese e respiração, onde os alunos podem obter o espectro de massa para verificar a presença de picos característicos dos compostos presentes no ar ( H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar e CO<sub>2</sub>)<sup>42</sup>.

Como mostrado na Figura 4 é mostrado o espectro de massa obtido na análise de uma amostra de ar.

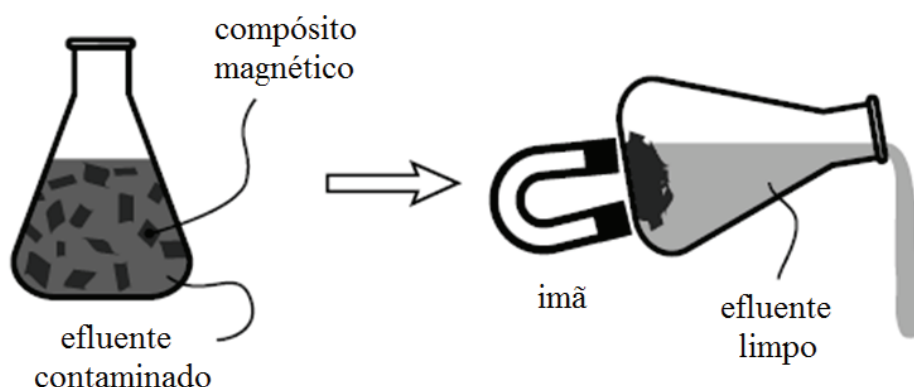


**Figura 4.** Picos característicos dos compostos presentes no ar :  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar e  $\text{CO}_2$ <sup>42</sup>.

Segundo os autores, podem ser abordados tópicos como cálculos de massa molar e método científico, o propósito do experimento pode ser, facilmente, relacionado com questões ambientais, além de possibilitar o contato com a instrumentação de análise moderna<sup>42</sup>.

No item 4 (Tabela 2), é apresentado um experimento de preparação de um material magnético (composto por carbono ativado ou argila e soluções de óxido de ferro e sulfato de ferro) que pode ser utilizado no tratamento de água para a remoção de diferentes tipos de contaminantes, por exemplo, metais ou compostos orgânicos que podem ser removidos por um simples processo de separação magnética<sup>43</sup>.

Na Figura 5 é mostrado um esquema da ação do material magnético em uma amostra contaminada.



**Figura 5.** Esquema de descontaminação de efluentes por compósitos magnéticos<sup>43</sup>.

A preparação dos compósitos magnéticos é simples e pode ser realizada em um laboratório por estudantes da graduação ou do ensino médio. Os produtos químicos necessários estão facilmente disponíveis e de baixo custo<sup>43</sup>.

Os processos de descontaminação e remediação são complexos e muitas vezes exigem uso de soluções práticas e inovadoras. Portanto, os experimentos de laboratório envolvendo tecnologia ambiental são capazes de estimular a criatividade dos alunos e de grande interesse em uma ementa de química ambiental<sup>43</sup>.

Um dos benefícios pedagógicos deste experimento é que os estudantes podem avaliar os problemas ambientais que envolvem importantes aspectos da química básica, tais como as propriedades, caracterização e aplicação de diferentes materiais e compósitos<sup>43</sup>.

### **3.4. Dificuldades para implantação da Química Verde**

Como mostrado, a QV pode ser inserida nos cursos que contemplam as disciplinas de química nos currículos utilizando diversas metodologias. No entanto, a mudança de metodologia, às vezes, se depara com a resistência dos colegas professores, administradores e críticos de suas vantagens.

Segundo Klingshirn e Spessard<sup>35</sup> as questões e preocupações em relação à QV são:

- A resistência à mudança, pois somente uma palestra ou um programa de laboratório pode oferecer aos instrutores pouco incentivo para fazer alterações. Outra questão também é o tempo necessário para desenvolver experimentos de QV, pois o seu desenvolvimento pode ser um processo muito demorado. Apenas para se desenvolver um programa-piloto de laboratório para um semestre são gastos 20 horas por semana durante oito semanas.
- Conseguir o apoio de colegas e estudantes, antes de se implantar um programa de QV: É importante conseguir apoio dos colegas e administradores, sendo que muitas vezes a QV bastante atraente para a administração de uma instituição, porque é associada à maior segurança e redução de geração de resíduo, como também tem uma grande importância pedagógica.

### 3.5. Microescala

Uma das maiores prioridades para o gerenciamento de resíduos tóxicos é a redução do volume de resíduo gerado. Este objetivo requer uma análise detalhada das fontes geradoras e das possibilidades de redução, sendo que seus benefícios incluem maior segurança, melhor relacionamento com a sociedade, reduzida tendência a sofrer penalidades legais por acidentes, diminuição nos custos de tratamento e disposição final, redução nos custos de matérias-primas, e formação adequada de recursos humanos<sup>45</sup>.

Os laboratórios acadêmicos e as instituições de pesquisa geralmente geram resíduos com composição e volume muito mais diversificados que as indústrias e, portanto, necessitam de soluções muito mais criativas para o monitoramento e a redução dos resíduos gerados. Dentro desta perspectiva, a utilização de experimentos em microescala tem revolucionado o ensino de química nos laboratórios de graduação nos Estados Unidos<sup>45</sup>.

A Química em microescala iniciou-se em 1980 quando o Bowdoin College, Brunswick, Maine (USA), não pode mais adiar a modernização do sistema de ventilação inadequado de seus laboratórios de química orgânica. O recurso disponível para as melhorias era bastante restrito e, ao invés de gastar US\$250.000 para instalar um novo sistema de capelas e ventilação, os professores de química do Bowdoin desenvolveram um novo método de ensino para alunos de graduação. As técnicas e equipamentos que eles desenvolveram, em colaboração com professores do Merrimack College, North Andover, Massachusetts (USA), permitiram que os estudantes realizassem reações com quantidades de reagentes bastante reduzidas (50 a 150 mg). A “macroescala” típica normalmente requer quantidades mínimas de 5 a 15 g. A redução drástica na quantidade de reagentes reduziu substancialmente a proporção de vapores produzidos nos laboratórios de química orgânica, entre outras vantagens<sup>46</sup>.

O conceito de microescala difundiu-se rapidamente. Apesar de a força motriz inicial para a conversão à microescala do Bowdoin e Merrimack College ser a qualidade do ar, a quantidade de resíduo químico que necessita tratamento e disposição final sofre uma redução correspondente. Isso levou à redução na disposição de resíduos tóxicos, o que motivou muitas outras instituições a adotá-la<sup>47</sup>.

Segundo uma estimativa feita por Arden Zipp (Professor da Universidade Estadual de Nova Iorque em Cortland, USA), a microescala nos cursos de laboratórios de química orgânica com 60 alunos produz cerca de 1 L de resíduo tóxico por semestre. Em contraste,

Zipp afirma que um curso de laboratório de química orgânica tradicional gera cerca de 1 L por aluno por semestre<sup>46</sup>.

Outra vantagem da utilização de experimentos em microescala é a redução da exposição dos estudantes a reagentes tóxicos, uma vez que as quantidades manipuladas são um centésimo ou um milésimo das quantidades utilizadas nos cursos tradicionais. A microescala também reduz o risco de acidentes de grandes proporções. Além disso, como as quantidades utilizadas são reduzidas, os professores podem expandir suas possibilidades de usos de reagentes para outros que são mais caros ou tóxicos, o que é particularmente interessante para laboratórios de química inorgânica, onde em “macroescala” geralmente utiliza-se somente crômio e cobalto por serem mais baratos<sup>47</sup>.

McGough também observou que a maior conscientização e conhecimento dos alunos resultaram em menor ocorrência de derramamentos de reagentes e menor quebra de materiais, já que se necessita de maior cuidado para manipulações em microescala<sup>47</sup>.

Adicionalmente ao benefício econômico da aquisição de menores quantidades de reagentes, menor custo de disposição e das vantagens do ponto de vista ambiental e de segurança da adoção da microescala, alguns professores de química observaram um inesperado ganho pedagógico. Os estudantes ganham maior segurança para trabalhar com pequenas quantidades, desenvolvem uma técnica de trabalho mais cuidadosa e, como o tempo de reação é normalmente reduzido, podem realizar uma maior variedade de ensaios. Assim, uma das maiores vantagens da adoção da microescala é a criação de um ambiente propício para a proliferação de uma consciência ética e ecológica nos estudantes, visto que a prática tem mostrado que é muito mais fácil formar pessoas com um posicionamento ambientalmente correto do que tentar mudar a forma de pensar e agir dos profissionais graduados<sup>48</sup>.

Mesmo com todas estas vantagens, não se espera que a “revolução da microescala” atinja todos os cursos práticos de química, já que alguns experimentos requerem equipamentos de tamanho padrão, enquanto outros não usam reagentes caros ou produzem resíduos inócuos e a redução de custo da adoção de microescala seria mínima<sup>48</sup>.

Apesar de o custo inicial da conversão para a microescala ser alto, dependendo do tipo de vidraria utilizada, e de outros equipamentos selecionados, muitas instituições entendem que o dinheiro economizado na disposição final, na compra de reagentes e na renovação de seus sistemas de exaustão justifica este investimento inicial. Segundo Zipp o custo de um “kit” de vidraria em microescala para laboratório é de US\$ 150 a 200 nos Estados Unidos,



mas este investimento inicial se paga em cerca de 6 anos com a redução dos demais custos envolvidos. Para evitar este investimento inicial, algumas universidades adotaram uma redução para escala “semi-micro”, a qual envolve quantidades da ordem de 0,5 a 1 g, e o uso de vidraria de tamanho convencional<sup>46</sup>.

### 3.6. Química Verde no Brasil

Segundo Bazito, o desafio da divulgação e expansão da QV no Brasil está na educação, desde a educação básica a graduação, para se acompanhar os progressos internacionais na área<sup>49</sup>.

Em termos de publicação em periódicos mundiais, a contribuição do Brasil é de 3%, sendo que os Estados Unidos apresentam maior porcentagem com 48%. No Brasil, há cerca de 20 grupos de pesquisas na área de QV em instituições de ensino superior e centros de pesquisas que atuam em diferentes áreas, tais como educação, síntese, catálise, biocatálise, entre outros. Grupos de pesquisa com denominação da QV consolidados são, por exemplo, o Grupo de Pesquisa em Química Verde e Ambiental - da Universidade de São Paulo - USP (criado em 2003) e de Química Verde Coloidal e Macromolecular - da Universidade Federal de Viçosa - UFV (criado em 1999)<sup>50</sup>.

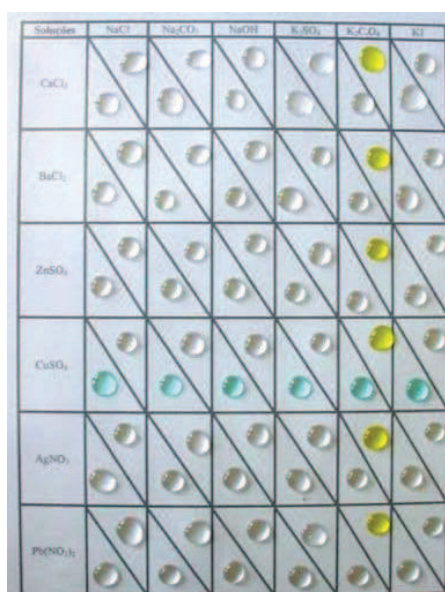
Anualmente na USP é realizada a Escola de Verão em Química Verde, cujo foco é proporcionar aos alunos de graduação uma visão geral da Química Verde e sua importância na solução de problemas ambientais. A Escola de Química Verde do IQ-USP foi criada no início de 2006, por iniciativa dos professores Leandro Helgueira Andrade, Reinaldo Camino Bazito e Renato Sanches Freire, que notaram uma grande demanda nessa área<sup>51</sup>.

Desde 2002, pela iniciativa dos professores da Universidade Federal de Pelotas, tem se no Brasil o *site*: [www.ufpel.tche.br/iqg/wwverde/](http://www.ufpel.tche.br/iqg/wwverde/), intitulada como a página de divulgação da Química Verde no Brasil, que traz os temas: O que é Química Verde, os 12 princípios, pesquisa, educação, indústria, Brasil, artigos e *links*. Trazendo informações sobre o tema, iniciativas de pesquisadores e empresas, no Brasil, artigos para consulta e *links* sobre organizações governamentais, organizações não governamentais, periódicos e recursos didáticos<sup>52</sup>.

Outro fator importante foi a publicação brasileira do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos do Distrito Federal, cujo objetivo é integrar os esforços que alguns programas já

vêm desenvolvendo de forma isolada no país, tendo em vista a promoção da Química Verde no Brasil no período de 2010-2030. A proposta prioriza os temas: as biorrefinarias (pelas rotas termoquímicas e bioquímicas), a alcoolquímica, a oleoquímica, a sucroquímica, a fitoquímica, a conversão de CO<sub>2</sub>, os bioprodutos, bioprocessos e biocombustíveis e as energias alternativas. Caracterizando-se como uma estratégia de desenvolvimento sustentável nacional, nas áreas da Biologia, Química e Engenharia Química<sup>53</sup>.

No curso de Química da UNICENTRO, também há iniciativas de professores que desenvolvem atividades experimentais em microescala. Na disciplina de Química Geral Experimental, são realizadas diversas reações de precipitação, e com o objetivo de otimizar e reduzir a quantidade de reagentes, no procedimento em microescala, mostrado na Figura 6, o experimento é realizado em uma folha dividida em várias células envolta por uma capa plástica transparente. Em cada uma das células são gotejadas as soluções aquosas dos compostos e em seguida são misturadas com auxílio de um bastão, observando se há ou não a formação do precipitado<sup>54</sup>.



**Figura 6.** Experimento em microescala para reações de precipitação<sup>54</sup>.

Nesta metodologia, as quantidades utilizadas de soluções são bastante reduzidas, enquanto que no experimento tradicionalmente executado essas reações são realizadas em béquer ou tubo de ensaio, o que requer uma quantidade maior de reagentes.

Os exemplos citados acima mostram que gradualmente tem aumentado o interesse em estudar e adequar metodologias que envolvem a QV.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Química Analítica Qualitativa

As aulas experimentais de Química Analítica Qualitativa são realizadas pelos cursos de Química, Farmácia, Engenharia de Alimentos e Agronomia. Durante as aulas são realizadas as determinações experimentais do grupo de ânions e cátions<sup>55</sup>.

Grupos de cátions:

- Primeiro Grupo de cátions, grupo da prata ( $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Hg}_2^{2+}$  e  $\text{Pb}^{2+}$ )
- Segundo Grupo de cátions, grupo do cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$  e  $\text{Pb}^{2+}$ )
- Análise do Grupo do arsênio ( $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{Sb}^{3+}$  e  $\text{Sn}^{2+}$ )
- Terceiro Grupo de cátions ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$ )
- Análise do Grupo 3B ou subgrupo do zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$ )
- Quarto Grupo de cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  e  $\text{Ba}^{2+}$ )
- Quinto Grupo de cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$ )

Grupos de ânions:

- Primeiro Grupo de ânions ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{AsO}_4^{3-}$ )
- Segundo Grupo de ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SCN}^-$ ,  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$  e  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ )
- Terceiro Grupo de ânions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{MnO}_4^-$ ,  $\text{H}_3\text{CCOO}^-$  e  $\text{ClO}_3^-$ )

As turmas são compostas em média de 15 a 20 alunos. O número de turmas do ano de 2011 estão mostradas na Tabela 3.

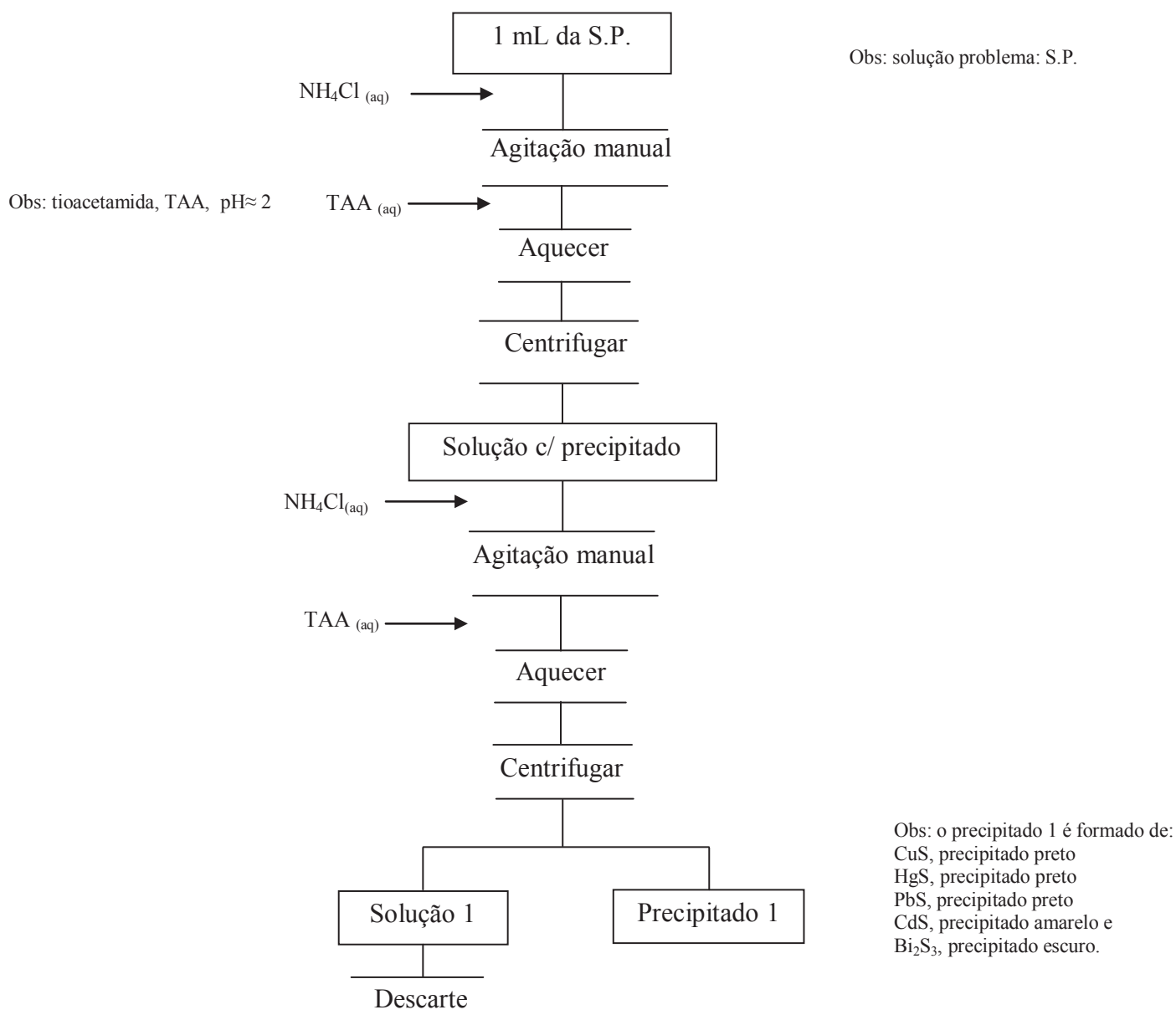
**Tabela 3.** Número de turmas por curso da disciplina de Química Analítica Qualitativa.

| Curso                   | Número de turmas | Total de alunos |
|-------------------------|------------------|-----------------|
| Química                 | 5                | 88              |
| Farmácia                | 2                | 35              |
| Engenharia de Alimentos | 2                | 35              |
| Agronomia               | 5                | 88              |

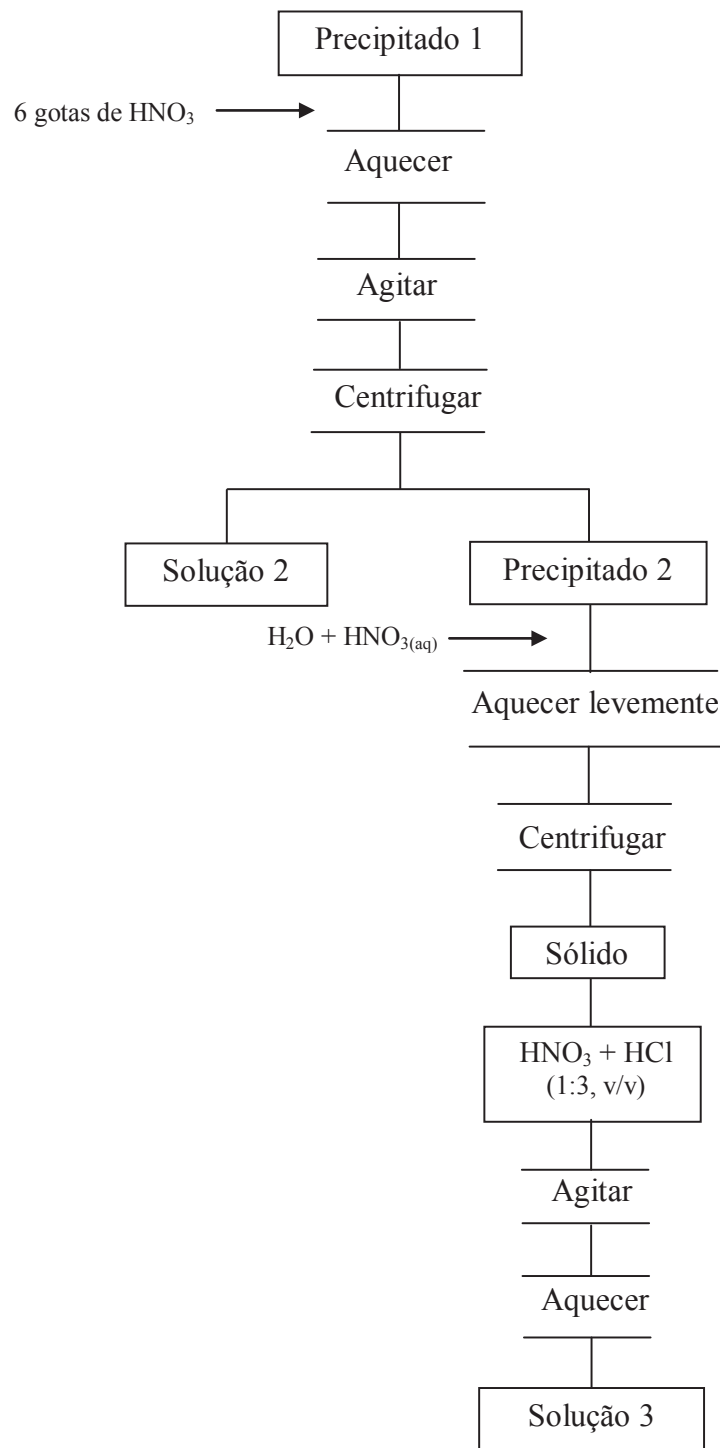
Com a finalidade de se minimizar a quantidade de resíduos gerados e a utilização de substâncias consideradas tóxicas, como os metais pesados, realizou-se o procedimento do grupo do cobre, já que esse grupo é o que contém a maior quantidade de metais pesados ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$  e  $\text{Pb}^{2+}$ ) quando comparado com os demais grupos de cátions e ânions.

O roteiro experimental do grupo do cobre está descrito nos fluxogramas 1 a 8. Como forma de se trabalhar de forma diferenciada com esse grupo, o experimento foi realizado da mesma maneira que nas aulas, no entanto, todas as etapas foram fotografadas e foi criada uma apresentação em slides, o que possibilita demonstrar e discutir passo-a-passo cada uma das particularidades do experimento com os alunos da graduação.

#### 4.1.1 Determinação Analítica do Grupo do Cobre



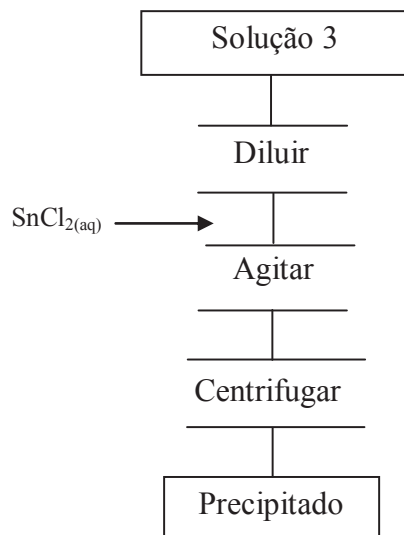
**Fluxograma 1.** Análise do segundo grupo de cátions grupo do cobre (constituído por: Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Bi<sup>3+</sup> e Pb<sup>2+</sup>).



Obs: a solução 2 pode conter os íons:  
 $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  e  $\text{Bi}^{3+}$ .  
 O precipitado 2 contém  $\text{HgS}$ .

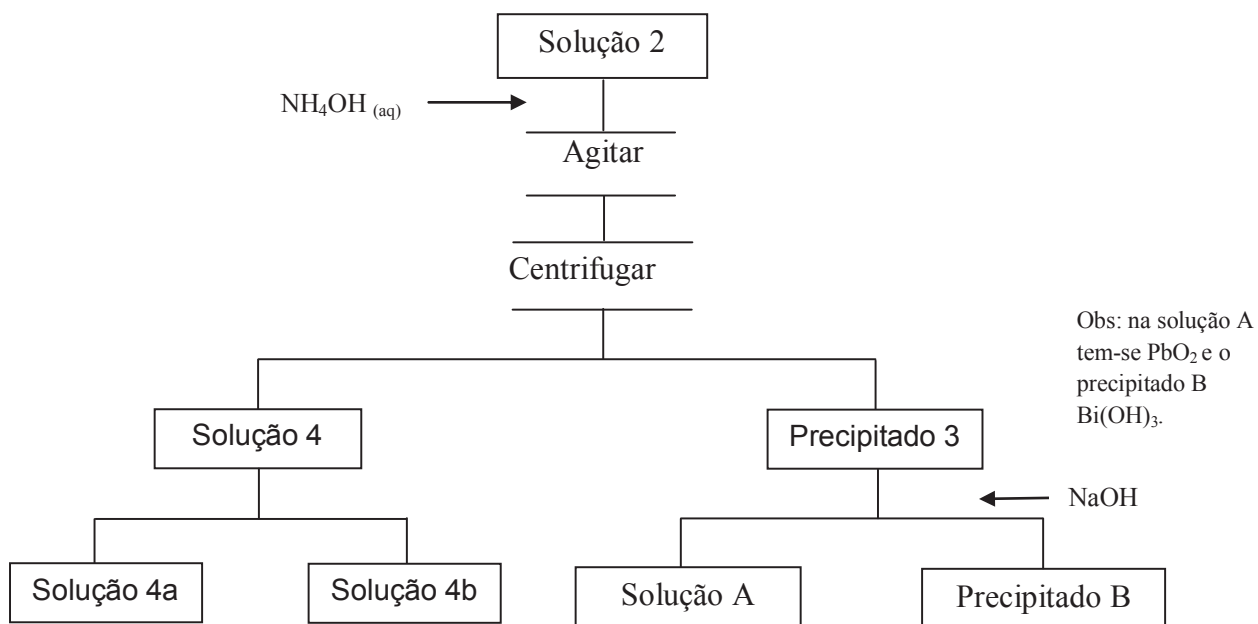
Obs: a solução 3  
 Contém o íon  $\text{Hg}^{2+}$ .

**Fluxograma 2.** Separação do íon  $\text{Hg}^{2+}$ .



Obs: precipitado branco ou cinza identifica MERCÚRIO (II).

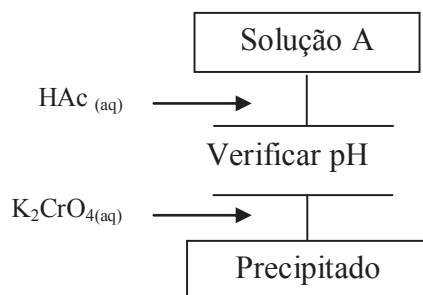
**Fluxograma 3.** Identificação do íon  $\text{Hg}^{2+}$ .



Obs: na solução A tem-se  $\text{PbO}_2$  e o precipitado B  $\text{Bi(OH)}_3$ .

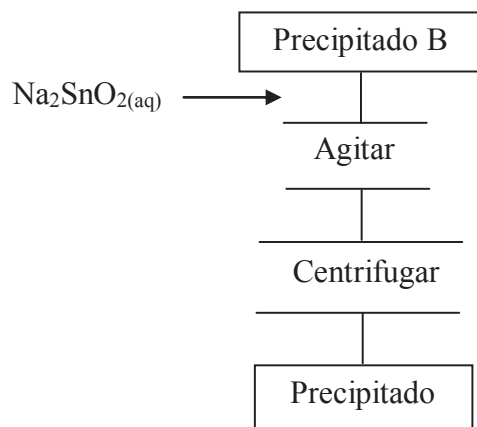
**Fluxograma 4.** Separação dos íons  $\text{Bi}^{3+}$  e  $\text{Pb}^{2+}$  de  $\text{Cu}^{+2}$  e  $\text{Cd}^{+2}$ .

Obs: adicionar HAc (ácido acético) até pH ácido.



Obs: Precipitado amarelo indica CHUMBO.

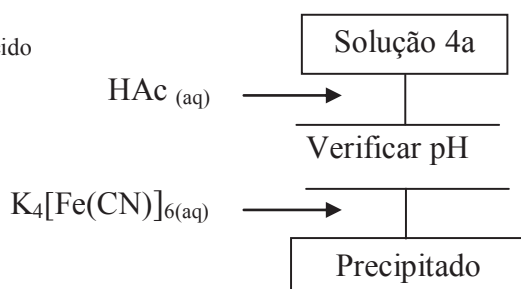
**Fluxograma 5.** Identificação do íon  $Pb^{2+}$ .



Obs: precipitado preto indica BISMUTO.

**Fluxograma 6.** Identificação do íon  $Bi^{3+}$ .

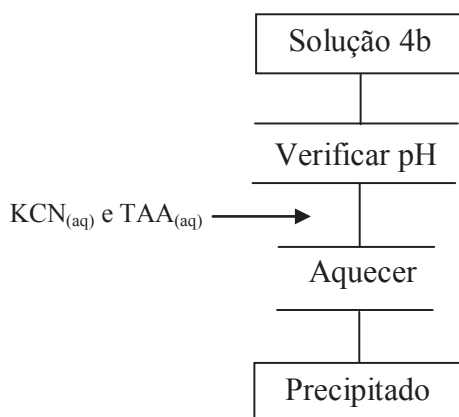
Obs: adicionar HAc (ácido acético) até pH ácido.



Obs: precipitado vermelho indica COBRE.

**Fluxograma 7.** Identificação do íon  $Cu^{2+}$ .

Obs: os cianetos não podem ser adicionados a soluções ácidas, pois formam ácido cianídrico.



Obs: precipitado amarelo indica CÁDMIO.

### Fluxograma 8. Identificação do íon $\text{Cd}^{2+}$ .

#### 4.2. Química Orgânica Experimental

As aulas experimentais de Química Orgânica são realizadas por alunos dos cursos de Química, Farmácia e Engenharia de Alimentos. Os experimentos realizados estão listados abaixo<sup>56</sup>:

- Determinação do ponto de ebulição, ponto de fusão e índice de refração;
- Destilação fracionada;
- Solubilidade de compostos orgânicos;
- Recristalização de um composto orgânico;
- Determinação Qualitativa de carbono, hidrogênio, nitrogênio, halogênio e enxofre;
- Extração com solventes quimicamente ativos;
- Determinação da concentração de glicose e sacarose utilizando um polarímetro;
- Preparação do cicloexeno a partir do cicloexanol;
- Nitração do benzeno e da acetanilida;
- Preparação da acetona a partir do álcool isopropílico;
- Preparação do éter n-butílico;
- Preparação do brometo de isopropila;
- Preparação do fenol a partir da anilina;
- Preparação do ácido adípico a partir do cicloexanol;
- 2,4,6 – tribromoanilina;



- Resina de fenol-formol;
- P-nitroanilina;
- Preparação do iodeto de sec-butila;
- Salicilato de metila;
- Confirmação das funções aldeído e cetona por ensaios via úmida;
- Síntese da benzanilida;
- Preparação da acetanilida;
- Benzoato de metila;
- Uréia e formol: uma sólida união;
- Síntese e caracterização da dibenzalacetona;
- Preparação e caracterização de butanal.

A Tabela 4 apresenta o número de turmas do ano de 2011, as turmas são compostas em média de 15 a 20 alunos.

**Tabela 4.** Número de turmas por curso da disciplina de Química Orgânica.

| <b>Curso</b>            | <b>Número de turmas</b> | <b>Total de alunos</b> |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Química                 | 4                       | 70                     |
| Farmácia                | 2                       | 35                     |
| Engenharia de alimentos | 2                       | 35                     |

Como forma de substituir reagentes considerados nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, propõe-se a substituição do agente oxidante no experimento de síntese do butanal, pois no roteiro experimental é utilizada a mistura sulfocrômica ( $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$ ) que contém cromo VI. Para isso, propõem-se duas metodologias sendo consideradas menos agressivas como:

- 1) Permanganato de potássio e ácido sulfúrico (item 4.2.1.);
- 2) Hipoclorito de sódio e ácido acético (item 4.2.2.).

Como na Química Orgânica Experimental é comum de se avaliar os rendimentos das reações químicas em porcentagem, propõe-se também o cálculo de rendimento considerando a eficiência atômica da reação que contempla o princípio 2 da QV. Para demonstrar o cálculo da eficiência atômica foi utilizado como exemplo o experimento de nitração da acetanilida (item 4.2.3), já que esta reação ocorre com bom rendimento em porcentagem e pode-se comparar com o rendimento em termos de eficiência atômica.

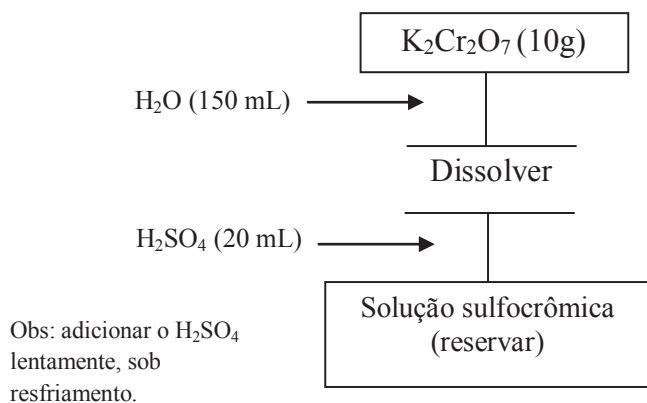
Realizou-se também dois experimentos em microescala: a síntese da acetanilida e da dibenzalacetona (item 4.2.4), mostrando que os produtos são obtidos mesmo reduzindo as quantidades de reagentes utilizados.

#### 4.2.1. Preparação e Caracterização do Butanal

Buscando substituir reagentes considerados nocivos fez-se a troca da solução sulfocrômica pela sulfopermangânica, para o experimento de síntese do butanal<sup>57</sup>.

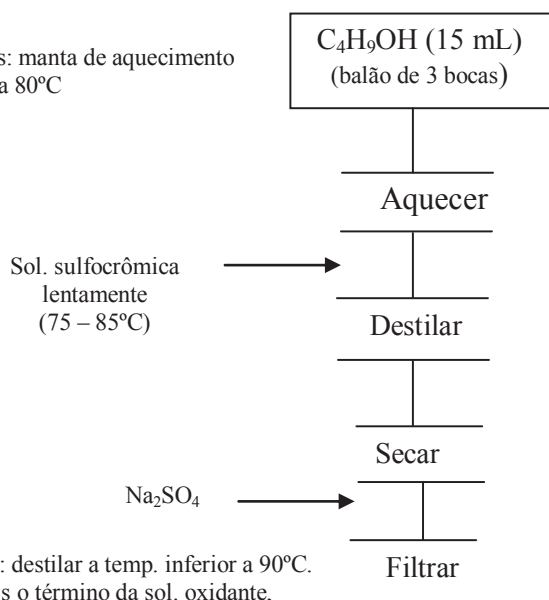
O procedimento usual emprega como agente oxidante do butanol a mistura  $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$  (fluxograma 9), enquanto para a nova metodologia proposta sugere-se o uso da mistura  $KMnO_4/H_2SO_4$  (fluxograma 10).

PROCEDIMENTO  
EXPERIMENTAL USUAL



Obs: adicionar o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  lentamente, sob resfriamento.

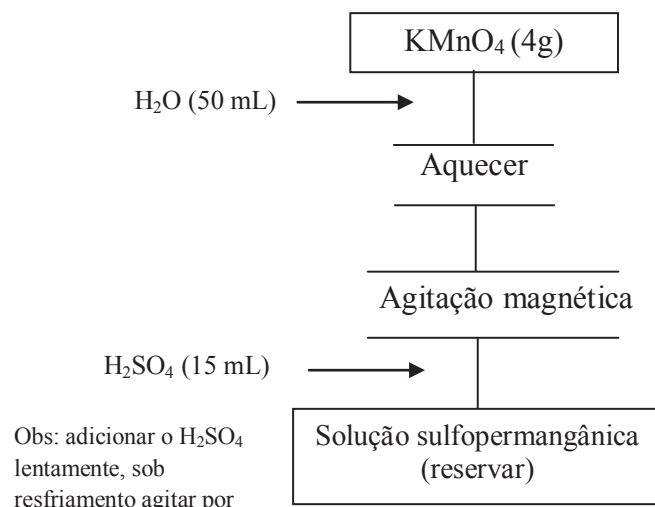
Obs: manta de aquecimento 75 a 80°C



Obs: destilar a temp. inferior a 90°C. Após o término da sol. oxidante, manter aquecimento e refluxo por 30 – 40 min.

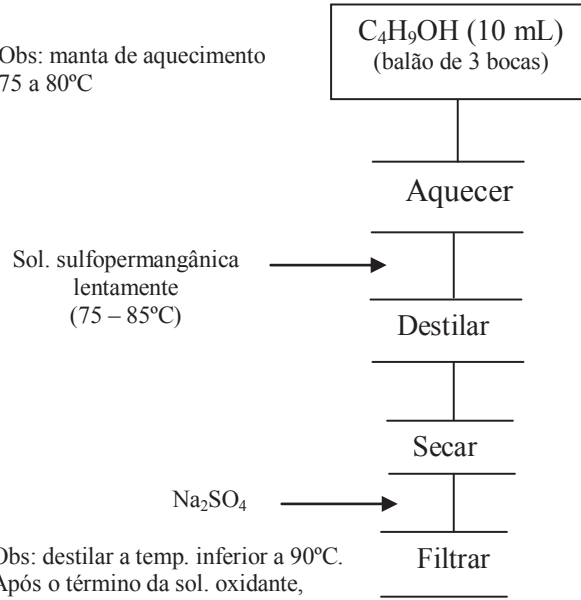
**Fluxograma 9.** Procedimento experimental usual para preparação do butanal<sup>56</sup>.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL  
NOVA METODOLOGIA



Obs: adicionar o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  lentamente, sob resfriamento agitar por

Obs: manta de aquecimento 75 a 80°C



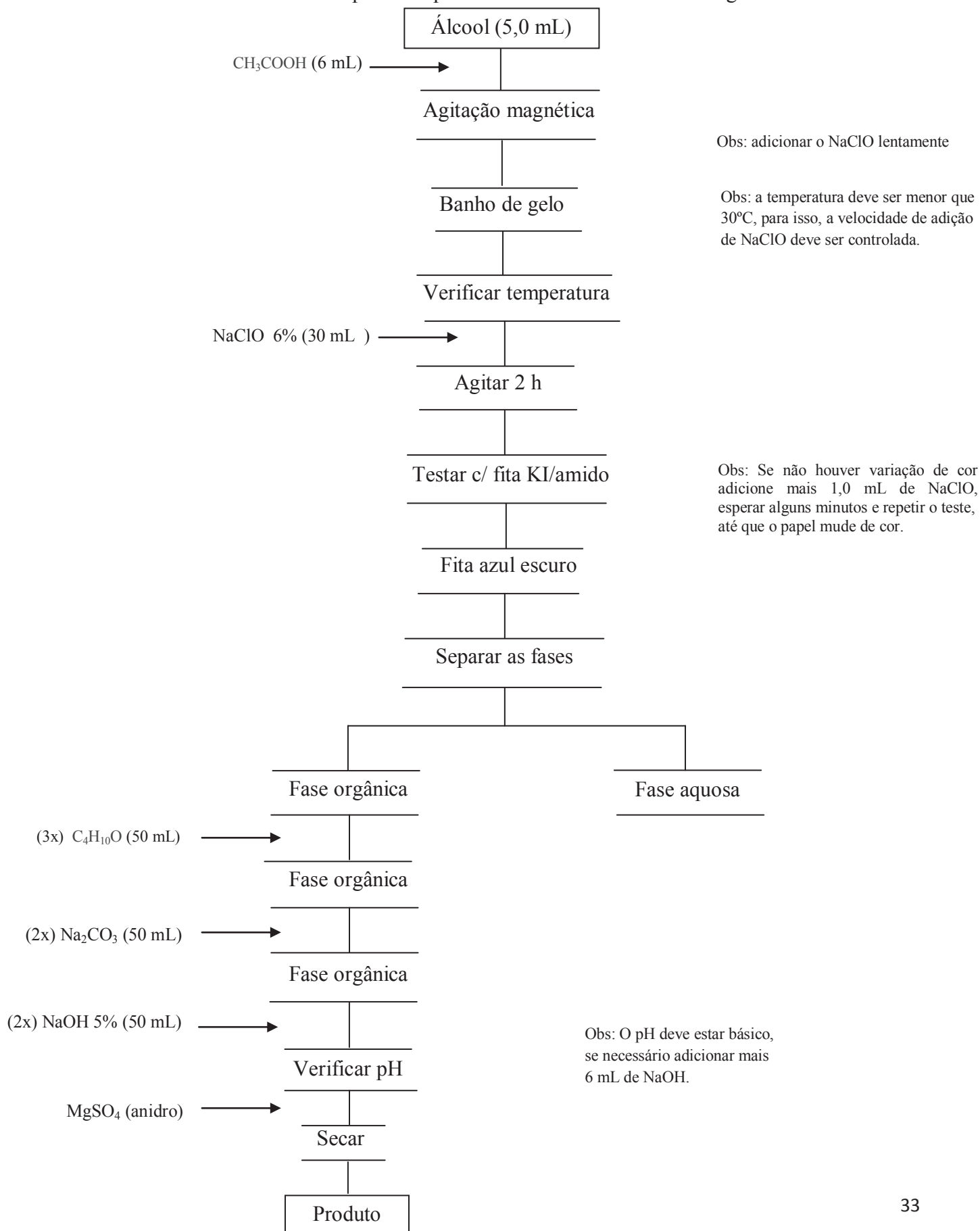
Obs: destilar a temp. inferior a 90°C. Após o término da sol. oxidante, manter aquecimento e refluxo por 30 – 40 min.

**Fluxograma 10.** Procedimento experimental com nova metodologia para preparação do butanal.

#### 4.2.2. Uso de agentes oxidantes “verdes”

A mistura hipoclorito de sódio e ácido acético é empregada como agente oxidante para álcoois primários e secundários<sup>57</sup>, em substituição da mistura sulfocrômica,

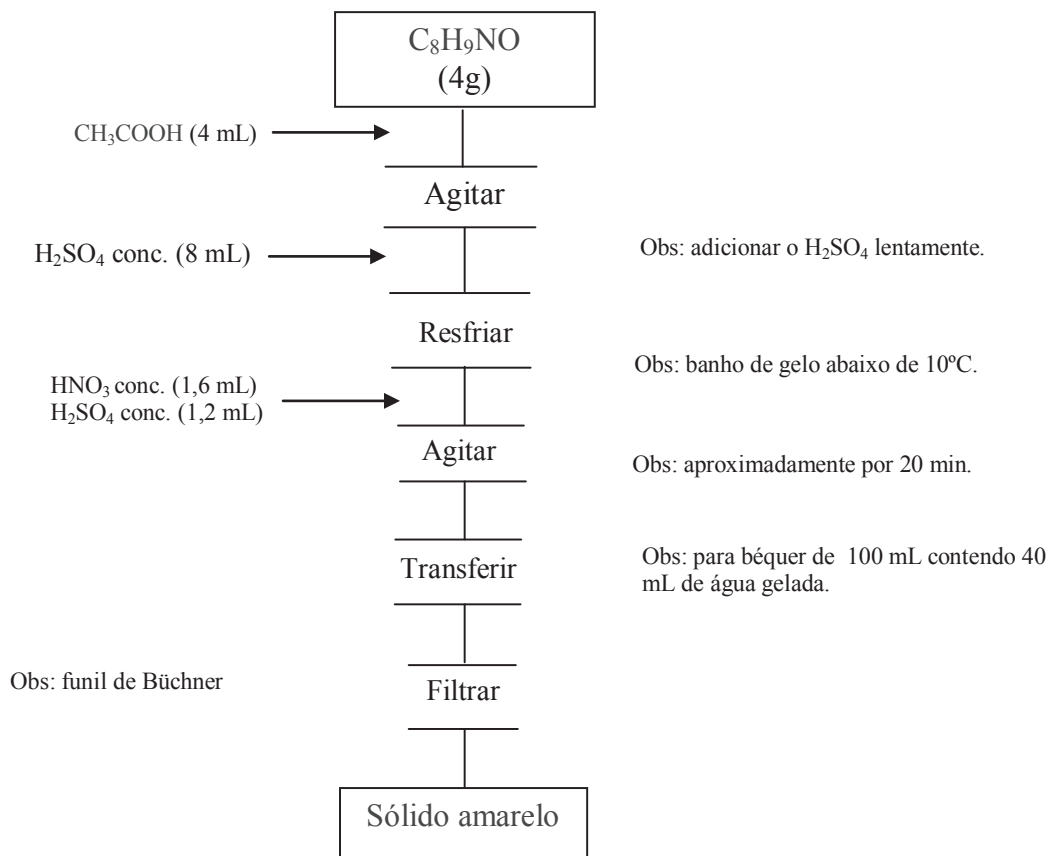
contemplando os princípios 1, 3, 4, 5, 6 e 12 da QV. No experimento foram utilizados o 1-butanol e o 2-butanol. As etapas do experimento são mostradas no fluxograma 11.



**Fluxograma 11.** Oxidação de álcoois com hipoclorito de sódio<sup>57</sup>.

### 4.2.3. Nitração da Acetanilida: Cálculo da Eficiência Atômica

Para se aplicar o cálculo da eficiência atômica da reação utilizou-se como exemplo o procedimento experimental da nitração da acetanilida como mostrado no fluxograma 12.

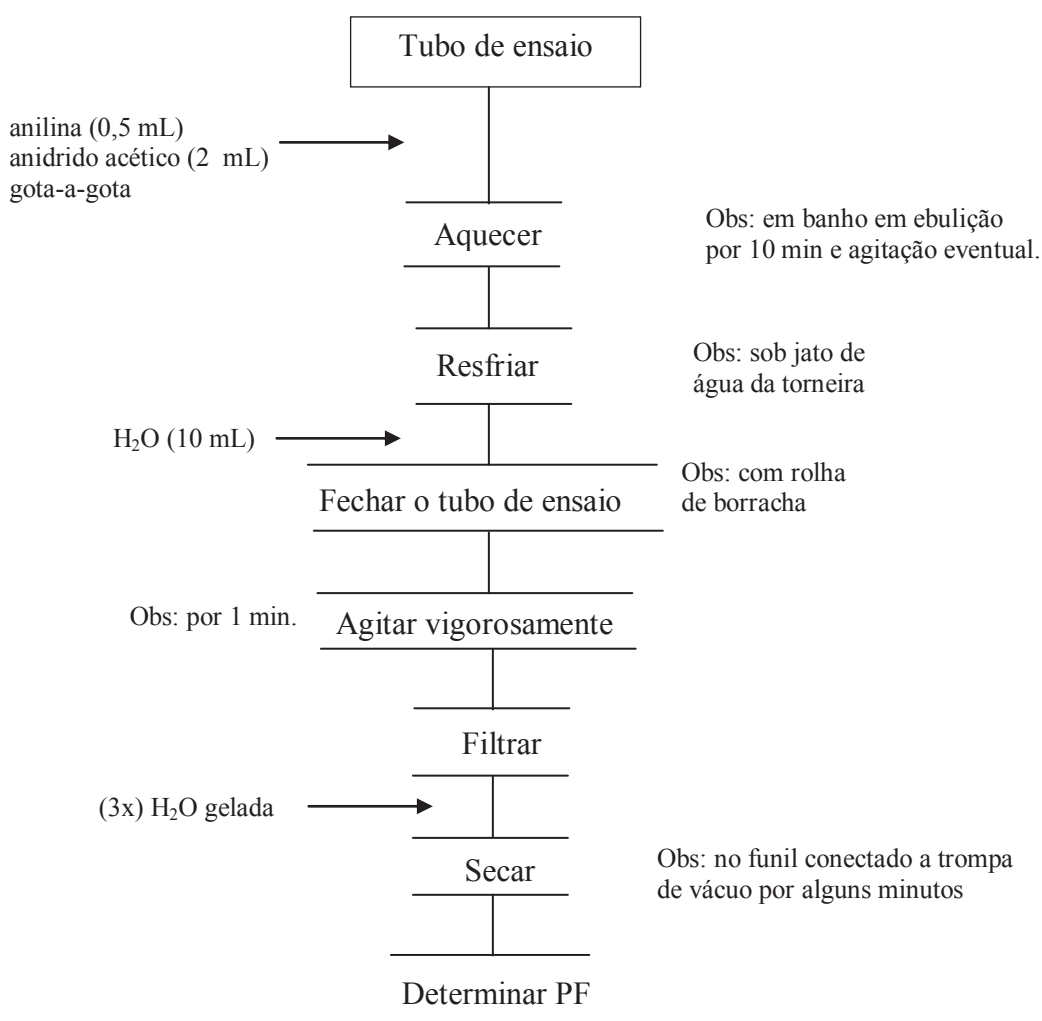


**Fluxograma 12.** Procedimento experimental usual para nitração da acetanilida<sup>47</sup>.

#### 4.2.4. Experimentos em Microescala

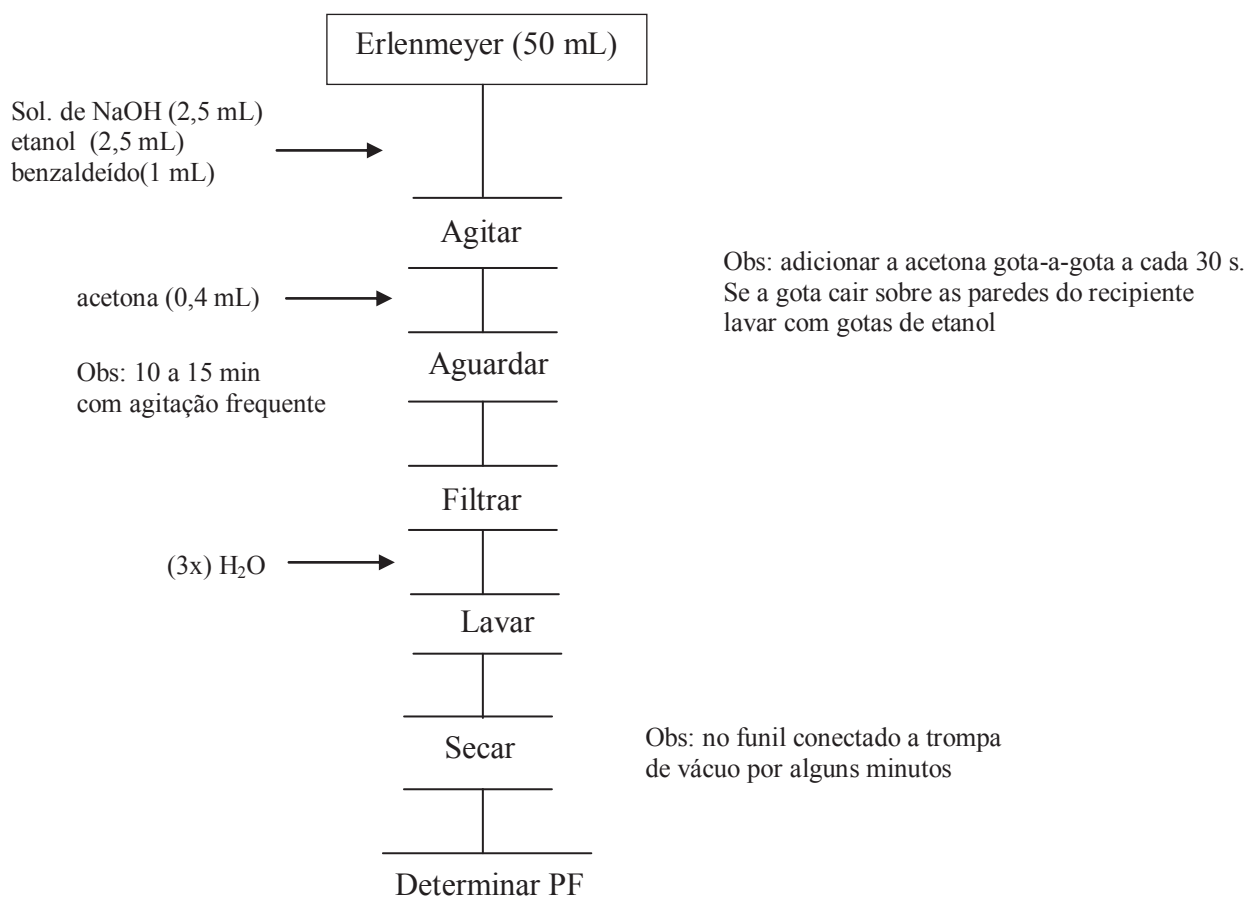
São apresentados dois procedimentos experimentais para a obtenção de dois produtos que são usualmente sintetizados na disciplina de Química Orgânica Experimental, no entanto o procedimento apresentado utiliza escalas reduzidas para a obtenção da dibenzalacetona e a acetanilida.

##### 1) Síntese da Acetanilida



**Fluxograma 13.** Procedimento experimental para a obtenção da acetanilida<sup>58</sup>.

## 2) Síntese da dibenzalacetona



**Fluxograma 14.** Procedimento experimental para a obtenção da dibenzalacetona<sup>58</sup>.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho os conceitos da QV foram aplicados em diferentes atividades experimentais desenvolvidas no curso de Química. Na disciplina de Química Analítica foi proposta metodologia alternativa para o experimento de determinação analítica do grupo do cobre e para a disciplina de Química Orgânica aplicou-se novas metodologias para o experimento de preparação do butanal, experimentos em microescala para as sínteses da acetanilida e da dibenzalacetona e sugeriu-se também a aplicação do cálculo de Eficiência Atômica para o experimento de nitração da acetanilida e que pode ser aplicado aos demais experimentos.

### 5.1. Determinação Analítica do Grupo do Cobre

O objetivo ao se trabalhar com a Química Analítica foi propor uma metodologia alternativa para estudo de um dos grupos, em especial, o grupo do cobre. No curso de Química não são abordadas as questões de tratamento, gerenciamento e a prevenção da formação de resíduos. A única disciplina do currículo que trata sobre as questões ambientais é a Química Ambiental.

Diversos grupos são analisados pelos alunos da graduação durante as aulas experimentais, no entanto, no experimento do grupo do cobre (cobre, mercúrio, chumbo, cádmio e bismuto) é o que contém maior quantidade de metais considerados tóxicos denominados de metais pesados, sendo o bismuto considerado o menos tóxico<sup>56</sup>.

Portanto, o descarte dos resíduos deste grupo é considerado um grave problema ambiental, por esse motivo, foi proposto uma atividade fundamentada nos princípios da QV. As etapas envolvidas (adição de reagentes, aquecimento, centrifugação, separação e formação de produtos) são mostradas nos fluxogramas 1 a 8 (p. 25 a 29), foram fotografadas passo-a-passo e elaborado uma apresentação em slides (apêndice 1).

Estes slides foram elaborados envolvendo todas as etapas do experimento, enfocando a adição e função dos reagentes em cada etapa, a separação das fases líquidas e sólidas, evidenciando as cores dos sólidos formados que servem para identificar as substâncias presentes na amostra.



Esta proposta pode ser aplicada em substituição, especificamente, na etapa referente a execução experimental do grupo do cobre, e os demais experimentos devem ser executados normalmente, pois os resíduos gerados não são considerados nocivos, como por exemplo, na identificação de grupos que contém os íons  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , entre outros. Portanto, os alunos não deixarão de vivenciar as práticas de laboratório e não haverá o comprometimento da aprendizagem.

Essa nova metodologia foi apresentada para uma turma de 36 alunos do 2º ano na disciplina de Química Analítica do curso de Química. Após, a execução desta atividade, foi aplicado um questionário, com cinco questões que estão apresentadas no apêndice 2, para que os alunos avaliassem a nova metodologia. Esse questionário objetivou abordar o tema Química Verde, conhecer a concepção dos licenciandos sobre a geração e descarte de resíduos e sugestões pertinentes no desenvolvimento das aulas experimentais.

Os resultados coletados foram avaliados com seleção de algumas respostas dos alunos sobre a atividade.

Na questão referente a nova metodologia, apresentação por slides, sobre o experimento envolvendo o grupo do cobre, os alunos afirmaram que a nova proposta é válida para se trabalhar com esse grupo de metais, e alguns destacaram que houve melhor compreensão do conteúdo, como pode ser visto nas respostas apresentadas a seguir:

“Muito interessante, uma forma inovadora visando a economia, mostrando que não há necessidade de desperdiçar muito reagente e com uma porcentagem de aprendizado igual ou até melhor que o outro método”.

“Esse novo método de apresentação é ótimo para a redução da utilização desses metais pesados que quando descartados de maneira errada podem prejudicar nós mesmos”.

“Bom, pois assim acabamos prestando mais atenção, aprendendo melhor como ocorrem as reações, porque ao fazer os experimentos acaba dando tumulto no laboratório, estragando reagentes e simplesmente seguindo o roteiro sem saber direito como fazer certos passos”.

“O conteúdo apresentado dessa nova maneira diminui o uso de reagentes, e é de forma mais explicativa a identificação de cada substância”.

“Considerando a parte ambiental, é uma boa forma de apresentar o conteúdo, pois evita a grande quantidade de resíduos contendo metais pesados que precisam ser descartados depois”.

“ Achei a nova metodologia interessante, pois quando ocorrem danos ao meio ambiente isso prejudica a nós mesmos, pois se resíduos são jogados no solo podem prejudicar as plantas, animais e água, que pode chegar a nós e prejudicar a nossa saúde”.

“Não podemos pensar só em nós, sempre tem que inovar, está sendo tão falado em meio ambiente, poluição. Nós como químicos responsáveis temos o dever de criar novos métodos para pelo menos diminuir os resíduos do meio ambiente ”.

Observando as respostas dadas nota-se que existe a preocupação com o meio ambiente e com a existência da espécie humana, houve também respostas em que os químicos assumiram as responsabilidades para resolverem os problemas ambientais, este é um aspecto importante, visto que existe a necessidade da Química se preocupar com os problemas ambientais, de acordo com Auler<sup>59</sup>, isso demonstra a superação de uma visão neutra de ciência. Pois, as atividades químicas também são responsáveis pelos problemas ambientais, no entanto a solução dos problemas não depende apenas dela, pois existem outros fatores que influenciam nesta problemática, logo não se pode atribuir individualmente aos profissionais a exclusiva responsabilidade pelas causas e soluções dos problemas ambientais acaba por secundarizar a imensa responsabilidade do sistema produtivo-industrial, político e econômico<sup>59</sup>.

Marques e colaboradores<sup>60</sup> complementam afirmando que, quando ocorre essa fragmentação do entendimento das causas e das possíveis soluções aos problemas ambientais pode haver uma compreensão superficial e reducionista de meio ambiente, que dificulta ainda mais a incorporação dessa temática pela química, seja do ponto de vista epistêmico ou pedagógico.

Quanto a questão referente as vantagens da nova metodologia aplicada para a identificação do grupo do cobre, os alunos apontaram a menor geração de resíduos, economia de reagentes, diminuição da poluição, afirmaram que com a nova metodologia o conteúdo se tornou mais claro e destacaram a diminuição do risco de acidentes, evidenciando que eles

compreenderam o objetivo do procedimento e a desvantagem, segundo eles, é a ausência de aula experimental.

“Como estamos aprendendo, podemos errar no experimento ocasionando perigo ou tendo que gastar mais reagentes e com esse novo método não há estes perigos.”

“A vantagem é que reduzimos os metais pesados no meio ambiente. A desvantagem é a falta ou prática em laboratório com reagentes mais perigosos ou não realização de práticas e identificação”.

“A vantagem é que não há tumulto no laboratório, devido ao grande número de alunos, e a desvantagem é que os alunos ficam mais acomodados, e é bom saber como lidar corretamente com os reagentes principalmente os tóxicos”.

“As vantagens são a economia de descartes nocivos ao corpo humano e para a natureza. Também desperta dúvidas ao aluno quanto ao que precipitou e porque precipitou, as desvantagens são que você esquece quais os procedimentos necessários para agir no laboratório”.

“Vantagem: diminui o uso de reagentes dos grupos mais perigosos, traz mais ênfase na identificação. Desvantagem: o aluno perde a parte prática”.

“Vantagens: diminuir soluções com metais pesados, que no caso da universidade armazena e não há um projeto de tratamento”. “Desvantagem: os alunos não iriam absorver o conteúdo como na prática”.

Quando perguntado sobre a preferência de metodologia, a atual ou o novo método os alunos mostraram-se receptivos a, para somente esse grupo de cátions, substituir a aula experimental por uma aula teórica, mostrando que apesar deles gostarem de realizar os procedimentos em laboratório, eles deixariam de fazê-lo por um bom motivo, isso demonstra sua consciência sobre as questões ambientais.

“O método atual é mais divertido, mais interessante, mas por uma boa causa eu trabalharia tranquilamente com o método alternativo”.

“O método alternativo, método atual é confuso, enquanto o método alternativo tem imagens, assim podemos analisar se o próprio procedimento realizado coincide com as imagens”.

“O atual é bom, porém, estabelecendo-se a filosofia da Química Verde, é de muita valia se estudar e aplicar métodos alternativos que visem a preservação”.

“Para esse grupo o método alternativo, pois devemos nos preocupar com o meio ambiente, a nossa qualidade de vida depende disso. Porém gosto do método atual, pois considero que a prática é muito interessante”.

“Geralmente, a aula se torna mais proveitosa quando realizada a aula prática. Porém, o método alternativo preza pelo meio ambiente. Como os outros grupos podem ser trabalhados da forma tradicional, seria bom trabalhar com o grupo de metais pesados da forma com foi apresentado, evitando a geração de resíduos”.

“Com o método atual as aulas são mais divertidas, mas com o método alternativo é mais ecologicamente correto”.

“Eu prefiro o atual, mas quando se trata de metais pesados e pela consciência que tenho de poluição, o método alternativo é válido”.

“Eu prefiro o método atual... em minha opinião com a prática se facilita o aprendizado, mas claro que há casos, quando for um grupo de metais pesados como o grupo A de cátions poderia optar pelo método alternativo”.

Pela avaliação dos alunos, a metodologia alternativa teve boa receptividade, observou-se que a inserção de novas metodologias incentiva o aluno a refletir sobre questões ambientais, como a geração e gestão de resíduos, levando-os a pensarem sobre formas alternativas para tratar essa questão, sem que suas ações fiquem restritas ao roteiro experimental, desenvolvendo assim o seu senso crítico.

Quando foi solicitadas sugestões para se trabalhar os grupos dos cátions e ânions, citados no item 4.1 (p.24), os alunos citaram que o professor ou um dos grupos de alunos poderia realizar o experimento e apresentar para o restante da turma, trabalhar os

experimentos que utilizam reagentes de maior toxicidade somente de forma teórica, e ainda propuseram a utilização de reagentes menos nocivos e citando a gestão de resíduos como uma forma de diminuir os impactos ambientais.

“Seria interessante se cada grupo de alunos pegasse um grupo de cátions e ânions e fizesse uma aula e apresentasse para o restante da turma”.

“Deve-se trabalhar teoricamente com os grupos que são julgados mais perigosos”.

“Para cuidar do meio ambiente sugiro que alguns grupos façam o experimento e os outros observem, pois assim, aprendemos a trabalhar de forma segura no laboratório e não trabalhamos somente de forma teórica”.

“Para os grupos que tenham elementos tóxicos, além de ser trabalhados dessa forma (como foi proposto), poderia ser realizado apenas um experimento demonstrativo, pelo professor, ou por um grupo de alunos”.

Como sugestões para o descarte de resíduos contendo metais pesados, vários alunos citaram o tratamento, gerenciamento e a prevenção como formas de reduzir a sua formação como pode ser observado nos comentários abaixo:

“ Devíamos tratar e recuperar os descartes gerados nos laboratórios”.

“ Métodos alternativos e eficientes que visem a diminuição do descarte de metais pesados no ambiente são válidos, pois ajudam na preservação do meio ambiente... ”

“É extremamente importante que se faça o descarte correto destes resíduos, ou encontre uma finalidade para eles, e é de nossa responsabilidade cuidar para que isto seja feito de maneira correta”.

Com relação as sugestões dos alunos quanto ao descarte de resíduos tóxicos, existem diversas discussões sobre a formação de resíduos em 2000 e 2001, por exemplo, a Sociedade Brasileira de Química promoveu durante a 23<sup>a</sup> e a 24<sup>a</sup> Reunião Anual, oficinas sobre

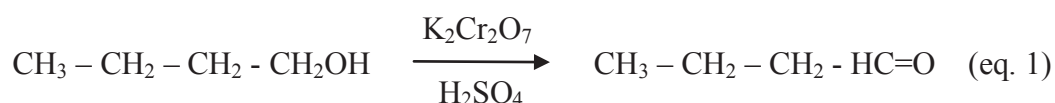
“Gerenciamento e Tratamento de resíduos químicos”. Como forma de alertar sobre a responsabilidade das universidades na geração, tratamento e descarte de resíduos químicos, influenciando a incorporando as questões ambientais em Cursos de Graduação em Química. Inclusive foram criados nas universidades programas de gerenciamento, minimização e adequada destinação de seus resíduos<sup>61</sup>.

Segundo Abreu<sup>62</sup>, no Campus da USP de Ribeirão Preto, foi criado em 2001 um Programa de Gerenciamento de Resíduos. A partir de discussões sobre resíduos químicos algumas disciplinas, como a Química Analítica Qualitativa, reformulou o seu programa, buscando eliminar os excessos, etapas repetitivas, e incluir discussões sobre toxicidade e tratamento de alguns resíduos. Foi também, instituído disciplinas como “Tratamento de Resíduos Químicos”, “Noções de Segurança em Laboratórios de Química” e “Química Ambiental”, como forma de despertar nos alunos a responsabilidade com relação ao meio ambiente<sup>62</sup>.

## 5.2. Preparação e Caracterização do Butanal

No experimento realizado ocorre a oxidação do butan-1-ol a butanal conforme mostrado na equação 1. As reações de oxidação de álcoois são executadas, geralmente, com a utilização da mistura de dicromato de sódio ou de potássio e ácido sulfúrico<sup>57</sup> (equação 2).

1) Metodologia usual : Oxidação do butanol a butanal utilizando  $K_2Cr_2O_7/H_2SO_4$



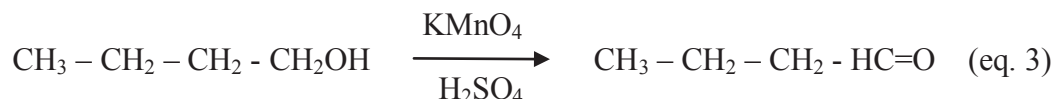
Reação química da solução sulfocrômica



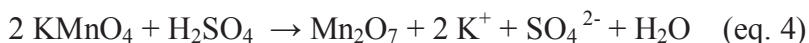
Na realização do experimento de preparação do butanal optou-se pela substituição da mistura sulfocrômica que possui o cromo VI que representa comprovadamente produz câncer e é extremamente nocivo ao meio ambiente<sup>63</sup> pela sulfopermangânica composta por permanganato de potássio e ácido sulfúrico (equação 3 e 4<sup>64</sup>), mostrados nos fluxogramas 9 e 10 (p.32).

O permanganato de potássio em meio ácido é considerado um forte agente oxidante, mais forte até que o dicromato de potássio, o potencial de redução do permanganato é igual a +1,52 V (vs. EPH) enquanto o dicromato é de +1,33V (vs. EPH)<sup>64</sup>.

2) Metodologia mais ‘verde’: Oxidação do butanol a butanal utilizando  $\text{KMnO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$



Reação química da solução sulfopermangânica



Todos os permanganatos são solúveis em meio ácido, formando soluções de cor violeta avermelhada. Em soluções ácidas, a redução ocorre até a formação de íons manganês (II) incolores, como mostrado na equação 5. Na presença de ácido sulfúrico, ocorre redução do permanganato instantaneamente<sup>64</sup>.

Redução do permanganato



Para se caracterizar os produtos obtidos fez-se o teste de Tollens que serve para identificar os aldeídos, pela formação do espelho de prata. No teste o aldeído reduz a solução de nitrato de prata amoniacal (nitrato de prata e hidróxido de sódio) ao metal prata. O aldeído se oxida a ácido carboxílico, como mostrado na equação 6<sup>65</sup>.

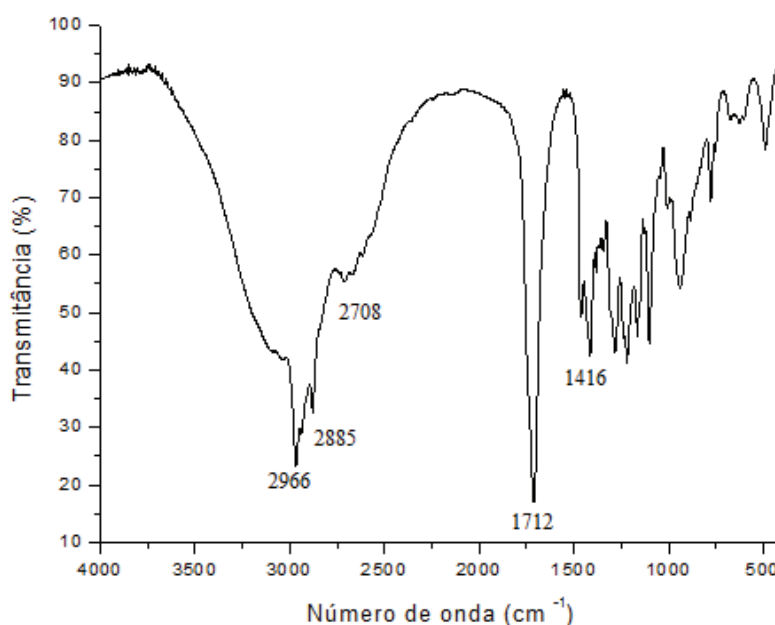


Com a troca dos agentes oxidantes são seguidos os princípios 1, 3 e 4 da QV, que destaca a prevenção da formação de resíduos de difícil descarte e a redução da toxicidade. Assim é reduzida a necessidade do tratamento de resíduos, que nem sempre resolve

satisfatoriamente o problema. Para isso propõe-se o estudo de novas metodologias em que não haja a necessidade de investimentos no tratamento de resíduos.

Após realizados os dois experimentos fez-se o teste de confirmação dos produtos formados, para isso utilizou-se o teste de Tollens, que forneceu resultado positivo para a oxidação do álcool, confirmando a síntese do aldeído nas duas metodologias. Também se obteve os espectros no infravermelho (IV).

A Figura 7 mostra o espectro de oxidação do butan-1-ol utilizando o dicromato de potássio. O objetivo do experimento é a obtenção do aldeído, no entanto, o que se observa são bandas atribuídas ao ácido carboxílico, o que evidencia uma forte reação de oxidação do álcool. As atribuições das bandas obtidas estão apresentadas na Tabela 5.



**Figura 7.** Espectro de IV obtido da oxidação do butanol com solução de dicromato de potássio.

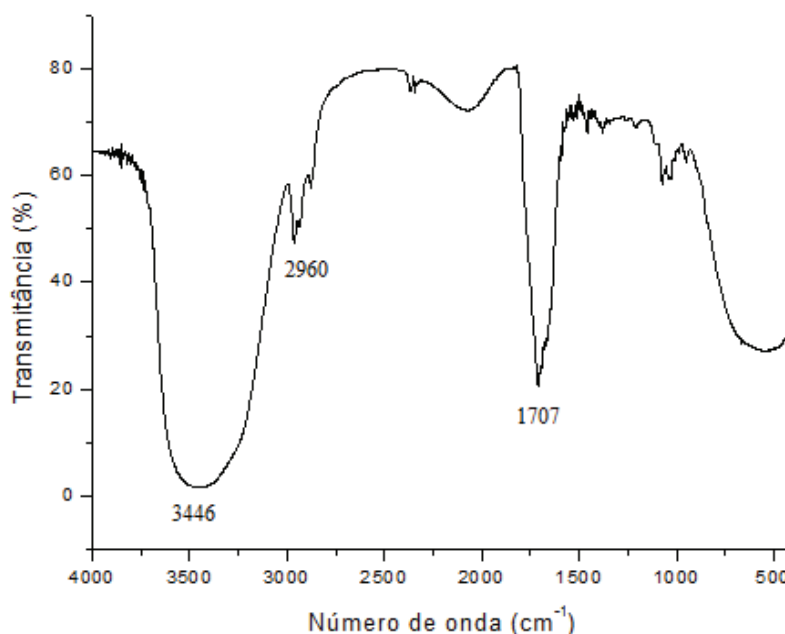
Observa-se na Figura 7, a presença de deformações axiais de O-H, larga de 3300 a 2500  $\text{cm}^{-1}$ , de C-H em 2966-2885  $\text{cm}^{-1}$  e C=O em 1712  $\text{cm}^{-1}$ , deformação angular no plano de C-O-H em 1416  $\text{cm}^{-1}$ , deformação de (CO)-C-H de 2885  $\text{cm}^{-1}$  a 2708  $\text{cm}^{-1}$  e banda forte em 2885  $\text{cm}^{-1}$  é decorrente da presença do estiramento C-H<sup>66</sup>.



**Tabela 5.** Dados de IV para a oxidação do butanol com solução de dicromato de potássio<sup>66</sup>.

| Grupos | Região (cm <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------------------------|
| CH     | 2966-2885                  |
| HCO    | 1416                       |
| OH     | 3300-2500                  |
| CO     | 1712                       |

A Figura 8 mostra o espectro obtido para a oxidação do butan-1-ol utilizando como mistura oxidante a solução de permanganato de potássio em meio a ácido sulfúrico. Observa-se deformação axial de C=O em 1707 cm<sup>-1</sup>, banda de superposição: deformação C-H, 3446 cm<sup>-1</sup> devido a presença do grupo O-H. Deformação de (CO)-C-H em 2960 cm<sup>-1</sup>. Banda forte em 2960 cm<sup>-1</sup> é decorrente da presença do estiramento C-H.



**Figura 8.** Espectro de IV do butanal obtido da oxidação do butanol com permanganato de potássio.

Na Tabela 6, são mostradas as atribuições das bandas obtidas.

**Tabela 6.** Dados de IV para a oxidação do butanol com solução de permanganato de potássio<sup>66</sup>.

| Grupos | Região (cm <sup>-1</sup> ) |
|--------|----------------------------|
| HCO    | 2960                       |
| OH     | 3446                       |
| CO     | 1707                       |

Como mostrado pelos espectros de infravermelho nas duas metodologias empregadas se observou a formação do aldeído.

### 5.3. Uso de Agentes Oxidantes “Verdes”

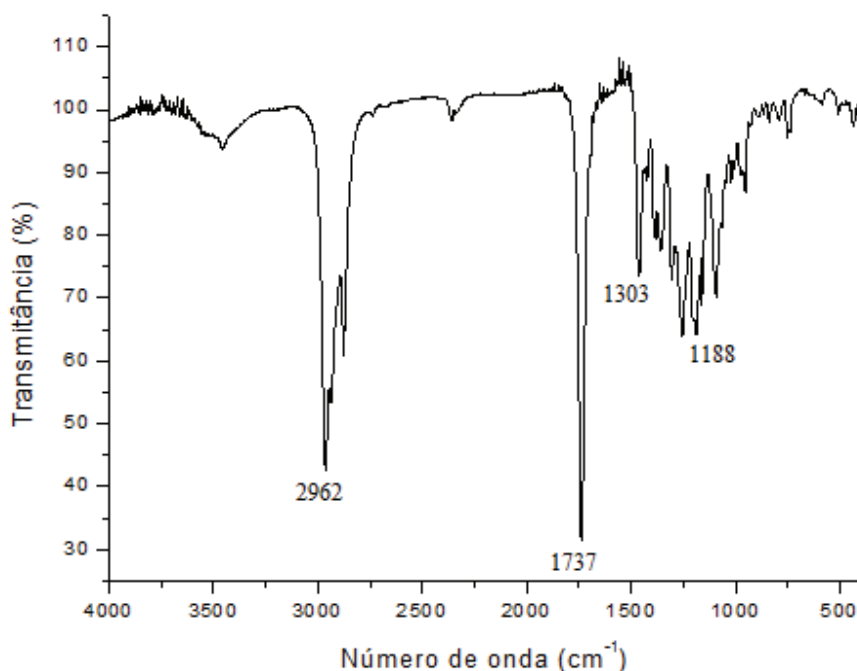
Com o objetivo de fazer a oxidação de álcoois primários a aldeídos e álcoois secundários a cetonas, utilizou-se como agente oxidante o hipoclorito de sódio em ácido acético, esse reagente é descrito na literatura <sup>48</sup> como um agente oxidante “verde”. Como essa reação ocorre mais rapidamente em um ambiente ácido, é provável que o agente de oxidação verdadeiro seja o ácido hipocloroso, HOCl. Este ácido é gerado pela reação entre o hipoclorito de sódio e o ácido acético (equação 7)<sup>57</sup>.



No fluxograma 11 (p. 33), estão apresentados os experimentos utilizando os álcoois: 1-butanol e 2-butanol, com o objetivo de fazer a oxidação desses álcoois, a butanal e butanona, respectivamente.

Para se caracterizar os produtos obtidos fez-se o teste de Tollens<sup>57</sup>, que serve para identificar os aldeídos, o resultado do teste deu positivo confirmando a síntese do aldeído.

A Figura 9 apresenta o espectro de infravermelho obtido pela oxidação do butan-1-ol com o hipoclorito de sódio.



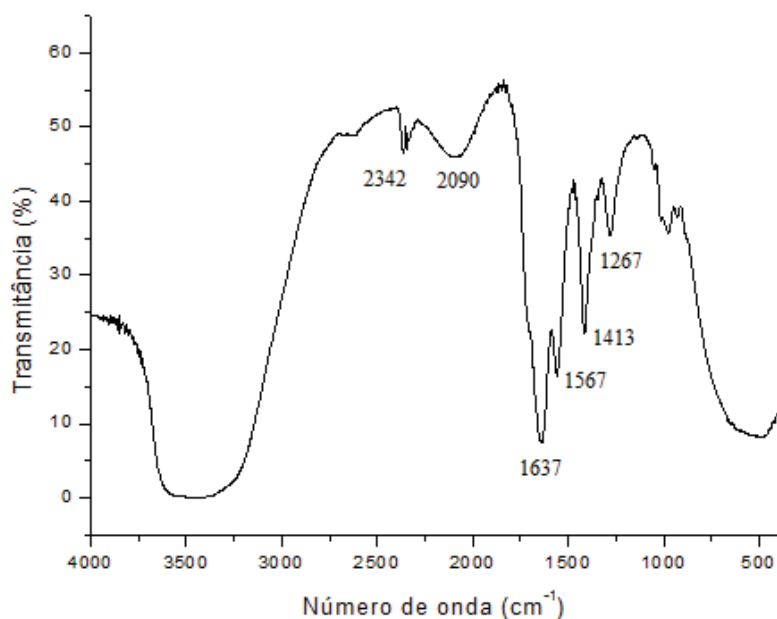
**Figura 9.** Espectro de IV do butanal obtido da oxidação do butan-1-ol com hipoclorito de sódio.

A análise do espectro da Figura 9 confirma a síntese do butanal, demonstrando bandas na região de  $2950\text{ cm}^{-1}$  que podem indicar o estiramento axial da ligação  $\text{-CH}$  do grupo formila de aldeídos. Bandas fortes em torno de  $2900\text{ cm}^{-1}$  aparecem em quase todos os espectros de compostos orgânicos, pois são decorrentes da presença do estiramento  $\text{C-H}$ . As atribuições das bandas obtidas estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7.** Dados IV para a oxidação do butanol com solução de hipoclorito de sódio<sup>66</sup>.

| Grupos | Região ( $\text{cm}^{-1}$ ) |
|--------|-----------------------------|
| CH     | 2950                        |
| COH    | 2962                        |
| CO     | 1737                        |

A Figura 10 mostra o espectro obtido da oxidação do butan-2-ol com o hipoclorito de sódio.



**Figura 10.** Espectro IV obtido da butanona da oxidação do butan-2-ol com hipoclorito de sódio.

O espectro mostrado na Figura 10 confirma a síntese da butanona, pois mostrou deformação axial e angular de  $\text{C-(C-O)-C}$  em  $1267\text{ cm}^{-1}$ , banda de superposição: deformação de  $\text{C-H}$ ,  $3700$  a  $3250\text{ cm}^{-1}$  devido a presença do grupo  $\text{O-H}$  e vibração angular de  $\text{C-H}$  em  $1413$  a  $1567\text{ cm}^{-1}$ . São mostradas na Tabela 8 as atribuições das bandas obtidas.

**Tabela 8.** Dados de IV para a oxidação do butan-2-ol com solução de hipoclorito de sódio <sup>66</sup>.

| <b>Grupos</b> | <b>Região (cm<sup>-1</sup>)</b> |
|---------------|---------------------------------|
| C-(C-O)-C     | 1267                            |
| OH            | 3700-3250                       |
| CH            | 1413-1567                       |

#### 5.4. Eficiência atômica de uma reação

Para se incluir a QV nas aulas experimentais pode-se fazer a aplicação de questões pré-laboratoriais e pós-laboratoriais, ou seja, os alunos devem pensar no experimento antes e após a sua realização fazendo uma comparação entre os resultados obtidos.

Sendo que, um dos princípios fundamentais da química verde é a economia atômica (princípio 2 da QV), uma pergunta pré-laboratorial possível poderia ser para os alunos calcularem a economia de átomos da síntese utilizando a equação 8.

$$\% \text{ Economia Atômica} = \frac{\text{massa átomos utilizados}}{\text{massa de todos os reagentes}} \times 100 \quad (\text{eq. 8})$$

Este cálculo relativamente simples pode levar a questões sobre se a economia de átomos e com isso se relaciona as questões de geração de resíduos.

Questões de pós-laboratório podem ser gerados para estimular os estudantes a comparar e contrastar procedimentos experimentais antigos com procedimentos mais recentes de sínteses mais verdes e determinar as vantagens e desvantagens relativas de cada um. Por exemplo, se um procedimento de laboratório foi redesenhado para substituir o forte oxidante cromo (VI) pelo peróxido de hidrogênio 3%, questões pós-laboratoriais poderiam ser incluídas requerendo aos alunos para consultar a FISPQ de cada produto químico e classificação quanto ao risco de explosão, propriedades químicas, e assim por diante.

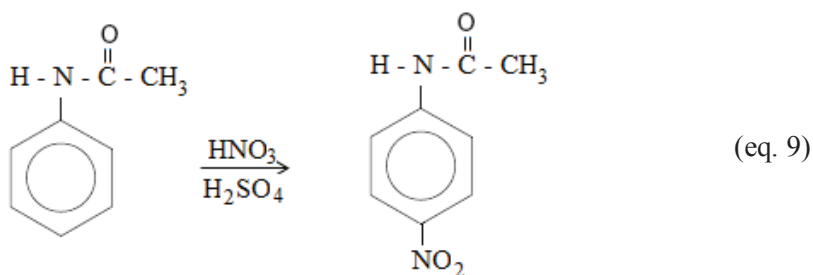
Através do monitoramento e a análise de resíduos os alunos podem compreender o conceito de quantidade de resíduos gerados. Se os cálculos forem realizados para determinar os resíduos gerados para uma aula de laboratório, ou, eventualmente, para todas as aulas de laboratório, ele vai levar consigo a ideia de que resíduos equivale a desperdício e, conseqüentemente, o aumento de custos.

Para se ilustrar como o cálculo da eficiência atômica pode ser aplicado ao currículo, tomou-se como exemplo um experimento frequentemente executado na disciplina de Química Orgânica, conhecido como nitração da acetanilida (equação 9). Esse experimento é descrito no fluxograma 12 (p. 34).

#### 5.4.1. Aplicação do cálculo de Eficiência Atômica: Nitração da Acetanilida

A acetanilida é reagente de partida para a preparação de p-nitro acetanilida, através da nitração da acetanilida. A nitração da acetanilida é normalmente feita com ácido nítrico, em presença da mistura ácido acético glacial/ácido sulfúrico<sup>67, 68</sup>.

Reação de nitração da acetanilida.



A partir das massas utilizadas dos reagentes, descrito no roteiro experimental, fez-se a comparação entre o rendimento em porcentagem e o cálculo da eficiência de uma reação.

##### 5.4.1.1. Rendimento em Porcentagem

Embora a eficiência de uma reação possa ser medida de muitas formas, a maneira mais comum é o cálculo do rendimento em porcentagem (equação 10). No laboratório, muitas vezes é solicitado ao estudante que determine o rendimento teórico (equação 11) baseado no reagente limitante e o rendimento em porcentagem baseado na relação rendimento obtido/rendimento teórico x 100. Em geral, os químicos orgânicos consideram rendimentos de 90% ou superiores como excelentes, enquanto que rendimentos de 20% ou inferiores são considerados baixos<sup>69</sup>.

$$\text{Rendimento em porcentagem} = \frac{\text{rendimento obtido}}{\text{rendimento teórico}} \times 100 \quad (\text{eq. 10})$$

**Rendimento Teórico** = nº mols reagente limitante x razão estequiométrica x MM produto (eq. 11)

A partir da reação estequiométrica (Equação 9) percebe-se que um mol de cada reagente é necessário para produzir um mol nitroacetanilida, e como, a acetanilida (0,0296 mol) é usado em menor quantidade é o reagente limitante (Tabela 9).

**Tabela 9.** Reagentes utilizados na nitração da acetanilida.

| Reagentes                                    | Massa molar (g/mol) | Massa utilizada (g) | Volume (mL) | Número de mols utilizados | Número de mols teórico necessário | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--|---------------------|---------------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO             | 135,163             | 4,000               | -           | <b>0,0296</b>             | <b>0,0296</b>                     | -                              |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> | 58,036              | 4,196               | 4           | 0,0723                    | 0,0296                            | 1,049                          |
| HNO <sub>3</sub>                             | 63,013              | 2,240               | 1,6         | 0,0355                    | 0,0296                            | 1,400                          |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>               | 98,079              | 16,888              | 9,2         | 0,1720                    | 0,0296                            | 1,835                          |

Ácido acético glacial 99,7%

Ácido sulfúrico concentrado 98%

Ácido nítrico concentrado 65%

O cálculo do rendimento teórico de nitroacetanilida fornece 5,33 g (Tabela 10). Isto significa que, usando as quantidades de reagentes (descrito na Tabela 9), e assumindo um rendimento de 100%, a quantidade máxima de nitroacetanilida que pode ser produzida é **5,33 g**.

**Tabela 10.** Rendimento obtido na síntese da nitroacetanilida.

| Produto   | Massa molar (g/mol) | Rendimento teórico (mols) | Rendimento teórico (g) | Rendimento obtido (g) | Rendimento (%) |
|---|---------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|
| C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 180,2               | 0,0296                    | <b>5,33</b>            | 3,50                  | 65,7           |

$$\begin{aligned} \text{Rend. Teórico} &= \text{n}^\circ \text{ mols reagente limitante} \times \text{razão estequiométrica} \times \text{MM produto} \quad (\text{eq. 10}) \\ &= (0,0296 \text{ mol})(1 \text{ mol}/1 \text{ mol})(180,161 \text{ g/mol}) \\ &= \mathbf{5,33 \text{ g}} \end{aligned}$$

Nenhuma reação se procede sempre com 100% de rendimento, devido a uma série de fatores, como formação de produtos diferentes do desejado, conversão incompleta dos materiais de partida, perdas na extração da mistura reacional, e perdas no isolamento e purificação do produto desejado. Então, esta reação produz geralmente rendimentos na faixa de 3,5 g. Assumindo que o rendimento real seja de 3,5 g, o rendimento pode ser calculado como se segue. Dessa forma, 65,7 % do rendimento teórico foram efetivamente isolados, que pode ser considerado um bom rendimento.

$$\begin{aligned} \text{Rendimento em porcentagem} &= \frac{\text{rendimento obtido}}{\text{rendimento teórico}} \times 100 && \text{(eq. 10)} \\ &= \frac{3,50 \text{ g}}{5,33 \text{ g}} \times 100 \\ &= 65,7 \% \end{aligned}$$

#### 5.4.1.2. Economia de Átomos em uma reação

Como citado anteriormente, a maioria dos químicos utiliza tradicionalmente o rendimento em porcentagem para medir a eficiência de uma reação, entretanto quando se considera a eficiência atômica as sínteses devem ocorrer preferencialmente de tal forma a produzir apenas o produto desejado, incorporando no produto final o máximo dos átomos dos reagentes e evitando a formação de subprodutos.

Se consideradas as massas utilizadas na reação (equação 8), onde um total de 27,324 g de reagentes (4,0 g de acetanilida, 4,196 de ácido acético, 2,240 g de ácido nítrico e 16,888 g de ácido sulfúrico) foi utilizado e que o máximo que a reação pode fornecer será apenas 5,33 g do produto desejado, percebe-se que a maior parte (27,3g – 5,33 g = 22,0 g) da massa dos reagentes é descartada, ou seja, eles se convertem em outros produtos que podem ser indesejados, não utilizados, tóxicos e/ou não reutilizados.

Os produtos obtidos além daquele que se deseja (subprodutos) são tratados às vezes como resíduos e precisam ser descartados ou tratados de alguma maneira. No experimento realizado apenas 20% da massa dos reagentes (5,33 g/ 27,32 g x 100) transformam-se no

produto desejado. Se, entretanto, o rendimento real é de 65,7%, então apenas 13,2% da massa dos reagentes ( $0,66 \times 0,20 \times 100$ ) são transformadas, efetivamente, no produto desejado.

Com o objetivo de focalizar os átomos dos reagentes que são incorporados no produto desejado e aqueles que são descartados (incorporados em produtos indesejados), Barry Trost<sup>10</sup> desenvolveu o conceito de economia de átomos. Em 1998, Trost foi premiado com o Prêmio Presidencial Desafio em Química Verde, pelo desenvolvimento do Conceito de Economia de Átomos. Para demonstrar a aplicação de Trost no experimento da nitração da acetanilida, na Tabela 11, são apresentados os reagentes e o total de átomos utilizados.

**Tabela 11.** Reagentes e átomos utilizados na nitração da acetanilida.

| <b>Reagentes</b>                                    | <b>Massa molar (g/mol)</b> |
|---|----------------------------|
| C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO                    | 135,16                     |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>        | 58,036                     |
| HNO <sub>3</sub>                                    | 63,013                     |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                      | 98,079                     |
| <b>Total de átomos : 10 C, 16 H, 10 O, 2 N, 1 S</b> |                            |

A Tabela 12 fornece outra visão da economia de átomos desta reação. Nas colunas 1 e 2 da Tabela estão o número de átomos e a massa molar dos reagentes. Em verde estão mostrados (colunas 3 e 4) os átomos dos reagentes que são incorporados no produto desejado, e em marrom são mostrados (colunas 5 e 6) os átomos e massas dos átomos dos reagentes que terminam como produtos indesejados.

Pode ser visto que dos átomos dos reagentes (**10 C, 16 H, 10 O, 2 N e 1 S**), nem todos são utilizados na obtenção do produto desejado (**8 C, 8 H, 3 O e 2 N**) e a parte deles (**2 C, 8 H, 7 O e 1 S**) são descartados na forma de produtos indesejados.

Utilizando o conceito de Trost de economia de átomos é possível calcular a economia de átomos em porcentagem. Isto pode ser feito tomando a razão entre a massa dos átomos utilizados (**180,2 g/mol**) e a massa total dos átomos de todos os reagentes (**356,2 g/mol**) e multiplicando-a por 100.

Como mostrado na equação 8 (p.49) , esta reação tem uma economia de átomos de **50,6%**. Desta maneira, no máximo (se a reação tiver um rendimento de 100%), apenas pouco mais da metade da massa dos reagentes seria incorporada ao produto desejado, enquanto que o restante seria descartado na forma de produtos indesejados.



**Tabela 12.** Total de átomos utilizados e não utilizados na obtenção da nitroacetanilida.

| Total de átomos | Massa molar (g/mol) | Átomos utilizados | Massa molar dos átomos utilizados | Átomos não utilizados | Massa molar dos átomos não utilizados |
|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 10 C            | 120,1               | 8 C               | 96,08                             | 2 C                   | 24,02                                 |
| 16 H            | 16,13               | 8 H               | 8,065                             | 8 H                   | 8,06                                  |
| 10 O            | 159,9               | 3 O               | 48,00                             | 7 O                   | 112,0                                 |
| 2 N             | 28,01               | 2 N               | 28,01                             | —                     | —                                     |
| S               | 32,01               | —                 | —                                 | S                     | 32,01                                 |
| <b>Total:</b>   | 356,2               |                   | 180,2                             |                       | 176,1                                 |

$$\begin{aligned} \% \text{ Economia Atômica} &= \frac{\text{massa átomos utilizados}}{\text{massa de todos os reagentes}} \times 100 && (\text{eq. 8}) \\ &= (180,2/356,2) \times 100 \\ &= 50,6 \% \end{aligned}$$

A economia de átomos e a economia de átomos experimental vão além do cálculo do rendimento de uma reação e oferecem uma segunda maneira para medir a eficiência de uma reação, levando em conta os átomos dos reagentes utilizados e os não-utilizados. A economia de átomos em porcentagem e a economia de átomos experimental em porcentagem nos fornecem os meios para quantificar a economia de átomos, contribuindo para uma comparação quantitativa da economia de átomos de uma reação (ou síntese) em relação à outra. Talvez a melhor medida da eficiência de uma reação seja feita levando-se em consideração tanto a economia de átomos quanto o rendimento, através do cálculo rendimento em porcentagem versus economia de átomos experimental. Evidentemente, ao considerarmos a adequação ambiental de uma reação (ou síntese), deve se considerar não apenas a eficiência de uma reação, mas também (como já discutido) outros fatores, como a toxicidade, o uso de substâncias auxiliares, demanda de energia, origem da matéria-prima e o uso de reagentes catalíticos em substituição de reagentes estequiométricos.

A nitração da acetanilida é um dos experimentos em que se pode aplicar o conceito de eficiência atômica, esses cálculos podem ser estendidos a todos os experimentos em que se precise calcular o rendimento da reação.

Dessa forma, o aluno pode fazer uma comparação entre os dois cálculos de rendimento, o cálculo em porcentagem e o rendimento em economia de átomos, tendo uma medida muito melhor da eficiência de uma reação e sua aceitabilidade ambiental.

## 5.5. Experimentos em Microescala

Foram realizados dois experimentos em microescala, Síntese da acetanilida (N-fenilacetamida ou N-feniletanamida) e Síntese da dibenzalacetona (1,5-difenil-(e,e)-1,4-pentadien-3-ona)<sup>58</sup>, mostrados nos fluxogramas 13 e 14, respectivamente (p. 35 e 36). Enquanto os métodos convencionais utilizam grandes quantidades de reagentes o método em microescala reduz significativamente essa quantidade, o que se reflete na menor geração de resíduos.

Os dois roteiros experimentais são de fácil execução, não exigem sofisticação técnica, são realizados em tubo de ensaio e béquer, o que facilita ao aluno a visualização do fenômeno químico com facilidade, direcionando a sua atenção exclusivamente para o fundamento do experimento. Os experimentos utilizam pouca quantidade de reagentes, sendo, portanto econômicos, dessa forma a utilização de pequenas quantidades de reagentes contribui para a execução mais segura dos experimentos, além de minimizar a quantidade de resíduos e rejeitos.

Nas Tabelas 13 e 14 são feitas comparações entre as quantidades dos reagentes utilizados nos dois experimentos, a rota A mostra as quantidades de reagentes utilizados no experimento tradicionalmente executados e a rota B mostra as quantidades utilizadas para os experimentos em microescala.

**Tabela 13.** Reagentes utilizados na síntese da acetanilida.

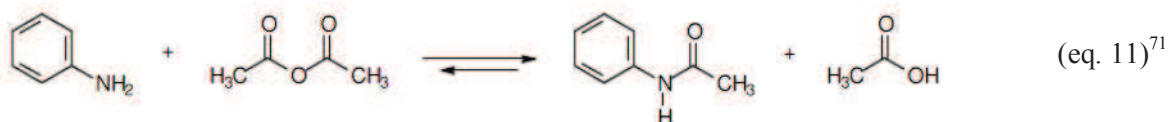
|                         | ROTA A | ROTA B |
|-------------------------|--------|--------|
| Reagentes               |        |        |
| Anilina                 | 4,6 mL | 0,5 mL |
| Anidrido acético        | 5,1 mL | 2,0 mL |
| Acetato de sódio anidro | 1,3 g  | -      |
| Ácido acético glacial   | 4,8 mL | -      |

Como mostrado na Tabela 13, na rota B as quantidades de reagentes foram significativamente reduzidas e dois desses reagentes não foram utilizados, o acetato de sódio anidro e o ácido acético glacial.

A função da mistura de acetato de sódio e ácido acético na mistura é formar uma solução tampão de maneira que o pH da solução não se altere muito. A função específica do ácido acético é acidificar o meio, favorecendo assim a forma protonada da anilina, favorecendo a reação e a função do acetato de sódio é aumentar a polaridade do meio aquoso

prejudicando a solubilidade da acetanilida que é apolar, melhorando a formação dos cristais do produto desejado<sup>70</sup>. No entanto, a síntese mostrou-se eficiente e com bom rendimento mesmo sem a presença desses dois reagentes.

Na equação 11 é mostrada a equação de obtenção da acetanilida o rendimento foi de 51,2 % formando um produto de cor branca.

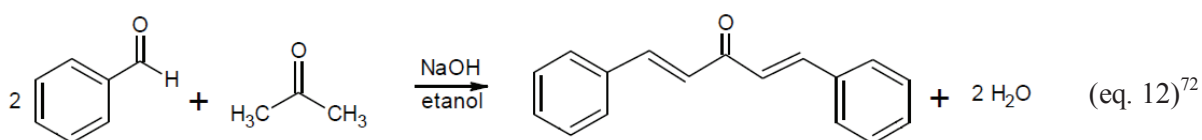


**Tabela 14.** Reagentes utilizados na síntese da dibenzalacetona

|             | ROTA A | ROTA B |
|-------------|--------|--------|
| Reagentes   |        |        |
| NaOH (aq)   | 100 mL | 2,5 mL |
| Etanol      | 80 mL  | 2,5 mL |
| Benzaldeído | 7,0 mL | 1,0 mL |
| Acetona     | 4,0 mL | 0,4 mL |

Como mostrado na Tabela 14, os volumes de reagentes foram significativamente reduzidos, conseqüentemente tem-se redução da formação de resíduos.

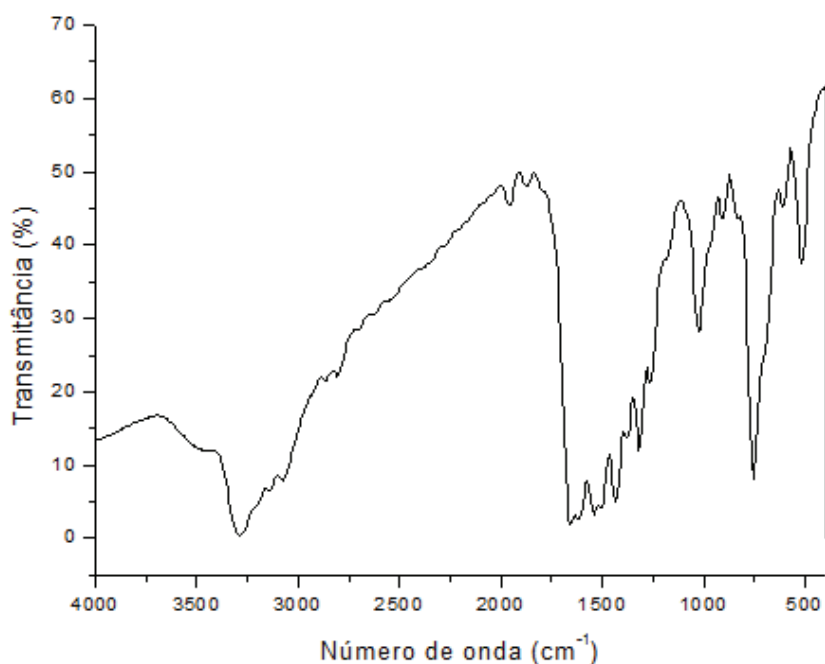
A equação 12 representa a reação de síntese da dibenzalacetona, o rendimento obtido foi de 57,2%, com formação de um sólido amarelo.



Para a caracterização dos produtos obtidos realizou-se os pontos de fusão, para a acetanilida o valor obtido foi de 114°C - 115°C, e para a dibenzalacetona foi de 113°C - 114°C, que coincidiram com os valores descritos na literatura<sup>73</sup>. Também foram feitas as análises de espectroscopia no infravermelho.

Observam-se na Figura 11 bandas de estiramento da ligação C=O de carbono ligado ao nitrogênio da amida com pico em 1669 cm<sup>-1</sup>. As bandas de deformação das ligações N-H de amidas secundárias ligadas a um anel aromático são presentes nos picos em 3278 cm<sup>-1</sup>, 3147 cm<sup>-1</sup> e 3064 cm<sup>-1</sup>.

Em  $1316\text{ cm}^{-1}$  é o pico relativo à deformação da ligação C-N em compostos aromáticos e em  $1023\text{ cm}^{-1}$  é atribuído à ligação C-N. O estiramento das ligações C=C dos carbonos de um anel aromático gerou picos característicos em  $1650\text{ cm}^{-1}$  e  $1435\text{ cm}^{-1}$ . A deformação das ligações C-H dos carbonos no anel aromático mono substituído é evidenciado pelo pico em  $752\text{ cm}^{-1}$ .



**Figura 11.** Espectro de IV obtido da acetanilida.

Na Tabela 15 são mostrados os picos atribuídos aos grupos.

**Tabela 15.** Dados de IV da acetanilida<sup>74</sup>.

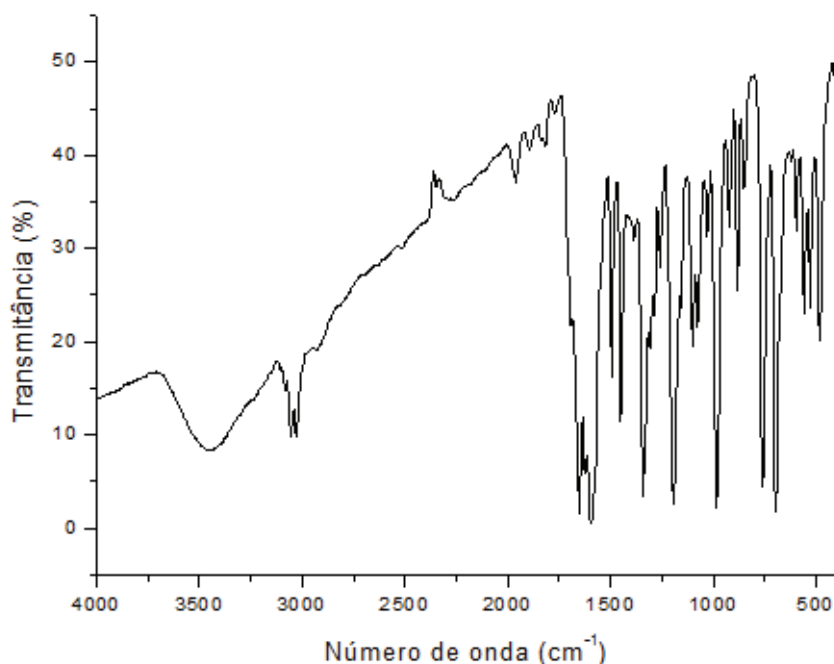
| Grupos  | Região ( $\text{cm}^{-1}$ ) |
|---------|-----------------------------|
| C=O     | 1669                        |
| NH - Ar | 3278, 3147 e 3064           |
| C-N     | 1023                        |
| CN - Ar | 1316                        |
| C=C     | 1650 e 1435                 |
| CH - Ar | 752                         |

Ar: aromático

Na Figura 10, podem ser observadas bandas na região de  $3026\text{ cm}^{-1}$  referente ao estiramento da ligação C-H dos anéis aromáticos.

Em  $1650$  e  $1463\text{ cm}^{-1}$  observam-se as bandas de estiramento referentes as ligações C=O e C=C de compostos carbonílicos  $\alpha,\beta$ -insaturados, respectivamente. Em  $761$  a  $687\text{ cm}^{-1}$

são observadas bandas características das vibrações de deformação angular fora do plano das ligações carbono hidrogênio do anel aromático.



**Figura 12.** Espectro de IV obtido da dibenzalacetona.

Na Tabela 16, são apresentados os dados de infravermelho e os picos atribuídos aos grupos da acetanilida.

**Tabela 16.** Dados de IV da dibenzalacetona<sup>74</sup>.

| <b>Grupos</b> | <b>Região (cm<sup>-1</sup>)</b> |
|---------------|---------------------------------|
| CH - Ar       | 3026 e 761- 687                 |
| C=O           | 1650                            |
| C=C           | 1463                            |

Como mostrado, as reações em microescala alcançam os mesmos objetivos do experimento executado em macroescala, ou seja, os alunos executam os experimentos, obtêm os produtos desejados e realizam a caracterização desse produto pela determinação do ponto de fusão, com a vantagem da redução das quantidades de reagentes e conseqüentemente menor quantidade de formação de resíduos.

Ao se trabalhar com a QV é preciso uma mudança na forma de se pensar em relação à prática da Química, pois seus métodos vão além da reprodução de metodologias, reagentes e solventes já testados e comumente utilizados. Mas que necessita do apoio de indústrias, governantes, na qual a educação tem um papel fundamental na sua disseminação na

sociedade. Apesar da sua presença nos currículos ainda ser muito pequena aos poucos está se tornando mais presente em publicações e em eventos o uso do termo “Química Verde”.

Fazendo uma avaliação do currículo do curso de Química observa-se que a maior preocupação tem sido com o domínio de técnicas e memorização de conteúdos, claro que esse domínio é necessário, no entanto, é possível formar cidadãos e profissionais mais conscientes, com capacidade de se adaptar as exigências que o mercado propõe, ou seja, pessoas mais engajadas com as questões ambientais sem implicações na aquisição de conhecimento dos conteúdos das disciplinas. Educar futuros e atuais químicos em QV é um primeiro passo necessário para prevenir a poluição através de produtos mais seguros e processos químicos mais ecológicos.

## 6. CONCLUSÕES

As atividades propostas contemplam alguns dos princípios propostos pela QV, demonstrando que a QV pode ser inserida nos currículos dos cursos de graduação através de pequenas iniciativas sem interferir na compreensão do conteúdo pelo aluno.

A metodologia proposta para o desenvolvimento do experimento de determinação analítica do grupo do cobre obedece aos princípios 1, 3, 4 e o princípio 12 que discute a química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes.

Quando se propõe a substituição da mistura oxidante sulfocrômica pela sulfopermangânica no experimento de oxidação do butan-1-ol trabalha-se o princípio 1, que discute a prevenção da formação de resíduos e os princípios 3 e 4, que envolve a síntese segura, para a obtenção de um produto químico que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente.

O experimento do uso de agentes oxidantes “verdes” que utiliza o hipoclorito de sódio em meio ácido, obedece aos princípios 1 sobre a prevenção de resíduos indesejáveis, o princípio 3 que destaca a síntese segura, o princípio 5 que discute o uso de solventes e auxiliares seguros, o princípio 6 sobre busca pela eficiência de energia, pois a reação ocorre a temperatura e pressão ambiente e o princípio 10 geração de produtos mais facilmente degradáveis quando comparados com a metodologia convencional.

Os resultados obtidos nas sínteses de aldeído e cetona mostraram-se tão eficientes quanto o método convencional, com a vantagem da utilização de reagentes de fácil descarte que geram subprodutos menos perigosos, pois utiliza hipoclorito de sódio e ácido acético, sendo reações que ocorrem à temperatura ambiente precisando somente de agitação. A solução de permanganato de potássio pode utilizar menor quantidade de reagente e gerar menos resíduos que oferecem menor impacto que a metodologia convencional que gera o cromo VI.

No experimento de nitração da acetanilida foi aplicado o princípio 2 da QV, onde se calculou a eficiência atômica de uma reação química. Esse cálculo pode ser aplicado a todos os experimentos em que é necessário calcular o rendimento da reação. Permitindo aos alunos avaliarem a aceitabilidade ambiental das reações químicas, vivenciando durante a graduação a necessidade de se minimizar a geração de subprodutos durante um processo químico e o descarte de subprodutos poluentes, de forma que possam aplicar estes conceitos em sua vida

profissional, como pessoas conscientes das vantagens e da necessidade de preservação do meio ambiente.

Com a realização de experimentos em microescala aplica-se o princípio 1, pois há redução da formação de resíduos, reduzindo assim, gastos em sua disposição além da formação de profissionais com consciência ecológica, atende-se também o princípio 12, como as quantidade reduzidas de reagentes se minimiza o risco de acidentes.

Sem dúvida a Química já avançou muito e hoje se depara com o desafio da busca de soluções aos problemas ambientais, apesar de não ser de fácil resolução a QV possui a capacidade para resolvê-los, segundo Kang<sup>75</sup>, “Nunca ninguém disse que a Química Verde é fácil. No entanto, com vontade e uma visão sistêmica e holística da Química é possível cada vez mais uma melhoria contínua, transformando os desafios em oportunidades verdes”.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Programa de Gestão Ambiental da República. **O que é educação ambiental?** Disponível em <<http://pga.pgr.mpf.gov.br/pga/educacao/que-e-ea/o-que-e-educacao-ambiental>> Acesso em: 2 set. 2008.
2. BRUNDTLAND, G.H. **Nosso futuro comum**. 2 ed. São Paulo: FGV, 1991.
3. ANDRADE, J.B. SILVA, L.A. Química a serviço da humanidade. **QNEsc**, São Paulo. n.5, p.3-4, nov. 2003.
4. BATISTA, A.C.F.; DABDOUB, M.J.; LENARDÃO, E.J.; FREITAG, R.A.; SILVEIRA, C.C. “Green Chemistry” – Os 12 princípios da Química Verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **QNEsc**. São Paulo, n.1, v. 26, p. 123-129, jan./fev.2003.
5. SENE, E. de; MOREIRA, J.C. **Geografia Geral e do Brasil: espaço geográfico e globalização**. São Paulo: Scipione, 1998. 455p.
6. BRANCO, S.M. Ecologia e Ecologismos. **Ecologia em debate**. 3ed. São Paulo: Moderna, 1997.
7. TUNDO, P.; ANASTAS, P.; BLACK, D.S.; BREEN, J.; COLLINS, T.; MEMOLI, S.; MIYAMOTO, J.; POLYAKOFF, M.; TUMAS, W. Synthetic pathways and processes in green chemistry Pure. **Appl. Chem.** n.7 v. 72, p.1207-1228. 2000.
8. ANASTAS, P.T.; WARNER, J.C.; **Green Chemisty: theory and practice**. New York: Oxford University Press. 1998.
9. MELO, M.R. **Elaboração e análise de uma metodologia de ensino voltada para questões sócio-ambientais na formação de professores de química**. 2010. 179p. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade de São Paulo, 2010.
10. TROST, B. M. The Atom Economy – A search for synthetic efficient. **Science**. v.254, p.1471-1477, dez.1991
11. DUPONT, J. Economia de átomos, engenharia molecular e catálise organometálica bifásica: Conceitos moleculares para tecnologias limpas. **QNEsc**. São Paulo v. 23, n. 6, p. 825, nov./dez.2000.
12. SATO, K. AOKI, M. NOYORI. R. A ‘Green’ Route to Adipic Acid: Direct Oxidation of Cyclohexene with 30 Percent Hydroxide Peroxide. **Science**. v. 281, p. 1646-1647. 1998.
13. WESTHEIMER, T. The Award Goes to BHC. **Chem. Eng.** p. 84-95. 1993.
14. **Presidencial Green Chemistry Challenge (PGCC) Awards Program**. Disponível em < <http://www.epa.gov/greenchemistry/past.html>> Acesso em: jan. 2012.

15. **Trabalhando para eliminar o perigo dos pesticidas tóxicos.** Disponível em <<http://www.pan-uk.org/pestnews/pn46/pn46p21b.htm>> Acesso em: set. 2011.
16. OAKES, R. S.; CLIFFORD, A. A.; RAYNER, C. M.; J. The use of supercritical fluids in synthetic organic chemistry. **Chem. Soc.**, Perkin Trans. I, p.917-941, mar. 2001.
17. KEIPER, J.S., SIMHAN, R., DESIMONE, J. M. New Phosphate Fluorosurfactants for Carbon Dioxide. **J. Am. Chem. Soc.** n.9, v. 124. p. 1834-1835. 2002.
18. ECKERT, C. A., LIOTTA, C. L., BROWN, J. S. Clean solution for chemical synthesis. **Chem. Ind.** London, v.3, p.94-97. 2000.
19. ECKERT, C.A.; LIOTTA, C.L.; BROWN, J. S. Nearcritical Water as a Reaction Solvent. **Chem. Ind.** p.94. 2000.
20. HORVÁTH, I. T.; JÁBAI, J. Facile Catalyst Separation Without Water: Fluorous Biphasic Hydroformylation of Olefins. **Science.** v. 266, p.72-75. 1994.
21. EARLE, M. J. SEDDON, K. R. Ionic liquids. Green solvents for the future. **Pure Appl. Chem.** v. 72, n. 7, pp. 1391–1398, 2000.
22. COSTA, P. R.; ROSSI, L.F.S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L.P. Produção de biodiesel alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **QNEsc.** São Paulo, v.23,n.4, p. 531, jul./ago.2000.
23. **Nobel e-Museum.** Disponível em: <<http://www.nobel.se/chemistry/laureates/2001/index.html>> Acesso em fev.2010.
24. LENARDÃO, E.J.; FREITAS, R. A; DABDOUBIII, 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. **Quim. Nova.** v. 26, n.1 São Paulo, Jan./Feb. 2003.
25. WARNER, J.C.; CANNON, A.S.; DYE, K.M. **Green Chemistry.** Environ. Imp. Asses. Rev., v.24, p.775, 2004.
26. REINER, D. M.; CURRY, T. E.; DE FIGUEIREDO, M. A.; HERZOG, H. J.; ANSOLABEHERE, S. D.; ITAOKA, K.; JOHNSSON, F.; ODENBERGER, M. American exceptionalism? Similarities and differences in national attitudes toward energy policy and global warming. **Environ. Sci. Technol**, Cambridge, v.1, n. 40, p. 2093-2098, Apr. 2006.
27. HJERESEN D.L. GONZALES, R. Can green chemistry promote sustainable agriculture? **Environ. Sci. Technol**, Washington, DC, v. 36 n.5, p.102A-107A. mar. 2002.
28. TUCKER, J. L. Green Chemistry: Cresting a Summit toward Sustainability. **Org. Process Res. Dev.** San Diego, California, v.14 n.2, p. 328–331. Jan.2010.
29. NEWS AND ANNOUNCEMENTS. **J. Chem. Educ.** Washington, DC, v.83, n.8, p. 1133 - 1135, aug. 2006.

30. **Página da empresa Pfizer.** Disponível em < <http://www.pfizer.com.br>> Acesso em mar de 2012.
31. HAACK, J.A.; HUTCHISON, J.E.; KIRCHHOFF, M.M.; LEVY, I. J. Going Green: Lecture Assignments and Lab Experiences for the College Curriculum. **J. Chem. Ed.**, Oregon, v.82, pp. 974-976, jun. 2005.
32. GRON, L.U. Green Analytical Chemistry: Application and Education. In: ANASTAS, P. T.; IRVIN, J. L. PARENT, K. E. **Green Chemistry education: Changing the Course of Chemistry.** Washington, DC: American Chemical Society, 2009. pp. 103 – 116.
33. DOXSEE, K. M.; HUTCHISON, J. E. **Green Organic Chemistry: Strategies, Tools and Laboratory Experiments.** Belmont, CA: Thompson Books, 2003. 244p.
34. The ACS Green Chemistry INSTITUTE. **Green Chemistry Education Web.** Disponível em <<http://portal.acs.org/portal/PublicWebSite/greenchemistry/education/index.htm>> Acesso em: 20 nov. 2011.
35. KLINGSHIRN, M. M., SPESSARD, G.O. Integrating Green Chemistry into the Introductory Chemistry Curriculum. In: ANASTAS, P. T.; IRVIN, J. L. PARENT, K. E. **Green Chemistry education: Changing the Course of Chemistry.** Washington, DC: American Chemical Society, 2009. pp. 79 – 92.
36. ANASTAS, P.T. LEVY, I.J. PARENT, K.E. **Green Chemistry Education: Changing the course of Chemistry.** ACS: Washington, DC. 2009.
37. RYAN, M.A.; TINNESAND, M. **Introduction to Green Chemistry: Instructional Activities for Introductory Chemistry.** Pennsylvania: ACS, 2002. 68p.
38. HATFIELD, T.H. AND OTT, D.H., “Measuring Source Reduction of Laboratory Hazardous Wastes”, **J. Environmental Health.** v.56, 7, 1993.
39. KLINGSHIRN, M. A.; WYATT, A. F.; HANSON, R. M.; SPESSARD, G. O. Determination of Formula of a Hydrate – A Greener Alternative. **J. Chem. Educ.** Washington, DC, v. 85; n.6, p. 819-821, jun. 2008.
40. CACCIATORE, K. L.; SEVIAN, H. Teaching lab report writing through inquiry: A green chemistry stoichiometry experiment for general chemistry. **J. Chem. Educ.** Washington, DC, v.83, n. 7, p. 1039 - 10410. Jul. 2006.
41. McCARTHY, S. M.; GORDON-WYLIE, G. M. J. A Greener Approach for Measuring Colligative Properties. **J. Chem. Educ.** Washington, DC, v.8, n.1, p. 116-121. Jan. 2005.
42. PERSINGER, J. D.; HOOPS, G. C.; SAMIDE, M. J. Mass Spectrometry for the Masses. **J. Chem. Educ.** Washington, DC, v. 81, n. 8, p. 1169-1173, aug. 2004.
43. OLIVEIRA, L. C.A.; RIOS, R. V. R. A.; FABRIS, J. D.; LAGO, R. M.; SAPAG, K. Magnetic Particle Technology. A Simple Preparation of Magnetic Composites for the

Adsorption of Water Contaminants. **J. Chem. Educ.** Washington, DC, v.81, n.2, p. 248-252, feb. 2004.

45. ANDREWS, R., "Microscale: A Wee Revolution in College Chemistry Labs". **The Scientist**. p. 24-26, nov. 1990.

46. ZIPP, A.P. Introduction to the Microscale Laboratory. **J. Chem. Educ.**, v.66, p. 956, 1989.

47. MCGOUGH, M.C. Organic Laboratory Experiments: Micro vs. Conventional. **J. Chem. Educ.**, v.66, p.92. 1999.

48. JARDIM, W.F., "Gerenciamento de Resíduos Químicos em Laboratórios de Ensino e Pesquisa", **Quím. Nova**. v.21, p.671. 1998.

49. BAZITO, R.C. Química Verde, a Química protetora do meio ambiente. **Rev. Bras. de Eng. Qui.** p. 42, mai/ago. 2011.

50. FARIAS, L.A; FÁVARO,I. T. Vinte anos de Química Verde: conquistas e desafios. **Quím. Nova**. v.34, n.6, p. 1089- 1093, 2011.

51. **Escola de Química Verde**. Disponível em < quimicaverde.iq.usp.br> Acesso em: mar. de 2012.

52. LENARDÃO, E.J; SILVA, T.B; MENDES, S.R. **A página de divulgação da Química Verde no Brasil**. Disponível em: <www.ufpel.tche.br/iqp/wwverde/ > Acesso em: set. 2012.

53. CENTRO DE ESTUDOS E GESTÃO ESTRATÉGICOS. **Química Verde no Brasil: 2010-2030**. Brasília. 2010.

54. Disponível em: <<http://educa.fc.up.pt/ficheiros/fichas/1042/Estudo%20da%20solubilidade%20de%20alguns%20sais.pdf>> Acesso em: abril 2012.

55. BOLDORI, A. GIACOMETTO, P. VERDADE, R. **Química Analítica Qualitativa**. Maringá: Editora Paraná e Alfa vestibulares, 1980, 95p.

56. **Apostila de Química Orgânica Experimental**. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava: 2011.

57. PAVIA, D.L.; LAMPMAN, G.M.; KRIZ, G.S.; ENGEL, R.G. **Química Orgânica Experimental -Técnicas de escala pequena**. 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

58. BESSLER, K. E. ; NEDER, A.V.F. **Química em tubos de ensaio – uma abordagem para principiantes**. 1ed. Edgard Blücher: São Paulo, 2004. 195p.

59. AULER, D.; **Interações entre ciência-tecnologia-sociedade no contexto da formação de professores de ciências**.2002. 258p. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC.

60. MARQUES, C. A; GONÇALVES, F.P; ZAMPIRON, E; COELHO, J.C, MELLO, L.C; OLIVEIRA, P.R.S; LINDEMANN, R.H. Visões de meio ambiente e suas implicações pedagógicas no ensino de química na escola média. **Quím. Nova**, v. 30, n. 8, p.2043-2052, 2007.
61. MICARONI, R.C. **Gestão de Resíduos em Laboratórios do Instituto de Química da UNICAMP**. 2002. 127p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
62. ABREU, D.G. **Tratamento de resíduos como ferramenta para formação da educação ambiental no ensino de química**. 2003. 120p. Tese (Doutorado em educação) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, SP.
63. MANAHAN. S. E. Green Chemistry and the ten commandments of sustainability. **ChemChar Research, Inc.** 2005.
64. VOGEL, A.I. **Análise Química Quantitativa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
65. MIZAFZAL, G.A. LOZEVA, A.M. Phase transfer catalyzed oxidation of alcohols. With sodium hypochlorite. **Tetrahedron Letters**. v.39, p.7263-7266, 1998
66. SILVERSTEIN, R.M. BASSLER, G.C. MORRILL, T.C. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. Ed. 5. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro: 1994. 387p.
67. CRABTREE. R. H. **Handbook of Green Chemistry**. Green Catalysis. homogeneous catalysis. 2009.
68. MANO, E. B.; SEABRA, A. P.; **Práticas de Química Orgânica**. 3<sup>a</sup> ed., Ed. Edgard Blücher Ltda; 1987.
69. VOGEL, A. I.; **Química Orgânica. Análise Orgânica Qualitativa**, Ed. Ao Livro Técnico S. A., 1982.
70. MORRISON, R.T.; BOYD, R.N.. **Química Orgânica**, 13ed., Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 1996.
71. VOGEL, A. I. **A Textbook of Practical Organic Chemistry**. 3ed, Longmann: Londres, 1978.
72. VOGEL, A.I.; **Química Orgânica - Análise Orgânica Qualitativa**. v.2 , 3ed., Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, p. 755-756. 1971.
73. LIDE, D. **Handbook of Chemistry and Physics**. 82ed. Washington, DC. 2002
74. SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G.C.; MORRILL, T.C.; **Spectrometric Identification of Organic Compounds**, 3ed, 1974.

75. KANG, E.; Commentary: an industrial perspective on Green Chemistry. **Tetrahedron Letters**, v.66, p. 1029–1030, 2010.

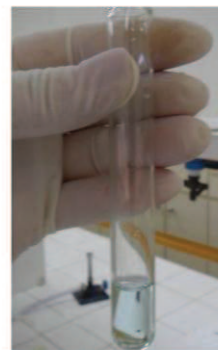
## APÊNDICE

## APÊNDICE 1

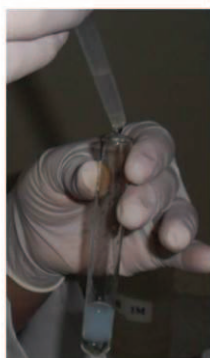


**Determinação Analítica do Segundo Grupo A de Cátions**  
**Grupo do cobre**  
**(Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Bi<sup>3+</sup> e Pb<sup>2+</sup>)**

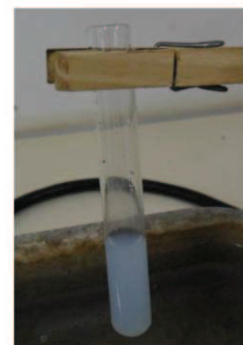
1 mL da Solução Problema (SP)



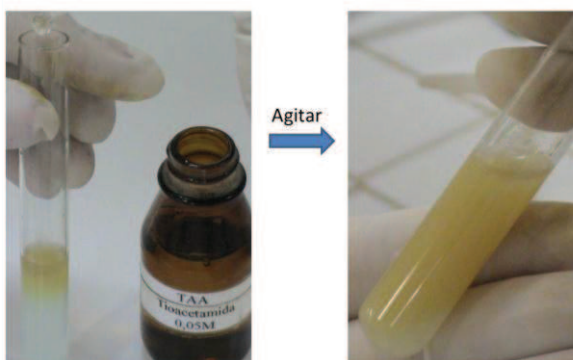
Adição  
NH<sub>4</sub>Cl<sub>(aq)</sub>



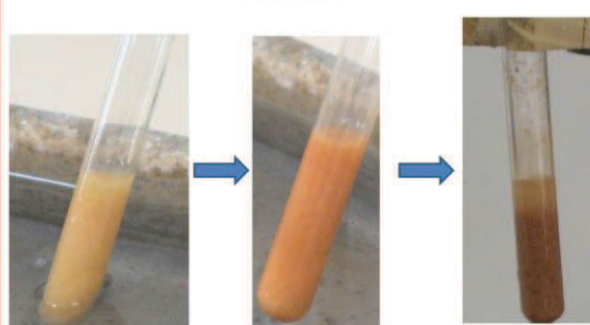
Aquecer  
a solução

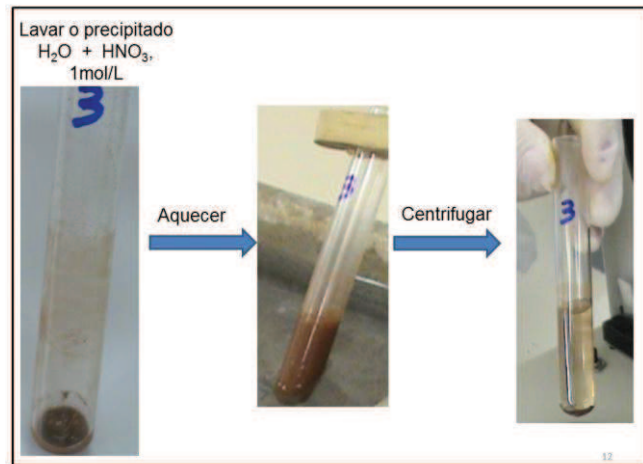
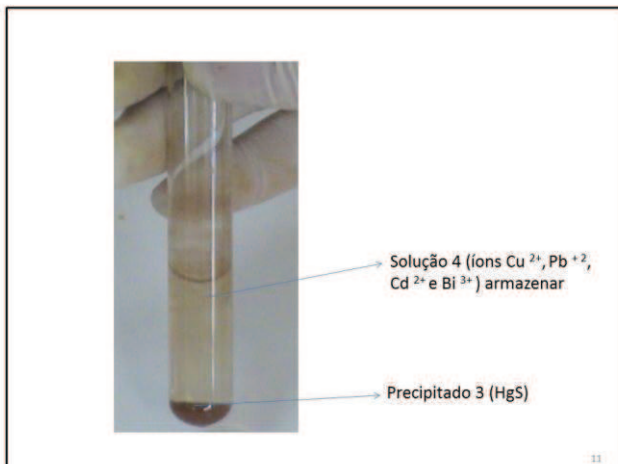
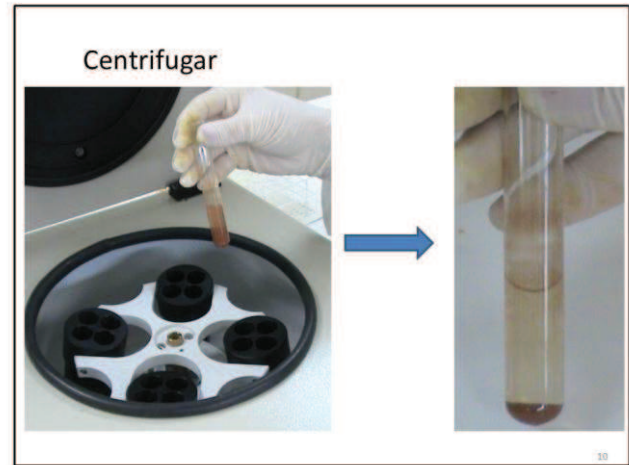
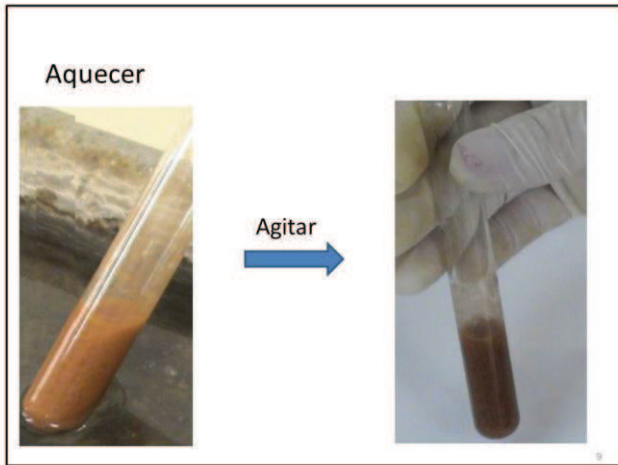
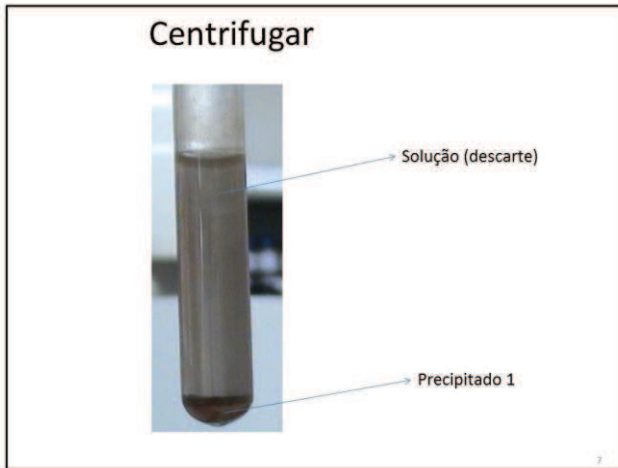


Adição de C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>NS (tioacetamida) 0,05 mol/L



Aquecer





**Dissolução do precipitado**

HNO<sub>3</sub> + HCl  
(água régia)

Agitar

13

**Aquecer**

14

**Identificação do íon Hg<sup>2+</sup>**

Diluir (água)

Agitar

15

**Aquecer**

16

**Centrifugar**

Precipitado branco ou cinza,  
identifica **MERCÚRIO**

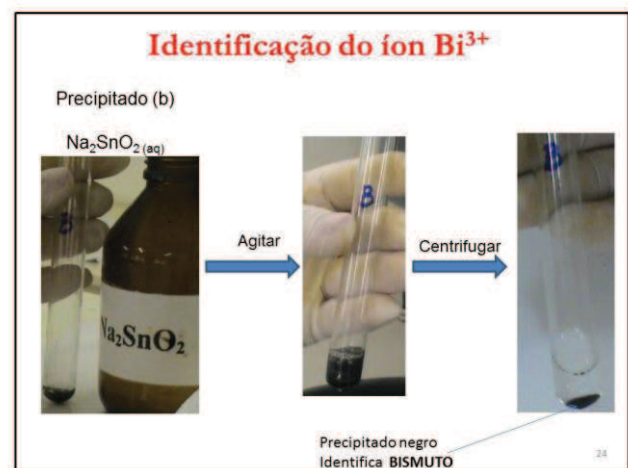
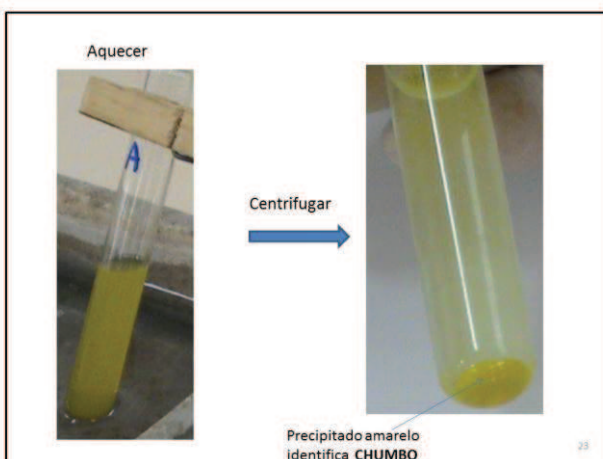
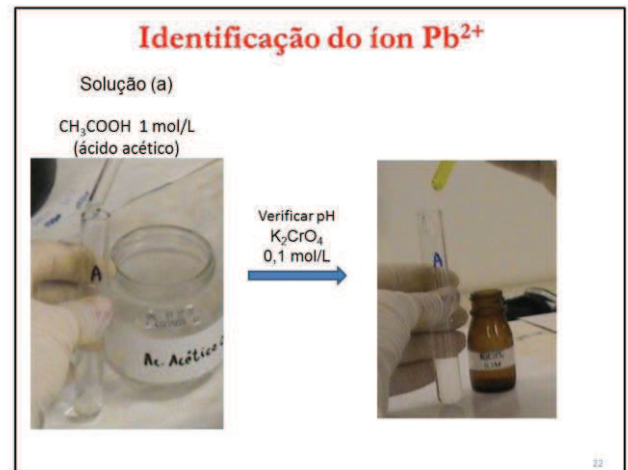
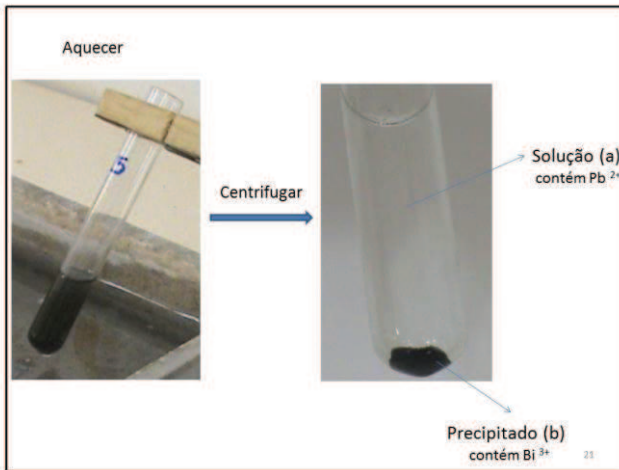
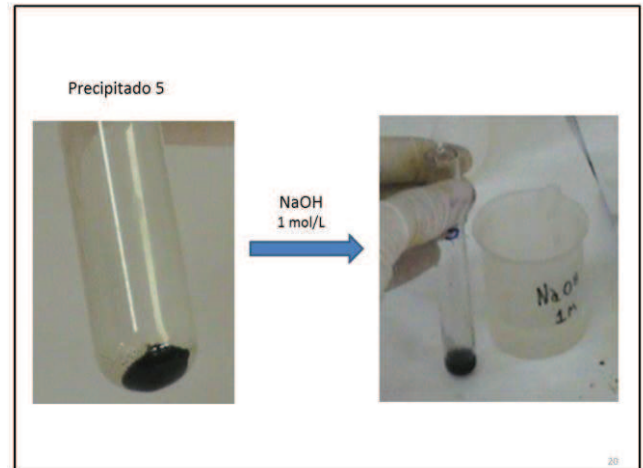
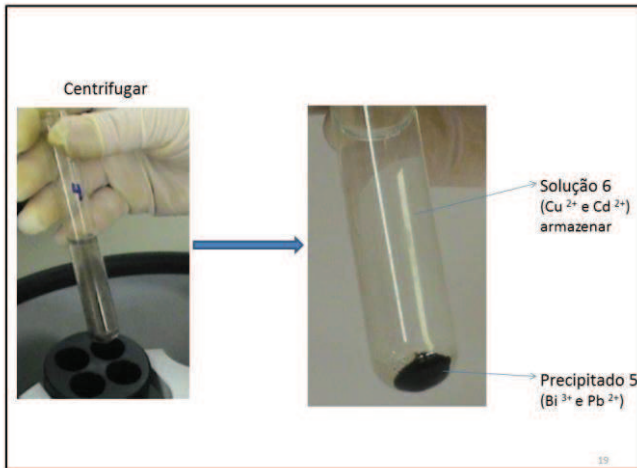
17

**Separação dos íons Bi<sup>3+</sup> e Pb<sup>2+</sup> de Cu<sup>2+</sup> e Cd<sup>2+</sup>**

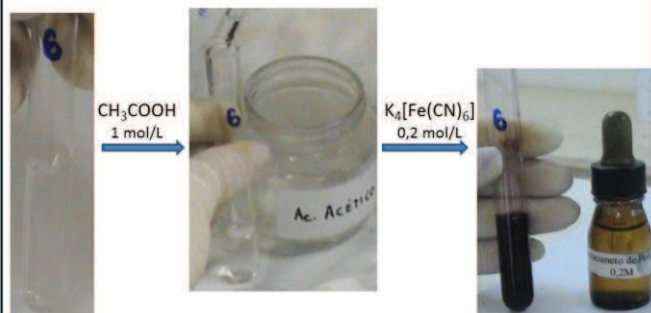
NH<sub>4</sub>OH  
1mol/L

Agitar  
Aquecer

18

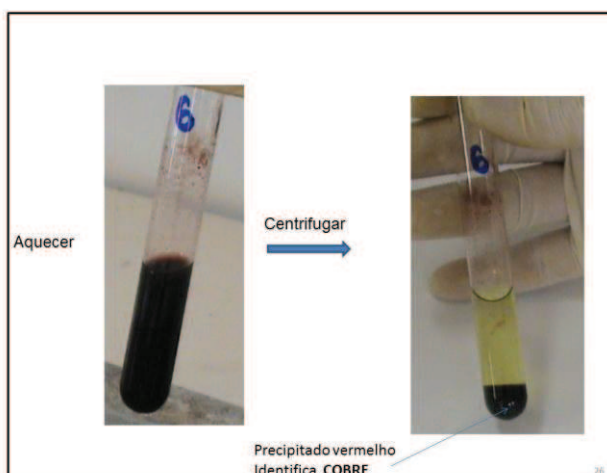


### Identificação do íon $\text{Cu}^{2+}$



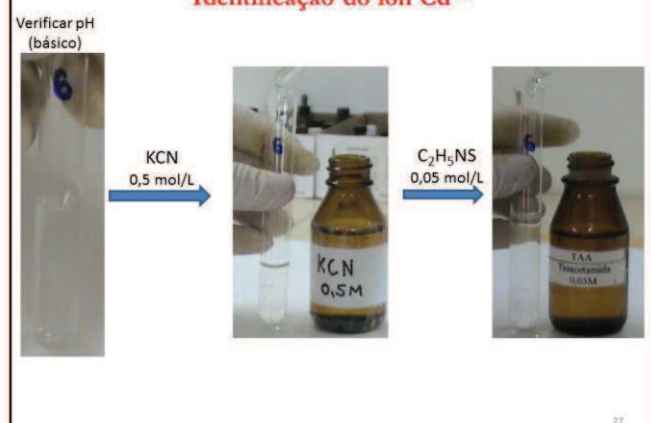
Obs: Dividir a solução 6 em duas partes.

25

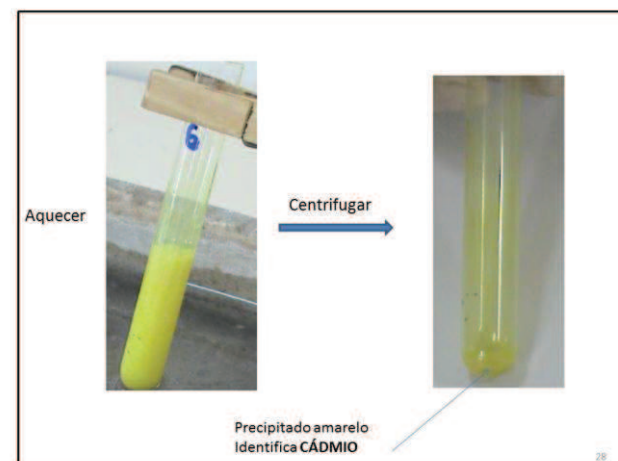


26

### Identificação do íon $\text{Cd}^{2+}$

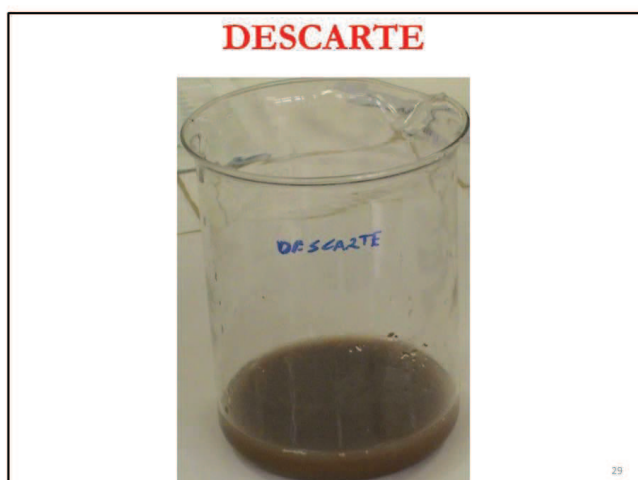


27



28

### DESCARTE



29

## APÊNDICE 2

