

2

Sustentabilidade corporativa, normalização e química analítica verde

Inicialmente, apresenta-se a base conceitual sobre sustentabilidade corporativa, criação de valor sustentável e Química Verde como suporte para a discussão central deste capítulo, qual seja a importância da Química Analítica Verde (QAV) no contexto da sustentabilidade corporativa de empresas e instituições de C&T. Aborda-se na segunda seção o impacto mútuo entre a Química Analítica Verde e a adoção de normas ou certificações relacionadas com gestão ambiental (ISO 14001:2004), gestão de saúde e segurança ocupacional (OHSAS 18001/2), responsabilidade social (ISO 26000:2010), gestão do conhecimento (CEN-CWA 14924:2004), sistemas de gestão da qualidade (ISO 9001:2008) e avaliação da competência de laboratórios de ensaio e calibração (ISO 17025:2004). Destaca-se na terceira seção a contribuição da Química Analítica Verde para a criação de valor sustentável em empresas e instituições de C&T com atividades de Química Analítica, à luz dos princípios da Química Verde aplicáveis às atividades de QAV. Ressalta-se, ao final, a importância do uso de ferramentas de avaliação da graduação verde (termo em inglês, *greenness*) dos métodos analíticos praticados por essas organizações.

2.1.

Bases conceituais

A base conceitual sobre sustentabilidade corporativa e criação de valor sustentável, juntamente com a definição de Química Verde e seus doze princípios, fundamentam a discussão central deste capítulo em torno das seguintes questões:

- Qual a importância da Química Analítica Verde no contexto da sustentabilidade corporativa de empresas e instituições de C&T?;
- A adoção de normas e guias internacionais – relacionados com a gestão do conhecimento, responsabilidade social, gestão de saúde e segurança ocupacional, sistemas de gestão ambiental e da qualidade e requisitos

da competência de laboratórios de ensaio e calibração – vem impactando o desenvolvimento de QAV e vice-versa?;

- Como o desenvolvimento e execução de métodos e procedimentos de QAV pode criar valor sustentável para uma determinada empresa ou instituição de C&T e para suas diversas partes interessadas?.

2.1.1 Sustentabilidade corporativa

Como princípio ético, a sustentabilidade objetiva atingir a contínua satisfação das necessidades humanas e fundamentar o debate sobre o desenvolvimento sustentável, em geral. Quando aplicada ao contexto empresarial e das instituições de C&T, pode ser definida como sustentabilidade corporativa.

De acordo com Welford (1997), a sustentabilidade corporativa associa-se fundamentalmente a processos, mais do que a resultados tangíveis em si. Seus elementos essenciais são: (i) sustentabilidade ambiental, pela adoção de sistemas de gestão ambiental, produção limpa e execução de procedimentos e métodos verdes; (ii) sustentabilidade social (estímulo à participação das partes interessadas e consideração de seus interesses e expectativas em processos decisórios); (iii) sustentabilidade econômico-financeira; e (iv) perspectiva de longo prazo.

Em síntese, Hedstrom et al. (1998) conceituam sustentabilidade corporativa como uma abordagem capaz de criar prosperidade até horizontes de longo prazo, mediante a integração de estratégias voltadas para o crescimento econômico, a preservação ambiental e a equidade social.

As pressões dos sistemas sociais para que as empresas e instituições de C&T se engajem o mais rapidamente possível na visão da sustentabilidade referem-se em grande parte ao alinhamento de seus processos aos objetivos mencionados por Hedstrom et al. (1998). Nesse contexto, O’Riordan e Voisey (1998) abordam a transição para a sustentabilidade como um processo permanente, partindo do pressuposto de que a ‘sustentabilidade pura’ é um estado idealizado, impossível de ser alcançado. Os autores propõem uma escala de evolução para a sustentabilidade, variando do estágio de sustentabilidade muito fraca, que envolve pequenas mudanças de práticas ambientais, até o estágio de sustentabilidade muito forte, autossustentada, inclusiva e que considera os

interesses e necessidades das diversas partes interessadas nos processos decisórios.

Nessa perspectiva, Labuschagne e Brent (2005) identificaram quatro tipos diferentes de forças-motrizas para a incorporação da sustentabilidade nas práticas das organizações. Incluem os mecanismos institucionais voltados para sustentabilidade corporativa e responsabilidade social, assim como licenças para existir, para operar e para comercializar. Esses autores defendem que mudanças organizacionais na direção da sustentabilidade corporativa devem ocorrer em três níveis: (i) estratégico; (ii) metodológico ou de processo; e (iii) operacional.

Observa-se nos últimos anos, uma tendência crescente de implementação de sistemas de gestão ambiental, de elaboração e divulgação de relatórios de sustentabilidade segundo as diretrizes da *Global Reporting Initiative* (GRI, 2006).

Como resultado de um processo evolucionário iniciado no final dos anos 90, surgiram modelos e abordagens importantes voltadas para a sustentabilidade corporativa, especialmente endereçadas às empresas que desejam atuar de forma sustentável. Um dos mais populares instrumentos dessa natureza é a abordagem *Triple Bottom Line*, proposta por Elkington em 1997, que vem sendo objeto de contínuo aperfeiçoamento desde então (Elkington, 1997).

Embora muitas organizações no mundo consigam perceber desenvolvimento sustentável e sustentabilidade corporativa como genuinamente importantes, a maioria não sabe ainda como criar opções de valor segundo esse novo modelo, particularmente no curto prazo. Uma vez que o ambiente de negócios evolui constantemente, refletindo as alterações em expectativas e relevância, as empresas precisam ser flexíveis na forma de abordar a sustentabilidade e monitorar sistematicamente as mudanças de seu ambiente de atuação. A sustentabilidade é ela própria um processo contínuo, desde as pequenas atividades de curto prazo, de ganho imediato, até a incorporação de estratégias que proporcionem vantagens competitivas sustentáveis no longo prazo (Hart e Milstein, 1999; 2003; 2004).

2.1.2 Criação de valor sustentável

Hart e Milstein (1999; 2003; 2004) propõem um modelo complexo e multifacetado de criação de valor sustentável, que considera os desafios globais

do desenvolvimento sustentável. Ressaltam que a sustentabilidade corporativa como princípio das organizações deve contribuir com benefícios econômicos, sociais e ambientais, como discutido anteriormente.

O conceito de sustentabilidade, segundo esses autores, ainda é percebido por muitas organizações como uma exigência legal e redução das margens de lucros. No entanto, Hart e Milstein buscam demonstrar como a sustentabilidade pode se tornar oportunidade de negócio para empresas e organizações que adotam o modelo multidimensional de criação de valor sustentável.

O modelo proposto por esses autores contempla duas dimensões: (i) tempo (presente ou futuro); e (ii) ambiente (interno ou externo à organização). Os quadrantes da Figura 2.1 traduzem-se em espaços para a identificação de oportunidades de uma atuação social e ambientalmente responsável, que podem resultar em benefícios econômicos para a organização no curto, médio e longo prazo.



Figura 2.1 – Criação de valor sustentável

Fonte: Hart e Milstein (2003; 2004).

Conforme ilustrado na Figura 2.1, essas oportunidades podem ser expressas em cada quadrante, a saber: (i) inferior esquerdo (retorno corporativo com a redução de custos e riscos, mediante iniciativas voltadas para a ecoeficiência e para a minimização de resíduos e emissões); (ii) inferior direito (retorno

corporativo com a reputação e legitimidade, através da integração das perspectivas das diversas partes interessadas nos processos decisórios); (iii) superior esquerdo (retorno corporativo pelas inovações sustentáveis e reposicionamento estratégico, mediante o desenvolvimento de competências e soluções tecnológicas sustentáveis); e (iv) superior direito (retorno corporativo pelo crescimento e trajetória sustentável, segundo a visão de futuro de atender a necessidades não satisfeitas, decorrentes do consumo consciente e da mudança de valores frente aos desafios do desenvolvimento sustentável nas próximas décadas).

O ponto fundamental do quadrante inferior esquerdo é a redução de custos e riscos, que faz parte do escopo gerencial da organização e resulta em oportunidades muitas vezes não percebidas. O gerenciamento efetivo de resíduos e a redução de emissões das operações constituem importantes motivadores para geração de valor sustentável até no curto prazo. Nesse sentido, busca-se demonstrar os retornos com a redução de custos e riscos, a partir da avaliação do custo real da geração de resíduos e emissões e os riscos associados, quando a organização não adotar qualquer medida.

Preconizando-se sua atuação sustentável no futuro (quadrante superior esquerdo), a organização deve preocupar-se com o desenvolvimento de produtos e serviços que possam garantir sua sustentabilidade ambiental e social, bem como seu crescimento econômico-financeiro no longo prazo. Deverá, portanto, criar ou fortalecer competências para o desenvolvimento ou incorporação de soluções tecnológicas sustentáveis (produtos, serviços ou processos) para o reposicionamento estratégico no futuro.

Outra estratégia sugerida pelos autores para geração de valor sustentável é a integração das perspectivas das diversas partes interessadas nos processos decisórios da organização (quadrante inferior direito). Para tanto, torna-se fundamental conhecer e avaliar as necessidades identificadas pelos públicos de interesse (clientes, parceiros, força de trabalho, órgãos reguladores, comunidades, mídia e ONGs), traduzindo-as em oportunidades que venham neutralizar os problemas discutidos. Como consequência, o retorno corporativo será o aumento da legitimidade e o fortalecimento da imagem e da reputação da organização. Possuir certificações relativas à gestão de saúde e segurança ocupacional (cf. OHSAS 18001/2), ao sistema de gestão ambiental adotado (cf. ISO 14001:2004) e

a sistemas de gestão da qualidade (cf. ISO 9001:2008) representa uma importante fonte de criação de valor sustentável e de vantagens competitivas associadas à reputação e à credibilidade da organização. Focalizando-se especificamente o potencial de criação de valor sustentável pelas atividades de Química Analítica, discute-se na seção 2.2, adiante, o impacto mútuo entre essas atividades e a adoção de normas ou certificações mencionadas e de outras, como a Norma ISO 17025:2004 referente a requisitos da competência de laboratórios de ensaio e calibração (ISO, 2004).

Na sequência, Hart e Milstein discorrem sobre as forças motrizes globais da sustentabilidade. A primeira é a industrialização. Apesar dos inquestionáveis benefícios que trouxe para a humanidade, a industrialização estimulou também o consumo elevado de matérias-primas não renováveis, poluição ambiental e altas taxas de geração de resíduos. A segunda refere-se às partes interessadas que integram a sociedade civil – hoje bem informadas e exigentes em relação à atuação das organizações e ao consumo dos produtos e serviços ofertados. A terceira relaciona-se fortemente com a questão principal desta dissertação e aborda o desenvolvimento e aplicação de tecnologias emergentes e de métodos de trabalho segundo os preceitos da sustentabilidade. Finalmente, os autores percebem o crescimento populacional, a pobreza e a desigualdade social como catalisadores de cenários de insustentabilidade (poluição, miséria, fome, uso inadequado de recursos naturais, levando à escassez dos mesmos, dentre outros impactos indesejados).

Ao considerar essas quatro forças motrizes, as organizações podem identificar inúmeras oportunidades para a criação de valor sustentável, mediante estratégias direcionadas para um ou mais quadrantes da Figura 2.1. A título de ilustração, essas estratégias referem-se a atividades de pesquisa e desenvolvimento de soluções tecnológicas sustentáveis; à geração de inovações sustentáveis de produtos e processos; a iniciativas operacionais de redução do consumo de energia, de uso de matérias-primas de fontes renováveis e de redução ao máximo do emprego de produtos nocivos à saúde, bem com ao gerenciamento efetivo de resíduos.

Com destaque para o tema da presente dissertação, essas iniciativas incluem o planejamento e a utilização de métodos e procedimentos analíticos com

graduação verde elevada. Esses e demais exemplos citados podem resultar em benefícios econômicos – como redução do consumo de energia elétrica e de matérias-primas, não pagamento de multas por acidentes ou pelo gerenciamento ineficiente de resíduos – além dos benefícios ambientais e sociais.

Hart e Milstein (2003; 2004) recomendam para as organizações que desejam criar valor sustentável, a realização de um diagnóstico, utilizando o próprio modelo de valor sustentável representado na Figura 2.1 e também a avaliação estratégica de oportunidades de criação do valor sustentável *versus* competências internas em relação aos focos identificados (matriz *SWOT*¹). Recomendam, finalmente, a definição objetiva de estratégias e detalhamento de planos de ação relativos às respectivas iniciativas, priorizadas para cada período (curto, médio e longo prazo).

Em síntese, os autores concluem que entender a sustentabilidade como oportunidade de criação de valor para as partes interessadas e fonte de vantagens competitivas já é uma tendência nos ambientes corporativos. Dentre as evidências que traduzem essa percepção, podem ser citadas: (i) o crescente número de relatórios corporativos de sustentabilidade, como mencionado anteriormente; (ii) o movimento ascendente de certificações relacionadas com a criação de valor sustentável; e (iii) a criação de programas internacionais voltados para a sustentabilidade corporativa e redução de emissões, como o *Carbon Disclosure Project* (CDP, 2010) e o *Greenhouse Gas Protocol* (World Resource Initiative, 2004).

2.1.3 Química Verde: conceito e princípios

A partir das abordagens conceituais sintetizadas nos itens anteriores, buscase analisar a contribuição de iniciativas, conceitos e princípios da chamada Química Verde para a sustentabilidade das organizações que atuam com processos de produção, transporte e utilização de produtos químicos, incluindo a realização de procedimentos e métodos de Química Analítica.

¹ Matriz *SWOT* é uma ferramenta consagrada no campo de planejamento estratégico e tem por objetivo identificar as forças e fraquezas de uma organização (ambiente interno) e contrastá-las matricialmente com as oportunidades e ameaças (ambiente externo). Os resultados da análise estratégica fornecem aos decisores importantes elementos para a definição da estratégia corporativa.

Segundo OECD (1998), define-se 'Química Verde' como o desenvolvimento e a utilização de produtos químicos e processos para reduzir ou eliminar o uso ou geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao meio ambiente.

Conforme trabalhos consagrados neste campo, um dos objetivos mais importantes da Química Verde é buscar o desenvolvimento de métodos químicos mais seguros e que preserve o meio ambiente (Anastas e Warner, 1998; Anastas e Eghbali, 2010).

Essa busca pelo desenvolvimento de uma 'química sustentável' não tem sido feita de forma acidental. Inclui diagnóstico, planejamento, concepção sistemática e inovação.

Pela importância crescente do tema na última década, instituições como a *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*, *Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD)* e a *US Environmental Protection Agency (US EPA)* mobilizaram-se e formaram um consenso sobre doze princípios que devem balizar o desenvolvimento da Química Verde. São eles:

- Princípio #1 – Prevenção: é melhor prevenir a formação de resíduos do que tratar áreas poluídas;
- Princípio #2 – Eficiência atômica: os métodos sintéticos devem ser desenvolvidos para incorporar o máximo possível do número de átomos dos reagentes do produto final;
- Princípio #3 – Síntese segura: métodos sintéticos devem ser desenvolvidos de maneira que utilizem e gerem substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e o ambiente;
- Princípio #4 – Desenvolvimento de produtos seguros: deve-se buscar o desenvolvimento de produtos químicos que após o uso desejado não causem danos ao meio ambiente;
- Princípio #5 – Uso de solventes e substâncias auxiliares seguras: a utilização de substâncias auxiliares como solventes, agentes de separação, etc. deve ser evitado ao máximo, porém quando suas utilizações forem inevitáveis, as mesmas devem ser inócuas ou facilmente reutilizáveis;
- Princípio #6 – Busca pela eficiência energética: os impactos ambientais e econômicos causados pela geração de energia utilizada em um

processo químico devem ser minimizados. Métodos que ocorram à pressão e temperatura ambientes necessitam ser desenvolvidos;

- Princípio #7 – Uso de matérias primas renováveis: o uso de biomassa como matéria prima deve ser priorizado no desenvolvimento de novas tecnologias e processos;
- Princípio #8 – Evitar a derivatização: processos que envolvem intermediários com grupos bloqueadores, proteção/desproteção, ou qualquer modificação temporária da molécula por processos físicos ou químicos devem ser evitados, pois esses passos requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos;
- Princípio #9 – Catálise: o uso de catalisadores, tão seletivos quanto possível, deve ser adotado em substituição aos reagentes estequiométricos;
- Princípio #10 – Produtos degradáveis: os produtos químicos precisam ser desenvolvidos para a biocompatibilidade. Após serem utilizados não devem permanecer no ambiente, degradando-se em produtos inócuos;
- Princípio #11 – Análise em tempo real para prevenir a poluição: deve ser viabilizado o monitoramento e controle, em tempo real, durante o processo. A possibilidade de formação de substâncias tóxicas deve ser detectada antes de serem geradas;
- Princípio #12 – Química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes: a escolha das substâncias, bem como a sua utilização em um processo químico, devem procurar a minimização do risco de acidentes, como vazamentos, incêndios e explosões.

Esses princípios têm provado ser a fonte de soluções inovadoras para uma ampla gama de problemas no campo da Química e, em particular, na Química Analítica. Constituem as “regras do projeto” para orientar os químicos analíticos a atingirem a meta intencional da sustentabilidade no campo da Química Analítica (Keith et al., 2007).

No entanto, segundo esses autores, dentre os doze princípios, apenas seis se aplicam à Química Analítica Verde, a saber:

- Prevenção (princípio #1);
- Uso de solventes e substâncias auxiliares seguras (princípio #5);
- Busca pela eficiência energética (princípio #6);
- Evitar a derivatização (princípio #8);
- Análise em tempo real para prevenção de poluição (princípio #11);

- Química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes (princípio #12).

Além de Keith et al. (2007), outros pesquisadores buscaram identificar consequências analíticas dos 12 princípios da Química Verde, dentre eles Guardia e Garrigues (2011; 2012); Guardia e Armenta (2011); e, mais recentemente, Galuszka et al. (2013). Keith et al., 2007).

Esses últimos autores identificaram conceitos importantes de Química Analítica Verde que não foram considerados em alguns dos 12 princípios propostos por Anastas e Warner (1998).

A partir desta constatação, sugeriram a revisão dos 12 princípios da QV no sentido de uma plena aplicação em atividades de Química Analítica. Em sua proposta, os autores utilizaram os seis princípios identificados por Keith et al. (2007) e complementaram essa lista inicial com seis novas diretrizes, como apresentado a seguir:

- Devem ser aplicadas técnicas analíticas diretas para evitar procedimentos de tratamento de amostras;
- O tamanho e o número de amostras devem ser minimizados;
- Realização de medições *in situ*;
- Integração de processos analíticos e operações visando à economia de energia e à redução do consumo de reagentes;
- Seleção de métodos automatizados e miniaturizados;
- Geração de derivação deve ser evitada;
- Geração de um grande volume de resíduos analíticos deve ser evitada, mediante prevenção e gerenciamento adequado dos resíduos analíticos;
- Preferência por métodos multianalitos ou multiparâmetros ao invés daqueles que empregam monoanalito;
- Consumo de energia deve ser minimizado;
- Preferência por reagentes obtidos a partir de fontes renováveis;
- Reagentes tóxicos devem ser eliminados ou substituídos;
- Segurança do operador deve ser intensificada.

A discussão sobre a aplicabilidade dos princípios definidos por Anastas e Warner (1998) no contexto da QAV será retomada no capítulo 3, quando da escolha das ferramentas de avaliação da graduação verde de métodos analíticos, visando à modelagem da sistemática de avaliação a ser adotada no estudo de caso (capítulo 4).

2.2

Química Analítica na perspectiva da normalização

Ressalta-se nesta seção a conscientização crescente de empresas e instituições de C&T em relação à efetiva gestão de segurança, meio ambiente e saúde ocupacional (SMS), mediante a implementação de sistemas de gestão e iniciativas voltadas para o atendimento a requisitos legais e normativos baseados em normas internacionais e nacionais.

Valcárcel e Lucena (2013) abordam os impactos mútuos entre a Química Analítica e a adoção de normas e guias internacionais relacionados com gestão ambiental (ISO 14001:2004), gestão de saúde e segurança ocupacional (OHSAS 18001/2), gestão da qualidade (ISO 9001:2008) e avaliação da competência de laboratórios de ensaio e calibração (ISO 17025:2004), gestão do conhecimento (CEN-CWA 14924:2004) e responsabilidade social (ISO 26000:2010).

Os autores mostram na Figura 2.2 relações biunívocas da Química Analítica com pelo menos seis normas e guias internacionais, que levam a impactos mútuos da adoção dessas normas nos referidos campos de atividades.

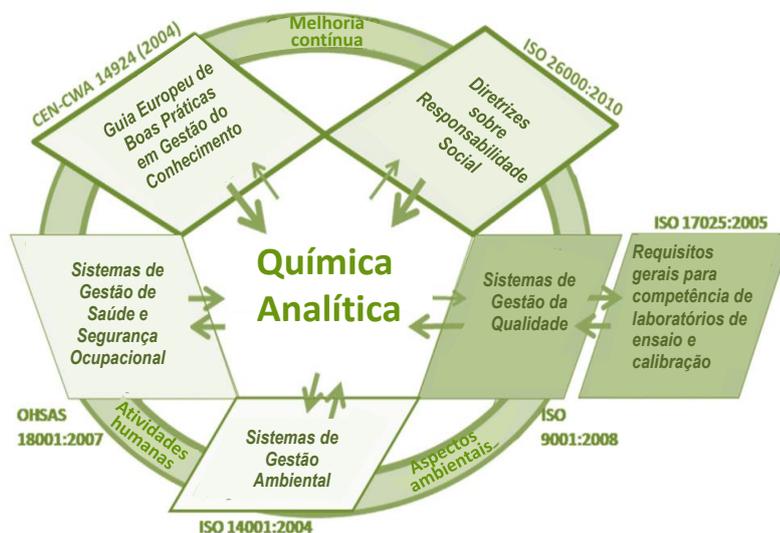


Figura 2.2 – Influências da adoção de normas e guias sobre as atividades de Química Analítica e vice-versa

Fonte: Valcárcel e Lucena (2013).

As principais características das relações entre Química Analítica e os seis documentos de normalização selecionados são: (i) as relações são biunívocas; (ii)

adaptação mútua em cada relação biunívoca é mandatória; (iii) podem ter impacto positivo ou negativos.

Com relação à primeira característica, ambos os lados (normas e atividades de QA) recebem influências mútuas. Essas influências podem ter diferentes níveis de importância, indicados didaticamente no Figura 2.2 pelo tamanho e largura das setas.

No que tange à segunda característica, os autores alertam para o fato que as normas foram especialmente concebidas e aplicadas a empresas e organizações, não tendo sido enfatizadas peculiaridades da área de C&T. A fim de que as instituições de C&T possam se beneficiar das relações mútuas, torna-se necessário extrapolar cuidadosamente para a Química Analítica as abordagens gerais das normas.

Quanto aos impactos das normas sobre o avanço da Química Analítica e as contribuições que avanços nesse campo podem trazer para a normalização, os autores ressaltam que as relações podem gerar impactos positivos ou negativos e citam exemplos concretos, a saber: (i) contextualização equivocada e burocracia com excesso de documento (impactos negativos); e (ii) desenvolvimento de enquadramentos básicos, diretrizes para implementar boas práticas (impactos positivos).

A partir dessas características, os autores buscam identificar as principais relações entre a Química Analítica e cada uma das normas abordadas no artigo. As discussões em torno dessas relações, juntamente com o conhecimento sobre os princípios da Química Verde aplicáveis à Química Analítica, contribuíram para a escolha das ferramentas abordadas no capítulo 3.

2.3.

Química analítica na perspectiva da sustentabilidade corporativa: Química analítica verde (QAV)

A filosofia da Química Verde tem sido considerada como o centro da Química Ecológica e, nesse contexto, a Química Analítica constitui uma importante ferramenta para determinar a qualidade do ar, da água e do solo e é também indispensável para fornecer os dados necessários para o desenvolvimento de modelos voltados para a decomposição de moléculas sintéticas tóxicas. Reforça-se, com isso, a necessidade de conhecimento sobre as substâncias

químicas para avaliação dos riscos ambientais da produção, transporte e utilização de produtos químicos.

Ressalta-se, no entanto, que o escopo das atividades de Química Analítica não deve ficar restrito à identificação, monitoramento ou controle de substâncias nocivas ao meio ambiente e à saúde humana. Considerando que as atividades analíticas também podem gerar danos aos ecossistemas mediante a utilização de reagentes tóxicos e a geração de resíduos. As oportunidades oferecidas pela Química Analítica devem, portanto, ser analisadas frente aos compromissos da organização com a preservação do meio ambiente (tanto o meio abiótico, quanto o biótico), com a saúde e segurança ocupacional e com a criação de valor sustentável, em geral. É nessa perspectiva mais ampla que se insere o conceito de ‘Química Analítica Verde’.

Baseando-se nos trabalhos de Namiésnik (2001), Keith et al. (2007) e Armenta, Garrigues e Guardia (2008), define-se, para fins da presente dissertação, Química Analítica Verde como o desenho, desenvolvimento e utilização de métodos de Química Analítica, visando reduzir ou eliminar o uso ou geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao ambiente.

Guardia e Garrigues (2011; 2012) descrevem a evolução dos principais objetivos da Química Analítica antes e depois do surgimento do paradigma ecológico. De acordo com a opinião desses autores, a busca por um equilíbrio entre o homem e a biosfera tem ampliado o interesse dos cientistas e analistas para além do foco principal das metodologias analíticas, conscientizando-os sobre os efeitos adversos potenciais de suas práticas. No entanto, Guardia e Garrigues afirmam que, em uma perspectiva mais ampla, uma ‘boa’ Química Analítica Verde deve ser orientada para novos desafios, sem renunciar melhorias nos aspectos básicos dos métodos analíticos. Esse argumento alinha-se fortemente às premissas do modelo de Hart e Milstein no que se refere à visão de futuro (ver quadrantes superiores da Figura 2.1, no item 2.1.1).

Segundo esse enfoque, Guardia e Garrigues ressaltam ainda a necessidade de se encontrar um equilíbrio entre a qualidade dos métodos empregados (avaliada por parâmetros analíticos convencionais, como precisão, seletividade, detectabilidade, dentre outros) e seu caráter ambientalmente responsável e seguro (expresso por novos parâmetros, como eficiência energética, uso de solventes e

reagentes de fontes renováveis, para citar alguns exemplos). Ilustram com exemplos de substituição de reagentes tóxicos por inócuos; de redução do tamanho e do número de amostras; de racionalização do consumo de reagentes e solventes; e da manutenção ou melhoria da precisão, sensibilidade e seletividade dos métodos disponíveis.

Esses autores afirmam ainda que a confiabilidade dos métodos analíticos pode ser facilmente questionada em relação à minimização do tamanho ou quantidade da amostra, da aplicação de métodos diretos e à miniaturização de instrumentos. Nesse sentido, Galuszka et al. (2013) alertam que um dos inconvenientes do emprego de alternativas analíticas mais verdes em substituição aos métodos convencionais é um desempenho inferior do método alternativo (mais verde), considerando parâmetros usualmente adotados na avaliação comparativa de métodos analíticos, como acuidade, precisão, seletividade, sensibilidade e detectabilidade.

Galuszka et al. (2013) comparam técnicas utilizadas para determinação de um determinado analito na mesma matriz com as suas alternativas mais verdes, de acordo com os critérios acima mencionados. Essa comparação, baseada em diferentes aplicações analíticas (ambientais, alimentos, farmacêuticas, industriais e biomédicas), permitiu que os autores identificassem algumas implicações práticas referentes ao uso de métodos analíticos verdes. A maioria dos procedimentos analíticos verdes recentemente introduzidos pode ser caracterizada não somente pela proteção do meio ambiente, mas também pelo baixo custo de análise, menor consumo de energia, simplicidade e eficiência no uso do tempo, assim como pela relativamente alta sensibilidade. Os autores sugerem que provavelmente alguns métodos tradicionais em breve serão substituídos por essas novas técnicas verdes.

Guardia e Armenta (2011) compartilham esse ponto de vista, pois acreditam que o rápido desenvolvimento tecnológico e o avanço do conhecimento sobre os problemas existentes no campo da Química Analítica poderão levar a melhorias na graduação verde dos métodos analíticos e até ao desenvolvimento de novos métodos em substituição aos convencionais. Às vezes, esses problemas podem ser resolvidos de forma simples (por exemplo, modificando as medições *in-situ* para melhorar a calibração utilizando padrões entre as amostras).

De uma forma geral, as análises químicas são consideradas complexas e envolvem várias etapas, para as quais alternativas ecológicas podem ser empregadas. Para a proposição de alternativas ‘mais verdes’, torna-se fundamental avaliar cada uma das etapas (e os respectivos procedimentos) que compõem uma determinada metodologia analítica. Buscando sempre atender aos princípios da Química Verde aplicáveis (Keith et al, 2007; Galuszka et al, 2013).

Galuszka et al. (2013) reforçam os argumentos acima, ao ressaltarem que a Química Analítica moderna oferece muitas técnicas e instrumentos para a determinação de um dado analito em diferentes amostras. Em outras palavras, abre inúmeras oportunidades para se chegar ao equilíbrio entre a qualidade dos métodos empregados e seu caráter ambientalmente responsável e seguro, como recomendado Guardia e Garrigues. Segundo Galuszka et al. (2013), as oportunidades de avanços no campo da Química Analítica Verde referem-se basicamente às seguintes metas:

- eliminação ou redução do uso de substâncias químicas (solventes, reagentes, conservantes, aditivos para ajuste de pH e outros);
- minimização do consumo de energia;
- gestão adequada dos resíduos analíticos;
- maior segurança para o operador.

Na perspectiva, Galuszka et al. (2013) identificaram seis questões críticas que deveriam ser consideradas em relação ao atendimento aos princípios da Química Verde aplicáveis (Fig. 2.3).



Figura 2.3 – Componentes de procedimentos analíticos no contexto da Química Analítica Verde

Fonte: Galuszka et al., 2013.

A discussão sobre os parâmetros para avaliação da graduação verde de métodos analíticos será retomada no capítulo 4, quando da escolha de ferramentas que farão parte da sistemática integrada de avaliação a ser adotada no estudo de caso (capítulo 5).

2.4. Considerações finais sobre o capítulo

A base conceitual sobre sustentabilidade corporativa e criação de valor sustentável, juntamente com a definição de Química Verde e seus doze princípios, permitiu fundamentar a discussão sobre a importância da Química Analítica Verde no contexto da sustentabilidade corporativa de empresas e instituições de C&T. Focalizando, mais especificamente a contribuição da normalização em seis áreas – gestão ambiental, gestão de segurança e saúde ocupacional, gestão do conhecimento, responsabilidade social, gestão da qualidade e avaliação da competência de laboratórios de ensaio e calibração – buscou-se evidenciar os benefícios mútuos decorrentes da adoção das respectivas normas e de métodos analíticos mais verdes em comparação aos convencionais.

Com base na discussão sobre a criação de valor sustentável por uma determinada empresa ou instituição de C&T mediante o desenvolvimento e execução de métodos e procedimentos de QAV, pode-se concluir que:

- a maioria dos métodos analíticos apresenta uma graduação pouco verde, necessitando, portanto, de melhorias ou de substituições voltadas para a eliminação de reagentes tóxicos, redução do uso de reagentes e de energia, minimização de resíduos e aumento da segurança dos operadores;
- as melhorias ou substituições são necessárias ao longo de todo o processo analítico, começando com a amostragem e terminando com o tratamento adequado de resíduos analíticos;
- as alternativas mais verdes contemplam uma ou mais das seguintes estratégias: (i) uso de quimiometria e estatísticas para a redução do número de amostras; (ii) uso de sistemas analíticos integrados para melhoria da eficiência analítica; (iii) redução do uso de reagentes e solventes; (iv) consumo de reagentes, de preferência de origem

renovável e menos tóxicos; e (v) miniaturização de métodos para reduzir os riscos para o operador e danos ao meio ambiente;

- os princípios da Química Verde aplicáveis à Química Analítica (discutidos no item 2.1.3) fornecem orientações essenciais para tornar as operações de laboratórios de QA mais verdes. No entanto, considerando-se a diversidade de métodos de análise e suas características (em termos de consumo de energia, reagentes e solventes, geração de resíduos e segurança) é impossível formular princípios universais para todas as aplicações possíveis. As propostas de Keith et al. (2007) e de Galuszka et al. (2013) podem ser consideradas como abordagens gerais a serem testadas empiricamente em avaliações quantitativas de processos e métodos analíticos específicos, como será visto no capítulo 4 desta dissertação.