

1 Introdução

Um grande desafio para a economia moderna é direcionar-se para sistemas cada vez mais sustentáveis de produção e consumo. Enfrentar esse desafio exige mudanças profundas nas atuais relações com os recursos naturais, nas formas de conceber e implantar sistemas de produção e no gerenciamento de resíduos e efluentes dos processos produtivos. Pelo lado da oferta, a transição para sistemas mais sustentáveis depende, principalmente, de inovações sustentáveis. Ou seja, depende da capacidade das empresas desenvolverem novos métodos, produtos ou processos que venham contribuir para a sustentabilidade ambiental. Pelo lado da demanda, a transição apoia-se fundamentalmente em mudanças nos padrões de consumo e hábitos, segundo os preceitos da sustentabilidade.

Focalizando-se especificamente a indústria química, nas últimas décadas testemunhou-se o surgimento de novos conhecimentos visando o desenvolvimento de uma indústria química sustentável, em função das crescentes pressões sociais e políticas. Já na década de 1980, começam a surgir termos ambientalmente conscientes relacionados a esse movimento, bem como a convergência ética entre a Química e a preservação ambiental (Epicoco et al., 2014).

Não obstante a diversidade de termos e visões – química sustentável, química limpa, química verde e química benigna – o movimento para a sustentabilidade da indústria química tem crescido com o forte apoio de uma comunidade internacional de profissionais do meio acadêmico, da indústria e do governo. Isso pode ser evidenciado pelo aquecimento de debates públicos sobre a sustentabilidade da indústria química nas últimas décadas e pelo rápido crescimento, desde 1998, das publicações científicas indexadas sob o termo “química verde” (como pode ser observado adiante na Figura 1.1).

Linthorst (2010) fornece um histórico da origem e do desenvolvimento da Química Verde, identificando três principais fases desse movimento.

O primeiro período vai de 1980 até o final de 1992 e caracterizou-se pela necessidade de se adotar nos EUA a prevenção como princípio da preservação

ambiental e do combate à poluição, ao invés de uma política de controle e fiscalização por parte da *US Environmental Protection Agency (US EPA)*. Naquele país, essa nova abordagem foi expressa no *Pollution Prevention Act*, em 1990, que formalizou o interesse de cooperação entre o governo e a indústria química e a disponibilidade de recursos financeiros à *US EPA* para o lançamento de novos programas, visando o desenvolvimento de processos e métodos químicos alternativos (e verdes).

O segundo período (1993 – 1998) foi marcado pelo processo de institucionalização progressiva da Química Verde. Um simpósio foi organizado com o objetivo de ampliar a formação da rede e a cooperação entre a indústria, a academia e o governo (mas também entre países, como Japão e Itália). Durante esses anos, a terminologia que refletia as diversas visões da época, começou a mudar em favor do termo “química verde”, ao se comparar, por exemplo, com outros termos como química limpa ou química benigna. Em 1998, o Prof. Paul Anastas, que também é representante da *US EPA*, e John Warner publicaram o primeiro livro sobre Química Verde, que se tornou referência no mundo todo. Nesse livro, os autores definiram os objetivos da Química Verde, a visão de futuro e os desafios associados ao movimento. Segundo os autores, Química Verde pode ser definida como “o desenho de produtos e processos químicos para reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias químicas perigosas”, devendo ser balizados por 12 princípios, que serão abordados em detalhe no capítulo 2.

Ainda no segundo período, criou-se nos EUA o prêmio *US Presidential GC Challenge Awards* (1995), o *Green Chemistry Institute* (uma organização sem fins lucrativos fundada em 1997 para a incorporação e disseminação dos 12 princípios da Química Verde), a *Green Chemistry Network* (1998) e o *Green Chemistry Journal* (1999), um periódico científico focalizando explicitamente a pesquisa nesse campo.

Já no terceiro período (1999 – em diante) observa-se uma significativa contribuição do *Green Chemistry Journal* (GCJ) em termos de divulgação dos trabalhos científicos e disseminação do conceito em larga escala. Em 2009, o GCJ foi classificado em 15º lugar, dentre os 140 periódicos de Química de maior fator de impacto. A título de ilustração, citam-se outros periódicos que ganharam destaque no terceiro período, como a revista *Green Chemistry* publicada pela

Royal Society of Chemistry, no Reino Unido; e as publicações *Green Chemistry Letters and Reviews*, divulgadas desde 2007, por Taylor & Francis, também no Reino Unido. Além desses dois exemplos, muitas seções de revistas e jornais científicos têm focalizado questões das metodologias verdes, como ocorreu em 2008 com a revista “*Trends in Analytical Chemistry*”, editada pela Elsevier.

Além do *Green Chemistry Institute*, afiliado à *American Chemical Society* (EUA), inúmeras iniciativas foram criadas nesse período, em nível mundial: (i) *Green Chemistry Network*, estruturada pela *Royal Society of Chemistry* (Reino Unido); (ii) *Inter-University Consortium of Chemistry for the Environment* (Itália); (iii) *Canadian Green Chemistry Network*, resultante da afiliação ao *Green Chemistry Institute* (Canadá); (iv) *Centre of Green Chemistry of Monash University* (Austrália); e (v) outras iniciativas na Alemanha, Japão, Espanha, Suécia, Rússia e, mais recentemente, no Brasil (CGEE, 2009).

Atualmente, os princípios da Química Verde podem ser considerados como referência normativa das atividades industriais e de P&D em Química, direcionadas para a sustentabilidade. No contexto normativo, os métodos e procedimentos de Química Analítica constituem importantes ferramentas para determinar a qualidade do ar, da água e do solo, sendo também indispensáveis na obtenção de dados necessários para o desenvolvimento de modelos voltados para a decomposição de moléculas sintéticas tóxicas. Por outro lado, podem também contribuir para danos ao ecossistema, pela utilização de reagentes tóxicos, geração de resíduos ou consumo elevado de energia.

Em princípio, todos os componentes de um determinado método analítico (incluindo solventes e reagentes, instrumentação e protocolos) podem trazer danos à saúde humana, à segurança das operações e ao meio ambiente. Isso porque os solventes e reagentes podem ser tóxicos ou bioacumulativos e os equipamentos e a instrumentação podem exigir grandes quantidades de energia para operarem. Mais precisamente, os riscos estão associados à complexidade dos métodos químicos analíticos.

Nessa perspectiva, considera-se de fundamental importância a reflexão crítica por parte das instituições de pesquisa e desenvolvimento, em geral, e de centros de P&D de empresas, em particular, sobre os métodos de Química Analítica que vêm adotando, no sentido de passarem a empregar métodos mais

‘verdes’. Essas instituições devem avaliar de forma sistemática os riscos inerentes a alguns tipos de amostras, o uso elevado de reagentes e solventes químicos, o alto consumo de energia associado à automação, além da geração de resíduos e emissões poluentes resultantes das várias etapas dos processos químioanalíticos. Trata-se do compromisso ético de desenvolver e oferecer metodologias analíticas verdes, como parte da avaliação dos custos ambientais e de segurança das práticas e procedimentos convencionais de Química Analítica.

Cabe ressaltar ainda a conscientização crescente de empresas em relação à efetiva gestão de segurança, meio ambiente e saúde ocupacional (SMS), mediante a implementação de sistemas de gestão baseados em normas internacionais. Valcárcel e Lucena (2013) abordam o impacto mútuo entre a Química Analítica e a adoção de normas e guias internacionais relacionados com a gestão do conhecimento (CEN-CWA 14924:2004), responsabilidade social (ISO 26000:2010), gestão de saúde e segurança ocupacional (OHSAS 18001/2), gestão ambiental (ISO 14001:2004), os sistemas de gestão da qualidade (ISO 9001:2008) e requisitos da competência de laboratórios de ensaio e calibração (ISO 17025:2004).

No Brasil, na esteira das iniciativas empresariais de implementação de programas e sistemas voltados para a segurança operacional, gestão ambiental e saúde ocupacional, a Petrobras estruturou, em 2006, um projeto estratégico intitulado “Excelência em Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS)”, dando continuidade à implantação de 15 diretrizes corporativas de SMS na Companhia e ao Programa de Segurança de Processo da Petrobras, concluído em 2005. A proposta desse projeto foi consolidar conquistas já obtidas em termos de desempenho em SMS e promover melhorias para preparar a Empresa para o crescimento projetado em seu Plano Estratégico – 2020. O projeto foi estruturado em duas fases, abrangendo todas as áreas de negócio da empresa, as atividades de P&D e Engenharia, as unidades no exterior e as empresas subsidiárias (Petrobras, 2006).

A primeira fase de implantação do Projeto foi iniciada em 2006 e concluída em 2010, passando antes por uma revisão. Já a segunda, em andamento no momento, deverá estar concluída até 2015.

O projeto tem como pilares seis iniciativas, a saber:

- Gestão integrada de SMS;
- Ecoeficiência de operações e produtos;
- Prevenção contra acidentes, incidentes e desvios;
- Saúde dos trabalhadores;
- Prontidão para atuar em situações de emergência;
- Minimização de riscos e passivos.

Especificamente, em relação à Química Analítica Verde, o Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes) já vem aplicando a ferramenta *National Environmental Methods Index (NEMI)*, dos EUA, para avaliar os perfis dos métodos analíticos que executa quanto à sua graduação verde. A avaliação consiste na aplicação dos quatro critérios *NEMI* para definir o ‘perfil verde’ de cada método, como será descrito em detalhe no capítulo 3 desta dissertação. A experiência do Cenpes, ao aplicar os critérios do *Green Chemistry Institute/NEMI*, envolveu doze laboratórios e cerca de 100 profissionais.

A presente pesquisa, em continuidade aos esforços já empreendidos pelo Cenpes, expande a avaliação da graduação verde dos métodos analíticos, introduzindo duas ferramentas de avaliação de Química Analítica Verde, além do pictograma *NEMI*, e integrando-as em uma abordagem conceitual que culmina na análise das forças e fraquezas de cada método e das oportunidades e ameaças potenciais em relação à substituição por métodos analíticos de perfis ‘mais verdes’. Visando demonstrar a aplicabilidade da abordagem integrada proposta, buscou-se concentrar a pesquisa de campo em cinco métodos analíticos realizados com maior frequência pelo Laboratório de Métodos Especiais do Cenpes.

1.1. Definição do problema de pesquisa

O problema da pesquisa a ser investigado norteia-se pela seguinte questão: “Quais os perfis dos métodos do Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Centro de Pesquisas da Petrobras avaliados segundo abordagem conceitual de Química Analítica Verde que integra ferramentas de avaliação adotadas nesse campo e referenciais normativos consagrados em nível internacional?”.

Visando responder a questão principal, desdobram-se seis questões a seguir:

- Qual a importância da Química Analítica Verde no contexto da sustentabilidade corporativa de empresas e instituições de C&T?;
- Que ferramentas estão sendo desenvolvidas e empregadas em nível mundial para avaliação de métodos analíticos, em conformidade com os princípios da ‘Química Analítica Verde’ e referenciais normativos consagrados?;
- Qual a graduação verde dos métodos analíticos mais executados pelo Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Cenpes-Petrobras, analisados segundo a abordagem conceitual que integra três pictogramas de perfis verdes – *National Environmental Methods Index (NEMI)* e pictogramas complementares?;
- Dentre os métodos avaliados, quais poderão ser modificados ou substituídos por alternativas ‘mais verdes’, baseando-se no estado-da-arte da QAV e buscando-se alinhamento aos objetivos do Projeto Estratégico 'Excelência em SMS" da Petrobras?;
- Que modificações ou alternativas mais verdes poderão ser propostas à Gerência de Química do Cenpes – Petrobras em relação aos métodos avaliados?.

1.2.

Objetivos: geral e específicos

Nesse contexto, o objetivo geral desta dissertação é avaliar os métodos do Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Centro de Pesquisas da Petrobras, segundo abordagem conceitual de Química Analítica Verde que integra ferramentas de avaliação adotadas nesse campo e referenciais normativos consagrados em nível internacional. Em termos específicos, a dissertação busca:

- Conceituar ‘Química Analítica Verde’ e discutir sua importância no contexto da sustentabilidade corporativa de empresas e instituições de C&T;
- Identificar as ferramentas que estão sendo desenvolvidas e empregadas em nível mundial para avaliação de métodos analíticos, em conformidade com os princípios da ‘Química Analítica Verde’ e referenciais normativos consagrados;
- Analisar a ‘graduação verde’ dos métodos analíticos mais executados pelo Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Cenpes-Petrobras, analisados segundo a abordagem conceitual que

integra três pictogramas de perfis verdes – *National Environmental Methods Index (NEMI)* e pictogramas complementares;

- Identificar os métodos hoje adotados pelo Laboratório que poderão ser modificados ou substituídos, em alinhamento aos objetivos do Projeto Estratégico ‘Excelência em SMS’ da Petrobras e ao estado-da-arte da QAV;
- Propor modificações ou alternativas mais verdes à Gerência de Química do Cenpes – Petrobras em relação aos métodos avaliados.

1.3. Motivação

Considera-se de fundamental importância a reflexão crítica sobre a contribuição das instituições de C&T, incluindo os centros de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de empresas, no uso de metodologias de Química Analítica Verde e de ferramentas de avaliação dos métodos analíticos que adotam. Nesse sentido, devem ser avaliados os riscos inerentes de alguns tipos de amostras, o uso elevado de reagentes e solventes químicos, o alto consumo de energia, além dos resíduos e emissões poluentes resultantes dos vários passos dos processos analíticos. Trata-se do compromisso ético de desenvolver, oferecer e implantar metodologias e ferramentas, como parte da avaliação dos custos ambientais e de segurança das práticas e procedimentos químico analíticos atualmente adotados. Essa foi a principal questão que estimulou o desenvolvimento da presente pesquisa.

Uma consulta à base de dados Web of Science referente à produção científica nos temas ‘Química Verde’ e ‘Química Analítica Verde’, no período 1990 - 2013, indicou que a última era ainda relativamente pouco explorada no contexto mais amplo de desenvolvimento da Química Verde em nível mundial (Figura 1.1).

Como pode ser observado, desde que o conceito de Química Verde foi introduzido em 1992, a evolução da produção científica nos dois temas sinaliza um crescimento significativo do número de publicações no tema “Química Verde”, a partir de 1998. Já com relação às publicações sobre ‘Química Analítica Verde’, o mesmo não ocorreu. Somente a partir de meados da década de 2000, impulsionado pelos trabalhos de Koel e Kaljurand (2006); Keith, Gron e Young (2007); e Armenta, Garrigues e Guardia (2008), inicia-se um ciclo de crescimento,

mas ainda pouco expressivo em relação às taxas de crescimento da produção científica em ‘Química Verde’ para o mesmo período.

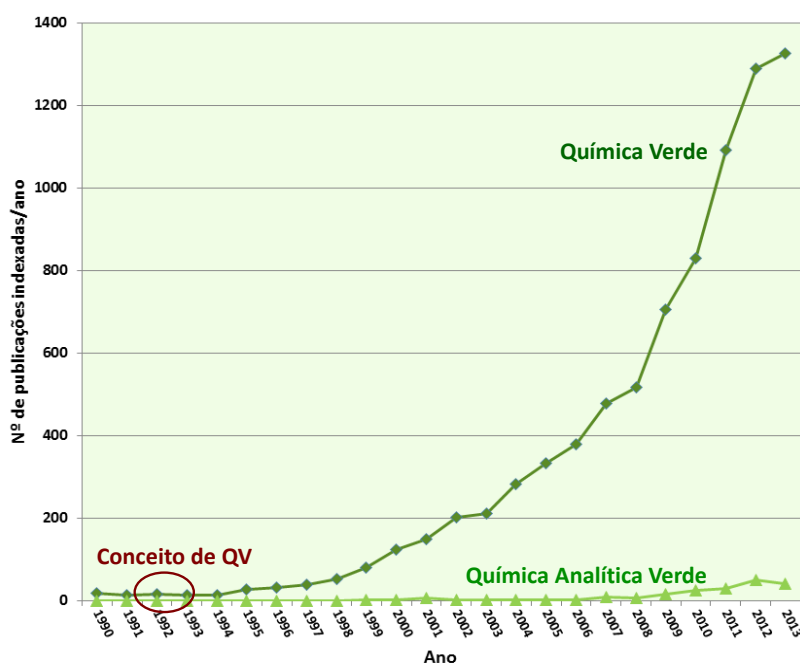


Figura 1.1 – Evolução da produção científica dos temas química verde e química analítica verde

Fonte: Elaboração própria. Consulta à base de dados *Web of Science* em 10 mar. 2014.

Esses resultados reforçam a importância de se desenvolver estudos empíricos, voltados para a adoção cada vez intensa de métodos analíticos com perfis verdes, mediante ações e iniciativas de centros de P&D de empresas e instituições de C&T públicas e privadas.

A motivação da pesquisadora, que presta serviços especializados ao Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Cenpes (Petrobras), baseou-se nos seguintes fatos e circunstâncias:

- compromisso ético de desenvolver, oferecer e implantar metodologias e ferramentas, como parte da avaliação dos custos ambientais e de segurança das práticas e procedimentos químico analíticos atualmente adotados.
- identificou-se um campo promissor para o desenvolvimento de metodologias de Química Analítica Verde e ferramentas de avaliação dos métodos analíticos, pelo levantamento da produção científica em Química Analítica Verde no período de 1990 a 2013, como demonstrado no gráfico da Figura 1.1;

- houve forte interesse da Gerência de Química do Cenpes em colaborar, desde a fase de projeto da pesquisa, incluindo co-orientação desta dissertação de mestrado;
- há grande potencial de aplicação em diversos laboratórios da Petrobras, no próprio Cenpes e em outras unidades operacionais, a partir de experiências de implantação bem sucedidas pelo Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Cenpes.

1.4. Metodologia

A Figura 1.2 apresenta a sequência da pesquisa em suas três grandes fases: (i) exploratória e descritiva; (ii) pesquisa aplicada; (iii) conclusivo-propositiva.

De acordo com a taxonomia proposta por Vergara (2002; 2005), a pesquisa pode ser considerada, quanto aos fins, aplicada e descritiva. Quanto aos meios de investigação, foram utilizados os seguintes métodos: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa de campo e estudo de caso.

O desenho da pesquisa mostra em cada uma das fases as sequências lógicas que foram seguidas e os métodos utilizados durante os trabalhos de investigação, conforme descrito a seguir.

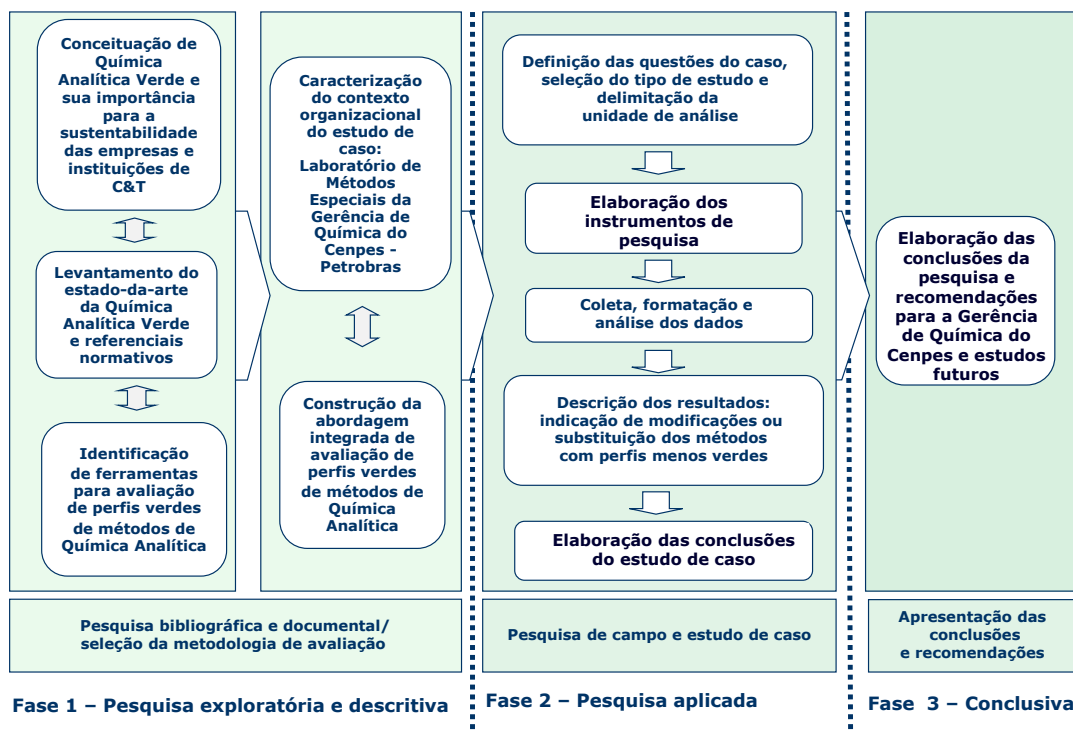


Figura 1.1 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos

1.4.1 Fase exploratória e descritiva

A fase exploratória e descritiva foi iniciada com pesquisa bibliográfica e documental, com o objetivo de levantar trabalhos conceituais sobre o tema central da pesquisa, para em seguida identificar estudos e documentos sobre o estado-da-arte mundial da ‘Química Analítica Verde’ (Barrionuevo e Lanças, 2000; Armenta, Garrigues e Guardia, 2008; Guardia e Garrigues, 2011; Guardia e Garrigues, 2012; e Bendicho et al., 2012). Buscou-se, em primeiro lugar, evidenciar a importância da ‘Química Analítica Verde’ para as instituições de C&T, incluindo os centros de P&D de empresas e do governo. A partir dessa visão mais geral, identificaram-se referenciais normativos e metodologias para avaliação de perfis verdes de métodos de Química Analítica.

Ainda nessa fase, a partir do referencial teórico e normativo, buscou-se caracterizar o contexto institucional do estudo de caso, ou seja, o Laboratório de Métodos Especiais da Gerência de Química do Cenpes, na perspectiva da seleção dos métodos que deveriam ser foco do estudo de caso e das ferramentas de escolha para a avaliação dos perfis dos métodos executados pelo referido Laboratório.

1.4.2 Pesquisa aplicada

Com base nos resultados da revisão bibliográfica e documental que nortearam a definição dos objetivos da pesquisa e a escolha das ferramentas de avaliação mais adequadas para o contexto do Laboratório de Métodos Especiais do Cenpes, iniciou-se a fase da pesquisa aplicada propriamente dita (Fase 2). Nessa fase, demonstrou-se no âmbito desse Laboratório a adequação do uso do pictograma do ‘*National Environmental Methods Index*’ (NEMI), dos pictogramas complementares e da Matriz SWOT, adaptada para fins de aplicação no contexto da Química Analítica Verde (capítulo 4).

O estudo de caso foi desenvolvido em sete etapas, a saber: (i) definição das questões do estudo de caso; (ii) seleção do tipo de estudo; (iii) delimitação e caracterização da unidade de análise e seu contexto organizacional; (iv) elaboração da ferramenta para a pesquisa de campo (formulários para a coleta de

dados e para a avaliação dos métodos); (v) coleta, formatação e análise dos dados; (vi) descrição e discussão dos resultados, com proposições de modificações em métodos tradicionais ou desenvolvimento/adoção de novos métodos analíticos; e (vii) elaboração das conclusões do estudo de caso. No capítulo 4, apresentam-se em maior detalhe os procedimentos e os resultados alcançados ao longo do desenvolvimento do estudo de caso.

1.4.3

Fase conclusiva

Nesta fase, formularam-se as conclusões da pesquisa e um conjunto de recomendações aos diversos atores interessados nos resultados desta pesquisa, especialmente aos gestores, consultores e especialistas da Gerência de Química do Cenpes – Petrobras.

Adicionalmente, encaminharam-se propostas de estudos futuros, como desdobramentos naturais da presente pesquisa.

1.5.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, incluindo esta introdução. No capítulo 2, apresenta-se o referencial teórico sobre os temas sustentabilidade corporativa, criação de valor sustentável e Química Verde como base para a discussão central deste capítulo, qual seja a importância da Química Analítica Verde no contexto da sustentabilidade corporativa de empresas e instituições de C&T. Aborda-se na segunda seção o impacto mútuo 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); sistemas de gestão da qualidade (ISO 9001:2008); requisitos da competência de laboratórios de ensaio e calibração (ISO 17025:2004); gestão do conhecimento (CEN-CWA 14924:2004); e responsabilidade social (ISO 26000:2010). Destaca-se, na seção 2.3, a contribuição da Química Analítica Verde para a criação de valor sustentável nas empresas e instituições de C&T, à luz dos princípios da Química Verde aplicáveis às atividades de Química Analítica. Ressalta-se, ao final, a necessidade de se implementar ferramentas de avaliação da

graduação verde (termo em inglês, *greenness*) dos métodos analíticos praticados por essas organizações.

Apresentam-se no capítulo 3 as principais ferramentas de avaliação do ‘perfil verde’ de métodos de Química Analítica, concebidas e implementadas na última década em nível internacional, com o objetivo de propor uma sistemática integrada de avaliação de ‘perfis verdes’ que contemple: (i) a utilização do pictograma de ‘perfil verde’ do *National Environmental Methods Index (NEMI)*; (ii) o emprego de pictogramas complementares ao pictograma *NEMI*; (iii) a aplicação da matriz *SWOT* adaptada para avaliação estratégica de métodos e práticas de ‘Química Analítica Verde’.

No capítulo 4, apresenta-se o estudo de caso, focalizando-se os resultados da pesquisa de campo realizada nesse Laboratório, com o apoio direto da Gerência de Química do Cenpes - Petrobras. Inicialmente, definem-se as questões do estudo de caso e o tipo de estudo. Na sequência, delimita-se e caracteriza-se a unidade de análise em seu contexto organizacional e apresentam-se os instrumentos para a pesquisa de campo (formulários para a coleta de dados e diagnóstico). Finalmente, discutem-se os resultados, com proposições de modificações em métodos tradicionais ou desenvolvimento/adoção de novos métodos analíticos.

No capítulo 5, formulam-se as conclusões da pesquisa e endereçam-se propostas para estudos futuros, como desdobramentos naturais e aprofundamento de aspectos relevantes que emergiram da presente pesquisa.