

Química Verde no Brasil: visão de futuro e estratégia nacional para o período 2010-2030

José Osvaldo Beserra Carioca¹, Peter Seidl², Eduardo Falabella Sousa-Aguiar³ & Maria Fatima Ludovico de Almeida⁴

Resumo

O movimento relacionado com o desenvolvimento da Química Verde teve início nos anos 1990, principalmente nos Estados Unidos, Inglaterra e Itália, com a introdução de novos conceitos e valores para as diversas atividades fundamentais da Química e setores correlatos da atividade industrial e econômica. O Brasil encontra-se em uma posição privilegiada para assumir a liderança no aproveitamento integral das biomassas pelo fato de possuir a maior biodiversidade do planeta; possuir intensa radiação solar; água em abundância; diversidade de clima, além do pioneirismo na produção de biocombustíveis. Identificam-se inúmeras oportunidades para o país implementar inovações verdes nos mais diversos segmentos de mercado, pela agregação de valor às matérias-primas renováveis, permitindo assim que se passe de uma economia de exportação de commodities para uma economia de bioprodutos inovadores e de alto valor agregado – a bioeconomia.

Abstract

Initiatives concerning the development of Green Chemistry began in the early 1990s, mainly in the United States, Britain and Italy, with the introduction of new concepts and values for the various fundamental activities of Chemistry, as well as for different sectors of correlated industrial and economic activities. Brazil has several competitive advantages to assume a leadership in developing products from biomass, given its megabiodiversity, its solar radiation intensity and climate diversity. Additionally, the country is pioneer in biofuels production from biomass in large scale, especially ethanol from sugarcane. In fact, several opportunities of green innovations by adding value to raw materials have been identified for the country. These opportunities when implemented will contribute to a significant change - from a commodity export economy to an innovative market oriented economy based on high-value bioproducts and bioprocesses - the bioeconomy. In

- 1 Doutor em Engenharia Química (Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ), professor associado (Universidade Federal do Ceará), e presidente do Centro de Energias Alternativas e Meio Ambiente-CENEA. Email: carioaca@ufc.br.
- 2 Doutor em Química (Universidade da Califórnia, USA), docente do Programa de Pós-graduação em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química (UFRJ). Email: pseidl@iq.ufrj.br.
- 3 Doutor em Engenharia Química (UFRJ), professor adjunto da Escola de Química (UFRJ) e consultor do Centro de Pesquisas da Petrobras. Email: falabella@cenpes.petrobras.com.br.
- 4 Doutora em Engenharia de Produção (PUC-Rio), professora adjunta da Programa de Pós-graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação, e consultora do CGEE e Petrobras. Email: fatima.ludovico@gmail.com.

Nesse contexto, o presente artigo apresenta a visão de futuro da Química Verde no Brasil e a proposta de criação da Rede Brasileira de Química Verde e da Escola Brasileira de Química Verde, no âmbito de uma estratégia nacional para o desenvolvimento desta área no país e considerando-se um horizonte de vinte anos (2010-2030).

Palavras-chave: Química verde; inovação verde; foresight; redes tecnológicas; Brasil.

this context, this paper presents a future vision for the development of Green Chemistry in Brazil and a proposal for creating the Green Chemistry Brazilian Network and the Brazilian School of Green Chemistry, within the context of a national strategy for developing this area in Brazil covering the period of twenty years, from 2010 to 2030.

Keywords: *Green chemistry; green innovation; foresight; technological networks; Brazil.*

1. Introdução

Iniciativas relacionadas ao desenvolvimento da Química Verde começaram nos anos 1990, principalmente nos Estados Unidos, Inglaterra e Itália, pelo reconhecimento formal de que a química está no centro de todos os processos que impactam o meio ambiente. Química Verde foi então definida como o desenho, desenvolvimento, produção e uso de produtos químicos e processos para reduzir ou eliminar o uso ou geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao ambiente (Anastas, 1998; 2010).

Na perspectiva do desenvolvimento sustentável, espera-se que governos, universidades, empresas e demais atores-chave busquem maximizar a eficiência no uso dos recursos naturais, por meio de atividades associadas ao conceito de Química Verde. Tais atividades incluem conservação de energia e de fontes não-renováveis; minimização de riscos; prevenção da poluição; minimização de rejeitos em todos os estágios do ciclo de vida dos produtos e o desenvolvimento de produtos que sejam duráveis e que possam ser reusados e reciclados.

Química Verde refere-se também a outros dois conceitos – produção limpa e inovação verde. Hoje esses conceitos já estão relativamente difundido em aplicações industriais, particularmente em países com indústria química bastante desenvolvida e que apresentam rigoroso controle na emissão de agentes poluentes. Baseiam-se no pressuposto de que processos químicos com potencial de impactar negativamente o meio ambiente venham a ser substituídos por processos menos poluentes ou não-poluentes. Tecnologia limpa, prevenção primária, redução na fonte, química verde, química ambiental e inovação verde são denominações que surgiram e foram cunhadas no decorrer das últimas duas décadas para traduzir esse importante conceito. A palavra verde é sinônimo de limpo e tem um tom político; a química é o centro da questão ambiental; sustentabilidade ambiental, social e econômica traduz o futuro desejado; e Química Verde reflete a união dessa idéias.

No decorrer das últimas duas décadas, pela atuação da International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e outros organismos nacionais, como a Environmental Protection Agency (EPA), dos EUA, formou-se um consenso sobre doze princípios fundamentais da Química Verde. São eles:

1. prevenção: prevenir é melhor do que remediar áreas poluídas;
2. eficiência atômica: os métodos sintéticos devem ser desenvolvidos de modo a incorporar o maior número possível de átomos dos reagentes no produto final;
3. síntese segura: devem ser desenvolvidos métodos sintéticos que utilizem e gerem substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente;
4. desenvolvimento de produtos seguros: deve-se buscar o desenvolvimento de produtos que após realizarem a função desejada, não causem danos ao ambiente;
5. uso de solventes e substâncias auxiliares seguros: a utilização de substâncias auxiliares como solventes, agentes de purificação e secantes precisa ser evitada ao máximo; quando inevitável a sua utilização, estas substâncias devem ser inócuas ou facilmente reutilizadas;
6. busca pela eficiência energética: os impactos ambientais e econômicos causados pela geração da energia utilizada em um processo químico precisam ser considerados. É necessário o desenvolvimento de processos que ocorram à temperatura e pressão ambientes;
7. uso de matérias-primas renováveis: o uso de biomassa como matéria-prima deve ser priorizado no desenvolvimento de novas tecnologias e processos;
8. formação de derivados deve ser evitada: processos que envolvem intermediários com grupos bloqueadores, proteção/desproteção, ou qualquer modificação temporária da molécula por processos físicos ou químicos devem ser evitados;
9. catálise: o uso de catalisadores, tão seletivos quanto possível, deve ser adotado em substituição aos reagentes estequiométricos;
10. produtos degradáveis: os produtos químicos precisam ser projetados para a biocompatibilidade. Após sua utilização não deve permanecer no ambiente, degradando-se em produtos inócuos;

11. análise em tempo real para a prevenção da poluição: o monitoramento e controle em tempo real, dentro do processo, deverá ser viabilizado. A possibilidade de formação de substâncias tóxicas deverá ser detectada antes de sua geração;
12. química intrinsecamente segura para a prevenção de acidentes: a escolha das substâncias, bem como sua utilização em um processo químico, devem procurar a minimização do risco de acidentes, como vazamentos, incêndios e explosões.

Conscientes de sua importância e urgência, diversos países já criaram iniciativas nacionais de Química Verde, balizando-se pelos princípios acima. Entre elas, destacam-se:

- Green Chemistry Institute, criado em 1997 e afiliado à American Chemical Society em 2001 (EUA);
- Green Chemistry Program, conduzido pela Environmental Protection Agency (EUA);
- Green Chemistry Network, estruturada pela Royal Society of Chemistry em 1998 (Reino Unido);
- Inter-University Consortium of Chemistry for the Environment, criado em 1993 (Itália),
- Canadian Green Chemistry Network, resultante da afiliação ao Green Chemistry Institute em 2001 (Canadá);
- Centre of Green Chemistry of Monash University (Austrália), que opera desde 2001, além de outras iniciativas na Alemanha, Japão, Espanha, Suécia, Rússia e Brasil.

No âmbito internacional, destaca-se a realização do “Workshop on Sustainable Chemistry” em Veneza (Itália), em outubro de 1998. Esse evento foi co-coordenado pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) e pela Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) e teve como foco principal a discussão sobre aspectos políticos e programáticos de iniciativas de Química Sustentável (ou Química Verde) no âmbito da OECD. Esse evento internacional foi co-patrocinado pelos governos da Alemanha, Itália, Japão e dos EUA em cooperação com os principais patrocinadores. Uma das principais recomendações que emergiram desse evento de Veneza foi que a OECD deveria estimular os países-membros a desenvolverem atividades de P&D em Química Verde de forma programática e articulada.

Resultados do “Workshop on Sustainable Chemistry” de 1998 e trabalhos da OECD nos anos subsequentes indicaram que um certo número de organizações em diversos países já estavam engajadas nessas atividades e muitas outras estavam interessadas em iniciar pesquisa cooperativa na fase pré-competitiva. Como consequência desses estudos, um segundo workshop internacional realizado em Tóquio, em 2000, teve como objetivo principal estabelecer diretrizes gerais

para o efetivo desenvolvimento de programas de P&D em Química Verde pelos países-membros daquela organização (OECD, 2002).

Tais iniciativas mobilizadoras, tanto em nível nacional, quanto internacional, vêm despertando o interesse de organizações governamentais, não-governamentais e empresas de vários países. Na Europa, Japão e Estados Unidos foram criados prêmios específicos para incentivar pesquisadores de empresas e universidades a desenvolverem tecnologias empregando os princípios da Química Verde (US EPA, 2010).

No caso do Brasil, o sétimo princípio – uso de matérias-primas renováveis – destaca-se como uma grande oportunidade estratégica para o país se inserir e até liderar segmentos relacionados a diversas áreas da Química Verde em nível mundial, como será discutido em capítulos seguintes.

Nesse contexto, em consonância com as diretrizes da Política de Desenvolvimento Produtivo e com as metas do Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para 2007-2010 13, o Ministério de Ciência e Tecnologia encomendou ao Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) um estudo prospectivo para servir de base a uma proposta de criação da Rede Brasileira de Química Verde e da Escola Brasileira de Química Verde, como pilares organizacionais de uma estratégia nacional de CT&I nesta área.

Este artigo apresenta a visão de futuro da Química Verde no país e a proposta de criação da Rede e da Escola Brasileira de Química Verde, considerando-se um horizonte de 20 anos (2010 – 2030). Inicia com uma breve apresentação das iniciativas em Química Verde em nível internacional e nacional, segundo uma perspectiva histórica, situando o desenvolvimento do referido estudo prospectivo em um contexto mais amplo. Em seguida, apresenta os objetivos, escopo e metodologia do estudo prospectivo e discute as potencialidades e oportunidades estratégicas para o Brasil nesta área. Finaliza com a proposição de cinco estratégias para o desenvolvimento da Química Verde no país, com ênfase na criação da Rede e da Escola Brasileira de Química Verde.

1.1. Antecedentes

Na fase inicial deste trabalho, um longo esforço foi desenvolvido com o apoio dos representantes das várias universidades, institutos de pesquisas, federações de indústrias, centros de pesquisas de empresas brasileiras, organizações de classe do setor químico e do Senado Federal, através da Comissão Mista de Acompanhamento das Mudanças Climáticas. Esse grupo de colaboradores contou ainda com a cooperação internacional prestada por representantes das Universidades e Redes de Pesquisas sobre Química Verde de vários países no sentido de dar suporte e ajuda ao desenvolvimento da concepção da estrutura de um Programa de Química Verde no Brasil, nos moldes do que vem sendo conduzido no exterior. Nesse sentido, destaca-se a cooperação com

as Universidades de Urbino e Lecce da Itália, que resultou numa publicação “Química Verde em Latino America” publicada pela IUPAC e INCA, a qual foi incluída na “*Green Chemistry Series*, nº 11”. Também destaca-se o Programa da Unido sobre Tecnologias Limpas, cujo apoio foi recebido através do representante da Petrobras junto a esta entidade..

Em síntese, todo este trabalho foi consequência da proposição feita inicialmente ao CGEE por membros representes da ANP junto ao Fundo Setorial do CTPetro, após a realização da primeira avaliação de projetos de pesquisas realizada na Finep em 2002. A partir desta indicação, um grupo de pesquisadores e representantes das várias entidades acima mencionadas passou a se reunir de forma sistemática sob a coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas (INT) no Rio de Janeiro e liderança científica do Cenpes, o qual prestou o imprescindível apoio para o desenvolvimento da concepção do Programa de Química Verde nos moldes aqui propostos.

Como fruto deste esforço, foi formalizada simultaneamente ao Ministro de Ciência e Tecnologia (MCT), em agosto de 2007, a proposição de apoio governamental à criação da Rede e da Escola Brasileira de Química Verde pelo vice-governador do Estado do Ceará, Francisco Pinheiro, e pelo Senador Inácio Arruda, durante a realização do 1º Workshop Internacional de Química Verde realizado em novembro de 2007, em Fortaleza, CE. Uma audiência pública foi realizada pelo Deputado Roberto Cláudio, da Assembléia Legislativa do Ceará, em apoio ao Programa.

O empenho e o esforço dos colaboradores foram materializados através da “Carta do Rio de Janeiro”, assinada em abril de 2009, em favor da estruturação do Programa Nacional de Química Verde. Os Anais do Workshop Internacional de Química Verde e a edição recente pelo CGEE do estudo prospectivo “Química Verde no Brasil, 2010–2030”, consubstanciam de forma inequívoca todos estes esforços e cooperações, bem como, exaltam as vantagens e as oportunidades do governo brasileiro em favor da criação da Rede e da Escola Brasileira de Química Verde como aqui proposta.

A International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) e a United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (Unesco) estabeleceram o ano de 2011 como o “Ano Internacional da Química”, tendo a biodiversidade sido considerada como tema central. Este fato mostra a importância e a oportunidade da criação da Rede e da Escola Brasileira de Química Verde para a formação de pessoal qualificado nesta área, desenvolvimento de inovações verdes, formação de uma consciência nacional sobre a Química Verde e a inserção do país em uma iniciativa global dessa magnitude.

Com a criação da Rede Brasileira de Química Verde e da Escola Brasileira de Química Verde, buscar-se-á: 1) inovar processos já existentes, tornando-os mais eficientes e sustentáveis nos diversos setores industriais; 2) desenvolver novos produtos e processos limpos; 3) contribuir para a forma-

ção de pessoal especializado nos diversos níveis, dando assim um forte estímulo ao crescimento da pós-graduação nacional em Química Verde. Em nível institucional, buscar-se-á mobilizar os atores-chave (governo, empresas, instituições de C&T, universidades, organizações não-governamentais e associações profissionais) em torno desses objetivos principais e promover a cooperação internacional com redes e iniciativas congêneres em nível internacional.

Levando-se em conta esses antecedentes, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) desenvolveu juntamente com uma efetiva representação da comunidade científica e tecnológica nacional, inclusive empresas, um amplo estudo prospectivo sobre os principais temas correlacionados com a Química Verde, tendo como foco, a experiência nacional nesta área; bem como, as potencialidades da nossa biodiversidade e a estreita cooperação com a indústria nacional para compor uma proposta de desenvolvimento da Química Verde no Brasil.

2. Objetivos, escopo e metodologia do estudo prospectivo

O objetivo geral do estudo prospectivo foi examinar o ambiente futuro de desenvolvimento da Química Verde no país e elaborar uma proposta de criação da Rede e da Escola Brasileira de Química Verde, que contemplasse planos de ação para três períodos: 2010 – 2015 (curto prazo); 2016- 2025 (médio prazo) e 2026 – 2030 (longo prazo).

A partir da análise detalhada de documentos de referência sobre iniciativas e estratégias de outros países nessa área¹, definiu-se o escopo do estudo prospectivo que compreendeu:

- oito temas estratégicos;
- seis dimensões de análise para a formulação de ações de curto, médio e longo prazo, conforme modelo conceitual proposto pelo CGEE;
- seis áreas socioprodutivas consideradas as mais impactadas pelas novas tecnologias no horizonte temporal de 2010 a 2030;
- seis atores-chave: governo, empresas, universidades, instituições de C&T, associações profissionais e organizações não-governamentais.

Apresentam-se, na seqüência, cada um dos componentes do estudo prospectivo, iniciando-se pelos temas estratégicos (Quadro 1).

¹ U.S. Environmental Protection Agency. Twelve Principles of Green Chemistry. EUA (1992); Interuniversity Consortium Chemistry for Environment. Itália (1993); Green Chemistry Institute. EUA (1997); Green Chemistry Network. Reino Unido. (1998); Anastas, P. T.; Warner, J. C. Green chemistry: theory and practice, Oxford University Press: New York, (1998).

Quadro 1. Temas prioritários de Química Verde no Brasil

Tema estratégico	Descrição
Biorrefinarias: rota bioquímica	Refere-se ao uso de matérias-primas renováveis e de seus resíduos, de maneira integral e diversificada, para a produção por rota bioquímica, de biocombustíveis e outros produtos tradicionais do refino tradicional do petróleo, com a mínima geração de resíduos e emissões de gases poluentes.
Biorrefinarias: rota termoquímica	Compreende as instalações e os processos, através dos quais, a partir de matérias-primas renováveis e de seus resíduos, são produzidos biocombustíveis, produtos químicos de alto valor agregado e energia pela rota termoquímica.
Alcoolquímica	Refere-se à utilização de álcool etílico como matéria-prima para fabricação de diversos produtos químicos, em particular o eteno, matéria-prima para resinas, além de produtos hoje importados derivados do etanol, como os acetatos e o éter etílico.
Sucroquímica	Refere-se à utilização da sacarose - matéria-prima de fonte renovável e de baixo custo, na síntese de derivados sacaríneos de maior valor agregado, como surfactantes não-iônicos, polímeros, adoçantes, emulsificantes, entre outros.
Oleoquímica	Compreende processos de transformação de óleos vegetais em produtos de alto valor agregado e biodiesel. Os óleos vegetais são fontes renováveis, são biodegradáveis e apresentam-se na forma de substratos diversificados e de baixo custo. Em geral, são ésteres, cujas aplicações dependem das famílias de oleaginosas: láuricos, oléicos, polinsaturados, ricinoleicos, graxos, dentre outras.
Energias renováveis	Refere-se ao desenvolvimento de processos que visam à produção e à utilização de energias renováveis em substituição a energias tradicionais, tais como utilização de energia solar nas suas diversas formas, notadamente a produção biológica de hidrogênio, além da cogeração.
Conversão de CO ₂	Compreende o desenvolvimento de processos para conversão de CO ₂ , particularmente redução química, reações de condensação com CO ₂ , produção de uréia, bicarbonato, carbonatos e policarbonatos orgânicos, além da produção de gás de síntese, considerada rota fundamental para a indústria química de base.
Fitoquímica	Consiste no levantamento e estudo de componentes químicos, como princípios ativos, aromas, pigmentos e moléculas da parede celular. As aplicações desses estudos podem se ramificar para a área médica, farmacêutica, cosmética e de higiene.

Na perspectiva da construção da visão de futuro do desenvolvimento da Química Verde no país, os temas foram desdobrados em tópicos, perfazendo-se um total de 57 tópicos associados (Tabela 1).

Tabela 1. Escopo do estudo prospectivo: temas e tópicos associados

Tema	Tópicos	Total
Biorrefinarias: rota bioquímica	T1a – Pré-tratamento da biomassa. T1b – Produção de celulases. T1c – Biologia molecular. T1d – Produção de biocombustíveis de segunda geração e outras moléculas. T1e – Integração energética de processo.	5
Biorrefinarias: rota termoquímica	T2a – Gaseificação para síntese química. T2b – Pirólise. T2c – Fischer-Tropsch. T2d – Obtenção de metanol. T2e – Obtenção de dimetil éter (DME) por rota direta. T2f – Obtenção de etanol e outros alcoóis de alto peso molecular. T2g – Processo HBio. T2h – Hidrocrackeamento catalítico (HCC). T2i – Hidroisodesparafinação (HIDW). T2j – Síntese de amônia. T2k – Síntese de uréia. T2l – Síntese de metanol a partir de CO ₂ . T2m – Obtenção de dimetil carbonato (DMC). T2n – Geração de energia. T2o – Intermediários para química fina.	15
Alcoolquímica	T3a – Obtenção de propeno via etanol. T3b – Obtenção de acetato de etila a partir de etanol via oxidativa. T3c – Obtenção de acetato de etila a partir de etanol via desidrogenativa. T3d – Obtenção de ácido acético a partir de etanol. T3e – Obtenção de 1-butanol a partir de etanol. T3f – Obtenção de 1,3 butadieno a partir de etanol.	6
Sucroquímica	T4a – Obtenção de ácido láctico. T4b – Obtenção de polihidroxibutirato (PHB). T4c – Obtenção de ácido succínico. T4d – Obtenção de ácido itacônico. T4e – Obtenção de sorbitol. T4f – Obtenção de ácido cítrico.	6
Oleoquímica	T5a – Glicerina. T5b – Matérias-primas oleaginosas convencionais. T5c – Matérias-primas oleaginosas não convencionais. T5d – Matérias-primas oleaginosas especiais. T5e – Gorduras animais. T5f – Microalgas. T5g – Extração e processamento de oleaginosas. T5h – Aproveitamento de co-produtos. T5i – Produção agrícola. T5j – Caracterização de derivados oleoquímicos. T5j – Caracterização de matérias-primas para oleoquímica. T5kl – Processos de biotecnologia em oleoquímica.	12
Energias renováveis	T6a – Produção biológica de hidrogênio. T6b – Biogás. T6c – Eficiência energética. T6d – Energia eólica. T6e – Energia solar fotovoltaica. T6f – Energia hidráulica.	6
Conversão de CO ₂	T7a – Redução química do CO ₂ . T7b – Reações de condensação com CO ₂ . T7c – Produção de uréia. T7d – Produção de bicarbonato. T7e – Produção de carbonatos e policarbonatos orgânicos. T7f – Produção de gás de síntese. T7g – Absorção/fixação de CO ₂ por microalgas.	7
Total		57

Cabe ressaltar que o tema “fitoquímica” foi incluído no estudo por recomendação dos participantes do Workshop. Pela complexidade do tema e magnitude das possibilidades de desenvolvimento de produtos fitoquímicos frente à megabiodiversidade brasileira, optou-se por apresentar no estudo prospectivo somente um quadro atual da produção científica, propriedade intelectual e aspectos de mercado, recomendando-se para uma etapa posterior a construção da visão de futuro referente a este tema.

Pelo seu caráter transversal e importância estratégica para o desenvolvimento da Química Verde no país, os temas “catálise” e “modelagem, simulação e escalonamento de processos” e seus impactos foram considerados nas trajetórias tecnológicas referentes a cada um dos oito temas apresentados no Quadro 1.

A seguir, no Quadro 2, apresentam-se as dimensões a serem cobertas na estruturação do Programa da Rede Brasileira de Química Verde (RBQV) e seus descritivos.

Quadro 2. Dimensões de análise da Rede Brasileira de Química Verde

Dimensão	Descritivo
Orientação estratégica para P,D&I	Esta dimensão compreende a orientação estratégica de P,D&I fornecida pelos mapas tecnológicos dos temas no Brasil e <i>portfolios</i> estratégicos, os quais indicam as oportunidades e os gargalos referentes a cada tema de Química Verde.
Infraestrutura	Esta dimensão compreende a infraestrutura física das instituições, públicas e privadas, que tenham como missão o desenvolvimento de P,D&I com foco nos temas estratégicos da Química Verde; a formação de ambiente favorável a uma maior interação entre o meio empresarial e os centros geradores de conhecimento que integram a Rede, além do estímulo ao surgimento de novas empresas de base tecnológica (<i>spin-offs</i>).
Recursos humanos	Capacidade de formar e qualificar recursos humanos conforme a orientação estratégica da Rede, focalizando particularmente a formação de massa crítica em temas emergentes e a consolidação de grupos de pesquisa em temas estratégicos que já se encontram em desenvolvimento.
Processo de inovação em rede	Capacidade da Rede de gerar conhecimento e inovação em rede. Para efeitos da formulação e avaliação futura do Programa da Rede Brasileira de Química Verde, esta dimensão de análise deverá considerar de forma integrada: competência em rede: habilidades para identificar potenciais parceiros, explorar e usar as relações colaborativas entre organizações; cooperação tecnológica em rede: cooperação entre pesquisadores intra e interuniversidades que integram a Rede e cooperação entre pesquisadores das universidades e de empresas; governança da Rede e instrumentos gerenciais de apoio: refere-se à estrutura administrativa da rede, aos mecanismos de coordenação internos, às políticas internas e ao sistema de gerenciamento da Rede (planejamento e avaliação).
Transferência tecnológica e científica	Compreende diversos mecanismos utilizados pela Rede com o objetivo de transferir o conhecimento e as tecnologias inovadoras para o mercado. Os mecanismos podem ser tanto diretos quanto indiretos. São diretos quando as universidades e institutos de pesquisa formam suas empresas de base tecnológica (<i>spin-offs</i>). São indiretos em situações em que as universidades e centros de pesquisa utilizam diversos agentes para fazer chegar o conhecimento gerado à indústria (entidades de transferência tecnológica, núcleos ou agências de inovação, escritórios de advocacia, parques tecnológicos, dentre outros).
Percepção de valor pela sociedade	Compreende os aspectos éticos e socioculturais na dimensão da inovação relacionados à incorporação de novos conhecimentos e tecnologias geradas pela Rede em produtos, serviços e processos e sua aceitação pela sociedade.

Os setores considerados os mais impactados pelas novas tecnologias no horizonte temporal de 2010 a 2030 foram identificados no contexto de cada um dos oito temas prioritários. Enquadram-se nas seguintes áreas socioprodutivas:

- produção de energia;
- produção industrial (diversos setores);
- preservação do meio ambiente;
- produção agrícola e florestal;
- sistema habitacional e sistema terciário.

A metodologia de prospecção proposta para a construção coletiva da visão de futuro foi desenvolvida de forma customizada para atender as necessidades específicas do CGEE e instituições parceiras e contemplou as seguintes etapas:

- definição dos tópicos a serem estudados por tema estratégico, seus descritivos, grau de maturidade no mundo e setores impactados no país;
- construção dos mapas tecnológicos no mundo e no Brasil para cada tema estratégico e definição do *portfolio* estratégico de cada tema, com indicação das aplicações mais promissoras e oportunidades estratégicas para o país;
- proposição e hierarquização das ações da Agenda da Rede Brasileira de Química Verde segundo as dimensões definidas no Quadro 2;
- consolidação do *Roadmap* Estratégico da Rede Brasileira de Química Verde, com planos de ação para três períodos: 2010-2015; 2016-2025; e 2026-2030.

Os 57 tópicos tecnológicos apresentados na Tabela 1 foram avaliados com o auxílio de ferramentas avançadas de construção de mapas tecnológicos, mapas estratégicos e *portfolios* tecnológicos. Em particular, para a etapa 2 – referente à construção coletiva da visão de futuro, utilizou-se o modelo conceitual proposto por Phaal et al (2004) para orientar os desenhos dos mapas tecnológicos e estratégicos que se encontram publicados no livro “Química Verde no Brasil: 2010-2030 (CGEE, 2010). Cabe ressaltar um diferencial da metodologia adotada neste estudo prospectivo em relação às práticas adotadas em estudos de mesma natureza, o qual impactou diretamente a formulação do *Roadmap* Estratégico da Rede Brasileira de Química Verde (RBQV). Os mapas estratégicos, via de regra, enfatizam ações e diretrizes vinculadas a uma determinada visão de futuro, que são representadas ao longo da linha do tempo em mapas tecnológicos, partindo-se de uma situação inicial até a situação desejada. O diferencial deste estudo é que as ações e diretrizes que compõem o *Roadmap* Estratégico da RBQV vinculam-se diretamente aos tópicos tecnológicos e suas trajetórias em cada tema. Desse modo, os *portfolios* tecnológicos estratégi-

cos desenvolvidos para cada tema prioritário permitiram identificar os tópicos mais promissores, pela sua classificação segundo dois critérios:

- sustentabilidade, calculada em função do impacto econômico e socioambiental das aplicações futuras;
- grau de esforço para atingir o posicionamento desenhado no mapa tecnológico do Brasil, que reflete a existência de barreiras, incertezas e riscos tecnológicos e comerciais.

Já a construção coletiva do *Roadmap* Estratégico da Rede focalizou as cinco dimensões descritas no Quadro 2: infraestrutura; recursos humanos; processo de inovação em rede; transferência tecnológica e científica; percepção de valor pela sociedade.

A proposição de ações foi conduzida em duas etapas distintas, porém complementares: na primeira, foram definidas ações por dimensão analítica, cobrindo os três períodos do estudo prospectivo (2010-2015, 2016-2025 e 2026-2030) e na segunda, as ações propostas na primeira etapa foram analisadas por período e de forma sistêmica.

Finalmente, vale destacar que o contexto institucional dos sistemas nacionais de inovação contempla três componentes vitais para o processo de inovação em rede como preconizado para a Rede Brasileira de Química Verde, ou seja, proporciona: (i) o desenvolvimento do conhecimento básico nas instituições de pesquisa; (ii) o fluxo do conhecimento entre instituições de pesquisa e a indústria; e (iii) o desenvolvimento do conhecimento pelas empresas.

3. Potencialidades e oportunidades estratégicas para o Brasil em Química Verde

Neste Capítulo, discutem-se inicialmente as potencialidades brasileiras em relação a cada um dos temas abordados no estudo prospectivo, para em seguida apresentar as oportunidades de desenvolvimento referentes ao conjunto dos 57 tópicos tecnológicos, que foram objeto da análise de *portfolio* realizada durante a etapa de construção da visão de futuro.

3.1. Potencialidades em relação aos temas prioritários

O Brasil se encontra em uma posição privilegiada para assumir a liderança no aproveitamento integral das biomassas pelo fato de possuir a maior biodiversidade do planeta; possuir intensa radiação solar; água em abundância; diversidade de clima e pioneirismo na produção de biocom-

bustíveis a partir da biomassa em larga escala. As microalgas despontam como um novo recurso renovável com potencialidades diversas em termos de bioenergia e produtos químicos.

O país reúne, ainda, condições para ser o principal receptor de recursos de investimentos provenientes do mercado de carbono no segmento de produção e uso de bioenergia, por ter no meio ambiente a sua maior riqueza e possuir enorme capacidade de absorção e regeneração atmosférica. Neste contexto, o termo biorrefinarias compreende as instalações e os processos através dos quais as matérias-primas renováveis e seus resíduos são transformados em biocombustíveis, produtos químicos de alto valor agregado, além de energia e alimentos. Neste sentido, as biomassas assumem posição estratégica na era pós-petróleo, uma vez que elas representam a grande fonte de materiais renováveis a serem utilizadas.

A alcoolquímica refere-se à utilização de álcool etílico como matéria-prima para fabricação de diversos produtos químicos. No Brasil, a alcoolquímica, implantada na década de 1920, foi abandonada quando da consolidação da petroquímica. A tendência para uso da alcoolquímica vem se consolidando devido ao interesse crescente das empresas em investirem em negócios sustentáveis do ponto de vista econômico, ambiental e social, além da grande valorização dos produtos químicos produzidos a partir de recursos renováveis e ao baixo custo do etanol brasileiro. Vale destacar que grande parte das atuais iniciativas industriais concentra-se na geração de eteno, oriundo de etanol.

Evidências existem sobre as condições para o surgimento no país de um moderno segmento industrial baseado no etanol como matéria-prima, que compreende não somente a geração de eteno e outros produtos e intermediários químicos de grande interesse comercial. Neste contexto, a alcoolquímica abrange a utilização de álcool etílico como matéria-prima para fabricação de diversos produtos químicos; em particular, o eteno, matéria-prima para produção de resinas; e produtos importados derivados do etanol, como os acetatos e o éter etílico.

A indústria oleoquímica é mais do que centenária e vinha perdendo prestígio frente aos avanços da petroquímica face aos ganhos de escala e preços relativamente mais baixos dos derivados do petróleo, pelo menos até a década de 1970. Com a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e a busca pela sustentabilidade em termos de matérias-primas e processos, a oleoquímica está sendo requisitada por faixas de mercado nos produtos de consumo, começando assim, a disputar algumas aplicações industriais. Dentro deste contexto, a oleoquímica engloba os diversos processos de transformação de óleos vegetais e/ou gorduras animais em produtos de alto valor agregado e biocombustíveis alternativos ao diesel. Estes materiais são fontes renováveis, biodegradáveis e apresentam-se na forma de substratos diversificados e de baixo custo. Em geral, são ésteres, cujas aplicações dependem das famílias de oleaginosas: láuricos, oléicos, ricinoleicos, polinsaturados, entre outras.

Embora a produção de açúcar necessite de vultosos investimentos em plantas industriais para atingir o volume de produção compatível com a escala de mercado, o preço do açúcar refinado é relativamente baixo em função da ampla oferta existente e do pouco valor agregado, ao contrário dos seus derivados químicos. Sendo uma matéria-prima de fonte renovável e de baixo custo, a sacarose vem despertando um crescente interesse como reagente na síntese de derivados de açúcar, área denominada sucroquímica.

Cabe ressaltar que grande parte dos derivados dos açúcares é importada, possuindo alto valor agregado, o que contribui significativamente para o déficit da balança comercial química do país. Simultaneamente, estas rotas industriais constituem excelentes oportunidades de investimento. Neste contexto, o termo sucroquímica refere-se à utilização da sacarose como matéria-prima renovável e de baixo custo, que é utilizada na síntese de derivados sacaríneos de maior valor agregado, como por exemplo: surfactantes não-iônicos, polímeros, adoçantes, emulsificantes, entre outros.

O Brasil detém um dos maiores estoques da biodiversidade do planeta. Os recursos naturais existentes em suas regiões tornam-se gradativamente conhecidos, à medida que as pesquisas científicas se intensificam e os resultados apresentam-se disponíveis para a sociedade. Embora, o Brasil detenha um dos maiores bancos de germoplasma in-situ, constata-se por parte daqueles que habitam os diferentes biomas uma elevada demanda de conhecimentos sobre o aproveitamento sustentável da biodiversidade.

A falta de domesticação dos recursos naturais como as plantas medicinais, aromáticas e detentoras de metabólitos secundários com propriedades biodefensivas, tem levado à subutilização e extinção de inúmeras espécies vegetais, impondo limitações socioeconômicas e ambientais. Além disso, a produção agrícola de alimentos saudáveis tem se confrontado com sérios problemas de contaminações por toxinas e pela dependência do uso de agrotóxicos. Dentro deste contexto, o termo fitoquímica abrange o levantamento e o estudo de componentes químico de vegetais utilizados como princípios ativos, aromas, pigmentos e moléculas da parede celular. As aplicações desses produtos podem se estender para diversas áreas como: médica, farmacêutica, cosmética, de higiene e alimentos.

Dentre as alternativas estratégicas para aumentar significativamente a utilização de CO₂, destaca-se o desenvolvimento de novos processos de obtenção de produtos químicos de grande demanda no mercado, nos quais o CO₂ venha a ser usado como matéria-prima ou como insumo. Acredita-se que a utilização de novas rotas tecnológicas baseadas no uso de CO₂ possa contribuir para a redução da emissão de gás carbônico na atmosfera. Desde a última década, foram ampliados os esforços de P&D direcionados para o maior uso do CO₂ como matéria-prima. Atualmente cerca de 100 Mt de CO₂ são usados anualmente para sintetizar produtos como

uréia, ácido salicílico e carbonatos. Um levantamento realizado nas bases internacionais (*Web of Science* e *Derwent Innovations Index*), sobre a produção científica e as patentes relacionadas com este tema, confirmam o avanço do conhecimento nos diversos tópicos associados no período de 1998-2009. Assim, o termo conversão de CO_2 compreende o desenvolvimento de processos para a conversão de CO_2 ; particularmente, a redução química, reações de condensação com CO_2 , produção de uréia, bicarbonato, carbonatos e policarbonatos orgânicos, além da produção de gás de síntese, considerada rota fundamental para a indústria química de base.

Pode-se afirmar que as energias renováveis estão chegando com força no cenário mundial, constituindo-se em opções reais para participar na expansão da oferta de energia. Merecem destaques a energia eólica, a solar, a biomassa e a própria indústria dos biocombustíveis. Conforme apontado pela IEA (International Energy Agency), a economia de energia é a forma mais rápida e barata para se reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

3.2. *Portfolio* tecnológico estratégico

Do processo estruturado de análise dos 57 tópicos apresentados no Quadro 2, destacaram-se no estudo prospectivo as oportunidades estratégicas para o país em quatro níveis, conforme representado na Figura 1. Os quatro níveis são:

- “apostas”, referentes a tópicos que foram classificados como de alta sustentabilidade e cujos desenvolvimentos requerem alto grau de esforço, na grande maioria dos casos devido ao estágio embrionário em que se encontram;
- “situação ideal”, quando os tópicos são de alta sustentabilidade e seus desenvolvimentos requerem menor esforço, em termos comparativos;
- “situação desejável”, quando os tópicos são de alta sustentabilidade e seus desenvolvimentos irão exigir um esforço médio;
- “situação aceitável”, quando os tópicos são de média sustentabilidade e seus desenvolvimentos irão exigir um esforço médio, na maioria dos casos por meio de parcerias e de cooperação internacional.

Sustentabilidade	alta	Biorrefinarias (rota termo): 1 Sucroquímica: 2 Oleoquímica: 1 Energias renováveis: 1 Conversão de CO ₂ : 2	Biorrefinarias (rota bio): 3 Biorrefinarias (rota termo): 4 Alcoolquímica: 4 Sucroquímica: 2 Oleoquímica: 4 Energias renováveis: 1 Conversão de CO ₂ : 4	Biorrefinarias (rota bio): 2 Biorrefinarias (rota termo): 3 Alcoolquímica: 2 Sucroquímica: 1 Oleoquímica: 2 Energias renováveis: 3 Conversão de CO ₂ : 1
		Ideal: 7	Desejável: 22	Apostas: 14
	média	Biorrefinarias (rota termo): 2	Biorrefinarias (rota termo): 2 Oleoquímica: 2 Energias renováveis: 1	
		Desejável: 2	Aceitável: 5	Indesejável:
	baixa	Biorrefinarias (rota termo): 3 Oleoquímica: 2		
		Aceitável: 5	Indesejável:	Indesejável:
		baixo	médio	alto
		Grau de esforço requerido		

Figura 1. *Portfolio* tecnológico estratégico da Química Verde no Brasil: 2010-2030

Conforme apresentado na Figura 1, no primeiro nível, denominado “apostas”, situam-se quatorze tópicos, sendo dois referentes a biorrefinarias (rota bioquímica); três associados a biorrefinarias (rota termoquímica); dois em alcoolquímica; um em sucroquímica; dois em oleoquímica; três associados a energias renováveis; e um em conversão de CO₂, mais especificamente a absorção/fixação de CO₂ por microalgas. Especificamente, as “apostas” referem-se aos seguintes tópicos: “produção de celulases” (T1b), “biologia molecular” (T1c); “gaseificação para síntese química” (T2a); “síntese de metanol a partir de CO₂” (T2l); “intermediários para química fina” (T2o); “obtenção de propeno via etanol” (T3a); “obtenção de 1-butanol a partir de etanol” (T3e); “obtenção de ácido cítrico” (T4f); “microalgas” (T5f); “processos de biotecnologia” (T5l); “produção biológica de hidrogênio” (T6a); “eficiência energética” (T6c); “energia solar fotovoltaica” (T6e); “absorção/fixação de CO₂ por microalgas” (T7g).

No segundo nível, “situação ideal”, classificam-se somente sete tópicos, sendo um referente a biorrefinarias (rota termoquímica); dois associados à sucroquímica; um em oleoquímica; um

associado a energias renováveis; e dois em conversão de CO₂. São eles: “processo HBio” (T2g); “obtenção de ácido láctico” (T4a); “obtenção de sorbitol” (T4e); “matérias-primas oleaginosas convencionais” (T5b); “energia hidráulica” (T6f); “produção de uréia” (T7c); e “produção de bicarbonato” (T7d).

No terceiro nível, “situação desejável”, classificam-se vinte e quatro tópicos com a seguinte distribuição: biorrefinarias – rota bioquímica (três tópicos); biorrefinarias – rota termoquímica (seis tópicos); alcoolquímica (quatro tópicos); sucroquímica (dois tópicos); oleoquímica (quatro tópicos); energias renováveis (um tópico); e conversão de CO₂ (quatro tópicos). São eles: “pré-tratamento da biomassa” (T1a); “produção de biocombustíveis de segunda geração e outras moléculas” (T1d); “integração energética de processo” (T1e); “pirólise” (T2b); “Fischer-Tropsch (T2c); “obtenção de dimetil éter (DME) por rota direta” (T2e); “obtenção de etanol e outros álcoois de alto peso molecular” (T2f); “processo HCC” (T2h); “geração de energia” (T2n); “obtenção de acetato de etila a partir de etanol via oxidativa” (T3b); “obtenção de acetato de etila a partir de etanol via desidrogenativa” (T3c); “obtenção de ácido acético a partir de etanol” (T3d); “obtenção de 1,3 butadieno a partir de etanol (T3f); “obtenção de polihidroxibutirato (PHB)” (T4b); “obtenção de ácido itacônico” (T4d); “matérias-primas oleaginosas não convencionais” (T5c); “extração e processamento de oleaginosas” (T5g); “aproveitamento de co-produtos” (T5h); “produção agrícola” (T5j); “energia eólica” (T6d); “redução química de CO₂” (T7a); “reações de condensação com CO₂” (T7b); “produção de carbonatos e policarbonatos orgânicos” (T7e); “absorção/fixação de CO₂ por microalgas” (T7f).

No quarto nível – “situação aceitável” – identificaram-se dez tópicos referentes aos temas: biorrefinarias – rota termoquímica (cinco tópicos); oleoquímica (quatro tópicos); e energias renováveis (um tópico). Os tópicos classificados na “situação aceitável” são: “obtenção de dimetil carbonato (DMC)” (T2m); “obtenção de metanol” (T2d); “síntese de amônia” (T2j); “síntese de uréia” (T2k); “aproveitamento industrial da glicerina” (T5a); “produção de biodiesel por matérias-primas especiais” (T5d); “caracterização de matérias-primas para oleoquímica” (T5k); “gorduras animais” (T5e); e “biogás” (T6b).

Vale ressaltar que, dentre os 57 tópicos abordados na visão de futuro do desenvolvimento da Química Verde no país, dois foram classificados na posição “indesejável”: “obtenção de ácido succínico” (T4c); e “caracterização de derivados oleoquímicos” (T5j). Para efeitos da construção do *Roadmap* Estratégico da Rede Brasileira de Química Verde, esses dois tópicos foram excluídos.

4. Estratégias para o desenvolvimento da Química Verde no Brasil

Considerando a necessidade de adequar o país aos novos paradigmas da economia da sustentabilidade baseada no uso de matérias-primas renováveis, a visão 2010-2030 derivada do estudo prospectivo conduzido pelo CGEE e instituições parceiras é: “estabelecer uma dinâmica de inovação e competitividade para a indústria brasileira baseada em processos químicos que usam matérias-primas renováveis dentro do contexto da Química Verde”.

Para materializar esta visão de futuro no horizonte de 20 anos, delinaram-se cinco estratégias em nível nacional:

- institucionalizar um programa nacional em química verde, considerando seus avanços e desdobramentos na conjuntura político-econômica internacional;
- estruturar a Rede Brasileira de PD&I em Química Verde;
- criar a Escola Brasileira em Química Verde;
- fomentar o desenvolvimento da bioeconomia no país;
- criar marcos regulatórios no país para permitir o uso ecologicamente correto e socialmente justo dos seus recursos naturais, bem como certificar produtos e processos referentes a inovações verdes.

4.1. Estratégia 1: institucionalizar um Programa Nacional em Química Verde

Esse Programa deverá observar as recomendações da IUPAC para obtenção de vantagens em ciência, tecnologia e inovação na utilização sustentável dos recursos naturais. É necessária a formação de parceria com o setor industrial que dinamize a economia e fortaleça a criação de novos mercados por meio de esforço coordenado e multidisciplinar.

O conceito internacional para Química Verde, entendida como o desenho, o desenvolvimento, a produção e o uso de produtos químicos e processos para reduzir ou eliminar o uso ou geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao meio ambiente, deverá sempre nortear ações que institucionalizem um programa nacional em química verde.

Ainda, para esse Programa, deverão ser consideradas:

- a importância da biodiversidade brasileira na biologia, pois a biologia tem se tornando um poderoso vetor de dinamismo da economia mundial, como base da inovação no século 21. A evolução dos conhecimentos em biologia contribui para maior utilização das biomassas, seja na preparação e produção de matérias-primas ou nas tecnologias de

conversão. Novos conhecimentos baseados em engenharia genética, novos processos fermentativos e enzimáticos estarão crescentemente disponíveis.

- a importância do agronegócio brasileiro para a economia nacional, o que levou a proposição de desenvolvimento de temas ligados ao agronegócio, visando dinamizá-lo e fortalecê-lo no sentido de que se passe nas próximas décadas de uma economia de exportação de matérias-primas para uma economia de bioprodutos de alto valor agregado. Seus resultados contribuirão para o desenvolvimento da bioeconomia do país.
- os benefícios da gestão tecnológica para o uso sustentável dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais existentes advindos do esforço desenvolvido pela comunidade científica brasileira para fazer uso da biodiversidade mediante a institucionalização do Programa;
- os impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis e as conseqüentes mudanças climáticas, que fazem necessário evoluir rapidamente para uma economia baseada no uso de biomassa; que gerará emprego e renda, promovendo de forma estratégica o desenvolvimento rural e diminuindo a evasão de divisas;
- a necessidade de integração dos esforços acadêmicos com a indústria química nacional, visando a incrementar a inovação como fator determinante da promoção de um desenvolvimento sustentável, a integração empresa-universidade se mostra uma estratégia valiosa para se atingir efetividade na inovação industrial.

4.2. Estratégia 2: estruturar a Rede Brasileira de Química Verde

A Rede Brasileira de Química Verde terá como visão de futuro: “ser referência mundial no desenvolvimento de produtos e processos limpos de acordo com os princípios da Química Verde, visando reduzir o impacto dos atuais processos químicos no meio ambiente nacional e contribuindo para que o país tenha um modelo de desenvolvimento industrial sustentável, no médio e longo prazo”.

Sua missão é “assumir o papel e a responsabilidade de mobilizar e desenvolver no médio e longo prazo a competência científica e tecnológica do país para a geração de inovações tecnológicas em Química Verde, visando reduzir impactos ambientais e alcançar a sustentabilidade ambiental, social e econômica”.

Para cumprir sua missão e atingir a visão em um horizonte de 20 anos, foram definidos os seguintes objetivos permanentes:

- promover o desenvolvimento tecnológico e inovação de produtos e processos limpos de acordo com os princípios da Química Verde, pela mobilização de instituições de ensino e pesquisa, empresas do setor industrial ou de serviços, órgãos públicos ou privados;
- consolidar e expandir a infraestrutura de laboratórios e facilidades de pesquisa e suporte técnico em torno da visão estratégica de P,D&I em Química Verde para o país;
- formar e qualificar recursos humanos nos temas estratégicos da Química Verde, capacitando gestores, pesquisadores, engenheiros e trabalhadores para o aproveitamento das oportunidades abertas pela Química Verde;
- transferir o conhecimento e as tecnologias desenvolvidas no âmbito da Rede de Química Verde para as empresas intervenientes e demais instituições que apóiam a Rede;
- estabelecer canais de comunicação que atinjam amplos setores da sociedade para informá-los sobre os impactos e benefícios da Química Verde na qualidade de vida do cidadão, no desenvolvimento local de comunidades e regiões e no aproveitamento das vantagens competitivas do país para o desenvolvimento industrial sustentável.

Na seqüência, propôs-se um sistema de governança para a Rede Brasileira de Química Verde que integra as premissas básicas para a operacionalização e gerenciamento da Rede; a estrutura de governança; o conjunto de atribuições e responsabilidades; e a sistemática de avaliação de desempenho da Rede.

As premissas básicas para a efetiva operacionalização e gestão da Rede Brasileira de Química Verde são as seguintes:

- visão de sustentabilidade e continuidade de atuação da Rede em áreas da Química Verde consideradas estratégicas para o país;
- desenvolvimento de produtos e processos limpos de acordo com os princípios da Química Verde;
- conhecimento e potencialização das competências disponíveis nas universidades, de instituições de ensino e pesquisa, empresas do setor industrial ou de serviços, órgãos públicos ou privados;
- transparência e equilíbrio entre as partes envolvidas, quanto à tomada de decisão no que se refere à disponibilização de recursos e à própria gestão dos projetos;
- auto-gestão, auto-avaliação, prospecção de demandas e divulgação de resultados;
- sistema de acompanhamento e avaliação das metas de curto, médio e longo prazo por parte dos atores envolvidos;

- consolidação das parcerias institucionais e promoção de ações multi- setoriais integradas;
- promoção da cooperação Internacional e a inserção internacional da Química Verde brasileira.

A Figura 2 representa a estrutura de governança proposta para a futura Rede Brasileira de Química Verde.

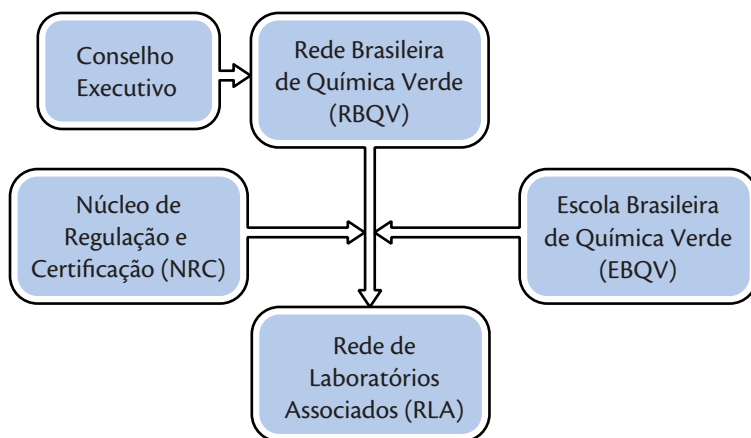


Figura 2. Estrutura de governança da Rede Brasileira de Química Verde

Como mostra a Figura 2, a RBQV compreenderá três unidades organizacionais, a saber: (i) Escola Brasileira de Química Verde (EBQV), cuja instituição gestora será a Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro; (ii) Rede de Laboratórios Associados (RLA); e (iii) Núcleo de Regulação e Certificação (NRC).

A Rede será gerenciada por um Comitê Gestor composto pelo Coordenador Geral da Rede e pelos Coordenadores de suas unidades constituintes. O Comitê Gestor, por sua vez, responderá a um Conselho Executivo integrado por representantes das diversas unidades da Rede e de partes interessadas.

Pelas suas características organizacionais peculiares, a Rede Brasileira de Química Verde requererá métodos de planejamento, monitoração e avaliação que se ajustem a sua estrutura e ao seu *modus operandi*. Apresenta-se sucintamente uma proposta conceitual para a sistemática de avaliação de desempenho da RBQV. Suas principais características são:

- orientação estratégica: a avaliação deve ser feita considerando sempre a perspectiva estratégica e sustentável da Rede, além da perspectiva técnica (Luggen et al, 2005; Germunden, Heydebreck, 1995). Como já abordado em diversas partes deste documento,

a estratégia é considerada elemento fundamental para o desenvolvimento da RBQV de forma sustentável. Compreende os direcionadores estratégicos definidos anteriormente e a visão de futuro expressa nos oito mapas tecnológicos e *portfolios* associados aos temas prioritários - foco do estudo prospectivo;

- abordagem sistêmica: a sistemática deve ser concebida e implementada no contexto de sistemas de inovação, uma vez que as redes, em geral, são consideradas como instrumentos-chaves para fortalecer sistemas de inovação. As seis dimensões fundamentais para a estruturação e funcionamento efetivo da futura Rede propostas neste estudo devem ser abordadas na perspectiva sistêmica, isto é, deve-se analisar as interligações entre elas como um todo, evitando-se a avaliação fragmentada, projeto a projeto ou unidade a unidade;
- abordagem dinâmica: deve considerar indicadores dinâmicos inerentes à natureza da rede, segundo uma perspectiva evolucionária, além dos indicadores clássicos para mensurar a inovação, como produção científica expressa em número de publicações indexadas nas bases internacionais; propriedade intelectual avaliada pelo número de patentes, para citar alguns exemplos;
- flexibilidade e transparência: a sistemática deve ser flexível, ou seja, deve ser capaz de se adaptar a mudanças nas dimensões decorrentes de mudanças ambientais, e transparente, como estabelecido no conjunto de premissas para operacionalização e gerenciamento da RBQV;
- análise qualitativa e quantitativa: os dois tipos de análise devem ser considerados para avaliar estruturas organizacionais como redes. São especialmente importantes as análises qualitativas, em função da sinergia e colaboração esperada entre os atores da rede (Freeman, 1991; Lundvall, 1992, 1998, 2000; Malerba, 2002; Gregersen, Johnson, 2005; Wasserman; Faust, 1994).

Uma condição indispensável para que a sistemática de avaliação opere de forma satisfatória para todos os atores diretamente envolvidos e as diversas partes interessadas é a existência de um ambiente de inovação apoiado por políticas públicas e estratégias deliberadas por parte do governo que viabilizem o processo de estruturação da Rede e implementação de sua estratégia

4.3. Estratégia 3: criar a Escola Brasileira de Química Verde no âmbito da RBQV

Considerando-se a necessidade de promover o avanço das pesquisas e da formação de pessoal de alto nível para permitir a transferência de conhecimentos para a indústria química nacional na área da Química Verde, propõe-se:

que esta Escola seja implantada junto a uma Universidade com vocação para o desenvolvimento da química no Brasil, bem como apresente um quadro de professores e pesquisadores especialistas em Química Verde;

a Escola Brasileira de Química Verde trabalhará como centro de geração e difusão de conhecimentos em consonância com o trabalho da Rede Brasileira de Química Verde e com o Núcleo de Certificação de Produtos e Processos Limpos, haja vista que não se dispõe deste tipo de atividade no país;

a Escola deverá permanentemente acompanhar o estado-da-arte das tecnologias visando a atualização das grades curriculares e o desenvolvimento de novos processos e produtos limpos. O seu trabalho identificará e atenderá demandas tecnológicas da indústria nacional, notadamente aquelas relacionadas com a formação de jovens cientistas, conforme recomendado pela IUPAC;

a Escola desenvolverá atividades na busca de se manter como uma instituição de excelência, realizando de forma continuada o alinhamento do país com os avanços científicos observados no exterior;

Vale ainda salientar que a Escola terá a difícil missão de transferir conhecimentos para as empresas nacionais e, em especial, para o pequeno produtor rural.

4.4. Estratégia 4: fomentar o desenvolvimento da bioeconomia no país

Considerando a necessidade de fortalecer as cadeias produtivas do agronegócio brasileiro, visando torná-lo mais competitivo, os diversos atores (Rede, Escola e empresas) trabalharão no sentido de se agregar valor às matérias-primas nacionais.

A meta estratégica é a criação de uma economia nacional voltada para bioprodutos, diferentemente da situação atual, na qual o foco está voltado para a produção e exportação de *commodities*. Essa meta exigirá pessoal qualificado para tornar o país referência mundial na produção de bioprodutos.

4.5. Estratégia 5: criar marcos regulatórios no país

Essa estratégia vai ao encontro da necessidade de se instalar um Núcleo de Certificação de Produtos e Processos Limpos junto à Rede e à Escola Brasileira de Química Verde, considerando-se a

necessidade de se criar marcos regulatórios no país para permitir o uso ecologicamente correto e socialmente justo dos seus recursos naturais, bem como certificar produtos e processos limpos.

O Núcleo acompanhará os desenvolvimentos dos marcos regulatórios no exterior e apoiará o desenvolvimento de legislação nacional aplicável ao desenvolvimento da Química Verde no país. Essas instituições deverão ser capazes de sustentar nova conduta em processos químicos industriais e de implementar ações segundo a legislação de inovação, regulamentação técnica e propriedade intelectual, em apoio às atividades de cadeias produtivas brasileiras.

5. Considerações finais

A Figura 3 apresenta a distribuição percentual dos tópicos analisados, segundo sua posição no *portfolio* tecnológico estratégico da Rede Brasileira de Química Verde. Observa-se um excelente balanceamento entre os tópicos considerados como apostas (25%) e aqueles situados nas posições desejável, aceitável e ideal (44%, 18% e 13%, respectivamente).

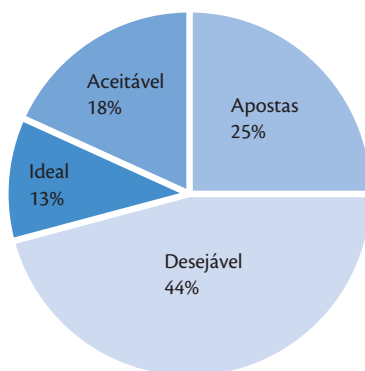


Figura 3. Distribuição percentual dos tópicos tecnológicos no portfólio tecnológico estratégico da Química Verde no Brasil

Como representado nas Figuras 1 e 3, um *portfolio* tecnológico estratégico com essas características favorece significativamente o cumprimento das ações e metas que foram propostas no *Roadmap* Estratégico da Rede e o engajamento oportuno e em tempo hábil dos diversos atores-chave em torno das trajetórias preconizadas nos respectivos mapas tecnológicos representados ao longo do documento.

O *Roadmap* Estratégico contemplou um conjunto consistente de 84 ações, cuja distribuição por período e por dimensão pode ser visualizada na Tabela 2. Os planos de ação não serão aqui com-

partilhadas devido à natureza sensível das informações e a necessidade de serem discutidos em fóruns específicos para a devida mobilização de recursos físicos, humanos e financeiros.

Tabela 3. Distribuição das ações do Roadmap Estratégico da RBQV por período e por dimensão

Período/ Dimensão	Infraestrutura	Recursos humanos	Processo de inovação em rede	Transferência tecnológica e científica	Percepção de valor pela sociedade	Total	(%)
Curto prazo	6	4	6	3	7	26	31
Médio prazo	8	5	9	9	8	39	46
Longo prazo	4	2	3	5	5	19	23
Total	18	11	18	17	20	84	100

O conjunto de ações volta-se preponderantemente para o aproveitamento das oportunidades indicadas no *portfolio* tecnológico estratégico (Figura 1), em três níveis distintos de exigências de recursos, e buscará promover a articulação e o engajamento dos mais diversos atores, por meio das ações de suporte propostas para as seis dimensões da Rede. Isso porque, por um lado, os pesquisadores precisam de apoio e orientação desde as fases iniciais mostradas nos mapas tecnológicos (pesquisa pré-competitiva), até a antecipação de oportunidades comerciais e consequente materialização dos resultados de P&D em inovações de produtos e processos, que gerem impactos sociais, ambientais ou econômicos para o país. Por outro lado, as empresas necessitam de uma maior integração com o ambiente acadêmico para gerar novas oportunidades de transferência para o setor socioprodutivo dos promissores resultados, como visto neste estudo, em relação à produção científica nacional. Em síntese, as ações que integram o *Roadmap* Estratégico foram consideradas necessárias para fortalecer o posicionamento do Brasil como um país capaz de desenvolver e aplicar, de modo sustentável, tecnologias de processos e produtos consideradas promissoras segundo a visão de futuro da Química Verde apresentada neste artigo.

O desenvolvimento e a implementação da Química Verde no país dependerá fortemente da ação articulada de diversos agentes mobilizadores: governo, empresas, instituições de C&T (ICT), universidades, organizações não-governamentais e associações profissionais, como por exemplo a Associação Brasileira de Química (Abiquim), a Associação Brasileira de Química Fina (Abifina), a Associação Nacional de Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia das Empresas Inovadoras (Anpei) e a Associação Nacional Incubadoras de Empresas e Parques Tecnológicos (Anprotec).

Entre todos os atores-chave, a colaboração e a troca de conhecimento tornam-se essenciais para que as atividades de educação, capacitação e qualificação de recursos humanos, P&D, inovação e difusão tecnológica possam ser operacionalizadas de forma eficiente e eficaz. Nessa perspectiva, foram definidos com clareza os papéis, objetivos e interesses de cada um dos

atores-chave, conforme orientações gerais da OECD para o estabelecimento de programas de P&D em Química Verde².

Finalmente, cabe ressaltar que o estudo prospectivo congregou os resultados de um esforço coletivo, envolvendo cerca de 30 representantes de instituições acadêmicas, de instituições de C&T, da indústria e do governo que atuam diretamente nos campos abordados neste artigo. Consolidou-se dessa forma, com o comprometimento de todos, programa de ação em três horizontes que servirá de base para as etapas posteriores de implantação da Rede Brasileira de Química Verde.

Agradecimentos

Os autores, em nome de todas as pessoas envolvidas nesta iniciativa, reconhece e agradece a colaboração prestada pelo corpo técnico e diretoria do CGEE à realização da publicação “Química Verde no Brasil, 2010 – 2030”, e de forma especial enaltece a visão estratégica da Dra. Lucia Mello, Presidente do CGEE, na elaboração deste trabalho desde a sua fase inicial.

² OECD. *Need for research and development programmes in sustainable chemistry* (Series on Risk Management, nº15). 2002. Versão digital ENV/JM/MONO(2002)12. Disponível em: <<http://www.oecd.org>>. Acesso em: set 2010.

Referências

- ALMEIDA, M.F.L. **Dimensões para o planejamento e avaliação da Rede Brasileira de Química Verde**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009. Texto para discussão. Mimeo.
- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. ACS. **ACS Green Chemistry Institute**. Disponível em: <<http://portal.acs.org>>. Acesso em: dez 2009.
- ANASTAS, P.T.; EGHBALLI, N. Green chemistry: principles and practice. **Chem. Soc. Rev.**, v.39, p. 301–312. 2010.
- ANASTAS, P.T.; WARNER, J. **Green chemistry: theory and practice**. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. MCT. **Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para 2007-2010. PACTI**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: dez 2009.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Política de Desenvolvimento Produtivo. PDP**. Brasília, maio de 2008. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/pdp/arquivos.destswf1212125941.pdf>>. Acesso em: dez 2009.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Química Verde no Brasil: 2010-2030**. Brasília: 2010.
- CLARK, J.H. Green chemistry: challenges and opportunities. **Green Chemistry**, v. 1999, p. 1-8. 1999.
- FREEMAN, C. Networks of innovators: a synthesis of research issues. **Research Policy**, v. 20, p. 499-514. 1991.
- GERMUNDEN, H.G.; HEYDEBRECK, D.P. The influence of business strategies on technological networks activities. **Research Policy**, n. 24, p. 831-849. 1995.
- GREEN CHEMISTRY NETWORK. **Green Chemistry Network**. Disponível em: <<http://www.greenchemistrynetwork.org>>. Acesso em: dez 2009.
- GREGERSEN, B.; JOHNSON, B. Performance of innovation systems. towards a capability based concept and measurements. In: GLOBELICS CONFERENCE, 3., Pretoria South Africa, 2005. **Trabalho apresentado...** Pretoria South Africa, 2005.
- JACOBIDES, M.G.; KNUDSEN T.; AUGIER M. Benefiting from innovation: value appropriation and the role of industry architectures. **Research Policy**, v.35, p. 1200-1221, 2006.
- LUNDEVALL, Bengt-.Ake. **The convergence and divergence of national systems of innovation**. Draft of contribution to special issue of Research Policy on Innovation Systems, 2000.
- _____. Why study national systems and national styles of innovation?. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 10, n. 4, p.407-422. 1998.
- _____. **National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning**. Londres: Pinter, 1992.

- MALERBA, F. New challenges for sectoral systems of innovation in Europe. In: *Druid Summer Conference 2002*. Copenhagen, Denmark, June 6-8, 2002. **Trabalhos apresentado...** Copenhagen, Denmark, June 6-8, 2002.
- OECD. **Need for research and development programmes in sustainable chemistry** (Series on Risk Management, No.15). 2002. Versão digital ENV/JM/MONO(2002)12. Disponível em: <<http://www.oecd.org>>. Acesso em: set 2010.
- PHAAL, R.; FARRUKH, C.; PROBERT, D.R. Customizing roadmapping. **Research Technology Management**, Mar – Apr, p. 26-37. 2004.
- U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Green Chemistry**. Disponível em:<<http://www.epa.gov/epahome/topics.html>>. Acesso em: dez 2009.
- _____. **Twelve principles of green chemistry**. 1992. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: dez 2009.
- _____. **EPA Twelve principles of green chemistry**. EUA.1992. Disponível em: <<http://www.epa.gov/greenchemistry>>. Acesso em: set 2010.
- UN. UNITED NATION ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global trends in sustainable energy investment**. 2009. Executive Summary. Disponível em: <www.unep.org/pdf/Global_trends_report_2009.pdf>. Acesso em: dez 2009.
- _____. **Towards sustainable production and use of resources: assessing biofuels**. 2009. Disponível em: <http://www.unep.fr/scp/rpanel/pdf/Assessing_Biofuels_Full_Report.pdf>. Acesso em: dez 2009.
- UN. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. UNFCCC. **Kyoto Protocol**. 2007. Disponível em: <http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php>. Acesso em: dez 2009.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Green chemistry program**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/greenchemistry>>. Acesso em: dez 2009
- _____. **Presidential Green Chemistry Challenge (PGCC) Awards Program**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/greenchemistry/pubs/pgcc/presgcc.html>>. Acesso em set 2010.
- WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysing methods and applications**. New York: Cambridge University Press, 1994.