



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E
TECNOLÓGICA

Leonardo Victor Marcelino

**OS TIPOS DE RACIONALIDADE NA QUÍMICA VERDE E SUAS RELAÇÕES
COM O ENSINO**

Florianópolis

2020

Leonardo Victor Marcelino

**OS TIPOS DE RACIONALIDADE NA QUÍMICA VERDE E SUAS RELAÇÕES
COM O ENSINO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de doutor em Educação Científica e Tecnológica.

Orientador: Prof. Carlos Alberto Marques, Dr.

Florianópolis

2020

Marcelino, Leonardo Victor

Os Tipos de Racionalidade na Química Verde e suas
Relações com o Ensino / Leonardo Victor Marcelino ;
orientador, Carlos Alberto Marques, 2020.

198 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas,
Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica,
Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Educação Científica e Tecnológica. 2. Racionalidade
Instrumental. 3. Valores. 4. Bibliometria. 5. Pensamento
Sistêmico. I. Marques, Carlos Alberto. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Educação Científica e Tecnológica. III. Título.

Leonardo Victor Marcelino

**OS TIPOS DE RACIONALIDADE NA QUÍMICA VERDE E SUAS RELAÇÕES
COM O ENSINO**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Profª. Vania Gomes Zuin, Dra.

Universidade Federal de São Carlos

Profª. Marilei Casturina Mendes Sandri, Dra.

Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Alberto Oscar Cupani, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de doutor em Educação Científica e
Tecnológica.

Prof. Juliano Camillo, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Carlos Alberto Marques, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2020.

Para Lucia Marcelino, mãe guerreira.

Para Helloá Glésia, *in memoriam*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A minha mãe, que me carregou no colo mesmo quando ela não conseguia andar.

A todos os professores, colegas e amigos das escolas-árvores e das escolas de lona durante os anos de luta no MST.

Aos professores e colegas de graduação, mestrado e doutorado por terem contribuído com tantos aprendizados.

Aos professores Jesper Sjöström, Adélio Machado e Alberto Cupani, por terem contribuído extensivamente com essa pesquisa.

Ao Bebeto, pela confiança, pela orientação e por toda a ajuda nesse período de mestrado e doutorado, tanto na tese quanto fora dela.

A minha terapeuta, Marília Bittencourt, por cuidar da pouca sanidade que me resta.

Aos queridos amigos que me suportaram e me deram suporte em quase uma década em Floripa: Celo, Taíse, Leila, Franci, Erica, Patrícia, Rodrigo, Malu, Bia, Grazi, Barbara, Julio, Igor, Fabiano, João Carlos, Fernanda, ANayara, Lionara e tantos outros.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq).

Já vivemos bastante. Já vimos muito. Para quem sabe tanto como nós, nada é importante. Tudo se repete eternamente, dia e noite, verão e inverno; o mundo está vazio e não tem significado. Tudo se move em círculos. O que aparece tem de desaparecer, o que nasce tem de morrer. Tudo passa, o bem e o mal, o estúpido e o inteligente, o belo e o feio. Tudo é vazio. Nada é real. Nada é importante (Ende, 1979).

RESUMO

A Química Verde (QV) emerge na década de 1990 como um campo científico organizado em torno da prevenção da degradação ambiental pelos produtos e processos químicos. Nossa hipótese é de que a QV tem características de racionalidade prática, incorporando a dimensão e valores ambientais, mas pode reduzir-se à racionalidade instrumental, dificultando a evolução de toda a Química como uma ciência engajada na salvaguarda do ambiente. O objetivo geral deste trabalho é discutir os tipos de racionalidade presentes em produções de químicos verdes, tendo em vista seu papel na produção e no enfrentamento dos problemas ambientais e a necessidade e importância das racionalidades ao ensino de Química. O referencial teórico principal está pautado na Filosofia da Química, Filosofia da Tecnologia e Teoria Crítica para pensar os tipos de racionalidade, o método de atribuir causa e justificar logicamente os fenômenos. A pesquisa foi qualitativa e documental. Mais de 14 mil textos foram analisados por Análise de Citação e de Hubs e Autoridades Intelectuais da QV, elencando as 13 publicações mais relevantes como *corpus* analítico. Os resultados indicaram que a QV se baseia na racionalidade prática, sendo direcionada para a produção de inovações tecnológicas baseadas em procedimentos e regras de *design*, consolidadas nos 12 Princípios da QV. Na racionalidade ética, os valores ambientais são voltados à prevenção da: toxicidade, geração de resíduos, da não renovabilidade, dos perigos físicos, da não biocompatibilidade dos produtos químicos e da ineficiência energética e material dos processos. Os valores econômicos não aparecem explicitamente nos 12 Princípios da QV, mas foram argumentos muito utilizados para convencer os demais químicos, indústrias e governo sobre a viabilidade econômica das práticas verdes. Na racionalidade política, os químicos verdes usam a ocupação de posições de poder (acadêmico, econômico, político) como estratégia para implementar os valores ambientais, o que pode solapar os valores do campo em favorecimento aos interesses econômicos hegemônicos. Essa concessão de valores é uma característica da racionalidade instrumental na QV. Devido à racionalidade prática na QV, o Ensino de Química pode ser beneficiado pela aproximação com a Educação Tecnológica em seus cinco temas principais: modelagem, *design*, recursos, sistemas e valores humanos. Destes, a educação em *design*, o Pensamento Sistêmico Crítico e a Heurística Sistêmica Crítica apresentam grande possibilidade para estabelecer uma posição crítica frente às inovações científico-tecnológicas e desvelar o salvacionismo tecnológico. Conclui-se que a evolução a um Pensamento Sistêmico Crítico na abordagem da QV na formação de químicos e cidadãos pode contribuir para direcionar a Química para práticas mais ambientalmente benignas e para uma sociedade mais justa, democrática e sustentável. A pesquisa apresenta, inexoravelmente, certos limites devido ao tamanho do *corpus* analisado e pelo recorte da amostra situar-se à pesquisa acadêmica. Pesquisas futuras podem investigar discursos e práticas de outros sujeitos da QV, como educadores, criadores de políticas públicas e participantes da indústria química.

Palavras-chave: Química Verde. Racionalidade Instrumental. Bildung. Pensamento Sistêmico Crítico.

ABSTRACT

Green Chemistry (GC) emerged in the 1990s as a scientific field organized around the threat of environmental degradation by chemical products and processes. The hypothesis is that a GC has characteristics of practical rationality, incorporating environmental dimensions and values, but it can be reduced to instrumental rationality, hindering the evolution of all Chemistry as a science engaged in safeguarding the environment. The general objective of this work is to discuss the types of rationality present in the production of green chemists papers, in view of their role in generating and combating environmental problems and the need and importance of these rationalities to Chemistry teaching. The main theoretical framework is based on Philosophy of Chemistry, Philosophy of Technology and Critical Theory to think about the types of rationality, the methods of attributing cause and logically justifying phenomena. This is a qualitative and documental research. More than 14 thousand texts were analyzed by Cocitation Analysis and by means of Intellectual Hubs and Authorities, with the 13 more relevant publications as the analytical *corpus*. The results indicated that GC is based on practical rationality, being directed towards the production of technological innovations based in *design* procedures and rules consolidated in the 12 GC Principles. In the ethical rationality, environmental values are aimed at preventing: toxicity, waste generation, non-renewable resources, physical hazards, non-biocompatibility of chemicals, and economic and material inefficiency of processes. Economic values do not appear explicitly in the 12 GC Principles, but they were widely used to convince other chemists, industries and the government about the economic viability of green practices. In the political rationality, green chemists occupy positions of (academic, economic or governmental) power as a strategy to implement environmental values, what can subsume the values of the field into the hegemonic economic interests. This concession of values is a characteristic of instrumental rationality in GC. Considered the practical rationality in GC, Chemistry Teaching can benefit from the approximation with Technology Education in its five main topics: modeling, *design*, resources, systems and human values. Of these, *design* education, Critical Systems Thinking and Critical Systemic Heuristics have great possibility of defining a critical position in the face of scientific-technological innovations unveiling technological salvationism. We concluded that the evolution to a Critical Systems Thinking in the approach of GC during the education of chemists and citizens in general can contribute to direct Chemistry towards more environmentally benign practices and towards a more just, democratic and sustainable society. The research has, inexorably, certain limits due to the size of the analyzed *corpus* and the restriction of the sample to analyzing academic research. Future research can investigate discourses and practices of other GC subjects, such as educators, policy makers and participants in the chemical industry.

Keywords: Green Chemistry. Instrumental Rationality. Bildung education. Critical Systems Thinking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma das Racionalidades. Fonte: Adaptado de Agazzi (1996).	29
Figura 2: Análise de cocitação. As referências A e B ocorrem conjuntamente em dois artigos (1 e 3).37	
Figura 3: Rede de interação hipotética.	38
Figura 4: Relação entre frente de pesquisa e base intelectual.	40
Figura 5: Resumo dos critérios para escolha dos dados de entrada para o CiteSpace.....	42
Figura 6: Valores de Modularidade Q e Silhueta Média em função do recorte temporal (Time Slice) e seleção de nós (Top N.)	43
Figura 7: Rede de cocitação a partir das publicações em Química Verde de 1990 a 2017. Imagem original em https://bit.ly/2sb73dw	46
Figura 8: Distribuição de trabalhos selecionados dos hubs intelectuais por especialidades.	53
Figura 9: Valores associados aos 12 Princípios da Química Verde.....	96
Figura 10: Principais valores da Química Verde.....	108
Figura 11: Diferentes visões dos defensores da QV e suas tensões de valores.....	110
Figura 12: Campo de valores em que a Química Verde (QV) atua.....	131
Figura 13: Formas de interação entre valores pessoais e sociais (LACEY, 2008b) e tipos de racionalidade.....	135
Figura 14: Interdependência entre fronteiras de um sistema, juízos de valor e observação de fatos.	157
Figura 15: Tetraedro de Sjöström, incluindo diferentes níveis de complexidade da discussão do elemento humano no conhecimento escolar a) da Química e b) da Química Verde.	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tamanho, silhueta e ano médio de publicação da base intelectual de <i>clusters</i> sobre Química Verde. * Trabalhos localizados entre duas especialidades o que dá a impressão de suas datas de publicação serem posteriores a de citação (frente de pesquisa).	47
Tabela 2: Produção selecionada dos hubs intelectuais por período. Em parênteses: em quantas especialidades apareceu.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação entre capítulos, questões complementares e objetivos de pesquisa.	32
Quadro 2: Configuração da construção de uma rede de cocitação sobre Química Verde de 1990 a 2017.....	44
Quadro 3: Hubs e autoridades intelectuais da Química Verde e suas especialidades.	50
Quadro 4: Hubs e autoridades intelectuais selecionadas para compor o <i>corpus</i> analítico.....	52
Quadro 5: Seleção de trabalhos mais relevantes (alta cobertura) dos hubs intelectuais da especialidade E e da QV em geral.	53
Quadro 6: Principal trabalho entre as autoridades intelectuais.	54
Quadro 7: Textos selecionados para o <i>corpus</i> de análise.	54
Quadro 8: Categorias de diferenciação entre racionalidade prática e racionalidade teórica.	63
Quadro 9: Especialidade da Química Verde.....	69
Quadro 10: Principais competências da Educação Tecnológica e seus temas.	146
Quadro 11: Questões, categorias e sujeitos da Heurística Sistemática Crítica (HSC).	158

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ACS	
American Chemical Society	17
ACT	
Alfabetização Científica e Tecnológica	162
ATD	
Análise Textual Discursiva	32
Burst	
Citation Burstness	47
CE	
Comunidade Epistêmica	116
Centr	
Betweenness Centrality	47
CGEE	
Centro de Gestão e Estudos Estratégicos	20
CMA	
Chemical Manufacturing Association	113
CNPq	
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	76
COMEST	
Comissão Mundial sobre a Ética do Conhecimento Científico e Tecnológico	149
Cov	
Coverage	47
CSR	
corporate social responsibility	113
CTA	
Construtive Technology Assessment	81
CTS	
Ciência, Tecnologia e Sociedade	24
CTSA	
Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente	162
D&T	
Design and Technology	141
EPA	
Environmental Protection Agency	17
ET	
Educação Tecnológica	140
Freq	
Frequência de Cocitação	47
GCI	
Green Chemistry Journal	39

GCLR	
e Green Chemistry Letters and Reviews.....	39
GCS	
Global Citation Score.....	47
HSC	
Heurística Sistêmica Crítica.....	153
LBY	
Look Back Year.....	40
LCA	
Life Cycle Analysis.....	80
LCD	
Learning by Collaborative Design.....	146
LCS	
Local Citation Score.....	47
MFA	
Material Flow Analysis.....	151
MQ	
Modularidade Q.....	40
MS	
Silhueta Média.....	40
N Trab	
Número de Trabalhos.....	47
NEPA	
National Environmental Policy Act.....	18
PLACTS	
Projeto Latino-Americano de CTS.....	163
PPA	
Pollution Prevention Act.....	18
PS	
Problem Solving.....	145
PSC	
Pensamento Sistêmico Crítico.....	153
QV	
Química Verde.....	17
SDM	
System Dynamic Model.....	151
STEM	
Science, Technology, Engineering and Mathematics.....	141
Top N.	
critério de seleção de nó.....	40
US EPA.....	<i>Consulte EPA</i>

WCED	
World Comission on Evironment and Development.....	74

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.1	RACIONALIDADE: A RAZÃO NA AÇÃO	27
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	30
1.3	QUESTÕES COMPLEMENTARES	30
1.4	OBJETIVO GERAL	30
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
2	PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA.....	34
2.1	BIBLIOMETRIA: A CIÊNCIA DA PRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO DO CONHECIMENTO	35
2.1.1	Percurso Metodológico.....	41
2.1.2	Resultados da análise de cocitação.....	44
2.1.3	Hubs e Autoridades da Química Verde.....	48
2.2	DEFINIÇÃO DO CORPUS	50
3	RACIONALIDADE PRÁTICA NA QUÍMICA VERDE: estratégias e limites técnicos	56
3.1	QUÍMICA: TEORIA OU PRÁTICA?	57
3.2	QUÍMICA VERDE: TEORIA OU PRÁTICA?.....	63
3.3	ESTRATÉGIAS DA QUÍMICA VERDE.....	69
3.3.1	A – Solventes	70
3.3.2	B – Líquidos Iônicos	71
3.3.3	C – Biomassa	72
3.3.4	D – Catálise.....	72
3.3.5	E — Caracterização da Química Verde	73
3.3.6	F — DIÓXIDO DE CARBONO COMO substrato para sínteses	74
3.4	LIMITES TÉCNICOS DA QUÍMICA VERDE	75
3.4.1	Eficácia dos Solventes Verdes.....	75
3.4.2	Limites Técnicos da Sustentabilidade.....	77
3.4.3	Métricas da Química Verde: avaliação da eficiência	81
3.5	TEORIA E PRÁTICA: UNIDAS	84
4	VALORES NA QUÍMICA VERDE: considerações da ética	89
4.1	VALORES NA PRÁTICA CIENTÍFICA.....	90
4.2	VALORES DA PRÁTICA EM QUÍMICA VERDE.....	93

4.2.1	Valores Práticos da Química Verde.....	94
4.2.2	Valores Teóricos da Química Verde	104
4.3	TENSÕES NOS VALORES DA QUÍMICA VERDE.....	108
5	VALORES NA QUÍMICA VERDE: considerações da política e da racionalidade instrumental.....	112
5.1	A QUÍMICA VERDE TEM POLÍTICA?	112
5.1.1	Química Verde: seus atores e seus beneficiários.....	115
5.1.2	Métricas verdes e indicadores sociais	118
5.1.3	Relações da Química Verde com as decisões governamentais	119
5.1.4	Participação social democrática na atividade científica	123
5.2	TEORIA TRADICIONAL E TEORIA CRÍTICA: RACIONALIDADE INSTRUMENTAL NA QUÍMICA VERDE	126
6	QUÍMICA VERDE E ENSINO DE QUÍMICA: relações para superação da racionalidade instrumental.....	139
6.1	O MODO DE CONHECER DO QUÍMICO (VERDE).....	140
6.2	ENSINO DE QUÍMICA: EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA E CIENTÍFICA	143
6.2.1	Conceitos fundamentais da Educação Tecnológica e educação em <i>design</i> ...	145
6.2.2	Pensamento Sistêmico (Crítico).....	154
6.3	EDUCAÇÃO PARA FORMAÇÃO CULTURAL	160
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	168
	REFERÊNCIAS.....	174
	APÊNDICES	192
	APÊNDICE A – TABELA DE ANÁLISE DO CORPUS DA TESE	192
	APÊNDICE B – TRABALHOS ANALISADOS SOBRE QUÍMICA VERDE E POLÍTICA.....	193
	ÍNDICE REMISSIVO	196

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Química desempenha um papel fulcral no enfrentamento da crise ambiental, visto que se localiza no centro de praticamente todos os processos produtivos, afetando a setores primordiais da economia (CGEE, 2010). Por outro lado, a Química, especialmente a indústria química, é vista como forte responsável pela crise ambiental (WCED, 1987b; MARQUES; MACHADO, 2014). Portanto, abordar a crise ambiental é refletir sobre a matriz produtiva de bens e serviços, e os conhecimentos que usam para desempenhar suas atividades, pois quando se fala em transformação de matéria e energia, trata-se do âmbito da Química.

A Química Verde (QV) emerge na década de 1990 como uma resposta proativa da Química aos problemas do ambiente, sendo fruto do moderno ambientalismo estadunidense (décadas de 1960 a 1980), por meio de ações governamentais via Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos e de uma rede de pesquisadores organizadas em torno de um problema comum: a degradação ambiental pelos produtos e processos químicos (EPICOCO; OLTRA; SAINT JEAN, 2014). Esses pesquisadores consideraram que não bastava limitar e controlar a exposição e o descarte dos produtos químicos, mas era necessário desenvolver rotas sintéticas e produtos químicos inerentemente seguros (POLIAKOFF *et al.*, 2002), agindo, assim, preventivamente aos danos ambientais.

A QV possui diversos locais de atuação, como pesquisa acadêmica, indústria e educação (HOWARD-GRENVILLE *et al.*, 2017), aproximando do conceito de campo, um espaço de disputa em que os sujeitos são unidos por entendimentos e regras compartilhadas (GILDING; PICKERING, 2011). Segundo Sjöström (2007, 2013), a QV tem uma natureza metacientífica, um reflexão sobre a própria prática científica que redireciona os caminhos da Química. Nesta pesquisa, referimo-nos à QV como um campo de pesquisa e de aplicações industriais, e defenderemos a ideia de que a QV também é prática (práxis). Portanto, quando nos referimos à QV, estamos falando principalmente da atividade realizada pelos químicos verdes, o que será o foco das nossas investigações.

A *American Chemical Society* (ACS) cria uma linha do tempo da QV (ACS, 2015) e traça sua origem na importante obra de Rachel Carson (2010) publicada em 1962, “Primavera Silenciosa”, em que ela denuncia o impacto de certos químicos (principalmente os pesticidas

organoclorados, como o DDT¹) sobre ecossistemas locais. A obra teve grande impacto e serviu para despertar o público e os cientistas para os impactos da atividade industrial química, incitando o início do movimento moderno ambientalista e também a criação de políticas de regulação da poluição nos Estados Unidos, como o *National Environmental Policy Act* (NEPA) (US EPA, 2013) em 1969.

As influências no cenário político estadunidense continuam e em 1970 (ACS, 2015) é criada a EPA, uma agência de regulação federal. Seu primeiro ato foi o banimento do DDT e outros pesticidas, passando em seguida a desenvolver uma série de regulações para controlar o impacto ambiental. Durante a década de 1980, uma série de eventos científicos debateu a questão da poluição ambiental e começou a defender a ideia de que não bastava o controle do descarte de resíduos, mas era necessário partir para ações de prevenção: de evitar a geração de substâncias tóxicas ou desnecessárias. Assim, em 1988 é criado o *Office of Pollution Prevention and Toxics*, divisão da EPA voltada para promover a prevenção de impactos ambientais.

Na década de 1990 (ACS, 2015), consolidam-se as políticas de prevenção da poluição e nasce o termo Química Verde. Ainda em 1990 a EPA apresenta um relatório ao Congresso dos EUA sobre a geração de resíduos em solo estadunidense e é aprovado o *Pollution Prevention Act* (PPA), que parte da ideia de que há geração de grande quantidade de resíduos que poderiam ser evitados pelas indústrias de forma preventiva. Uma vez que é possível prevenir a poluição e isso é mais eficiente do que controlar ou tratar rejeitos químicos, diz o relatório, defende-se a criação de uma política de regulação voltada à prevenção (US EPA, 1990), o PPA. Em 1994 ocorre o primeiro simpósio sobre o tema da prevenção em Chicago, "*Benign by Design: Alternative Synthetic Design for Pollution Prevention*", e também no início dessa década são publicados artigos na Europa sobre o assunto.

Em 1995 (ACS, 2015) a EPA recebe apoio presidencial para criar um incentivo à QV por meio de um prêmio: o *Presidential Green Chemistry Challenge Awards*, destacando inovações científicas em QV na indústria e academia. Em 1997 um funcionário aposentado da EPA e mais um químico fundam o *Green Chemistry Institute*, como uma instituição sem fins lucrativos para exclusiva promoção da QV. No mesmo ano é criado o primeiro programa de

¹ Diclorodifeniltricloroetano (DDT), primeiro pesticida moderno, largamente usado após a Segunda Grande Guerra para combate de vetores da malária e dengue.

doutorado em QV na Universidade de Massachusetts, em Boston.

Em 1998, Paul Anastas e John Warner publicam a obra clássica sobre QV, o livro *Green Chemistry: Theory and Practice*, que faz um levantamento da QV, demarcando seu conceito, seus métodos de avaliação, desafios e perspectivas. Um dos grandes marcos do livro é estabelecer os 12 Princípios da QV, uma reflexão sobre a ciência que tem sido feita dentro desse campo em seus primórdios e que apontam direções para seu futuro (ANASTAS; WARNER, 1998). Os 12 Princípios, conforme definição de Anastas e Warner (1998), assumem o papel de exemplares da prática científica, estratégias definidas dentro da comunidade e que demarcam seu campo de ação. Segue uma definição sucinta de cada um deles (ACS, 2017, tradução nossa):

1 Prevenção: é melhor prevenir o resíduo do que tratar ou limpar o resíduo depois que ele foi criado.

2 Economia Atômica: métodos sintéticos deveriam ser desenhados para maximizar a incorporação de todos os materiais usados no processo dentro do produto final.

3 Sínteses de Produtos Químicos Menos Perigosos: sempre que praticável, métodos sintéticos deveriam ser desenhados para usar e gerar substâncias que possuem pequena ou nenhuma toxicidade para a saúde humana ou ambiente.

4 Design de Produtos Químicos Seguros: produtos químicos deveriam ser projetados para desempenhar suas funções desejadas enquanto minimizam sua toxicidade.

5 Solventes e Auxiliares Seguros: o uso de substâncias auxiliares (por exemplo, solventes, agentes de separação, etc.) deveria se tornar desnecessário sempre que possível e inócuo se usado.

6 Design para Eficiência Energética: requerimento de energia dos processos químicos deveriam ser reconhecidos pelos seus impactos ambientais e econômicos, devendo ser minimizados. Se possível, métodos sintéticos deveriam ser conduzidos em temperatura e pressão ambientes.

7 Uso de Fontes Renováveis: um material bruto ou matéria-prima deveria ser renovável sempre que praticável técnica e economicamente.

8 Redução de Derivados: derivações desnecessárias (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária de processos químicos ou físico) deveriam ser minimizados ou evitados se possível, porque tais passos requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos.

9 Catálise: reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são melhores que reagentes estequiométricos.

10 Design para Degradação: produtos químicos deveriam ser projetados para que ao fim de suas funções eles se quebrem em produtos de degradação inócuos e não persistam no ambiente.

11 Análise da Prevenção da Poluição em Tempo Real: metodologias analíticas precisam ser mais bem desenvolvidas para permitir monitoramento e controle em tempo real e durante o processo, antes da formação de substâncias perigosas.

12 Química Inerentemente Segura para a Prevenção de Acidentes: substâncias e a forma de uma substância usada em um processo químico deveriam ser escolhidas para minimizar o potencial para acidentes químicos, incluindo liberações, explosões e incêndios.

Não se desconsidera o papel importante da prevenção e da eficiência na diminuição dos impactos ambientais. Antes, tenta-se expandir esse sistema, repensá-lo sobre novos valores. Assim, Thornton (2000) fala da superação do *paradigma do risco* – centrado na

prevenção, na permissão e no controle do uso e descarte, também decorrentes de um cientificismo –, pelo *paradigma ecológico* – baseado na precaução –, uma ação que se empreende frente à consciência da limitação científica em prever e controlar os riscos. Nessa perspectiva, assume-se a ubiquidade e a multiplicidade das fontes emissoras de poluentes e de sua poluição; parte-se da dificuldade de se analisar e avaliar as interações múltiplas, sinérgicas e complexas entre poluentes e ecossistema para promoverem novos meios de produção e consumo.

A QV vem recebendo crescente reconhecimento ao longo de sua breve história (já quase 30 anos). Como se notou, sua gênese esteve atrelada à criação de uma política científica e de regulação da poluição ambiental. Ela se beneficia das três estratégias de uma política: o banimento, a restrição e o incentivo (ECHEVERRÍA, 2003). No campo do banimento, foram importantes os primeiros atos da EPA em banir o DDT e outros pesticidas; na restrição, vem o papel do PPA, que restringe ainda mais a possibilidade de geração de resíduos e; no incentivo, ela gozou da criação de um prêmio financiado pelo governo federal estadunidense, por exemplo. Hoje ela expandiu sua atuação e não se limita apenas ao território dos Estados Unidos, mas possui pesquisadores em todo o mundo. Assim, a QV revela relações com o âmbito político, que podem ser mais bem investigadas.

No Brasil a QV é reconhecida como um conhecimento estratégico para o desenvolvimento econômico, conforme aponta relatório do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia. O órgão entende a QV como uma estratégia para alcançar uma produção industrial e um crescimento econômico de forma sustentável, pela transformação das *commodities* renováveis em produtos de alto valor agregado. Aqui percebemos que há um interesse comercial no desenvolvimento e implementação da QV, mas em que extensão esse valor econômico influencia nas práticas e na forma de pensar a QV?

Entretanto, diz o CGEE (2010), a efetivação da QV na matriz produtiva brasileira passa pelo fortalecimento da educação em QV em todos os níveis e também pela formação de profissionais para as indústrias, por meio de várias ações, com destaque à criação de uma Escola Brasileira de QV e a estruturação de uma Rede Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em QV. O papel da pós-graduação no desenvolvimento de pesquisas e na formação de pessoal de alto nível para a QV é um passo importante, considerando que vem de um órgão estratégico do Ministério da Ciência e Tecnologia. Mas esse destaque da CGEE é apenas enunciativo e muito precisa ser realizado. Por exemplo, ao

realizar uma pesquisa nas teses e dissertações defendidas entre os anos de 2002 e 2014 em Programas de Pós-Graduação em Química, Educação e Educação Científica e Tecnológica, Roloff (2016) encontrou apenas 14 trabalhos que abordavam diretamente o ensino de QV. Nos trabalhos analisados, a autora encontra a preocupação de que a QV reverbera no ensino de Química, especialmente na formação de professores; ela também conclui que a PG é um espaço primordial para discutir de forma plural e complexa as questões relativas ao ensino de QV. A necessidade de formação de profissionais capacitados também é identificada como um limitante para a consolidação da QV no país por coordenadores de cursos de pós-graduação em Química no Brasil (ZUIN, 2013) e pela investigação das compreensões de pesquisadores químicos brasileiros sobre conceitos e postulados da sustentabilidade (MARQUES *et al.*, 2013, 2014).

Como visto na pesquisa de Roloff (2016), a inserção da QV nas discussões sobre Ensino de Química no Brasil ainda é escassa e, conforme Zuin (2013), é também necessário fomentar a formação de profissionais capacitados para trabalhar com a QV na formação de químicos. Podemos inferir, portanto, que a presença da QV na formação de professores e na educação básica seja também incipiente, o que demonstra a necessidade de ampliar as pesquisas sobre QV no âmbito do Ensino de Ciências. É possível questionar também se a contribuição do Ensino de Química se restringe apenas à formação de químicos especializados em QV ou que outras possibilidades formativas podem ser atendidas.

Além disso, mas em outro importante âmbito de análise, é necessário questionar quais são as efetivas contribuições da QV para a sociedade. Sjöstrom (2007) investiga os discursos presentes das falas dos químicos e encontra a noção de que a natureza está à disposição do homem para ser dominada e que os eventuais problemas são resolvidos com mais inovações tecnocientíficas da Química. O autor questiona a falta de discussão clara sobre os objetivos sociais da Química e aponta que, na ausência dessa reflexão, a formação do químico é voltada para atender aos interesses da transformação industrial.

Pitanga, Santos e Ferreira (2017) analisam artigos publicados na revista Química Nova nos anos de 1999 e 2015 sobre Química Verde, tecnologias limpas e sustentabilidade, encontrando que a QV é praticada para evitar sanções econômicas e melhorar a eficiência dos processos. Ainda que em amostra reduzida, esses elementos apontam para a racionalidade formal (KALBERG, 1980) — a justificação de uma ação com base em leis e normas, e não em valores (ambientais, por exemplo). A crítica à racionalidade formal é seu caráter heterônomo, de obediência às regras de outros, minando com a autonomia e tornando o

sujeito em um objeto ou instrumento na ação de quem estipula as normas e regras.

Howard-Greenville *et al.* (2017) entrevistam químicos defensores da QV e encontram diversas justificativas relacionadas ao campo de atuação. Para os químicos-pesquisadores, a QV possibilita inovação e novos conhecimentos. Para os químicos solucionadores de problemas e gestores, a QV representa oportunidades de reduzir custos e angariar financiamentos. Para educadores e comunicadores químicos, a QV apresenta um compromisso ético com o ambiente. Essas visões sobre a QV entrem em conflito, mostrando que o campo não é homogêneo e é, de fato, um campo de disputas.

Convém ainda ressaltar que recentemente, a QV tem se aproximado do conceito de sustentabilidade, despertando também a necessidade de pensar no papel e na importância que a sustentabilidade ocupa enquanto justificativa para uma ação Química Verde (MARQUES; MACHADO, 2014). Em alguns momentos, o termo “Química Verde” e “química sustentável” são usados de forma indiscriminada, como sinônimos (CGEE, 2010). Porém uma investigação com pesquisadores em Química Verde mostrou que as compreensões dos químicos investigados sobre o conceito de sustentabilidade não são homogêneas ou consensuais, tampouco o reconhecimento dos limites ao desenvolvimento sustentável é amplamente reconhecido (MARQUES *et al.*, 2003; MARQUES *et al.*, 2014). Adélio Machado (2004) compara brevemente os termos QV, “Química Sustentável” e “Química Verde e Sustentável”, alertando sobre o possível caráter propagandístico dos dois últimos termos ao incluírem o Sustentável para se aliar aos atuais discursos ambientalistas. O próprio conceito de Desenvolvimento Sustentável é polissêmico e criticado por diversos autores (LATOUCHE, 2012; LÉNA, 2012; MARQUES; GONÇALVES; MACHADO, 2013), sendo necessário também refletir sobre o que significa a sustentabilidade ou sustentável. Freitas e Marques (2017) investigam e discutem bem essa polissemia, diferenciando uma abordagem instrumental da sustentabilidade, em que ela é uma mudança auxiliar ou adjetiva a um processo técnico, de uma abordagem substantiva, que opera na própria crítica do processo, mudando a sua natureza ou mesmo suspendendo sua existência.

Não obstante, alguns autores (SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016) criticam uma possível aproximação da QV com uma racionalidade instrumental, por meio da redução da prevenção e da sustentabilidade à metodologias pautadas na ecoeficiência. Para Sjöstrom, Eilks e Zuin (2016) a Química Verde apresenta uma natureza mais instrumental, de como fazer, sendo que a justificativa do porquê empreender essa ação parece estar sendo vinculada irrefletidamente aos discursos de desenvolvimento sustentável. Como ressaltado pelos

autores, o desenvolvimento sustentável pode não representar uma mudança efetiva e verdadeiramente transformativa para a proteção ambiental, mas apenas uma revisão dos processos produtivos sem afetar sua natureza, promovendo apenas a melhoria tecnológica para promover a eficiência dos processos — ecoeficiência (mesma crítica tecida por Freitas e Marques (2017) à abordagem instrumental da sustentabilidade).

A prevenção é o conceito chave da QV, como vimos anteriormente pela sua história, vinculada ao PPA (ACS, 2015). De forma sintética, podemos resumir as inovações da QV e as estratégias dos seus 12 Princípios em três eixos de ação (LENARDÃO *et al.*, 2003, p. 124), sendo:

- i) o uso de fontes renováveis ou recicladas de matéria-prima;
- ii) aumento da eficiência de energia, ou a utilização de menos energia para produzir a mesma ou maior quantidade de produto;
- iii) evitar o uso de substâncias persistentes, bioacumulativas e tóxicas.

O enfoque dado à eficiência no segundo eixo de ação remete à centralidade desse conceito na racionalidade instrumental. O pensamento econômico, cerne da técnica moderna, é a obsessão pela eficiência, seja em relação à durabilidade, confiabilidade, sensibilidade, velocidade na resposta de sua função, menor tempo de produção e/ou redução dos custos (SKOLIMOWSKI, 1966) — sendo a eficiência um valor instrumental (ECHEVERRÍA, 2003). Mumford já anunciava que um dos desdobramentos da tecnologia moderna seria a preocupação com a eficiência ambiental (MUMFORD; WINNER, 2010). A eficiência é um valor fundamental de um empreendimento prático, mas não pode ser o único. E aqui repousa a dúvida sobre a extensão e impacto da eficiência na QV.

O terceiro enfoque é no não uso de substâncias nocivas, uma clara aplicação do princípio da prevenção, de agir com base em relações causais claras e razoavelmente estabelecidas. Ewald (1997) destaca a prevenção como decorrência de um paradigma social centrado na certeza científica e tecnológica, pautado no poder da medição e predição de riscos, o que corrobora a ideia de que, em diversos aspectos, o que Ewald chama de *paradigma da prevenção* se assemelha à *racionalidade técnica*. Drews (2011, p. 211) defende a ideia de que a “preocupação central da QV é superar a mera eficiência ‘técnica’ e econômica dos processos químicos”. Seu argumento, no entanto, é mais normativo do que descritivo. Ela aponta como a QV *deveria ser*, mas, como *descreve* Machado (2008), as pesquisas são, na maioria, pseudoverdes, o que recai, talvez, em um *marketing* ambientalista apenas, e daí a importância das métricas para aferir a eficácia e eficiência desses processos.

Porém, a discussão sobre a presença da racionalidade instrumental na Química Verde

é um problema de pesquisa que carece de aprofundamento e de investigação crítica, sistemática e abrangente, essencial para conduzir uma reflexão apurada sobre suas influências no Ensino de Química (Verde), numa perspectiva do movimento Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) com enfoque humanizadora (AULER; DELIZOICOV, 2001; DELIZOICOV; AULER, 2011; SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014).

Nesse sentido, Sjöstrom (2007; 2013) critica o discurso sobre o papel social da Química apoiado na visão moderna (quantitativa, experimental, instrumental, sistemática, objetificante, reducionista e futurista) e propõe outra visão para embasar a Educação Química Humanizadora: um discurso complementar e reflexivo, que rompe com a racionalidade instrumental da Química. É um discurso ausente na fala dos químicos que vai além de descobrir os segredos da natureza ou de solucionar os problemas da indústria. Seu objetivo seria "apresentar soluções radicais para problemas (ambientais e sociais) já existentes ou/e para problemas novos além da agenda (industrial) estabelecida" (SJÖSTROM, 2007, p. 90, tradução nossa). Trata-se de um discurso que contribui para entender as coisas que são importantes em uma democracia, identificar as coisas que são insatisfatórias e achar soluções para problemas globais. Nesse discurso reflexivo, no sentido de estabelecer tanto uma relação quanto uma posição crítica, de identificar-se e contrapor-se à sociedade e à cultura (SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016), a Química seria abordada *como* Cultura e *dentro* da Cultura.

Com base no exposto acima, podemos elencar algumas considerações sobre as quais erigimos nossa pesquisa. Consideramos que:

1. A Química não tem objetivos sociais explícitos, sendo essa uma discussão que está fora do escopo de investigação mesmo dos filósofos (SJÖSTRÖM, 2007);
2. A sustentabilidade e a eficiência, como possíveis objetivos para as práticas em QV podem ser reduzidas a meros instrumentos, sem uma reflexão crítica e socialmente comprometida (SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016; FREITAS; MARQUES, 2017);
3. A QV tem possibilidades de induzir a evolução das práticas tradicionais da Química, considerando um comportamento reflexivo e crítico voltado ao meio ambiente.

Para considerar as contribuições da QV para uma relação crítica e reflexiva com o meio ambiente, focalizamos a discussão sobre a sua racionalidade (KALBERG, 1980; AGAZZI, 1996a; MONASTERÍN, 2008).

1.1 RACIONALIDADE: A RAZÃO NA AÇÃO

À capacidade humana de ser *intencional* (de fazer presente ante si, de dirigir-se a algo mesmo quando esse algo não está presente, recorrendo a sua imagem, ao abstrato) dá-se o nome de razão. De acordo com Monasterín (2008), a Razão é uma faculdade humana e, portanto, é uma capacidade, um direito ou aptidão dos seres humanos. Entretanto, seu exercício é uma possibilidade, não uma obrigação do homem. Logo, o homem não é o animal racional, mas o único animal ao qual se pode atribuir a razão, mas cabe ao homem agir racionalmente ou irracionalmente.

Agazzi (1996b) entende que a Razão possui as seguintes características:

- Capacidade de conhecer o universal e o abstrato;
- Necessidade de conhecer o porquê das coisas;
- Exigência que conduz o homem a argumentar dedutivamente, estabelecendo sequência de enunciados lógicos;
- Exigência de logos (de requerimento de compreensão e justificação dos fenômenos). É o caráter mais distintivo da razão, aquele que busca no que se vê (o imediato) uma causa abstrata que não se apresenta diretamente (o mediado).

Note-se que a racionalidade é um método ou forma de proceder, não uma conduta inexorável. A ação será racional se seguir as necessidades racionais de: abstração e generalização; conhecer a causa dos fenômenos; argumentar dedutivamente; e justificar logicamente os fenômenos.

Assim, podemos dizer que uma crença ou opinião é racional quando acreditamos em algo e justificamos a nossa crença, atribuindo-lhe uma causa, uma descrição geral da relação entre causa e consequência, passando por enunciados lógico-dedutivos. Mas se apenas cremos em algo e não lhe atribuímos causa, não deduzimos logicamente essa crença de uma causa, ela é uma crença irracional. Convém dizer que uma justificação racional pode recorrer a critérios analíticos (semânticos, conceituais), pessoais (indutivos, da experiência individual), de autoridade (científica, especialistas) e testemunhal (com base em testemunhas, mídias), em grau decrescente de importância. No entanto, uma crença justificada nem sempre é verdadeira (condizente com a realidade). Da crença que é justificada e verdadeira, chamamos de saber ou conhecimento.

A racionalidade, razão em exercício, é dividida por diversos autores (AGAZZI, 1996; FERRÉ, 1995a; 1995b; MONASTERÍN, 2008) em duas grandes categorias: racionalidade teórica e racionalidade prática. Racionalidade teórica tem a ver com crenças e

opiniões e seu objetivo é a justificação dessas opiniões e crenças. Racionalidade prática tem a ver com decisões, ações e condutas, tem a ver com saber os fins e os desejos ao se empreender uma ação, em achar a sua razão — o elemento que justifica a ação. Mas a racionalidade prática tem a ver também com o conhecer os meios necessários para desempenhar a ação, é o emprego da razão em encontrar os meios e a justificação para *o que deve ser*, no âmbito das possibilidades de transformação da realidade (MONASTERÍN, 2008).

No campo do conhecimento puro, a racionalidade teórica se caracteriza pela seguinte intenção (ação de dar causa): "explícita e exclusiva de conhecer *o que é*, de saber 'como são as coisas' e 'por que são assim'" (AGAZZI, 1996, p. 205, tradução nossa). Portanto, a racionalidade teórica toma o empírico como ponto de partida, compreendendo-o (processo hermenêutico) e procurando sua causa (a explicação). Esse é o movimento da *episteme*, que não somente aponta as crenças sobre o que o objeto é, mas atribui as causas do por que é dessa forma. Ao apoiar-se no pensamento hipotético-dedutivo, a *episteme* tem a pretensão de encontrar o "saber perfeito" e recorre à ideia de que a causa do fato (o que é) é a mesma coisa do que pode ser deduzido logicamente (o que deveria ser). Há uma atribuição de organização lógica ao mundo — o mundo é cognoscível e logicamente organizado.

Se a racionalidade teórica é o que permeia o conhecimento "perfeito", aquele cuja intenção é compreender e explicar, há uma racionalidade prática que perpassa o conhecimento voltado à ação. A racionalidade prática é "o ramo de inteligência mais biologicamente profundo e evolucionariamente mais antigo" (FERRÉ, 1995a, p. 35, tradução nossa); "é a capacidade de levar em conta o fisicamente ausente a fim de servir o apetite das coisas vivas em viver e melhorar as suas condições de vida" (FERRÉ, 1995a, p. 36, tradução nossa). Aqui cabe ressaltar que a racionalidade prática fundamenta uma ação que ainda não foi empreendida, mas que é pensada, "um estado de coisas puramente *possíveis*" (AGAZZI, 1996, p. 206, tradução nossa). O problema é escolher entre as possibilidades das coisas que *podem ser*. A racionalidade teórica tem a intenção de explicar e compreender o *existente*, a racionalidade prática em escolher e desenvolver uma *possibilidade*.

De forma mais sintética, a racionalidade prática lida com o que *deveria ser* e, portanto, engloba o âmbito de *práttein* (práxis, ação) e *poiéin* (trabalho, produção). A prática tem a ver com a ação eminentemente humana (práxis), aquela cujo valor e finalidade está em si mesma, com seus âmbitos moral (ética) e político (racionalidade política), mas também com a produção e desempenho (poiésis) (tecnologia/racionalidade técnica), cuja finalidade está fora da ação, em um produto a ser criado.

Na Figura 1, vê-se a relação entre as formas de expressão da racionalidade e sua relação com a razão.

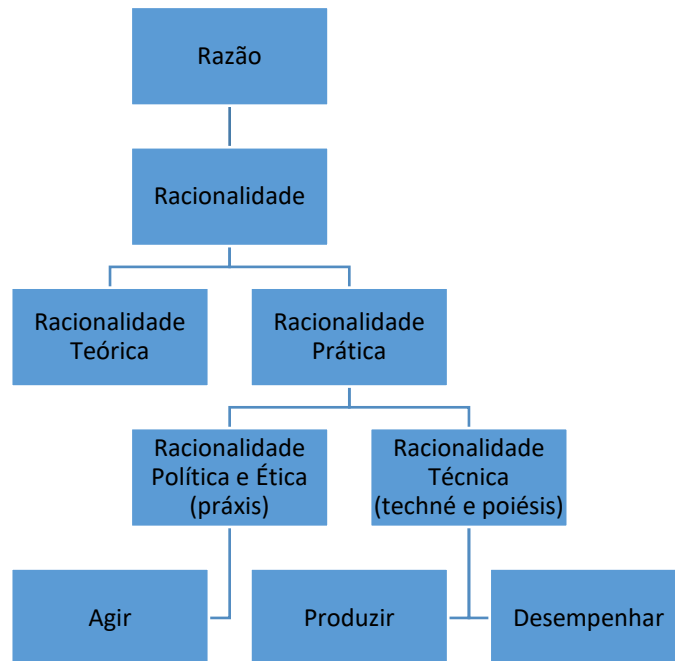


Figura 1: Organograma das Racionalidades. Fonte: Adaptado de Agazzi (1996).

A racionalidade instrumental é um caso específico da racionalidade prática, em que o apreço pelas regras procedimentais relega os valores humanos a um segundo plano, criando uma obsessão pelo controle, inovação tecnológica, quantificação e reificação dos sujeitos (KALBERG, 1980; LACEY, 2008a) ou, segundo Agazzi (AGAZZI, 1996b, p. 207) quando se usam conhecimentos exclusivamente provenientes da racionalidade teórica (sem reflexão de valores) para alcançar objetivos na prática política e ética humana.

Contrariamente à racionalidade instrumental, a racionalidade crítica é aquela que faz a religação entre teoria e prática e direciona as capacidades humanas para a manutenção da vida e emancipação dos sujeitos (ADORNO; HORKHEIMER, 1985; NOBRE, 2004). Trata-se de usar a racionalidade teórica para por em constante questionamento a realidade, não considerando os acontecimentos naturais, sociais e culturais como prontos, dados, acabados e imutáveis. A partir disso, a prática assume o papel de transformar essa realidade em busca de possibilidade de humanização (SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014) e do ser mais (FREIRE, 2013).

Como base no exposto acima, nossa hipótese é de que a QV apresenta elementos da racionalidade instrumental em seus discursos e prática, mas também incorpora avanços ao

direcionar suas pesquisas para a prevenção de impactos ambientais. O ensino de Química e a Educação Científica e Tecnológica em geral podem contribuir para potencializar as ações ambientalmente benignas da QV e a promover a formação para a cidadania.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

- Quais possibilidades os tipos de racionalidade presentes em publicações de químicos verdes apresentam à evolução da Química e de seu ensino?

1.3 QUESTÕES COMPLEMENTARES

Com relação ao *corpus* de análise (o conjunto de textos mais representativo) da Química Verde:

1. Quais os tipos de racionalidade que se apresenta em publicações de químicos verdes?
2. Como esses tipos de racionalidade se relacionam com a racionalidade instrumental e a racionalidade crítica?
3. Que dificuldades esses tipos de racionalidade apresentam para a QV?
4. Que implicações e demandas essas diversas formas de racionalidade trazem ao ensino da Química (Verde)?

1.4 OBJETIVO GERAL

- Discutir os tipos de racionalidade presentes em produções de químicos verdes, tendo em vista seu papel na produção e no enfrentamento dos problemas ambientais e sua importância no ensino de Química.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Discutir os tipos de racionalidade que se apresenta em publicações de químicos verdes;
- Analisar como esses tipos de racionalidade se relacionam com a racionalidade instrumental e a racionalidade crítica;
- Apontar quais dificuldades esses tipos de racionalidade apresentam para a QV;

- Discutir que implicações e demandas essas diversas formas de racionalidade trazem ao ensino da Química (Verde).

No capítulo 2, **Percurso Metodológico da Pesquisa**, apresentamos um conjunto de referências mais representativas da pesquisa em QV, servindo como objeto de pesquisa, nosso *corpus* analítico, para investigar a racionalidade dos químicos verdes. Os trabalhos foram selecionados a partir do emprego de uma técnica bibliométrica, aplicada e descrita em trabalhos anteriores (MARCELINO; MARQUES, 2019; MARCELINO; PINTO; MARQUES, 2020).

No capítulo 3, **Racionalidade Prática na Química Verde**, procuramos apontar as vinculações da Química (Verde) com a racionalidade prática, problematizando sua natureza científica com base em pesquisas da Filosofia da Química e da Filosofia da Tecnologia. Primeiramente, analisamos a Química em geral, para então fazer inferências mais específicas sobre a Química Verde, usando como objeto de pesquisa os artigos selecionados no capítulo anterior – o *corpus* analítico. Fazemos também uma descrição das estratégias técnicas que aparecem nas pesquisas em QV e apontamos alguns limitantes com base na literatura do campo. Fechamos esse capítulo considerando as dificuldades em fazer uma separação entre racionalidade teórica e racionalidade prática e, posteriormente, entre Ciência e Tecnologia, visto que na atualidade essas duas instâncias estão intimamente emaranhadas.

No capítulo 4, **Valores na Química Verde: considerações da ética**, esmiuçamos a discussão da racionalidade prática da QV, procurando na produção dos químicos verdes elementos que apontem para os meios e as justificações de sua prática para apontar os seus valores. Fazemos uma breve discussão dos conceitos de valor e apresentamos uma possível relação dos valores. Investigamos os valores da QV com base em no *corpus* de análise, apresentando os valores práticos e epistêmicos. Finalizamos o capítulo fazendo uma relação entre os valores presentes nos discursos e práticas dos químicos verdes e apontando tensões de valor.

Enquanto o capítulo 4 focaliza a discussão dos valores a partir da ética, o capítulo 5, **Valores na Química Verde: considerações da política e da racionalidade instrumental**, se ocupa em discutir o âmbito das relações de poder subjacentes à QV. Investigamos o *corpus* analítico definido no capítulo 1 e também outras produções acadêmicas dos químicos verdes com relação aos sujeitos que participam da QV, suas relações com decisões governamentais e métricas de avaliação de impactos e benefícios sociais. O capítulo é fechado com a discussão da racionalidade instrumental na QV e possibilidades para uma racionalidade crítica.

Enfim, no capítulo 6, **Química Verde e Ensino de Química: relações para superação da racionalidade instrumental**, sintetizamos os argumentos construídos anteriormente em uma reflexão sobre as influências da QV no Ensino de Química e as contribuições do Ensino de Química para a evolução da racionalidade da QV. Aqui tratamos de fazer inferências para o ensino com base nas características da QV apontadas nos capítulos anteriores. Uma vez que a QV se aproxima da racionalidade prática (a racionalidade característica dos engenheiros e tecnólogos), defende-se um ensino mais voltado para a resolução de problemas e *design* de substâncias. Considerando que a prática insta para a reflexão moral, discutimos a importância do Pensamento Sistêmico Crítico (PSC) e da Heurística Sistêmica Crítica (HST) para promover o pensamento crítico e reflexivo no ensino de Química, questionando quais são as fontes de motivação, fontes de poder, fontes de conhecimento e fontes de legitimação do *design* de uma inovação científico-tecnológica. Consideramos que o ensino de Química (Verde) deveria abordar mais o papel social de seu conhecimento, por meio, por exemplo, do movimento Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e a educação para a formação cultural (*Bildung education*).

Cada capítulo se relaciona a uma ou mais questões complementares de pesquisa apresentadas anteriormente, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Comparação entre capítulos, questões complementares e objetivos de pesquisa.

Capítulo	Questão Complementar
2 PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA	
3 RACIONALIDADE PRÁTICA NA QUÍMICA VERDE: estratégias e limites técnicos Erro! Resultado não válido para índice.	Q1. Quais os tipos de racionalidade que se apresentam em publicações de químicos verdes?
4 VALORES NA QUÍMICA VERDE: considerações da ética	Q1. Quais os tipos de racionalidade que se apresentam em publicações de químicos verdes?
5 VALORES NA QUÍMICA VERDE: considerações da política e da racionalidade instrumental	Q1. Quais os tipos de racionalidade que se apresentam em publicações de químicos verdes? Q2. Como esses tipos de racionalidade se relacionam com a racionalidade instrumental e a racionalidade crítica? Q3. Que dificuldades esses tipos de racionalidade apresentam para a QV?

**6 QUÍMICA VERDE E ENSINO DE QUÍMICA:
relações para superação da racionalidade
instrumental**

Q4. Que implicações e demandas essas
diversas formas de racionalidade trazem ao
ensino da Química (Verde)?

Fonte: os autores.

2 PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA

Esta pesquisa tem natureza qualitativa, exploratória e bibliográfica. De acordo com Oliveira (2007), a pesquisa bibliográfica pode ser entendida como um caso específico da pesquisa documental, aquela que se volta para as informações consolidadas em textos, imagens, vídeos, etc., sendo que o objeto de pesquisa possui uma natureza não-reativa: as informações se mantêm constante no mesmo documento (KRIPKA; SCHELLER; BONOTTO, 2015). Os documentos também representam uma maneira de interagir com sujeitos que estão distantes espacialmente ou temporalmente, por meio do registro de suas ações, pensamentos, opiniões, etc. No caso desta pesquisa, usamos como documentos, o objeto de análise, as produções científicas na forma de artigos (de revistas e eventos), *reviews* e capítulos de livros cujo tema seja voltado para a divulgação de pesquisa em QV e/ou sobre a QV.

O critério para seleção desses documentos é a sua adoção pela comunidade científica de químicos verdes. Avaliamos essa adoção por meio das redes de cocitação — a representação gráfica da interação da literatura de um campo por meio da quantidade de citações que duas obras recebem simultaneamente dentro de um conjunto de textos (GRÁCIO, 2016), conforme discutido em trabalhos anteriores (MARCELINO; MARQUES, 2019; MARCELINO; PINTO; MARQUES, 2020).

A partir desse *corpus* analítico (o conjunto de documentos mais representativos da prática em QV) analisamos as formas de racionalidade dos químicos verdes. Como instrumento de análise, usa-se a Análise Textual Discursiva (ATD) (MORAES, 2003; MORAES; GALIAZZI, 2007), uma estrutura teórico-metodológica, baseada na descrição e interpretação dos sentidos de um texto, para a produção de um significado geral do fenômeno. Ela segue as etapas de unitarização, categorização e síntese. Na unitarização, o texto é lido e desconstruído em unidades semânticas, que são reescritas na forma de um termo que represente o sentido daquela unidade. A tabela com as unidades de sentido pode ser consultada em Apêndice A – Tabela de Análise do corpus da tese. Na categorização, essas unidades de sentido são organizadas em suas diferenças, semelhanças e características próprias, criando uma estrutura de significação. A cada categoria, pode-se atribuir um texto breve e descritivo, abordando os sentidos que são construídos sobre o fenômeno em cada uma delas. Na última etapa, a síntese, as descrições das categorias são interpretadas, na forma de uma reflexão globalizante do fenômeno, gerando novos entendimentos sobre o objeto que transcendem às primeiras impressões. Esse metatexto sintético será desenvolvido nos

capítulos 2, 3 e 4, mas terá seu fechamento no capítulo 5, com as inferências sobre o papel das racionalidades da QV no Ensino de Química.

Como ressaltam Moraes e Galiuzzi (2007), a análise e síntese de um fenômeno nunca é um processo finalizado puramente objetivo, sendo que cada analisador leva pra análise sua bagagem teórica e vicária para estabelecer interpretações de um fenômeno. Mas também não é meramente subjetiva, pois as análises não se dão somente pelas ideias do investigador, mas dialogam com toda a comunidade de pesquisa que ele teve acesso em sua vida pregressa, sendo intersubjetiva. É por isso que os autores comparam a ATD a uma tempestade de luz: àquele momento no meio da tempestade escura em que um relâmpago ilumina o horizonte e permite vislumbrar as montanhas, planícies e árvores que se escondiam atrás da chuva. A cada relâmpago, a cada sujeito, um detalhe novo surge da mesma paisagem e enriquecem o entendimento da realidade (MORAES, 2003).

Nas seções a seguir, discutem-se os critérios que conduziram à seleção do *corpus* analítico e em seguida faz-se uma exploração das categorias a priori que guiam o processo de ATD.

2.1 BIBLIOMETRIA: A CIÊNCIA DA PRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO DO CONHECIMENTO

A bibliometria surge no início do século XX com o objetivo de elaborar leis empíricas que descrevessem a produção e disseminação de literatura científica (ARAÚJO, 2006). Ela se inicia como uma técnica quantitativa e estatística de medição da produção acadêmica em um domínio de conhecimento, mas hoje abrange um amplo campo de pesquisa.

Price (1965) analisou os padrões de citações através dos anos e o ritmo da produção de conhecimento e propôs que há uma distribuição geométrica entre a probabilidade de um artigo receber uma citação e a sua idade: quanto mais recente, maior a chance de ser citado — o fator de proximidade (*immediacy factor*). Essa tendência a citar os artigos mais recentes (fator de proximidade)² e um grupo seletivo de trabalhos é o que desencadeia a obsolescência da literatura (BORNMANN; MUTZ, 2015; DAVIS; COCHRAN, 2015), o fato de grande parte dos trabalhos ser pouco citada ou mesmo que 10% de toda a produção acadêmica deixa de ser citada a cada ano (PRICE, 1965; BRAGA, 1973).

² Conforme apontam Davis e Cochran (2015), a Química e as engenharias apresentam uma tendência a citar seus artigos cada vez mais recentes.

Mas a literatura também cresce em ritmo geométrico e estes artigos novos estão diretamente ligados a uma pequena fração da literatura anterior, relativamente nova, o que faz com que apenas um seleto grupo de autores e trabalhos receba grande parte das citações de um domínio de conhecimento. A esse grupo de trabalhos recentes e vinculados a uma literatura restrita e altamente citada se dá o nome de frente de pesquisa. Devido a sua alta circulação na comunidade científica de interesse, ela é também chamada por Braga (1973) de ciência da erudição, o conjunto de especialistas mais relevantes de um campo.

Os primeiros estudos do comportamento das citações na literatura científicas eram univariáveis (baseados na contagem direta das citações), como o fator de impacto, as frentes de pesquisa, a obsolescência da literatura. Atualmente as análises de citação são relacionais, preocupando-se com a interação entre os documentos e o fluxo de informação. Ela considera que o compartilhamento de referências e citações é representativo de um domínio científico e mostra um compartilhamento de bases teóricas e metodológicas. Um exemplo é a análise de cocitação.

A análise de cocitação surge em 1973 (SMALL, 1973) e procura analisar, identificar e descrever a estrutura e conectividade de uma área de conhecimento (GRÁCIO, 2016). Ela se baseia na proximidade de dois elementos (artigos, revisões, livros, atas de evento, etc.) estipulada por quantas vezes são colocados juntos pela comunidade científica, ou seja, citados simultaneamente. É uma forma de análise cujo objeto conta com múltiplas avaliações; é a comunidade científica inteira que promove a força da cocitação.

A análise de cocitação tem o diferencial de ser diacrônica: ter seu comportamento alterado no decorrer do tempo. O número de citações feitas simultaneamente a dois artigos varia conforme o tempo, possibilitando mostrar a evolução de uma comunidade científica. Na Figura 2, vemos um exemplo de análise de duas publicações: Referência A e a Referência B. Esses dois textos ocorrem simultaneamente nos Artigo 1 e Artigo 3. Essa coocorrência pode mudar conforme o tempo e a Referência A passar a coocorrer com uma Referência X, ser citada por outros artigos ou simplesmente deixar de ser citada. Na prática, todas as referências constantes no retângulo verde (as referências de um campo de conhecimentos) podem ter sua cocitação analisada em um determinado período temporal em através dos tempos.

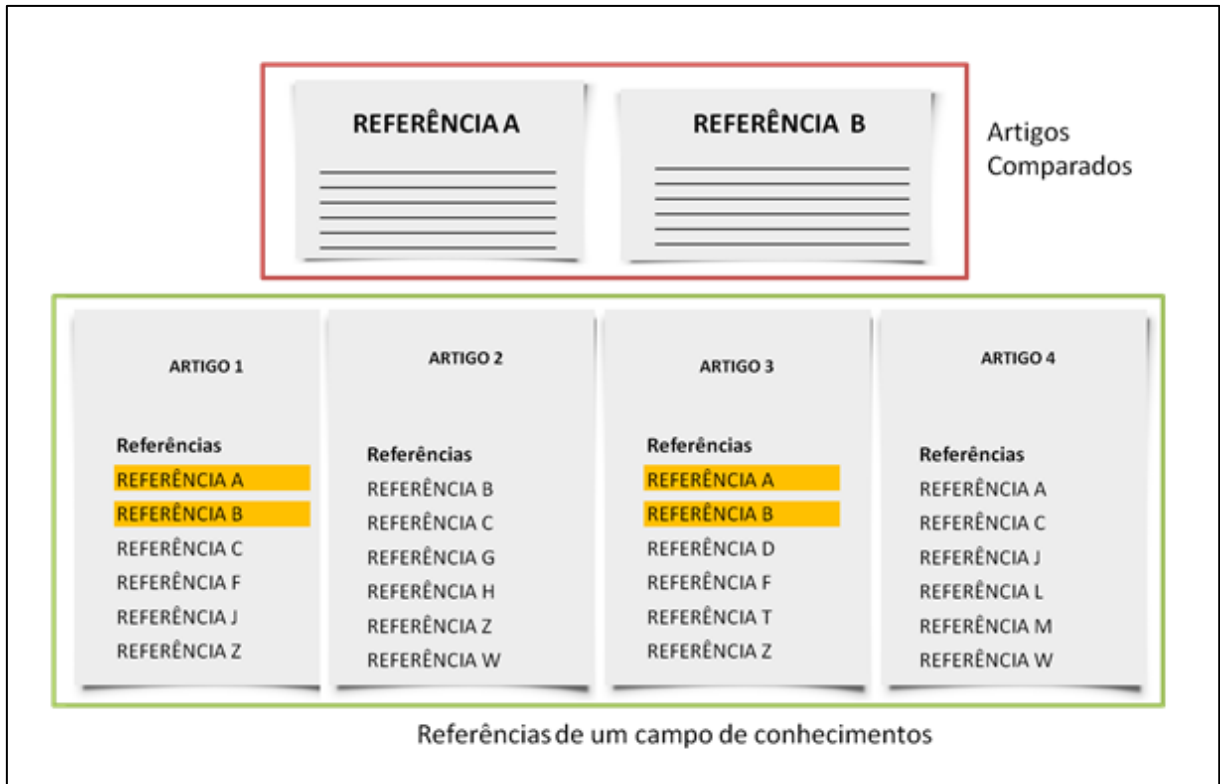


Figura 2: Análise de cocitação. As referências A e B ocorrem conjuntamente em dois artigos (1 e 3).
Fonte: os autores.

Recentemente, uma forma de análise e representação de dados sobre interações de sujeitos que vem ganhando destaque é a análise de redes, advindas da teoria de redes. Na Figura 3, referências hipotéticas são representadas como um vértice, ou um nó, como na terminologia das redes. Os nós são ligados por linhas, as arestas, que representam os artigos que fizeram a cocitação. Cada linha tem um valor atribuído, dependendo da força de ligação, ou seja, a quantidade de vezes que as duas referências são cocitadas. A quantidade de linhas e sua força de ligação (ou peso) é o que determina a separação das comunidades (*cluster*) dentro de uma rede. Por exemplo, as referências A e B são cocitadas 2 vezes; B e G apenas 1; A e I não apresentam ligações diretas entre eles, pois não são cocitados. Outros fatores podem ser incluídos e representados na rede, como o número de citações de uma referência que pode ser representado no tamanho do nó.

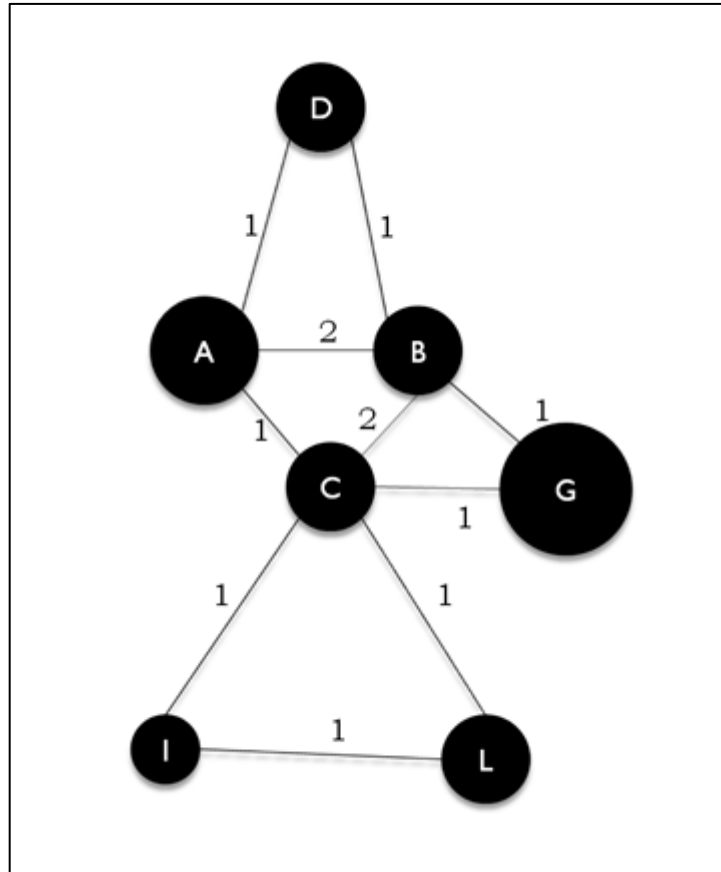


Figura 3: Rede de interação hipotética **Erro! Fonte de referência não encontrada..**
Fonte: os autores.

Uma das ferramentas que junta a teoria de redes com as análises bibliométricas é o CiteSpace, um aplicativo em Java para detectar, analisar e visualizar tendências emergentes e mudanças críticas na literatura (CHEN; IBEKWE-SANJUAN; HOU, 2010). Seu objetivo é facilitar a análise de tendências emergentes em um domínio de conhecimento, possibilitando o reconhecimento e identificação de artigos relevantes. Ele representa os dados na forma de diversas redes construídas em intervalos definidos de tempo e sobrepostas em uma rede única, mostrando a evolução temporal das interações estabelecidas entre as unidades de análise.

O CiteSpace define uma especialidade pela relação entre uma base intelectual formada por uma rede de cocitação e a frente de pesquisa formada por artigos que citam essa base, sendo a especialidade mutável no tempo (CHEN, 2004, 2006). Como explicado anteriormente, uma frente de pesquisa se refere ao corpo de artigos recentes, com grande número de citações e que interagem com uma literatura, também recente e muito citada (PRICE, 1965; BRAGA, 1973). Pelo fato de adquirirem grande número de citações, as frentes de pesquisa representam os assuntos que mais mobilizam a comunidade científica. A literatura diretamente citada pelas frentes de pesquisas configura a sua *base intelectual*, que também

costuma incluir trabalhos muito citados e publicados pouco antes da frente de pesquisa — o efeito de proximidade abordado anteriormente (BRAGA, 1973).

A partir de um conjunto de dados bibliográficos (informações sobre autor, ano de publicação, fonte em que foi publicado, relação das referências citadas) gerados sobre produções em determinado campo ou domínio de pesquisa, o CiteSpace extrai todas as referências citadas nesses textos e estabelece uma matriz de cocitação e, a partir dela, uma rede de citação. Essa rede é o que compõe a base intelectual, exemplificada na Figura 4 pelo paralelepípedo azul. Essa rede pode ser organizada em agrupamentos (*clusters*) de acordo com sua força de cocitação, isto é, a quantidade de vezes em que são citadas em conjunto. O *cluster A*, círculo azul, e o *cluster B*, laranja, representam esses agrupamentos dentro de uma rede, com linhas contínuas representando as cocitações fortes que unem os grupos e uma linha descontínua simbolizando a cocitação que os aproxima (Figura 4).

Definidos os *clusters*, a base intelectual, o programa reúne os artigos responsáveis por fazer a cocitação dentro desses agrupamentos, ou seja, a frente de pesquisa. No exemplo abaixo, o Artigo 1 é responsável por fazer as cocitações dentro do *cluster A* e o Artigo 3 é o que faz as cocitações no *cluster B*. O Artigo 2 é o que aproxima os dois *clusters*. Ou seja, o Artigo 1 tem em suas referências os trabalhos que constituem o *cluster A*. Geralmente, os agrupamentos possuem mais de um artigo em sua frente de pesquisa e poucos textos fazendo a cocitação entre diferentes grupos. Poderíamos dizer, portanto, que a relação entre o Artigo 1 e o *cluster A* é responsável por representar uma especialidade; a relação entre o Artigo 3 e o *cluster B* forma outra especialidade distinta. De forma sintética, no CiteSpace a frente de pesquisa é constituída por textos citantes e a base intelectual por textos citados (referências).

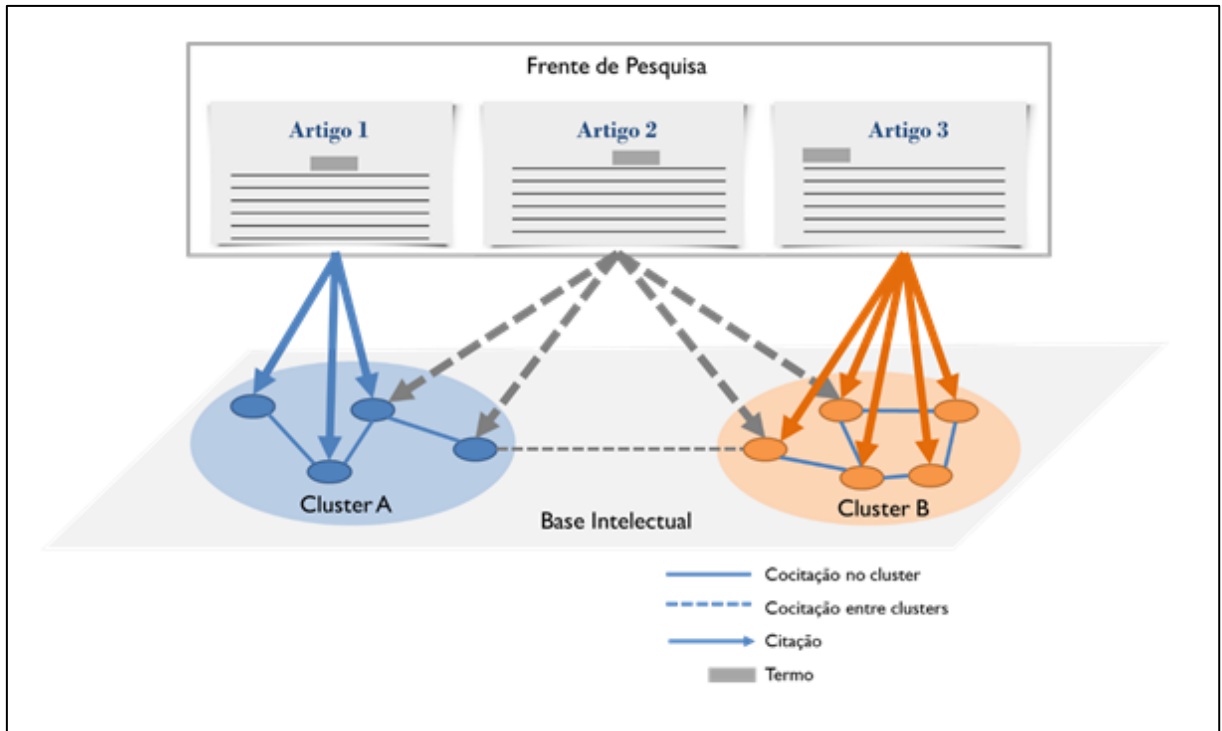


Figura 4: Relação entre frente de pesquisa e base intelectual.
Fonte: Adaptado de Chen (2006).

A análise da evolução temporal das especialidades é feita pela criação de redes de cocitação em intervalos de tempo definidos, que são então comparados e fundidos em uma rede única e heterogênea. Essa rede é composta por especialidades (*clusters*) estabelecidas pela força de cocitação da base intelectual (CHEN, 2004, 2006) e avaliada pela medida de silhueta (*silhouette*), a métrica de avaliação da qualidade de configuração de um *cluster*, indicando o quanto um agrupamento está coeso e é relevante. A silhueta varia de 0 a 1, sendo que quanto mais perto de 1 mais coeso é o *cluster*, mas valores acima de 0,7 são aceitáveis. O distanciamento entre os *clusters* representa a definição das especialidades em um domínio do conhecimento e é medida pela modularidade Q (*modularity Q*), de 0 a 1, sendo que valores acima de 0,7 são aceitáveis e o 1 o ideal (CHEN; IBEKWE-SANJUAN; HOU, 2010).

Convém ressaltar que o CiteSpace funciona analogamente a um mapa. Ele é geral o bastante para fornecer uma visão panorâmica de um domínio de pesquisa, mostrando as especialidades que mais se destacam em um determinado período, os artigos mais citados, que fazem mais relações. Da mesma forma, um mapa mostra os contornos gerais de um espaço, seu relevo, sua topografia. Entretanto, o mapa é condicionado pela escala: ele não é uma representação exata da realidade, mas uma simplificação. Quanto mais detalhado e correspondente com o ambiente real, menor sua escala, maior o tamanho do mapa e maior o

trabalho cognitivo para ter uma visão sinóptica do ambiente. De forma que o mapa tem um equilíbrio entre a visão geral e o detalhamento do terreno. Da mesma forma, o CiteSpace se baseia na análise das “montanhas” de um domínio de conhecimento: nos grupos de trabalhos mais recentes e mais citados de uma determinada época. Pode-se até tentar aumentar a definição e incluir grupos cujos trabalhos não sejam tão impactantes ou compartilhados pela comunidade científica, mas isso tornaria o trabalho de análise mais complexo e se perderia a visão geral da produção de conhecimento.

Nesse sentido, o CiteSpace pode ser uma ferramenta interessante para analisar a dinâmica de produção de conhecimento em QV. Ele possibilita vislumbrar um panorama da pesquisa em QV, apontando os trabalhos e grupos de textos mais relevantes em determinados períodos temporais. Possibilita vislumbrar como a comunidade científica tem disseminado essas informações, por meio de citações, e como os artigos funcionam dentro dessa rede de pesquisa. Entretanto, o limite do CiteSpace está justamente em mostrar apenas os destaques da QV (o mais recente, o mais citado). Porém, essa é uma questão inerente aos processos de análise que tem de ser abordada pelo estudo cuidadoso das métricas do CiteSpace, que tem uma função importante no seu uso (analogamente, pelo cuidado com a escala do mapa).

Apresentamos abaixo o percurso metodológico de uma pesquisa bibliométrica das produções em QV, usando o CiteSpace para fazer uma análise de cocitação e possibilitar o estudo da dinâmica da produção de conhecimentos em QV. A pesquisa completa está disponível em trabalhos anteriores (MARCELINO; PINTO; MARQUES, submitted; MARCELINO; MARQUES, 2019)..

2.1.1 Percurso Metodológico

Na Figura 5 apresentamos um resumo dos critérios para seleção dos dados de entrada no CiteSpace. Todos os dados foram buscados no *Web of Science*, no período de 1990 a 2017. Foram buscados registros de documentos do tipo artigos (*articles*), *reviews*, textos de *proceedings* e capítulos de livro. A partir desse ponto, a estratégia de busca se divide em duas: buscar pelos autodenominados químicos verdes, por meio do termo “*green chemistry*” em títulos, palavras-chave e resumos; buscar os registros de revistas especializadas, como a *Green Chemistry Journal* (GCJ) e *Green Chemistry Letters and Reviews* (GCLR), por serem as maiores fontes de publicação do campo com o título e escopo diretamente voltado ao assunto. Isso forma um conjunto final de 14.142 registros diferentes (excluindo duplicações entre registros dos autodenominados e das revistas especializadas).

O próximo passo foi definir os outros parâmetros para a análise: os recortes temporais e o critério de seleção de nó. O recorte temporal (*time slice*) é o intervalo de tempo que é considerado como unidade de análise. O critério de seleção de nó (Top N.) estipula o limiar (quantidade mínima) de textos que são considerados em cada recorte temporal. Definir o tamanho do recorte temporal ou o número de nós mínimos é um processo que exige tentativas na análise dos dados.

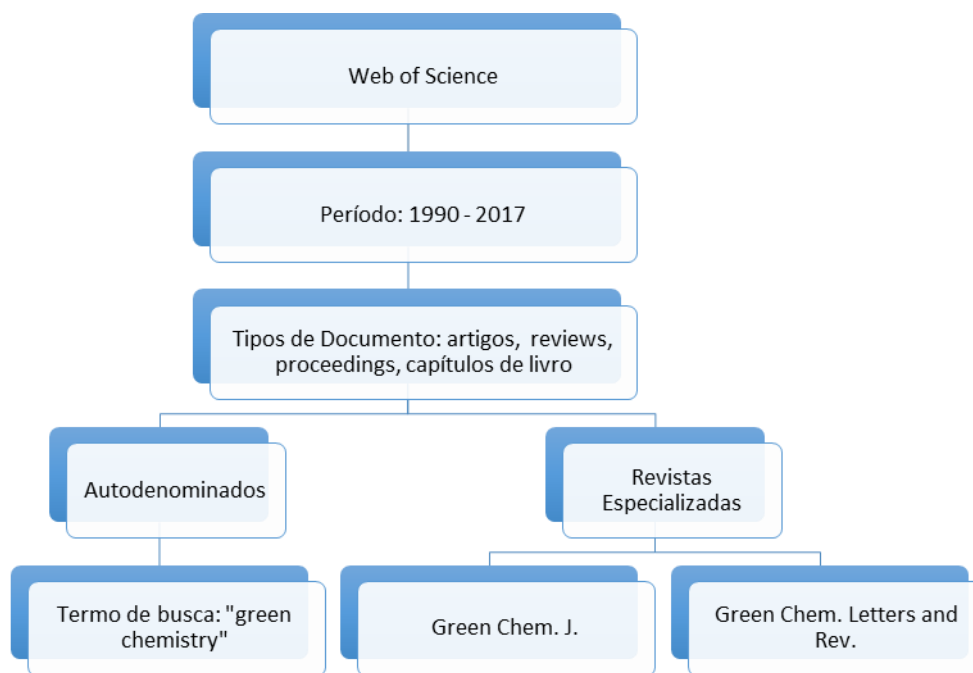


Figura 5: Resumo dos critérios para escolha dos dados de entrada para o CiteSpace.
Fonte: os autores.

Na Figura 6 apresentamos uma comparação entre a Modularidade Q (MQ) e a Silhueta Média (MS) em função do recorte temporal e dos critérios de seleção de nó (MARCELINO; PINTO; MARQUES, submitted; MARCELINO; MARQUES, 2019). Usamos como dados de entrada no CiteSpace os dados selecionados anteriormente (14.142 registros), usando Look Back Year (LBY)³ de -1, para então explorar a variação dos valores. Realizamos análises com recorte temporal variando de 1 a 5 anos. Recortes maiores que 5 anos prejudicariam a definição temporal da análise, consideramos que estamos trabalhando com 27 anos no total.

³ É o parâmetro que controla a idade dos trabalhos a serem incluídos na base intelectual. Um LBY de -1 indica que nenhum limite de idade é imposto.

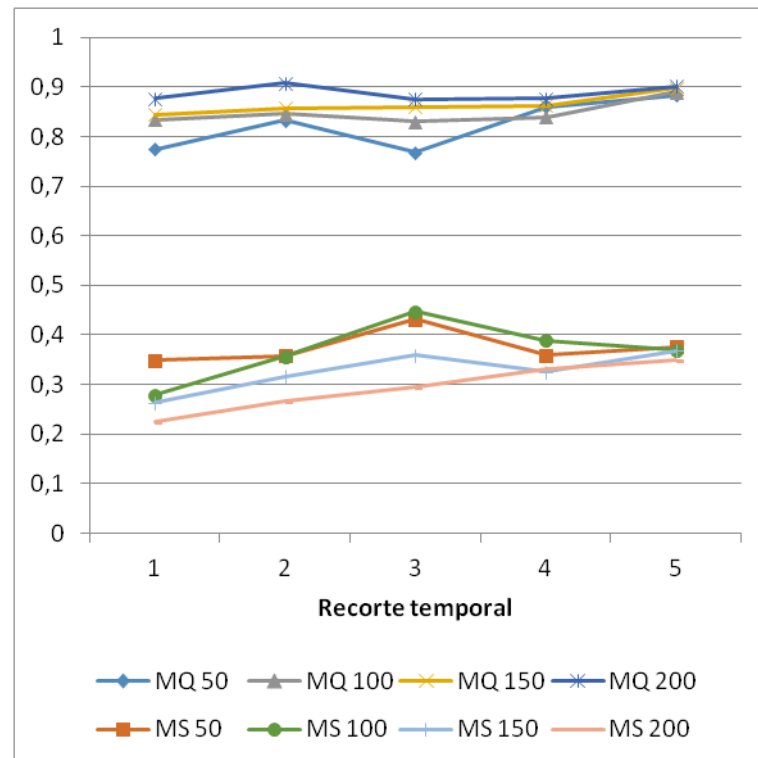


Figura 6: Valores de Modularidade Q e Silhueta Média em função do recorte temporal (Time Slice) e seleção de nós (Top N.).

Fonte: os autores.

Com base nas análises acima, decidimos por usar o recorte temporal de 3 anos, devido a sua grande influência da MS e principalmente no maior componente conectado. Assim, esse é o intervalo que possibilita abranger a maior rede possível, com *clusters* mais bem definidos. Com relação ao critério de seleção dos nós, escolhemos utilizar o Top N. 100, por melhor compatibilizar os valores de MS (0,447) e MQ (0,8302). Os parâmetros finais para análise no CiteSpace são:

- *Look Back Year (LBY)*: -1
- *Time Slice*: 3 anos (1990-2017)
- *Node types*: *Cited reference* (cocitação)
- Top N.: 100

Demais parâmetros seguiram a configuração padrão do programa.

Depois de gerada a rede, aplicou-se o algoritmo para a geração de *clusters*. Não usamos a ferramenta de nomenclatura automática de *clusters*, pois ela não gera resultados satisfatórios. Uma análise mais qualitativa dos agrupamentos, por meio da investigação dos tópicos semelhantes nos artigos da frente de pesquisa, é o que melhor possibilita o entendimento de sua temática de trabalho.

2.1.2 Resultados da análise de cocitação

O conjunto de dados inseridos no CiteSpace possui 14.094 registros, de onde foram recuperadas 387.150 referências citadas distintas, a base para formar a rede de cocitação. A rede final tem 457 nós e 1.353 ligações (arestas), selecionados das referências citadas considerando o Top N. 100 e o recorte temporal de 3 anos. Conforme Quadro 2, vemos que até 1998 havia pouca produção para estabelecer uma base intelectual sobre a qual se constrói uma frente de pesquisa. Só a partir do recorte temporal 1996-1998 foi possível estabelecer uma rede de cocitação dentro dos parâmetros estabelecidos. A data é interessante, pois é próxima à publicação de livros importantes para a área, como o *Green Chemistry: designing Chemistry for the Environment* (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996) e o mais importante deles: *Green Chemistry: theory and practice* (ANASTAS; WARNER, 1998), que lança os 12 Princípios da QV. Nos anos seguintes, há um aumento crescente no número de trabalhos citados, mostrando a expansão do campo em QV.

Quadro 2: Configuração da construção de uma rede de cocitação sobre Química Verde de 1990 a 2017.

Recorte temporal	Referências	Nós
1990-1992	0	0
1993-1995	9	0
1996-1998	924	38
1999-2001	8754	127
2002-2004	19637	124
2005-2007	36710	101
2008-2010	63773	117
2011-2013	119145	105
2014-2016	167595	102
2017-2017	82628	102

Fonte: os autores.

Na Figura 7 apresentamos a rede de cocitação gerada. Cada vértice na rede representa um nó e as linhas (ou arestas) representam as ligações entre os nós — as cocitações que foram feitas. Essa estrutura entre os nós é a representação da base intelectual. Teoricamente, em cada linha entre dois nós estão associados os textos que citam simultaneamente os dois vértices — a frente de pesquisa. Nessa rede, são apresentados no mínimo os 100 nós (Top N. 100) que receberam o maior número de cocitações em cada intervalo temporal (*time slice* 3 anos). A cor dos nós e arestas está associada ao intervalo de

tempo em que foram cocitados pela primeira vez, seguindo a legenda no topo da figura. Pelas cores, vemos que as primeiras cocitações são realizadas entre 1996 e 1998 (lilás), parte mais espalhada da rede. Trabalhos a partir de 2014 até 2017 estão mais localizados (amarelo). Três nós são proeminentes na rede, demonstrando o seu alto número de citações, correspondendo ao livro *Green Chemistry: theory and practice* (ANASTAS; WARNER, 1998); o artigo *Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry* (ANASTAS; KIRCHHOFF, 2002) e o review *Room-Temperature Ionic Liquids. Solvents for Synthesis and Catalysis* (WELTON, 1999). Pelo seu alto grau de citação, essas são consideradas autoridades intelectuais da QV (exploradas em detalhe mais a frente).

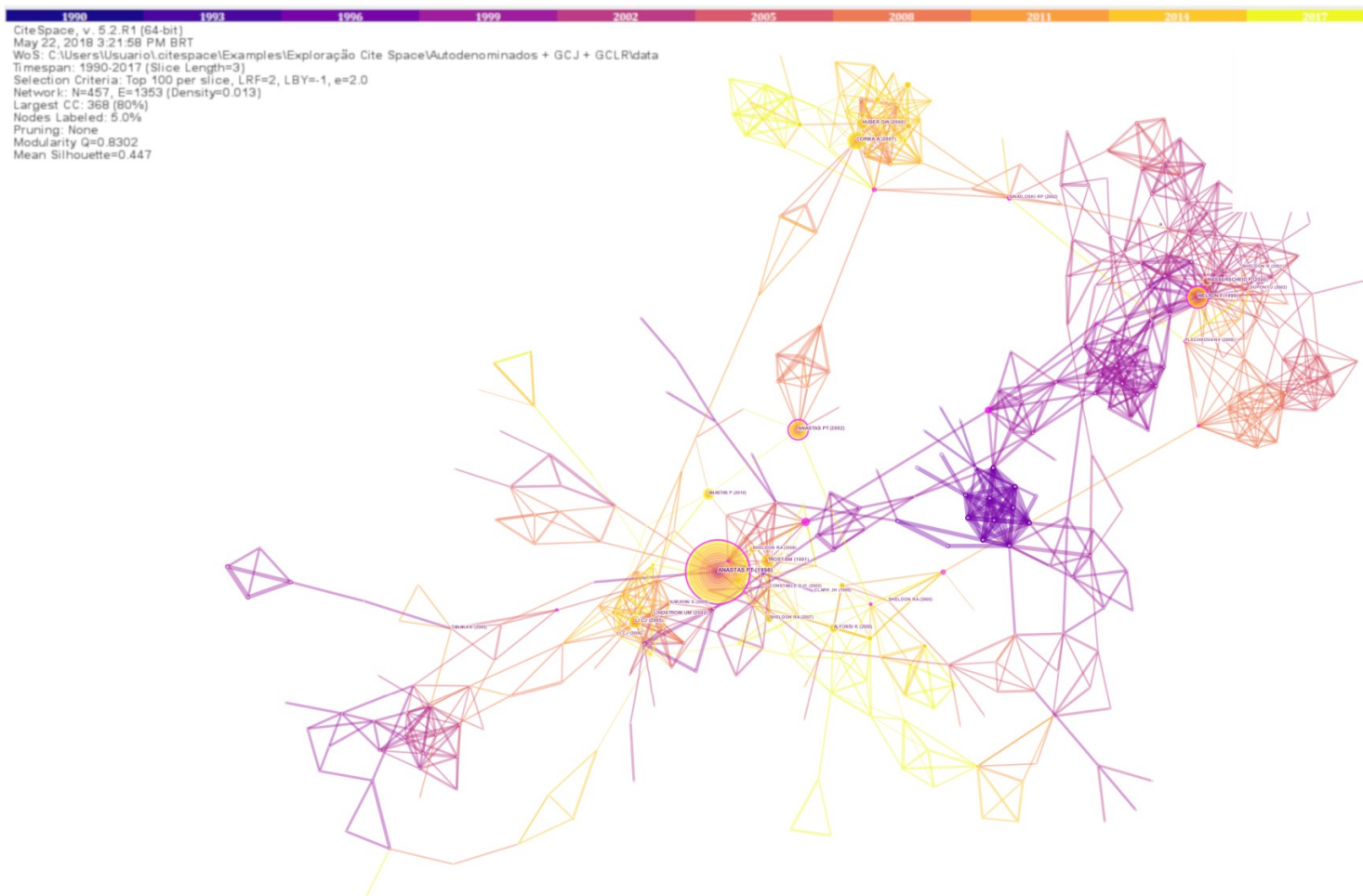


Figura 7: Rede de cocitação a partir das publicações em Química Verde de 1990 a 2017. Imagem original em <https://bit.ly/2sb73dw>.
Fonte: os autores.

A rede apresentada na Figura 7 apresenta o maior componente conectado que pode ser dividida em 16 especialidades (*clusters*). Outros 55 *clusters* não foram incluídos nas análises, por não atenderem parâmetros mínimos de significância: terem no mínimo 10 membros e estarem ligados ao maior componente conectado (CHEN, 2015). Ainda assim, a rede aqui analisada abrange 80% dos nós selecionados, indicando que grande parte das publicações estava organizada dentro dos *clusters* principais e que os agrupamentos descartados representam apenas 20% da amostra.

A Modularidade Q foi de 0,8718, acima do recomendado na literatura que é de 0,7 (CHEN; IBEKWE-SANJUAN; HOU, 2010). A silhueta teve valor médio de 0,4188, mas, quando analisamos o valor da silhueta para cada um dos 16 *clusters* apresentados na rede, vemos que seu valor é superior ao mínimo de 0,7 exigido (Tabela 1), sendo o menor valor o do *cluster* #0 (0,768). Os *clusters* #12, #16, #17 e #18 apresentam alta silhueta (maior que 0,94), mas são grupos pequenos, com menos de 10 membros (o que tende a favorecer a convergência interna) não sendo muito confiáveis para análise (CHEN, 2015).

Tabela 1: Tamanho, silhueta e ano médio de publicação da base intelectual de *clusters* sobre Química Verde. * Trabalhos localizados entre duas especialidades o que dá a impressão de suas datas de publicação serem posteriores a de citação (frente de pesquisa).

Grande Especialidade	Especialiades (<i>clusters</i>)	Silhueta	Base Intelectual			Research Front		
			Size	Mean Year	Period	Size	Mean Year	Period
A-Solventes	4 - Reação Org. Meio Aqu.	0.888	31	2002	1980-2014	30	2009	1999-2017
	5 - Solv. Supercrítico	0.915	30	1994	1989-2000*	2	1996	1996
	17 - Solv. Eutético Profundo	0.994	6	2012	2003-2016	10	2015	2014-2017
	18 - Reação Org. Meio Aqu.	0.97	5	1996	1990-2000	1	2000	2000
B-Líquidos Iônicos (LI)	0 - Líquidos Iônicos	0.768	55	2000	1982-2011*	17	2004	2002-2010
	6 - Recicl. E Recup. De Solv.	0.843	29	1996	1973-2000	3	2000	1999-2000
	8 - Toxicidade dos LI	0.972	19	2004	2002-2007	5	2008	2005-2010
	12 - Preparação dos LI	0.947	9	2000	2000-2001	2	2002	2002
C-Biomassa	3 - Transform. Biomassa	0.908	33	2009	2002-2014	34	2011	2010-2014
	11 - Valorização Lignina	0.987	10	2013	2010-2016	7	2017	2017
	16 - Glicoquímica	0.974	6	1995	1993-1997	1	1999	1999
D-Catálise	2 - Catal. Met. e Micro-ondas	0.865	38	2000	1986-2013	30	2008	1999-2014
	9 - Catal. Sólidos e Ácidos	0.953	12	2004	2002-2017*	10	2010	2010
	10 - Oxid. Catal. De Álcoois	0.994	11	1999	1981-2006	6	2009	2002-2010
E-Characterização da QV		0.816	45	2004	1991-2016	56	2010	1999-2017
F-CO2 como Substrato		0.943	28	2002	1981-2015	18	2012	1999-2017

Fonte: os autores.

A descrição qualitativa das especialidades (seus objetos de pesquisa, suas metodologias, seus conceitos e instrumentos) foi construída manualmente por meio das informações retiradas dos títulos, palavras-chave e resumos dos textos das frentes de pesquisas das especialidades (coluna 2 em Tabela 1), pois elas que interpretam as bases intelectuais na construção de um conhecimento recente (relativo ao período em que pertencem). A cada *cluster* foi atribuído um número, por ordem decrescente do tamanho da base intelectual. Assim o *cluster* 0 – Líquidos Iônicos é o que possui maior base intelectual e o *cluster* 18 – Reações Orgânicas em Meio Aquoso é o que tem a menor. O *cluster* E – Caracterização da QV era originalmente o *cluster* 1 e o *cluster* F – CO₂ como substrato era o *cluster* 7. Podemos também agrupar os *clusters* em grandes especialidades, conforme a sua proximidade temática (Coluna 1 na Tabela 1). Uma análise mais detalhada das especialidades será feita na seção 3.3 Estratégias da Química Verde.

Na Tabela 1 apresentamos também o período de publicação das bases intelectuais e das frentes de pesquisa. Interessante notar que em alguns casos (marcados em asterisco) a base intelectual parece ser posterior à publicação das frentes de pesquisa. Isso ocorre por serem trabalhos localizados na transição entre duas especialidades em períodos distintos. Esse trabalho deveria estar incluído no *cluster* mais recente, o que parece indicar uma limitação do programa.

Uma vez descritas as especialidades da QV, ou seja, seus principais temas de pesquisa, tornou-se necessário definir critérios para selecionar os trabalhos mais relevantes desses *clusters*. Para tanto, realizamos uma análise de autoridades e hubs dentro da rede, o que será discutido a seguir.

2.1.3 Hubs e Autoridades da Química Verde

Jon Kleinberg (1999), desenvolveu um algoritmo para analisar a importância dos nós de uma rede em fornecer conteúdo de relevância (autoridades) ou a capacidade de selecionar, agrupar e disseminar informações (hubs). O algoritmo de Kleinberg é baseado em recursão mútua, de forma que em uma determinada rede um hub importante se liga a autoridades importantes e vice-versa.

No caso desta pesquisa, temos uma rede de citação estruturada com uma base intelectual (artigos citados) e informações sobre as frentes de pesquisa, os artigos que citam os trabalhos dessa rede (CHEN, 2006, 2017). Isso equivaleria a dizer que existe uma rede

invisível formada pela frente de pesquisa que se inter-relaciona à rede visível feita pela base intelectual. Ao considerar essas duas fontes de informações, complexificamos a análise dos hubs e autoridades feita por Kleinberg para a qual desenvolvemos uma alternativa.

Consideramos que determinados autores da Frente de Pesquisa agem *como* hubs: nós com alto grau de ligação, agrupando a base intelectual em torno de um tema de pesquisa e disseminando a informação através da comunidade científica. Temos dois indicadores do comportamento de hub de um trabalho da frente de pesquisa: o seu valor de cobertura e o Global Citation Score (GCS). A cobertura nos dá a intensidade de concentração, o quanto determinado autor contribui para agrupar informação e caracterizar uma frente de pesquisa/especialidade. É uma medida associada à contribuição do autor para amarrar as pesquisas em torno de um tema específico. O GCS é a quantidade de citações recebidas pelo artigo por toda a comunidade acadêmica e dá uma ideia do papel do pesquisador em provocar a difusão da frente de pesquisa/especialidade ou do quanto ela tem sido divulgada dentro da comunidade da Química.

Alguns autores da Base intelectual atuam *como* autoridades: nós com informação relevante e que são vinculados por vários nós disseminadores, os hubs. As autoridades intelectuais fornecem os conceitos, metodologias e técnicas necessárias para a existência de uma especialidade. São três indicadores para a autoridade intelectual: a frequência de citação, a explosão de citação (*citation burstness*) e a centralidade de intermediação (*betweenness centrality*). A frequência mede quantas vezes o trabalho/autor foi citado dentro da amostra selecionada, o que pode ser chamado de valor de citação local (Local Citation Score, LCS). Diferentemente do Global Citation Score (GCS), que considera todas as citações recebidas por um trabalho, a frequência é um indicador do reconhecimento do trabalho/autor pelos químicos verdes (grupo de trabalhos selecionados previamente), o que dá a possibilidade de inferir no reconhecimento de uma determinada especialidade. A explosão de citação mede um aumento súbito do número de citações a um documento/autor e é um indicador do grau de inovação introduzido no domínio de conhecimento, que gera o interesse repentino por um determinado assunto. Já a centralidade de intermediação (chamada a seguir apenas de centralidade) é a capacidade de um trabalho/autor em transitar entre várias especialidades, promovendo o diálogo e a troca de informações. São elementos que preenchem lacunas na estrutura do conhecimento e agem como pontes em entre temas diferentes de pesquisa.

Para encontrar esses hubs e autoridades, consideramos diversas métricas, somando os valores dos trabalhos de cada autor para chegar a um total. Para determinado autor, os valores de GCS Total, o LCS total, o número de trabalhos total (N Trab), a frequência (Freq), a

Betweenness Centrality total (Total Centr) e a Citation Burstness total (Total Burst) são todos calculados pela soma simples dos valores individuais de cada métrica em seus artigos. A coverage total (Total Cov) de um autor é medida pela proporção de trabalhos da base intelectual que ele cita em seus trabalhos na frente de pesquisa.

Reunimos todos os autores e co-autores dos textos presentes nas frentes de pesquisa e nas bases intelectuais. Por meio do Microsoft Excel, atribuímos valores para os indicadores de cada autor. Seleccionamos os autores com os maiores valores dentro de uma especialidade como os candidatos a hubs e autoridades daquele *cluster* ou grande especialidade. Fizemos também uma análise sinóptica de todo o campo da QV, procurando os seus hubs e autoridades (MARCELINO; PINTO; MARQUES, 2020).

No Quadro 3 apresentamos uma síntese dos autores mais importantes em cada especialidade e considerando todo o campo da QV.

Quadro 3: Hubs e autoridades intelectuais da Química Verde e suas especialidades.

Especialidade	Hubs	Autoridades
A – Solventes	Victorio Cadierno Javier Francos	Chao-Jun Li
B – Líquidos Iônicos	Robin D. Rogers Kenneth R. Seddon	Kenneth R. Seddon Robin D. Rogers Tom Welton Peter Wasserscheid
C – Biomassa	David M. Alonso James A. Dumesic Atsushi Takagaki Michikazu Hara	James A. Dumesic George W. Huber Avelino Corma Sara Iborra
D – Catálise	Rajender S. Varma Michikazu Hara	Rajender S. Varma André Loupy Vivek Polshettiwar
E – Caracterização da QV	Paul T. Anastas Roger A. Sheldon James H. Clark	Roger A. Sheldon James H. Clark David J. C. Constable Alan D. Curzons Barry M. Trost Philip G. Jessop
F – CO ₂ como Substrato	Johannes Steinbauer Thomas Werner	Walter Leitner Toshiyasu Sakakura Jun-Chul Choi
Química Verde (geral)	Paul T. Anastas Rajender Varma	Roger A. Sheldon Philip G. Jessop

Fonte: adaptado de Marcelino, Pinto e Marques (2020).

Considerando as pesquisas apresentadas na seção 2.1, procedemos com a seleção do *corpus* de análise, apresentado na seção a seguir.

2.2 DEFINIÇÃO DO CORPUS

O *corpus* foi pensado para representar a QV de forma abrangente (transversalmente às suas especialidades), dando elementos para discutir uma possível evolução em relação à

Química Tradicional, mas também possibilitar a análise de evolução temporal na própria racionalidade da QV. Selecionar trabalhos relevantes para essa análise é uma tarefa complexa, considerando o número crescente de trabalhos sobre QV. Somente o *Green Chemistry Journal*, maior periódico específico do campo, tem mais de 6 mil documentos publicados entre 1999 e 2018. O Web of Science contém mais de 10 mil registros indexados com o termo “green chemistry” no mesmo período. Análises estritamente qualitativas, voltadas para Análise de Conteúdo, de todo esse montante de publicações é extremamente inviável e novas técnicas de seleção e análise desses dados precisam ser criadas.

Em trabalho anterior, traçamos um panorama das tendências de pesquisa da QV, ou seja, dos temas, objetos, metodologias ou processos que têm recebido atenção especial no decorrer da QV (MARCELINO; MARQUES, 2019). Mais do que fazer uma exploração exaustiva das práticas que têm sido chamadas de verde, objetivamos elencar os temas que mais se destacam, em que os pesquisadores têm se debruçado com maior ênfase; procuramos as frentes de pesquisa da QV. Para tanto, utilizamos a análise de cocitação, uma metodologia bibliométrica que se baseia na proximidade teórico-metodológica de dois ou mais textos de acordo com a força em que são citados em conjunto (CHEN, 2006; GRÁCIO, 2016).

Investigamos 14.142 registros, de onde foram recuperadas 387.150, e encontradas 6 grandes especialidades na QV: Solventes; Líquidos Iônicos; Biomassa; Catálise; CO₂ como Substrato e; Caracterização da QV. Dessas grandes especialidades, destaca-se o papel de E - Caracterização da QV como um núcleo da QV, analisando suas características, discutindo suas fronteiras e propondo meios de avaliação, demonstrando sua importância como objeto de análise para discutir as racionalidades da QV.

Em outra pesquisa (MARCELINO; PINTO; MARQUES, 2020), analisamos os autores que mais contribuíram para a divulgação da QV e de suas especialidades (os hubs intelectuais) e também os autores que mais contribuíram com conhecimentos para embasar as discussões da QV e suas especialidades (as autoridades intelectuais). Principalmente, os hubs intelectuais são autores que possuem as publicações mais relevantes em um determinado período e têm grande contribuição em consolidar e apresentar uma especialidade ou todo o campo da QV. Sendo assim, suas publicações possibilitam analisar a racionalidade mais influente em uma determinada época. Já as autoridades intelectuais têm ação mais difusa temporalmente, sendo que seus trabalhos são citados em diferentes períodos pelos hubs intelectuais e por diferentes motivos. Assim, eles não refletem necessariamente uma

mentalidade de um tempo e espaço, mas fornecem algumas informações que dão suporte às racionalidades apresentadas pelos hubs.

Considerando a importâncias desses autores, acreditamos que suas produções são importantes casos a serem estudados, apresentando em suas obras importantes sínteses do pensamento da QV. Seleccionamos duas instâncias em que os hubs e autoridades são representativos de todo o campo da QV (Quadro 4): a especialidade E - Caracterização da QV, como indica o nome, é organizada em torno de pesquisas que descrevem, qualificam e apontam os desafios da QV, sendo um núcleo característico do campo; as autoridades e hubs intelectuais que agem transversalmente na QV, extrapolando as fronteiras das especialidades.

Quadro 4: Hubs e autoridades intelectuais selecionadas para compor o *corpus* analítico.

Especialidade	Hubs	Autoridades
E - Caracterização da QV	Paul T. Anastas Roger A. Sheldon James H. Clark	Roger A. Sheldon James H. Clark (David J. C. Constable, Alan D. Curzons e Barry M. Trost)
Química Verde (geral)	Paul T. Anastas Rajender Varma	Roger A. Sheldon Philip G. Jessop

Fonte: adaptado de Marcelino, Pinto e Marques (2020).

Logo, uma alternativa interessante para analisar os tipos de racionalidade da QV é investigar os textos científicos dos hubs intelectuais das especialidades no decorrer dos 27 anos analisados. Textos importantes das autoridades intelectuais serão analisados quanto a forma em que são citados nos trabalhos dos hubs intelectuais, de forma a avaliar como eles suportam a racionalidade QV – qual conceito, valor e/ou metodologia sobre os quais eles têm autoridade.

Considerando o exposto, seleccionamos os trabalhos mais relevantes dos hubs intelectuais em cada recorte temporal de análise (time slice) considerando a cobertura (coverage) dos trabalhos e seu pertencimento à especialidade E - Caracterização da QV e sua ação transversal às especialidades do campo. São 12 trabalhos seleccionados dos hubs intelectuais: 5 de Anastas, 3 de Sheldon, 1 de Clark e 4 de Varma (conforme Quadro 5). Essas produções abrangem quase todas as especialidades, exceto a F - CO₂ como Substrato, indicando que são trabalhos influentes para o quadro geral da QV (Figura 8). Na Tabela 2 apresentamos os trabalhos seleccionados e os anos em que foram publicados, onde se vê que Anastas, Sheldon e Varma possuem trabalhos relevantes (alta cobertura e citações) publicados no decorrer dos 27 anos, possibilitando analisar a evolução temporal de suas racionalidades.

Quadro 5: Seleção de trabalhos mais relevantes (alta cobertura) dos hubs intelectuais da especialidade E e da QV em geral.

G. Esp.	Clu	Cov	GCS	Título	Autor, Ano	HUB
A	5	0,1	59	Green chemistry: an overview.	(ANASTAS; WILLIAMSON, 1996)	GERAL
E	1	0,13	625	Green chemistry: challenges and opportunities	(CLARK, 1999)	1
D; E	1; 2	0,13	1346	Solvent-free organic syntheses - using supported reagents and microwave irradiation	(VARMA, 1999)	1; GERAL
E	1	0,04	167	Green chemistry and the role of analytical methodology development	(ANASTAS, 1999)	1; GERAL
E	1	0,04	503	Green chemistry: science and politics of change	(POLIAKOFF <i>et al.</i> , 2002)	1; GERAL
D	2	0,03	142	Nano-organocatalyst: magnetically retrievable ferrite-anchored glutathione for microwave-assisted paal-knorr reaction, azamichael addition, and pyrazole synthesis	(POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a)	GERAL
A, B, C, D e E	4	0,1	891	Green chemistry: principles and practice	(ANASTAS; EGHBALI, 2010)	1; GERAL
A e D	4	0,1	532	Green chemistry by nano-catalysis	(POLSHETTIWAR; VARMA, 2010b)	GERAL
E	1	0,02	374	Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art	(SHELDON, 2014)	1
D	2	0,05	40	Magnetically recyclable magnetite-palladium (Nanocat-Fe-Pd) nanocatalyst for the Buchwald-Hartwig reaction	(SÁ <i>et al.</i> , 2014)	GERAL
E	1	0,11	59	The e factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability	(SHELDON, 2017)	1
C	11	0,5	14	Lignin transformations for high value applications: towards targeted modifications using green chemistry	(GILLET <i>et al.</i> , 2017)	GERAL

Fonte: os autores.

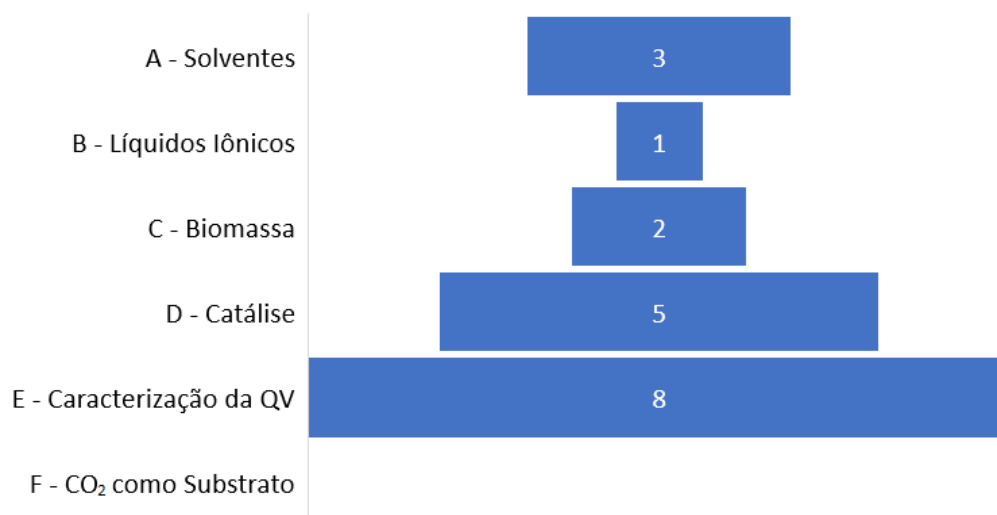


Figura 8: Distribuição de trabalhos selecionados dos hubs intelectuais por especialidades. Fonte: os autores.

Tabela 2: Produção selecionada dos hubs intelectuais por período. Em parênteses: em quantas especialidades apareceu.

Hubs	1996-1998	1999-2001	2002-2004	2005-2007	2008-2010	2011-2013	2014-2016	2017	Total Artigos
Paul T. Anastas	1	1	1		1 (5)			1	5
Roger A. Sheldon			1				1(2)	1	3
James H. Clark		1							1
Rajender Varma		1 (2)			2 (3)		1		4
Total	1	3	2	0	3	0	2	2	13

Fonte: os autores

Ademais, também selecionamos os trabalhos das autoridades intelectuais da grande especialidade E – Caracterização da QV e da QV em geral que foram mais citados nas especialidades. Embora Anastas se comporte mais como um hub intelectual, ele tem produções que desempenham fortemente o papel de autoridade intelectual da QV (ANASTAS; WARNER, 1998) entre os trabalhos mais referenciados na QV, com frequência total (citações em todos os trabalhos analisados) igual a 1.113. Podemos ver que essas referências extrapolam os limites das especialidades e são citadas por todas as frentes de pesquisa (Quadro 6). Analisar .

Quadro 6: Principal trabalho entre as autoridades intelectuais.

Período de citação	Título	Autor, Ano	FREQ TOTAL	CENTRAL	Cluster
1999-2017	Green Chemistry: theory and practice	(ANASTAS; WARNER, 1998)	1113	0,18	A;B;C;D; E; F

Fonte: os autores.

O *corpus* analítico proposto, portanto, é composto por 12 artigos dos hubs intelectuais e um texto das autoridades intelectuais, a serem lidos e analisados conforme as categorias propostas, sendo o instrumento principal para investigar os tipos de racionalidade na QV. No caso de livros (como Anastas e Warner (1998)), analisaremos o capítulo introdutório e/ou outro capítulo que seja diretamente citado pelos hubs.

Quadro 7: Textos selecionados para o *corpus* de análise.

Título	Citação
Green chemistry: an overview.	(ANASTAS; WILLIAMSON, 1996)
Green chemistry: challenges and opportunities	(CLARK, 1999)
Solvent-free organic syntheses - using supported reagents and microwave irradiation	(VARMA, 1999)
Green chemistry and the role of analytical methodology development	(ANASTAS, 1999)
Green chemistry: science and politics of change	(POLIAKOFF <i>et al.</i> , 2002)

Nano-organocatalyst: magnetically retrievable ferrite-anchored glutathione for microwave-assisted paal-knorr reaction, aza-michael addition, and pyrazole synthesis	(POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a)
Green chemistry: principles and practice	(ANASTAS; EGHBALI, 2010)
Green chemistry by nano-catalysis	(POLSHETTIWAR; VARMA, 2010b)
Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art	(SHELDON, 2014)
Magnetically recyclable magnetite–palladium (Nanocat-Fe–Pd) nanocatalyst for the Buchwald–Hartwig reaction	(SÁ <i>et al.</i> , 2014)
The e factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability	(SHELDON, 2017)
Lignin transformations for high value applications: towards targeted modifications using green chemistry	(GILLET <i>et al.</i> , 2017)
Green Chemistry: theory and practice	(ANASTAS; WARNER, 1998)

Fonte: os autores.

Maiores informações sobre o processo de análise, como temas de análise e categorias, são descritas nos capítulos seguintes.

3 RACIONALIDADE PRÁTICA NA QUÍMICA VERDE: estratégias e limites técnicos

Por muito tempo a Química foi negligenciada por filósofos e historiadores na investigação de sua natureza. Somente a partir da década de 1990 ela passou a ter devida atenção e os pesquisadores têm apontado muitos aspectos interessantes, que legitimam sua autonomia epistemológica e contribuem para o entendimento da ciência em geral. Uma dessas características mais fundamentais da Química é sua vinculação com a prática, com o experimental, a transformação e a síntese que opera e investiga.

Essa ligação com o âmbito prático já era reconhecida há muito tempo na Química. Porém, só recentemente esse fato começou a ser investigado em suas repercussões no entendimento da Química como ciência. Parte dessa negligência decorreu do baixo *status* que as atividades laboratoriais assumiram nas descrições positivistas da atividade científica. Em medida similar, também as tecnologias estiveram relegadas da análise filosófica e de uma consideração epistêmica.

Investigar e divulgar a natureza da Química, em seus processos históricos, sociológicos, filosóficos e psicológicos (dimensões da natureza da ciência), assume um papel importante para consolidação do seu valor epistemológico. Mas, contemporaneamente, as fronteiras disciplinares se esvaem cada vez mais e criar critérios de demarcação entre a Química e outras disciplinas (científicas e tecnológicas) não parece ser apropriado. A verdadeira contribuição de uma filosofia da Química é promover uma filosofia *com* a Química (BENSAUDE-VINCENT, 2014): enriquecer o repertório de entendimento da atividade científica e tecnológica como um todo, pluralizar a compreensão da forma como os cientistas, tecnólogos e engenheiros desenvolvem sua atividade.

Com o foco na atividade científica, e não em demarcações rígidas, analisamos as características teóricas e práticas da Química, buscando compreender se o seu lado prático é uma característica marcante que pode contribuir para o entendimento das ciências e tecnologias em geral. Abordamos essa distinção do ponto de vista das racionalidades: a razão em ação.

Assim, o objetivo desse capítulo é discutir possíveis vinculações da Química, em geral, e da Química Verde em específico, com a racionalidade teórica e a racionalidade prática. Em seguida, apresentamos na seção **3.1 (Química: teoria ou prática?)** uma revisão de trabalhos que abordam a filosofia e história da Química, ressaltando os argumentos que configuram uma racionalidade prática. Na seção **3.2 (Química Verde: teoria ou prática?)**

investigamos a Química Verde em específico, usando o *corpus* de análise definido no capítulo 1 (Tabela 2, p. 53).

A partir de análises bibliométricas em trabalhos anteriores (MARCELINO; PINTO; MARQUES, submitted, 2020; MARCELINO; MARQUES, 2019)., evidenciaremos quais são as metodologias e estratégias de pesquisas que mais se destacam na QV na seção **3.3 Estratégias da Química Verde**. Buscaremos também, dentro do *corpus* e em demais produções da área e fora dela, críticas à eficácia dessas abordagens metodológicas, salientando alguns aspectos técnicos da QV na seção **3.4 Limites Técnicos da Química Verde**: sua vinculação com o conceito de sustentabilidade e as estratégias para alcançá-la; a avaliação da eficácia e eficiência dos processos quanto a sua veridicidade por meio de métricas e; estratégias de melhoria consideradas de forma desvinculadas do sistema de produção, em especial o caso dos solventes verdes, como os líquidos iônicos.

A última seção **3.5 Teoria e Prática: unidas** faz uma síntese das interações entre teoria e prática e fecha o capítulo.

3.1 QUÍMICA: TEORIA OU PRÁTICA?

Uma primeira diferença entre racionalidade teórica, mais específica da ciência, e a racionalidade prática, aquela atribuída à tecnologia, vem da própria natureza do objeto de estudo. Aristóteles atribuiu à epistémé, parte do pensamento teórico, a especificidade de lidar com os objetos imutáveis⁴ sob a forma de uma ciência espectadora, contemplativa (SCHUMMER, 1997). Entretanto, não é assim que a Química investiga.

Diversos autores (CHAMIZO, 2013; SEVIAN; TALANQUER, 2014; MOCELLIN, 2015) ressaltam que a atividade química não é meramente contemplativa. A química é uma atividade que intervém no mundo, seu objeto não é imutável, pronto e acabado, mas é construído na atividade investigativa. Esses autores geralmente recorrem a Ian Hacking⁵ para dizer que a atividade química não é só representação do mundo, mas também intervenção.

Ainda no que diz respeito à natureza do objeto do conhecimento, pesquisas recentes da filosofia da Química alertam para o fato de que o objeto não é apenas mutável, mas também construído (LELAS, 1993; CROSS; PRICE, 2001; HENAO; STIPCICH;

⁴ Aristóteles fazia referência às essências, como objetos imutáveis do conhecimento humano. Seu equivalente hodierno seriam as leis naturais se consideradas imutáveis.

⁵ Em seu livro de 1983, *Representing and Intervening*, Ian Hacking faz uma concisa introdução à filosofia das ciências da natureza, considerando a experimentação como tendo vida independente da teoria, ressaltando a importância dos experimentos em si como intervenção no mundo e produção de conhecimentos próprios dessa manipulação.

MOREIRA, 2009; VESTERINEN; AKSELA; LAVONEN, 2013; BENSAUDE-VINCENT, 2014). Principalmente na Química contemporânea, os objetos surgem a partir de uma organização instrumental, que rearranja a energia e matéria em uma localidade do mundo para produzir um fenômeno, um artefato.

Bensaude-Vincent (2014) enfatiza que o estudo de uma substância na Química envolve uma série de operações para a construção do objeto. O material tem que ser sintetizado ou mesmo purificado, de forma que ele não existe de forma pronta e acabada, mas é uma interação entre a cultura e o mundo material por meio dos instrumentos.

Como argumentou Bachelard, todas as substâncias puras e simples são “factuais”. Uma vez analisadas, purificadas e caracterizadas, os produtos químicos são híbridos da natureza, dos instrumentos e das operações. [...] Eles têm vários modos de existência: natural, artificial e cultural (BENSAUDE-VINCENT, 2014, tradução nossa).

A parte da razão que lida com o mutável, com o conhecimento trivial, cotidiano, é a razão *logistikon*, calculante. A racionalidade envolvida com essa razão é a racionalidade prática. Assim, pela natureza do objeto de estudo da Química, ela estaria submetida aos critérios de justificação da racionalidade prática, mais próxima de uma tecnologia. Outro ponto concordante com esse argumento é a natureza “factual”,⁶ artificial, do objeto. A racionalidade teórica só lida com o que *é*, com aquilo que já existe. A racionalidade que lida com o que *poderia ser*, com o *dever* e as possibilidades de transformação é a racionalidade prática. Portanto, a natureza mutável e artificial do objeto da Química nos possibilita inferir que ela esteja mais voltada aos critérios práticos.

Racionalidade teórica e prática também podem ser diferenciadas quanto aos seus objetivos. No âmbito teórico, como já apontado, o objetivo é encontrar a causa de um fenômeno e justificar logicamente os acontecimentos que procedem da causa até o fenômeno em si. No âmbito prático, tratam-se das escolhas e das possibilidades da existência. Trata-se de produzir algo novo, o que é usualmente atribuído à técnica, e não à ciência.

De forma similar, diversos autores sinalizam que a Química tem objetivos práticos (SCHUMMER, 1997a; CHAMIZO, 2013; VESTERINEN; AKSELA; LAVONEN, 2013; BENSAUDE-VINCENT, 2014; SEVIAN; TALANQUER, 2014; MOCELLIN, 2015). Desses pesquisadores, Schummer (1997) é o que traz as argumentações mais sistematizadas. O autor investiga os *Abstracts* de Química, Física e Biologia (1960-1979) e identifica que a Química é a ciência natural com maior número de publicações, quatro vezes mais que a física, duas

⁶ Lembrando que “factual”, assim como “fato”, vem de “facere” (fazer).

vezes mais que a biologia. Não obstante, 2/3 dessas publicações são destinados à comunicação de sínteses, sendo que 95% de todas as substâncias produzidas são artificiais, não encontradas na natureza. Fica claro, dessa forma, que o empenho dos químicos ao desenvolverem suas práticas é o de criar novas substâncias. E isso não tem um objetivo apenas mimético, de mera reconstrução da natureza. Os químicos estão engajados em criar novas substâncias, em explorar possibilidades de existências de novos materiais. Isso é uma característica da *techné*, argumentam os filósofos.

Nessa tarefa de construir moléculas, o químico “quimicaliza” o ambiente, transforma a realidade natural em artificial. Aqui podemos encontrar uma nova correlação entre química e tecnologia, a criação de naturezas artificiais, de “sobrerrealidades”. Ortega y Gasset (1963) ressalta o caráter criativo e transformador que as tecnologias possibilitam ao homem, de forma que o homem realize atos que modificam ou reformam a natureza para conseguir aquilo que não está presente no momento ou inventando aquilo que de fato não exista. Conforme sintetiza o filósofo:

É, pois, a técnica, a reação enérgica contra a natureza ou circunstância que leva a criar entre esta e o homem uma nova natureza posta sobre aquela, uma sobrenatureza. Anote-se, portanto: a técnica não é o que o homem faz para satisfazer suas necessidades. Esta expressão é equívoca e valeria também para o repertório biológico dos atos animais. **A técnica é a reforma da natureza**, dessa natureza que nos faz necessitados e indigentes, reforma em sentido tal que as necessidades ficam, a ser possível, anuladas por deixar de ser problema a sua satisfação (ORTEGA Y GASSET, 1963, p. 6).

Alguns autores também analisam a relação entre métodos e finalidades da Química para apontar o seu caráter prático (CHRISTIE, 1994; SCERRI, 1997; KOVAC, 2002; CHAMIZO, 2013; GIEGÉ, 2013; VESTERINEN; AKSELA; LAVONEN, 2013; MOCELLIN, 2015; SEVIAN *et al.*, 2015). Para esses autores, a Química não é uma ciência cuja metodologia de pesquisa seja puramente teórica, abstrata e descrita por leis matematizáveis. Esses autores argumentam que a Química tem procedimentos metodológicos variados, recorrendo a modelos físicos e mentais e ao raciocínio por meio de casos para estabelecer afirmações sobre o comportamento das substâncias.

Chamizo (2013) enfatiza o papel dos modelos para criar algo novo (síntese). Esse modelo pode ser apenas visualizado ou materializado na forma de uma planta, um projeto. Na química usam-se diversos modelos, como os da mecânica quântica, dos grupos funcionais, dureza de ácidos e bases, etc. O modelo é o que liga a ideia ao objeto no mundo real, é uma etapa indispensável no trabalho de *design*, de projetar.

Mas os modelos químicos têm uma característica mais contextual e concreta. Eles não são altamente universalizáveis, correspondendo a situações e casos mais específicos. É por isso que a Química tem que lidar com diversas estratégias metodológicas para desempenhar suas investigações, pois o próprio objeto com o qual atua é extremamente complexo. É por esse motivo que Kovac (2002) atribui à química um raciocínio prático, pois a complexidade das situações com as quais trabalha não permite generalizações universais.

Conforme Kovac (2002), o estudo da solubilidade é um caso interessante sobre a racionalidade prática na Química. As leis termodinâmicas são insuficientes para explicar a solubilidade, apresentando uma descrição baseada em fatores idealizado e imprecisos de solução. O químico tem de recorrer a uma série de casos, conjuntos similares e analogias, para estudar a solubilidade. Usam-se os conceitos de ligação química, propriedades periódicas, polaridades, exceções aos casos, etc. Um conjunto de situações práticas para analisar, prever e criar soluções, não uma lei universal sobre a solubilidade.

Em outro exemplo, Kovac (2002) disserta sobre a complexidade das reações químicas. Para formar um composto a partir de dois reagentes, o químico recorre a um arsenal de reações já realizadas, procurando um modelo de reação que melhor se adeque ao seu caso, pois não existe uma teoria completa que permita descrever todas as reações de forma direta e precisa. É necessário recorrer à experiência e aos casos, e submetê-los às contingências. Assim, por exemplo, o químico orgânico recorre ao reconhecimento de grupos funcionais para pensar as formas de reação. Mas também tem que pensar em solventes, agitação, catalisadores, temperatura, tempo de reação. De forma que as reações químicas são muito complexas e a racionalidade prática (recorrer ao repertório de ações) é a melhor maneira de abordá-la. Para validar uma reação química a comunidade de químicos tem seus próprios critérios e não é necessário resolver a equação de Schrödinger para mostrar a viabilidade da reação.

Conforme já tratado, racionalidade é uma metodologia da razão para dar causa e justificar os atos, sejam eles para explicar o que é ou para realizar o que deve ser. A racionalidade prática é conhecimento que lida com dois objetivos: justificar uma ação e indicar os meios necessários para alcançar sua finalidade. Ela tem assim um componente instrumental e outro ético-político. A ação prática tem a seguinte estrutura: desejo; deliberação; percepção; escolha; ato (SCHIO, 2009). Na etapa de deliberação é onde entra o repertório de experiências e conhecimentos práticos do sujeito, que podem ser capazes de solucionar um problema apontado na etapa anterior, o desejo. A deliberação pode lidar também com conhecimentos e regras universais, mas pela própria natureza complexa do

problema, ela alude a casos de sucesso anterior, a regras práticas e teóricas, enfim, as deliberações são contextuais.

Vale ressaltar que a racionalidade prática lida com o contingente — desconhecido, possível de acontecer ou não. É um tipo de conhecimento que precisa lidar com a incerteza advinda da complexidade, com a insegurança de seus próprios atos. Ainda que se busque uma alternativa mais acertada durante a deliberação, não há certezas (em sentido estrito) de que ela venha funcionar. No máximo, o conhecimento de um caso específico de funcionamento anterior funciona como exemplo que alimenta a confiança no sucesso futuro. Nesse momento, a racionalidade prática invoca a *phrónesis*, a sabedoria prática: virtude de se movimentar entre os extremos e encontrar o equilíbrio, o meio mais adequado para um determinado fim, para se movimentar entre a arrogância científica e o ceticismo paralisante. Conforme os exemplos de Kovac (2002), a Química parece mesmo estar mais alinhada a uma racionalidade prática.

Além do mais, alguns autores (CHRISTIE, 1994; SCERRI, 1997) vão além e enxergam no fato de a Química ser contextual uma dificuldade de ela criar conhecimentos na forma de Leis: universais, matematizáveis, axiomáticas e abstratas. Não há consenso sobre quantas leis químicas existem ou mesmo se existem leis químicas. Geralmente, fala-se da lei das proporções definidas e das proporções múltiplas (estequiométricas), até mesmo de uma lei periódica. Mas Christie (1994) argumenta que elas não entram nos critérios filosóficos do que seja uma lei. Elas não são universais e também de difícil precisão. A lei periódica estabelece que há certa regularidade no aparecimento de certas propriedades dos elementos, mas não existe uma explicação axiomática para essas propriedades: "A regularidade capturada não pode ser expressa de maneira nomológica⁷ usando conceitos não-químicos" (VAN BRAKEL, p. 141, tradução nossa). A lei das proporções definidas precisa de interpretações vagas para explicar o caso do rubi ou dos polímeros. No primeiro caso, o rubi seria uma solução de cromo em óxido de alumínio, o que manteria a lei intacta, ou pode ser um novo composto, já que o cromo ocupa um lugar do alumínio na rede cristalina, violando a lei das proporções definidas com a composição irregular de cromo.

O que Christie (1994) deixa claro é que discutir a existência de leis naturais na ciência é um assunto complicado. Segundo Christie (CHRISTIE, 1994) não há uma definição restrita para o que sejam leis naturais, mas o que transparece é que as leis mais conhecidas da Química (as ponderais e periódicas) não satisfazem critérios filosóficos de clareza, redução

⁷ Relativo ao estudo das leis que regem os fenômenos naturais.

axiomática⁸ ou universalidade. Talvez tenhamos que flexibilizar o entendimento de leis, considerando que cada disciplina tenha suas formas de expressar seus fundamentos.

Para Mocellin (2015), existe um estilo químico de raciocinar, uma racionalidade específica, com foco no conhecimento através do fazer, com interesse na individualidade do material objetivando a síntese, o controle e a transformação. (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 2). O foco na individualidade do material, nos sistemas contextuais, com limites definidos e com resultados específicos é uma característica das atividades do *design* e da engenharia, portanto, atividades tecnológicas. Aproximar delas a Química pode-nos ajudar a entender a índole da mesma.

Pye (2007) diferencia invenção e *design* da seguinte forma. Invenção é descobrir um sistema, descobrir um princípio. "Cada invenção útil é uma descoberta sobre o jeito que as coisas e a energia se comportam" (PYE, 2007, p. 21, tradução nossa). "*Design* é o processo de aplicar esse princípio" (PYE, 2007, p. 21, tradução nossa), de "adaptar um sistema conhecido" (PYE, 2007, p. 18, tradução nossa). Para esse autor, o cerne do *design* está na tentativa de controle do fluxo de energia de um sistema, de forma a diminuir manifestações indesejadas de um fenômeno e conduzir o dispositivo para realizar uma operação para o qual foi projetado. Não há como evitar que a energia se dissipe, dado o limite imposto pela segunda lei da termodinâmica, e é por isso que os dispositivos tecnológicos sempre exibem resultados que não foram planejados. A tarefa do *designer* é justamente a de direcionar a energia o máximo possível para os resultados esperados, num processo de tentativa e erro, de criar de acordo com a o repertório de situações conhecidas.

Com base nas descrições de Pye (2007) sobre o que é o *design*, encontramos muitas similaridades com a atividade química. O químico está interessado em controlar o fluxo de energia dentro de um sistema reacional para possibilitar transformações na matéria. Essa matéria, muitas vezes, não é foco em si, mas exhibe resultados (qualidades) que são de interesse dos químicos, como um dispositivo que executa uma tarefa. A questão da tentativa e erro e da imprevisibilidade dos dispositivos químicos já foi tratada acima, ao se expor a ideia de uma racionalidade prática na Química (KOVAC, 2002). Chamizo (2013) também já apontou explicitamente a ação do químico como uma questão de *design* em que os modelos representam a parte de plano, instrumento, da produção.

Outro ponto importante que corrobora o caráter prático da Química é a sua história. Ao analisar a história da Química, Bensaude-Vincent (2014) faz notar que sua gênese se dá

⁸ Redução axiomática se refere à redução de uma lei a suas verdades inquestionáveis e universalmente válidas.

nas atividades das artes e ofícios: na atividade da metalurgia, dos corantes, dos elixires. Os primeiros laboratórios são os espaços dos artesãos, etimologicamente ligados ao *labor* (trabalho). Ainda que a Química tenha mudado substancialmente sua atividade desde essa época, sua raiz experimental ainda se faz presente. Como já apontado acima, a ênfase da pesquisa química é na síntese de novas substâncias. Herdeira das artes práticas e dos ofícios, a Química tenta estabelecer seu caráter científico nas academias e sociedades científicas por meio dos laboratórios e em vínculos com a indústria. Cerca de 60% dos químicos não estão no ensino ou academia, mas desenvolvem atividades em campos da transformação de materiais, como a indústria (TALANQUER, 2013).

Em suma, podemos perceber que a Química tem fortes vínculos históricos e metodológicos com as atividades práticas. Ela tem sua origem e lócus nos laboratórios. Sua forma de investigação é também de intervenção no mundo material, transformando e complexificando o mundo. Na seção seguinte, fazemos uma investigação das características da Química Verde, sob o ponto de vista da racionalidade teórica e/ou prática.

3.2 QUÍMICA VERDE: TEORIA OU PRÁTICA?

A análise anterior é feita a partir da Química em geral e, a princípio, aplica-se também à Química Verde (QV). Entretanto, a QV pode usar de estratégias diferenciadas de raciocínio que não foram identificadas anteriormente na Química. Propomos essa seção com o objetivo de refletir a partir da leitura do *corpus* se a QV tem características peculiares no uso da racionalidade teórica e prática.

Para realizar essa análise usaremos artigos definidos como *corpus* de pesquisa no Capítulo anterior (Quadro 7). A partir desses textos faremos uma comparação com as categorias anteriores, encontradas na Química em geral, e também com uma estrutura mais específica desenvolvida por Frederick Ferré (FERRÉ, 1995a, 1995b).

Ferré (1995a)⁹ diferencia as duas racionalidades em diversas categorias, conforme o Quadro 8 abaixo:

Quadro 8: Categorias de diferenciação entre racionalidade prática e racionalidade teórica.

Categorias	Racionalidade Prática	Racionalidade Teórica
Velocidade	Rapidez das ações para evitar perigo ou mudar circunstâncias.	Rapidez das ações para desvendar obscuridade conceitual.

⁹ Ferré (1995) usa o termo Inteligência Teórica (Theoretical Intelligence) e Inteligência Prática (Practical Intelligence). Mas o autor diz que o termo também é tratado como racionalidade por outros autores.

Discriminar diferenças sutis	Para planejar ações mais eficazes.	Para se munir com premissas mais bem analisadas.
Inferir conclusões remotas (antecipar)	Para preparar ou evitar eventos.	Identificar a sequência do argumento e aonde ele leva.
Síntese dos dados	Para planejar a batalha pela vida.	Compreensão unificada.
Interesses	Interessada em resultados.	Melhor se for imparcial ou desinteressada.
Objetivos	Se é eficaz, ela se acomoda com os resultados.	Quer entender por que é eficaz.
Meios	Procura os meios mais simples para realizar a tarefa de forma confiável (precisa).	Rejeita até a simplicidade se ela atrapalhar no aprofundamento da exatidão.
Sucesso da inteligência	Tem a ver com os resultados das ações — se funciona, fez sucesso.	Tem a ver com a qualidade do caminho, os meios das ações — depende de premissas (leis e princípios) com qualidade.
Explicitação	Trabalha melhor sem pensar nos detalhes de cada ação, sem explicitá-los (mais "instintivo", reativo) — performance	Procura a explicitação, o detalhamento de cada ação — entendimento;
Valores	Instrumentais — meios ou instrumentos para alcançar fins externos e valorados.	"Intrínsecos" — entendimento em si mesmo, exercício lúdico de uma mente sem contenções.

Fonte: adaptado de Ferré (1995).

Assim como na Química, a QV também tem uma natureza poética, ou seja, com objetivo de criar um produto, de interferir no mundo e criar algo que, a princípio, não estava lá. Essa atividade poética acontece tanto no âmbito da pesquisa quanto nas suas aplicações, mais vinculadas ao sistema industrial. A QV, assim como a Química, também desenvolve processos para criar moléculas inéditas, além de transformar e analisar as já existentes, com o objetivo de estudar suas propriedades e estudar o próprio processo. Mas, diferentemente da Química em geral, a QV é particularmente interessada em estudar processos e substâncias que tenham interesse no setor industrial. Afinal, seu objetivo é justamente prevenir a poluição, a periculosidade e a ineficiência da pesquisa e da indústria química (ANASTAS, 1999; CLARK, 1999; ANASTAS; EGHBALI, 2010), conforme trecho abaixo.

Uma definição sucinta é: a Química Verde utiliza com eficiência matérias-primas (de preferência renováveis), elimina o desperdício e evita o uso de solventes e reagentes tóxicos e / ou perigosos na fabricação e aplicação de produtos químicos (SHELDON, 2014, p. 950, tradução nossa).

O objetivo de transformar os produtos e processos químicos na indústria e na pesquisa tem a ver com a busca da melhoria da “qualidade de vida,” corroborando as características de racionalidade prática da QV, conforme quadro acima. O trecho abaixo relaciona a busca pelo bem-estar com o progresso tecnológico da QV.

O objetivo da Química Verde é reduzir os riscos associados a produtos e processos que são essenciais não apenas para manter a qualidade de vida alcançada pela sociedade através da Química, mas também para avançar ainda mais as conquistas tecnológicas da Química e fazê-lo de maneira sustentável (ANASTAS, 1999, p. 169, tradução nossa).

Em outros textos, o significado de avanço tecnológico ganha mais nuances. Não é apenas uma melhoria técnica direta dos produtos produzidos pela química. Trata-se também do avanço dos próprios conhecimentos teóricos e técnicos da Química. A QV é entendida pelos seus pesquisadores como um meio de criar novas tecnologias e produtos e também de criar novos conhecimentos. A inovação é tanto técnica como teórica, conforme apontam as citações abaixo, indicando a relação entre racionalidade teórica e racionalidade prática na QV.

Nem toda proposta de pesquisa cujo objetivo era sintetizar produtos naturais realmente produziu um e nem todo projeto de pesquisa que se esforçou para criar um agente quimioterapêutico conseguiu alcançar seu objetivo. No entanto, uma excelente química resultou dessas pesquisas. O mesmo vale para a Química Verde. Nem todo projeto alcançará seu objetivo de matérias-primas ou reagentes inócuos, ou condições ou produtos benignos, mas, ao buscar esse objetivo necessário e que vale a pena, mesmo esses projetos resultarão, e de fato resultaram, em excelente química (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 14, tradução nossa).

Além disso, a [catálise] geralmente abre as portas para reações químicas inovadoras e traz soluções não convencionais aos desafios químicos tradicionais. Além da eficiência, a catálise pode permitir que reações desfavoráveis sejam realizadas (ANASTAS; EGHBALI, 2010, p. 307, tradução nossa)

No entanto, com esses desafios, há um número igual de oportunidades para descobrir e aplicar uma nova química, melhorar a economia da fabricação de produtos químicos e aprimorar a imagem muito manchada da Química (CLARK, 1999, p. 1, tradução nossa)

Corroborando a existência da racionalidade prática na QV, o sucesso de uma pesquisa nem sempre é medido pelo grau de explicação que ela dá sobre um fenômeno, sendo que o fato de produzir um fenômeno já pode ser um feito valorizado. Isso mostra que a QV não tem o interesse somente em produzir explicações logicamente organizadas e coerentes sobre o mundo, mas também em produzir fenômenos, sendo igualmente importante que o processo funcione e não somente seja explicado. As explicações podem vir em estudos posteriores, conforme aponta trecho de Polshettivar e Varma (2010b, p. 753, tradução nossa):

Apesar dessa demanda bem reconhecida de nanocatálise, o conhecimento dos mecanismos predominantes em escalas tão pequenas é empírico e bastante escasso. É necessário um estudo detalhado do aspecto mecanístico desses processos catalíticos para desenvolver uma base científica que ajude a ajustar e adaptar o novo sistema catalisador. O verdadeiro potencial desse conceito em vários processos ainda não foi totalmente explorado, e espera-se um progresso adicional. no futuro.

Para explorar as possibilidades práticas dos fenômenos, a QV se aproxima do conceito de *design*. Conforme já explicamos, o *design* é o estudo dos métodos mais eficientes de controle da matéria e energia para desempenhar uma função (PYE, 2007). De forma semelhante, a QV também é sobre o controle da energia e da matéria em nível molecular para

a produção eficiente de funções desejadas (ANASTAS; EGHBALI, 2010). Do ponto de vista do *design*, a QV procura evitar o desperdício de matéria e energia na forma de resíduos, de desperdício de energia e também na prevenção ao uso e produção de substâncias tóxicas e perigosas:

Química Verde é definida como o “*design* de produtos e processos químicos para reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas” (ANASTAS; EGHBALI, 2010, p. 301).

Conforme mencionado na primeira seção (primeiro princípio), a energia não utilizada também pode ser considerada um desperdício (ANASTAS; EGHBALI, 2010, p. 306).

Portanto, o desafio é reduzir a toxicidade de uma molécula sem sacrificar a eficácia da função (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 13).

Na seção anterior discutimos o fato de a racionalidade prática ser mais baseada em regras do que em leis. As regras têm caráter mais limitado, contextual, socialmente definido, enquanto as leis são generalizáveis e naturais. Nesse sentido, Anastas define os 12 Princípios da QV como um conjunto de regras para o *design* ambientalmente benigno de substâncias químicas, corroborando a existência da racionalidade prática na QV.

O aspecto mais importante da Química Verde é o conceito de *design*. O *design* é uma declaração da intenção humana e não se pode fazer o *design* por acidente. Inclui inovação, planejamento e concepção sistemática. Os Doze Princípios da Química Verde são "regras de *design*" para ajudar os químicos a alcançar a meta intencional de sustentabilidade (ANASTAS; EGHBALI, 2010, p. 301).

Os 12 Princípios são as regras da QV para o *design* mais eficiente do ponto de vista material energético. Mas essas regras têm um limite de validade imposto pela segunda lei da termodinâmica, a lei da entropia, que adverte da impossibilidade de uma eficiência total de um processo, de forma que sempre há degradação da matéria e energia. Entretanto, pesquisas apontam que os pesquisadores em QV raramente relacionam essa lei com as regras de *design* verde (MARQUES *et al.*, 2013, 2014; MARQUES; MACHADO, 2014).

Como *design* é o uso da descoberta de um princípio para produzir uma inovação tecnológica, também a QV se baseia nos conhecimentos recentes sobre toxicologia para produzir uma química mais segura. As relações descobertas entre os mecanismos de toxicidade e as estruturas químicas são o princípio teórico que orienta a QV como *design*, conforme se lê no trecho abaixo (ANASTAS; EGHBALI, 2010), e também relacionam a interdependência entre racionalidade teórica e prática.

Nas últimas décadas, tem havido uma quantidade significativa de trabalhos no campo da toxicologia que a transformaram de ser uma ciência descritiva para uma

que possui um grande componente de mecanismos e, mais recentemente, progressivamente para a incorporação de um componente in-silico. Devido a essa transição, foi possível criar correlações, equações e modelos que relacionam estrutura, propriedades e função. Essas abordagens fornecem a base para o trabalho que está sendo realizado no desenvolvimento de uma estratégia abrangente de *design*. Por exemplo, o entendimento existente da Química medicinal já pode ajudar a estabelecer algumas regras básicas para o *design* de produtos químicos menos tóxicos através da incorporação de recursos específicos de *design* que bloqueiam seu acesso aos seres humanos e a muitos organismos animais (ANASTAS; EGHBALI, 2010, p. 304, tradução nossa).

Como o conhecimento da QV é feito nos moldes do *design* (racionalidade prática), seus conhecimentos são geralmente baseados em casos, em regras que funcionam em determinados contextos. Por exemplo, os pesquisadores em QV podem desenvolver um catalisador que funcione em determinadas condições para realizar uma reação, como o uso de paládio em altas pressões e temperaturas para fazer a hidrogenação de ligações duplas (SÁ *et al.*, 2014; SHELDON, 2017). Essa é uma forma de conhecimento diferente das leis da física ou da físico-química, por exemplo. A lei da entropia ou da conservação da energia independem do tipo de reação, do catalisador ou das condições, explicando e prevendo o que acontece nesses sistemas. Já esse conhecimento sintético da QV é restrito a classes de reações, a condições reacionais e a classes de reagentes, produtos e auxiliares, efetivamente um conhecimento prático, conforme exemplos abaixo.

A viabilidade prática de protocolos sem solventes assistidos por microondas foi demonstrada em transformações úteis envolvendo proteção/desproteção, condensação, oxidação, redução, reações de rearranjo e na síntese de vários sistemas heterocíclicos em suportes sólidos inorgânicos (VARMA, 1999, p. 44, tradução nossa)

O catalisador mostrou excelente atividade para reações de Paal – Knorr, microondas, Aza-Michael e síntese de pirazol (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a, p. 1096, tradução nossa).

Isso não quer dizer que a QV produza menos conhecimentos ou conhecimentos inferiores, apenas que produz conhecimentos relativos a contextos específicos, da mesma forma que a física quântica não desqualificou a física newtoniana, apenas explorou um nicho do universo que ainda não era estudado. Como mostraremos no decorrer deste texto, o diferencial da QV é incluir a salvaguarda do ambiente no processo de *design*.

Do ponto de vista da metodologia de pesquisa, o que se pode observar é que a QV opera de forma semelhante à química tradicional, ou seja, de forma a intervir no mundo. A QV continua a tradição da Química em intervir na estrutura, na composição e nas propriedades das matérias para poder estudá-las. Por exemplo, os pesquisadores não apenas descrevem a lignina de uma determinada amostra vegetal, eles têm que extrair, purificar e

analisar essa molécula. Os processos usados são tão complexos e variados que a determinação da estrutura natural da lignina, na madeira, ainda é um mistério (GILLET *et al.*, 2017). Outra estratégia técnica da QV é a biocatálise. Antigamente o desafio era adaptar um processo para viabilizar o uso de um micro-organismo, mas agora já é possível fazer o *design* de um micro-organismo ou de uma enzima especificamente para um processo já existente (SHELDON, 2017). No mesmo sentido Polshettiwar e Varma (2010a, 2010b) projetam nanocatalisadores específicos para realizar determinadas funções, alterando suas propriedades com base nas suas estruturas e composições. As possibilidades de intervenção no mundo se tornam cada vez maiores e a QV se aproveita delas para alcançar seus objetivos.

Os objetivos da QV, sendo um campo de *design* molecular, envolvem o aumento da eficácia dos processos. Discutiremos os objetivos mais detalhadamente no 4.2.1 Valores Práticos da Química Verde, mas elencaremos brevemente eles aqui. A busca pela eficiência energética e material parece estar atrelada à diminuição da poluição e do impacto da atividade química no ambiente, conforme visto em “A Química Verde é uma abordagem para a síntese, processamento e uso de produtos químicos que reduzem os riscos para os seres humanos e o meio ambiente” (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 1). Outros objetivos, também atrelados ao controle, são mais comuns na Química, como rendimento, velocidade de reação e seletividade: “As principais características desses protocolos de alto rendimento são as taxas de reação aprimoradas, maior seletividade e a facilidade experimental de manipulação” (VARMA, 1999, p. 43).

Alguns objetivos são mais específicos da QV e demonstram fortemente sua racionalidade prática, como por exemplo, o uso da inferência (ou capacidade de antecipação) e da velocidade para prever os impactos negativos dos produtos e processos químicos, conforme aponta Anastas e Eghbali (2010, p. 308): “Quando uma ação pode ser tomada rapidamente, pode evitar acidentes, economizar energia e / ou impedir a formação de quantidades significativas de subprodutos que, de outra forma, exigiriam purificações adicionais”.

Outro valor prático presente na QV é a importância da precisão. É importante para os pesquisadores em QV ter precisão nas propriedades das suas substâncias, então o controle sobre tamanho, estrutura e composição dos materiais é perseguido, conforme trecho abaixo:

O desafio científico é a síntese de nano-catalisadores de tamanho e forma específicos para permitir o movimento fácil de materiais na fase de reação e o controle sobre a morfologia das nanoestruturas para adequar suas propriedades físicas e químicas (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010b, p. 744).

Até o momento, vemos que a QV apresenta características mais explicitamente direcionadas à racionalidade prática do que a Química em geral. Isso pode decorrer de sua vinculação mais explícita e forte com o setor industrial, que ressalta os interesses técnicos. Entretanto, isso não significa um abandono da racionalidade teórica e de seus objetivos, a explicação do mundo e a busca pela verdade. Pelo contrário, os químicos verdes encaram a QV como uma forma de aliar a busca pela inovação tecnológica com a exploração das possibilidades criativas da Química, ampliando o rol de substâncias e processos disponíveis. Na seção anterior, aproximamos a Química do *design*, buscando correlações entre os campos. Para a QV, essa correlação já estava mais explícita (ANASTAS; EGHBALLI, 2010). O que diferencia a QV, no entanto, é o direcionamento do *design* para minimizar os impactos ambientais, o que será discutido no próximo capítulo. Na seção 3.5 Teoria e Prática: unidas, fazemos uma breve discussão sobre as interações sinérgicas entre racionalidade teórica e prática aplicadas à Química (Verde).

Abaixo, apresentamos a relação de estratégias (ou técnicas) usadas pela QV para promover uma prática preventiva e ambientalmente benigna.

3.3 ESTRATÉGIAS DA QUÍMICA VERDE

Analizamos mais de 14 mil artigos sobre QV por meio de análise bibliométrica, gerando uma descrição dos temas de pesquisa que receberam maior atenção pelos químicos verdes, as especialidades, no período entre 1990 e 2017 em trabalhos anteriores (MARCELINO; MARQUES, 2019; MARCELINO; PINTO; MARQUES, 2020).. No Quadro 9 apresentamos as 16 especialidades encontradas, que foram analiticamente agrupadas em seis Grandes Especialidades de acordo com o objeto de estudo e estratégias usadas pelas QV. Apresentamos logo abaixo uma breve descrição das grandes especialidades da QV.

Quadro 9: Especialidade da Química Verde.

Grande Especialidade	Especialidade
A-Solventes	4 - Reações Orgânicas em Meio Aquoso
	5 - Solventes Supercríticos
	17 - Solvente Eutético Profundo
	18 - Reações Orgânicas em Meio Aquoso
B-Líquidos Iônicos	0 - Líquidos Iônicos

	6 – Reciclagem e Recuperação de Solventes
	8 - Toxicidade dos Líquidos Iônicos
	12 - Preparação dos Líquidos Iônicos
C-Biomassa	3 – Transformação de Biomassa
	11 - Valorização de Lignina
	16 - Glicoquímica
D-Catálise	2 - Catálise Metálica e Micro-ondas
	9 – Catalisadores Sólidos e Ácidos
	10 – Oxidação Catalítica de Álcoois
C-Characterização da QV	
F-CO ₂ como Substrato	

Fonte: Adaptado de Marcelino e Marques (2019).

3.3.1 A – Solventes

O grande volume de solventes usados na indústria química, fator determinante nos custos e impactos ambientais, (ANASTAS *et al.*, 2018) justifica a existência de uma grande especialidade voltada para o estudo de reações orgânicas em meio aquoso (#4 e #18), solventes supercríticos (#5) ou solventes eutéticos profundos (#17), os *clusters* constituintes da grande especialidade A – Solventes, conforme corroboram revisões de Anastas *et al.* (2018) e Ivankovic (2017).

Os editoriais comemorativos dos 25 anos da QV ressaltam que o melhor solvente é não usar solventes (JESSOP, 2011, p. 2016; LI, 2016; SNEDDON, 2016), corroborando a importância do desenvolvimento das sínteses orgânicas em meio aquoso (#4 e #18) possibilitada por catálise metálica como grandes avanços da QV (LI, 2016; WAKAKI; OISAKI; KANAI, 2016). De forma similar, os solventes supercríticos (#5) são vistos como alternativas para processos químicos mais seguros (LI, 2016; SNEDDON, 2016). De toda a base intelectual de A – Solventes, 8% (6) dos trabalhos estão também citados nos editoriais comemorativos: 13% da especialidade 4 – Reações Orgânicas em Meio Aquoso e; 7% de 5 – Solventes Supercríticos. Isso indica que os temas e referenciais dessa grande especialidade são reconhecidos pelos químicos verdes em alguma extensão. As referências de A – Solventes são usadas para embasar os editoriais referentes ao Princípio 8 – Reduzir derivações (LI, 2016) (4 referências) e Princípio 12 – Química inerentemente segura para a prevenção de acidades (SNEDDON, 2016) (1 referência), usando argumentos de que “o melhor solvente é não ter solvente” (LI, 2016, p. 1837) e buscando opções não tóxicas e não voláteis para evitar acidentes.

Ao considerar a proximidade da base intelectual com a QV, 22% dos trabalhos são autodenominados QV, seja por usarem o termo “green chemistry” em seus títulos, resumos e/ou palavras-chave ou por estarem publicados em revistas especializadas do campo (GCJ e GCLR). Essa é a menor proporção de trabalhos autodenominados QV na base intelectual dentre as grandes especialidades, o que pode indicar que a base intelectual é voltada para aspectos mais estritamente químicos e técnicos dos solventes, já que os solventes podem ter diferentes interações de acordo com os reagentes, produtos e demais auxiliares. O valor difere nas especialidades: 32% em 4; 20% em 18 (ambas sobre reações orgânicas em meio aquoso); 83% em 17 – Solventes Eutéticos Profundos e; nenhum trabalho da base intelectual de 5 – Solventes Supercríticos é autodenominado QV.

3.3.2 B – Líquidos Iônicos

Essa grande especialidade repercute a preocupação dos químicos verdes em abordar a geração de resíduos por meio dos solventes. As primeiras especialidades da QV apontadas nessa pesquisa tratam de solventes supercríticos (5) e da reciclagem e recuperação de solventes (6); esta última é a gênese da grande especialidade sobre líquidos iônicos. Conforme aponta Sheldon (2017) o grande problema dos solventes é seu armazenamento e possibilidade de recuperação para reuso em processos futuros, uma das promessas dos líquidos iônicos e fluidos supercríticos (IVANKOVIĆ, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018).

Nenhum trabalho da base intelectual da grande especialidade B-Líquidos Iônicos é referenciado nos editoriais comemorativos dos 25 anos da QV. Porém, outros textos sobre líquidos iônicos são citados nos textos comemorativos, abordando como esses solventes são um dos maiores desenvolvimentos da QV na pesquisa acadêmica e industrial (LI, 2016) e também como exemplo de preocupação com a toxicidade dos produtos químicos (JACKSON; CAMPI; HEARN, 2016).

Uma parcela de 44% de toda a base intelectual da grande especialidade é autodenominada QV, o que demonstra que há relações entre o tema e as pesquisas do campo. Nas especialidades, 95% dos trabalhos de 8 – Toxicidade dos Líquidos Iônicos, 42% de 0 – Líquidos Iônicos, 24% de 6 – Reciclagem e Recuperação de Solventes, e 11% de 12 - Preparo de Líquidos Iônicos são autodenominados QV.

3.3.3 C – Biomassa

O uso de biomassa para a síntese de produtos químicos de interesse é uma grande especialidade da QV baseada no princípio 7 – Uso de Fontes Renováveis, como uma resposta ao iminente esgotamento das reservas de petróleo e gás natural e aos impactos ambientais gerados pela alta emissão de dióxido de carbono na atmosfera (IVANKOVIĆ, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018). As preocupações com uma possível competição entre fontes de alimento e substrato para indústria (MARION *et al.*, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018) se reflete nas pesquisas de biomassa de segunda geração, como a especialidade 11 – Valorização de Lignina.

A questão da biomassa (3, 11 e 16) é recorrentemente apontada nos editoriais comemorativos aos 25 anos da QV pela vantagem de ser renovável (DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016; LI, 2016; QUADRELLI, 2016; SHELDON, 2016) e possibilitar a produção de polímeros (LLEVOT; MEIER, 2016). Apenas 4 trabalhos da base intelectual de 3 – Transformação de Biomassa são citados nos editoriais comemorativos (8% de toda a base de C – Biomassa), sendo que 3 se relacionam ao Princípio 7 – Uso de fontes renováveis (LLEVOT; MEIER, 2016), duas referências no editorial sobre o Princípio 2 – Economia atômica (SHELDON, 2016) e um trabalho citado no editorial sobre o Princípio 9 – Catálise (DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016).

No que concerne ao número de autodenominados QV, a proporção é de 51% dos trabalhos na base intelectual, sendo 70% dos trabalhos em 3 – Transformação de Biomassa, 17% de 16 – Glicoquímica e 10% de 11 – Valorização de Lignina.

3.3.4 D – Catálise

A catálise é uma das ferramentas mais versáteis da QV (SHELDON, 2017), permitindo diminuir a energia necessária para as transformações, reduzir a geração de resíduos e aumentar a seletividade das sínteses, conforme sintetizam Anastas *et al.* (2018) e Ivankovic (2017) em revisões sobre a QV. A catálise heterogênea, como a promovida por catalisadores sólidos e ácidos (9), tem sido promovida como mais vantajosa por usar metais abundantes e menos perigosos (ANASTAS *et al.*, 2018). O uso de irradiação de micro-ondas também é citado em revisões prévias como uma possibilidade para aumentar a eficiência energética de todo um processo (IVANKOVIĆ, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018).

A temática das reações catalisadas por metais está em estreita relação com os solventes aquosos (4 e 18), processos sem solventes e com ativação por micro-ondas (2).

Li(2016) ressalta a importância da catálise metálica (com a sua opção aquosa) para o desenvolvimento da QV. Outros editoriais ressaltam o papel da catálise para diminuir a geração de resíduos (SHELDON, 2016) e/ou uso energético (WAKAKI; OISAKI; KANAI, 2016), refletindo também sobre a relação entre toxicidade e reutilização dos catalisadores (SNEDDON, 2016). Os catalisadores sólidos ácidos (9) são apontados como estratégia para reduzir a formação de resíduos por Delidovich e Palkovits (2016) e a oxidação de álcoois é amplamente utilizada por Wakaki, Oisaki e Kanai (2016) como um exemplar para falar da necessidade de trabalhar com substâncias inerentemente não tóxicas e por Delidovich (2016) como um exemplo da contribuição da catálise para gerar menos resíduo.

De toda a base intelectual da grande especialidade D – Catálise, 10% (6) está referenciada nos editoriais comemorativos, sendo 18% (2) de 10 Oxidação de Álcoois, 17% (2) de 9 – Catalisadores Sólidos e Ácidos e 5% (2) de 2 – Catálise Metálica, Micro-Ondas em Processos sem Solvente. A grande especialidade D – Catálise está relacionada aos Princípios 8 – Reduzir derivativos (LI, 2016) (3 trabalhos), Princípio 3 – Sínteses menos perigosas (WAKAKI; OISAKI; KANAI, 2016), Princípio 6 – *Design* para eficiência energética (QUADRELLI, 2016) e Princípio 9 – Catálise (DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016) (com um trabalho cada).

Não obstante, 48% (61) da base intelectual é autodenominada QV: 92% em 9 – Catalisadores Sólidos e Ácidos; 32% em 2 – Catálise Metálica, Micro-Ondas em Processos sem Solvente e; 55% em 10 – Oxidação de Álcoois.

3.3.5 E — Caracterização da Química Verde

Essa grande especialidade tem frente de pesquisa com 56 trabalhos que se dividem em três períodos, o primeiro em 1999 e 2002, o segundo em 2010 e 2014, o terceiro em 2017. Em 1999 são seis artigos e mais dois em 2002 que tratam de questões gerais da QV, suas características e apresentações (ANASTAS, 1999; CLARK, 1999; POLIAKOFF *et al.*, 2002), mas também alguns exemplos de práticas verdes, incluindo catálise e alternativas ao uso de solventes (CHOUDARY; KANTAM; KAVITA, 1999; KING; HOLLIDAY; LIST, 1999; NAKANO; KITAZUME, 1999; VARMA, 1999; SHEZAD; CLIFFORD; RAYNER, 2002). Uma segunda etapa da frente de pesquisa, em 2010 (30 artigos) e 2014 (4 artigos), continua a pesquisa em solventes verdes (STARK *et al.*, 2010; PENA-PEREIRA; NAMIEŚNIK, 2014), mas agora focalizando mais a questão da biomassa e dos processos catalíticos para sua transformação (COLLINSON; THIELEMANS, 2010; HERNÁIZ *et al.*, 2010; SHI *et al.*,

2010; YAN; XIAO; KOU, 2010; SHELDON, 2014; VIDAL; GARCÍA-ÁLVAREZ, 2014) . Em 2017 são 14 artigos, que tratam de questões gerais da QV, como a sua avaliação em métricas (SHELDON, 2017), e continuam as pesquisas em solventes verdes (LAWRENSON *et al.*, 2017; MISTRY *et al.*, 2017; SANTORO *et al.*, 2017) e biomassa (LANCEFIELD *et al.*, 2017; TOBISZEWSKI; NAMIEŚNIK; PENA-PEREIRA, 2017). Podemos resumir o *cluster* 1 como um conjunto de especialidades concernentes a temas gerais da QV e sua caracterização, explorando as suas possibilidades.

Os trabalhos autodenominados QV correspondem a 82% da base intelectual e 35% de todos os trabalhos são referenciados nos editoriais comemorativos, relacionando-se a todos os princípios. Destaca-se a presença de 6 relações com o Princípio 2 – Economia Atômica (SHELDON, 2016), abordando com a discussão sobre métricas e geração de resíduos na QV. Também há cinco relações com o Princípio 12 – Química inerentemente segura para a prevenção de acidentes (SNEDDON, 2016) e quatro ao Princípio 9 – Catálise (DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016). São três trabalhos relacionados aos princípios 6 – *Design* para Eficiência Energética e 8 – Reduzir Derivativos, cada. Dois trabalhos relacionados ao Princípio 1 – Prevenção; dois ao Princípio 7 – Uso de Fontes Renováveis e apenas 1 em cada um dos seguintes princípios: 3 – Sínteses Químicas Menos Perigosas, 4 – *Design* de Produtos Químicos Seguros, 5 – Solventes e Auxiliares Seguros, 10 – *Design* para Degradação e 11 – Análise em Tempo Real para Prevenção da Poluição.

Woodhouse e Breyman (2005) comparam a QV com um movimento social, sendo que a busca por identidade é um momento crucial para o coletivo. Essa grande especialidade parece reunir as produções e os debates que refletem essa busca de identidade da QV. As temáticas presentes nesses trabalhos repercutem os temas das demais especialidades encontradas nessa análise, como o uso de CO₂ supercrítico como solvente, processos sem solventes, uso de solventes eutéticos, líquidos iônicos, biomassa como fonte renovável e a necessidade de abordar as métricas nos processos químicos. Esse é o *cluster* com maior número de trabalhos da base intelectual autodenominados QV e referenciados nos editoriais comemorativos dos 25 anos da QV, e o fato de ele já apresentar temas que corroborem a rede como um todo, reforça a coerência do panorama da QV apresentado pela análise de cocitação.

3.3.6 F — DIÓXIDO DE CARBONO COMO substrato para sínteses

Em revisões sobre a QV, o dióxido de carbono é descrito dentro das abordagens de uso de recursos renováveis ao ser fixado da atmosfera pelo crescimento de biomassa

(IVANKOVIĆ, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018). Não obstante, também é apresentado como alternativa mais segura durante algumas reações que envolvem carbonatos orgânicos (IVANKOVIĆ, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018) (como é o caso dessa especialidade).

O uso de CO₂ como um substrato (7) é apresentado nos editoriais como uma alternativa renovável em substituição à matriz baseada em petróleo (LI, 2016; LLEVOT; MEIER, 2016) e também como matéria-prima abundante, cuja incorporação em materiais de interesse é um desafio para a Química (Verde) (DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016). São 14% dos trabalhos da base intelectual citados nos editoriais, sendo que 2 estão relacionados ao Princípio 3 – Sínteses menos perigosas (WAKAKI; OISAKI; KANAI, 2016) e um trabalho em cada um dos seguintes princípios: 8 – Reduzir derivativos (LI, 2016) e 9 – Catálise (DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016).

Das seis grandes especialidades, a E – Caracterização da QV tem natureza metacientífica, discutindo a identidade do campo. As outras cinco estão vinculadas à estratégias técnicas vinculadas a um ou mais princípios. Pode-se perceber a grande influência dos solventes (reações sem solventes, água como solvente, solventes supercríticos e solventes eutéticos), catalisadores metálicos (nanocatálise, recuperação de catalisadores), biomassa (principalmente proveniente de lignina) e ativação por micro-ondas.

3.4 LIMITES TÉCNICOS DA QUÍMICA VERDE

Abaixo apresentamos alguns desafios e limites para as estratégias da QV apontados na literatura. Eles são mencionados, inclusive, por alguns químicos verdes, mas nem sempre são reconhecidos por toda a comunidade, como é o caso da limitação entrópica para o alcance da sustentabilidade.

3.4.1 Eficácia dos Solventes Verdes

O uso de solventes é um dos grandes desafios da Química fina, especialmente a Química farmacêutica. No processo industrial, que opera em grande escala, são necessárias grandes quantidades de reagentes auxiliares para a síntese, separação e purificação dos compostos de interesse, de forma que a eficiência geral do processo (comparando massa do produto pela massa de resíduo gerado) é bastante baixa. Por isso, pensar em alternativas para o uso de solventes é um grande desafio para tornar os processos industriais químicos mais verdes.

Jessop (2011) analisa a questão dos solventes e sua benignidade, fazendo um comparativo entre o uso industrial, a crença dos pesquisadores e as pesquisas acadêmicas realizadas sobre solventes ambientalmente benignos. O autor faz uma afirmação provocante:

A pesquisa acadêmica na área de solventes verdes não focaliza nem no uso que as indústrias fazem dos solventes nem nos tipos de solventes que a comunidade de pesquisa acredita serem as melhores esperanças para reduzir o impacto ambiental relacionado ao uso de solventes (JESSOP, 2011, p. 1391, tradução nossa).

O autor (JESSOP, 2011) questiona os maiores pesquisadores em solventes verdes sobre quais as classes de solventes terão mais impacto em reduzir os impactos ambientais nos próximos 20 a 30 anos. Os entrevistados colocam como principal alternativa o dióxido de carbono (líquido, supercrítico e líquido expandido), seguido pela água (líquida e supercrítica) e pelos solventes orgânicos escolhidos cuidadosamente. Só depois aparecem os líquidos iônicos. Porém, quando se olha a produção acadêmica sobre solventes verdes, cerca de metade dela é sobre líquidos iônicos, 25% em água e depois reações sem solventes. Conforme apontamos na seção anterior (3.3Estratégias da Química Verde), a questão dos solventes é recorrente nas especialidades, havendo três delas voltadas aos líquidos iônicos e duas às reações em meio aquoso. Isso mostra, de acordo com Jessop (2011), que há um descompasso entre o que os especialistas acreditam serem as alternativas mais eficazes e o que a comunidade científica investiga.

Quando o autor pesquisa o *locus* de aplicação dos solventes (o seu uso no processo químico) por meio de uma análise dos artigos do *Green Chemistry Journal* no ano de 2010, ele encontra que mais da metade da produção selecionada é voltada ao uso dos solventes em processos de síntese. Contudo, quando se considera o uso dos resíduos industriais provenientes dos solventes, verifica-se que apenas uma pequena proporção advém da síntese em si. Por exemplo, segundo avaliação do *Environment and Climate Change Canada* apenas 0,7% da emissão de compostos orgânicos voláteis é proveniente da indústria química, enquanto 21% é liberada pelo uso geral de solventes, fora da indústria de manufatura química¹⁰ (CANADA, 2011).

Isso coaduna a crítica de Jessop (2011) de que a pesquisa em solventes verdes não está fortemente vinculada à resolução dos seus problemas. Ela não se vincula nem com o tipo de solventes que se julgam mais verdes, nem com os usos mais impactantes dos solventes. Assim, percebe-se que há um problema eminentemente técnico com a problemática dos

¹⁰ Maior parte vem da indústria de óleo e combustíveis, seguida pelas tintas (CANADA, 2011).

solventes para o meio ambiente. A pesquisa acadêmica parece não ser a mais eficaz para resolver os problemas. Por isso, Jessop (2011) estabelece quatro desafios a serem resolvidos para que a pesquisa acadêmica sobre solventes verdes consiga alcançar a diminuição dos impactos ambientais (ou seja, aumente sua eficácia):

- Desafio 1: aumentar o espaço de alternativas de solventes verdes com diversas funções (próticos e apróticos), pois atualmente há poucas opções disponíveis para substituir os solventes tradicionais;
- Desafio 2: desenvolver e promover o uso de métricas de avaliação da benignidade ambiental dos solventes disponíveis, pois atualmente essa é uma prática pouco exercitada;
- Desafio 3: produzir solventes polares apróticos fáceis de serem separados, pois são dificilmente destiláveis (não são voláteis) e a sua extração dificulta tratamentos futuros;
- Desafio 4: eliminar a necessidade de destilação para relizar a separação de solventes, pois é um processo que consome energia e necessita de solventes voláteis.

Como vemos, as estratégias apontadas por Jessop (2011) passam pela recompatibilização entre as pesquisas sobre solventes e seu uso nos processos industriais (Desafio 1), pela busca de eficiência energética e segurança intrínseca dos solventes (Desafios 3 e 4) e pela criação e uso de metodologias que possibilitem avaliar a eficácia e eficiência do processo (Desafio 2), por exemplo, uso de métricas verdes (como será discutido a seguir).

3.4.2 Limites Técnicos da Sustentabilidade

Marques e Machado (2014) fazem uma análise das obras fundantes da QV, explorando seu entendimento de sustentabilidade, sua relação com a Química (Verde) e possíveis limitações. Eles argumentam que a QV nasce num contexto de emergentes preocupações com a degradação ambiental e com a defesa da busca pela sustentabilidade. Eles alertam para o fato de logo após a publicação do Relatório “Nosso Futuro Comum”, mais conhecido como “Relatório Brundtland” (WCED, 1987a), surgir a Química Verde, com foco na prevenção dos impactos ambientais.

Eles ressaltam que a indústria química adotou a busca pela sustentabilidade tanto porque é responsável por grande parte dos impactos ambientais ocorridos no século XX, quanto por ser a base produtiva que mantém o estilo de vida contemporâneo (MARQUES;

MACHADO, 2014). A Química é a ciência (e o ramo da indústria) responsável pela transformação material, que constitui a base da existência humana na sociedade de consumo. Ela produz remédios, vacinas, pesticidas, fertilizantes, tintas, combustíveis, etc., de forma que pensar em uma sociedade sustentável passa invariavelmente por pensar em uma prática química sustentável. Como resumem os autores: “a Química Verde é uma nova prática da Química que possibilita trazer a sustentabilidade para os processos e produtos químicos” (MARQUES; MACHADO, 2014, p. 130, tradução nossa).

Sustentabilidade é um conceito polissêmico que se apresenta também na forma de Desenvolvimento Sustentável, como exposto no Relatório Brundtland (WCED, 1987a). Para Hueseman (2003), a sustentabilidade é um estado em que toda a matéria e energia usada nos processos industriais são renováveis e cujo uso não excede a capacidade de renovação desses recursos. Também, considera-se como parte do estado sustentável, a sustentabilidade, o fato de os resíduos liberados no ambiente não excederem a sua capacidade de assimilação. É um entendimento substantivo de sustentabilidade, em que ela adquire uma finalidade em si (FREITAS; MARQUES, 2017).

O Desenvolvimento Sustentável, no entanto, se refere a um novo caminho de desenvolvimento da sociedade industrial, que coloca como alvo o alcance do estado sustentável. Mas aqui a sustentabilidade assume um papel adjetivo e instrumental (FREITAS; MARQUES, 2017): ela é a qualidade de um desenvolvimento, não a coisa em si. Ela transparece a ideia de que a continuação do desenvolvimento é a finalidade a ser alcançada, muito mais do que a sustentabilidade (do ambiente, por exemplo). Não obstante, Huesemann (2003) alerta que considerando essas definições de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, temos que considerar que a definição do Relatório Brundtland é vaga, limitada e contraditória, por tentar compatibilizar o crescimento econômico e a proteção ambiental.

Os argumentos utilizados pelo autor para criticar essa concepção de desenvolvimento sustentável se baseiam (HUESEMANN, 2003):

- Na dificuldade de mudar para um sistema econômico e industrial baseado somente em fontes renováveis de energia e matéria, o que nos obrigaria a usar somente energia solar;
- No ufanismo tecnológico, que considera que por meio da inovação tecnológica se pode melhorar a eficiência produtiva e reduzir os impactos ambientais, mas desconsidera a Segunda Lei da Termodinâmica, que impõem

o aumento da entropia e a degradação material e energética em qualquer processo irreversível;

- Na incompatibilidade de um ritmo de crescimento econômico avançado com a manutenção ambiental, de forma que nem a inovação tecnológica é capaz de impedir os impactos nocivos do crescimento ao meio ambiente.

Ao investigar, no entanto, como a literatura em Química Verde aborda o tema da sustentabilidade, Marques e Machado (2014) argumentam que seus principais autores não dão a devida importância às limitações termodinâmicas. Não obstante, surgem ideias sobre o papel da QV que podem incorrer em uma abordagem baseada na eco-eficiência (com a crença de que inovações tecnológicas possibilitam compatibilizar o crescimento econômico com a manutenção ambiental). Por exemplo, Mary Kirchoff sugere que a QV é uma ferramenta importante para o alcance da sustentabilidade, por meio de sua prática voltada para a redução de uso e descarte de substâncias perigosas e pela promoção do *design* ambientalmente benigno. Ela afirma, ainda, que “as inovações científicas devem desempenhar um grande papel para alcançar o desafio [da sustentabilidade]” (KIRCHHOFF, 2005, p. 238, tradução nossa).

Em uma investigação com pesquisadores químicos brasileiros nível 1 do CNPq acerca de suas compreensões sobre desenvolvimento sustentável, Marques *et al.* (2013, 2014) encontraram que a maioria dos pesquisadores concordam com o conceito cunhado no Relatório Brundtland, achando-o suficiente e eficiente, sem considerá-lo vago e contraditório. Sobre a opinião dos pesquisadores investigados sobre os a relação entre os limites termodinâmicos e o alcance da sustentabilidade, cerca de 40% dos respondentes não veem qualquer relação entre esses âmbitos.

A Segunda Lei da Termodinâmica é a descrição de um grande limite técnico para o alcance da sustentabilidade. Essa lei estabelece que, embora a energia se conserve, ela sempre passa de uma forma mais organizada para uma forma menos organizada, de forma que a sua capacidade para realizar trabalho é diminuída. Ou seja, para que algum trabalho seja realizado, tem de haver aumento da entropia e desgaste da energia útil (MARQUES; MACHADO, 2014). Entretanto, a grande desconsideração dos limites termodinâmicos para a sustentabilidade por parte dos químicos verdes pode dificultar uma avaliação correta de suas práticas, com relação aos resultados efetivos que elas desempenham na proteção ambiental. A

sustentabilidade precisa ser encarada como um conceito ideal, ao qual procuramos, mas reconhecemos nossos limites em alcançá-lo.

Não obstante, considerar a limitação termodinâmica da sustentabilidade nos leva a reavaliar as estratégias disponíveis e eficazes para buscar o estado sustentável, o que passa por rever a ideia de crescimento econômico ilimitado e do estilo de vida contemporâneo, fortemente dependente do consumo. Isso desloca o foco das estratégias de inovação tecnológica para a questão social e cultural. Não se trata somente de desenvolver tecnologias material e energeticamente mais eficientes, mas também de mudar a forma como a sociedade se relaciona com esses bens e serviços produzidos pela química, até porque a inovação tecnológica não garante a preservação ambiental ou bem-estar social, conforme discussões na seção 4.2.1 Valores Práticos da Química Verde. Assim, espera-se melhor compatibilizar os três pilares que sustentam a sustentabilidade: economia, ambiente e sociedade.

Em última instância, a consideração dos limites entrópico leva à ideia de decrescimento (LATOUCHE, 2012). O pensamento parece impactante, mas não se trata de voltar atrás ou regredir em nosso estilo de vida. A questão é redistribuir as riquezas já geradas e melhorar nossa relação com o mundo, compatibilizando (tanto quanto possível) a economia e o ambiente (LATOUCHE, 2009). Se considerarmos que a degradação entrópica nos conduzirá para o esgotamento dos recursos materiais e energéticos, só podemos diminuir o ritmo dessa destruição, decrescer, portanto. As estratégias para o decrescimento encaram a sustentabilidade criticamente, como uma utopia concreta. Enquanto utopia, é horizonte jamais alcançado; como concretude, diz que alguma aproximação é possível, por meio de oito ações: reavaliar, reconceituar, reestruturar, redistribuir, realocar, reduzir, reutilizar, reciclar (LATOUCHE, 2009). A ideia básica do decrescimento é compatibilizar o uso dos recursos naturais tanto quanto possível com a capacidade de regeneração das fontes renováveis; incorporar os impactos ambientais no preço dos produtos; regionalizar a produção, de forma a criar comunidades que subsistem pela própria atividade e; transformar a cultura do consumismo, de forma que a inovação tecnológica se converta verdadeiramente em bem-estar e ócio para a população (LATOUCHE, 2009, 2012).

Aqui também se apresenta o problema de como avaliar a eficiência de uma prática quanto a sua sustentabilidade, entendida como a redução ao mínimo dos impactos ambientais. Torna-se imprescindível, portanto, o desenvolvimento de métricas de avaliação que não somente avaliem o impacto ambiental (toxicologia, degradação material e energética, por exemplo). Mas também é necessário considerar o aspecto econômico e social, sobre a divisão das riquezas geradas e o bem-estar humano. Complexifica-se a questão das métricas.

Como veremos a seguir, as métricas desempenham um papel central para a avaliação da eficácia e eficiência da Química Verde. A questão relativa às métricas retoma e sintetiza os principais desafios até agora apontados, apontando os limites técnicos e as possibilidades de ação dos químicos.

3.4.3 Métricas da Química Verde: avaliação da eficiência

Um dos grandes marcos da QV foi a formulação dos seus 12 Princípios, lançando as bases do que é entendido como uma prática verde (ANASTAS; WARNER, 1998). Machado (2012), porém, argumenta que os 12 Princípios apresentam uma abordagem mais qualitativa e são incipientes em oferecer uma avaliação quantitativa dos processos químicos industriais. Para isso, formularam-se os Segundos 12 Princípios, mais voltados à implementação industrial da QV, elegendo em seu princípio de número 21 a necessidade de considerar a avaliação da eficácia ambiental dos processos: “Deve-se tentar avaliar o melhor possível, quantitativamente, mediante métodos tanto quanto possível padronizados, o grau de sustentabilidade que possa ser obtido no processo industrial, após escalamento”. (MACHADO, 2012, p. 1255).

De modo genérico, uma métrica assume papel puramente técnico de auferir ou avaliar alternativas possíveis e propor o método mais adequado para alcançar um determinado fim. Decorre, portanto, que a métrica é um sistema de avaliação da eficiência, em seus múltiplos âmbitos (ambiental, econômica, de tempo de produção, etc.). Conforme sintetiza Machado (2014, p. 37, grifos do autor), a métrica “é um sistema de avaliação do funcionamento de um sistema dinâmico complexo que permita aferir o modo como ele opera, especificamente quanto ao cumprimento dos respectivos objetivos, isto é, um sistema de *medição da performance* do sistema”. A avaliação de um processo químico é uma tarefa complexa, pois envolve pensar em todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração de sua matéria prima, transformações industriais, até o consumo e destino final. Mas também há uma série de fatores que podem (e devem) ser avaliados durante toda essa cadeia (produtiva), desde as métricas clássicas da Química (economia, rendimento e seletividade), as métricas de massa (evitar a geração de resíduos) até as métricas ambientais (que avaliam o impacto do processo global no ambiente) (MACHADO, 2014).

Em 2012, Machado (2012) avaliava que o uso das métricas estava ainda em seu início, mas apresentava-se como um campo de estudo e de práticas necessário e crescente. Em 2014, o autor relata uma série de iniciativas que visam a alavancar o uso de métricas verdes

entre os praticantes da QV. Tem especial destaque um grupo de trabalho que reúne diversas empresas farmacêuticas sob coordenação do *Green Chemistry Institute* da ACS para promover a QV em suas áreas de atuação — o *Pharmaceutical Roundtable*. Uma das decorrências desse trabalho conjunto foi a sugestão que a revista *Organic Process Research & Development* (ACS) passasse a encorajar os seus autores a reportarem os valores de métricas da verduza dos processos que eles estavam comunicando. De forma semelhante, Machado (2012) relata que as revistas *Green Chemistry Journal* (publicada pela *Royal Chemical Society*) e *Green Chemistry Letters and Reviews* (da *Taylor & Francis*) também fizeram a sugestão para seus autores divulgarem as métricas de avaliação da verduza de seus processos, o que não se encontram mais nos portais eletrônicos das revistas.

A avaliação da eficiência de um processo é parte constituinte da racionalidade prática, diretamente vinculada ao seu âmbito técnico. Entretanto, Eckelman (2016) ressalta que a QV é mais baseada em princípios de *design*, sendo necessárias métricas de avaliação da implementação dos processos. As métricas mais usuais para avaliação da QV e sustentabilidade, como a LCA por exemplo, focam majoritariamente em indicadores de emissão de poluentes (ECKELMAN, 2016; SHELDON, 2017), principalmente gases do efeito estufa, e mais recentemente na toxicidade intrínseca de reagentes, produtos e processos, como a proposição de Eckelman (2016) para a toxicidade inerente dos ciclos de vida. A solução para esse impasse pode ser a modelização computacional dos processos e produtos projetados pela QV. A simulação computacional foi um procedimento decisivo para apontar as relações causais entre a emissão de clorofluorcarbonos e a diminuição da camada de ozônio (HAAS, 1992a), mostrando a sua relevância para abordar a complexidade das relações ambientais.

Embora QV e métricas ambientais, ou de sustentabilidade, pareçam estar muito entrelaçadas no âmbito da racionalidade técnica, essa relação não é tão efetiva na prática. É raro encontrar trabalhos que fazem propostas de processos verdes e avaliem consistentes suas propostas, sendo que a tendência é fazer uma avaliação mais qualitativa e em nível laboratorial. Polshettiwar e Varma (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a, 2010b) reconhecem a dificuldade de ampliar os processos desenvolvidos em laboratório para a escala industrial, o que exigiria uma avaliação e, portanto, métricas adequadas a esse novo contexto. Conforme abordaremos (seção 4.2.1 Valores Práticos da Química Verde), a QV incluiu apenas o valor de prevenção dos perigos intrínsecos (toxicidade e perigos físicos) em seus anos iniciais (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996), sendo que a prevenção aos resíduos aparece posteriormente na formulação dos 12 Princípios (ANASTAS; WARNER, 1998). A

consideração dos resíduos na prevenção pode ter decorrido do próprio campo das métricas de massas, já que o conceito de Economia Atômica foi publicado por Barry Trost em 1991 (TROST, 1991) e o de Fator Ambiental (E-Factor) por Roger Sheldon em 1992 (SHELDON, 2017). Sheldon (2017) ressalta que o objetivo das métricas de massa era mostrar que a ineficiência de muitos processos químicos em batelada é a fonte da grande quantidade de resíduos formados pela indústria química, especialmente a indústria farmacêutica e de química fina. Esse fato nos leva a crer que foram os próprios resultados de aplicações de métricas que promoveram a prevenção da geração de resíduos como um valor ambiental na QV. De fato, o segundo princípio da QV se resume ao conceito de Economia Ambiental (ANASTAS; WARNER, 1998; ANASTAS; EGHBALI, 2010).

As métricas de eficiência de massa, como o E-Factor, Economia Atômica, Intensidade de Massa de Processo, entre outras, são adequadas para avaliar a quantidade de resíduo formado e o aproveitamento dos materiais para constituição do produto de interesse. Entretanto, ela não fornece indicadores eficazes para avaliar o impacto desses resíduos no ambiente, pois é certo que 1 tonelada de cloreto de sódio não tem o mesmo impacto ambiental que 1 quilo de sal de cromo (SHELDON, 2017). A partir dessa consideração, diversas estratégias para adaptar as métricas ou mesmo a criação de novas métricas têm sido empreendidas para abordar a avaliação da toxicidade e perigos intrínsecos aos produtos e processos. Aqui, parece ter havido uma relação produtiva e sinérgica entre o campo da QV e das métricas: as métricas mostraram para a QV a importância da eficiência de massa dos processos para reduzir os resíduos e a QV mostrou para o campo das métricas a importância de considerar a periculosidade na avaliação da quantidade de resíduos.

Com a crescente busca pela sustentabilidade, os pesquisadores têm se questionado sobre uma métrica efetiva para sua avaliação. As métricas de massa e periculosidade acabam focalizando mais a dimensão ambiental da sustentabilidade e também no contexto da transformação industrial (*gate to gate*). A Análise de Ciclo de Vida (LCA) foi proposta como uma alternativa para possibilitar a avaliação da extração, transformação, uso e descarte de um material (*cradle to grave* ou *cradle to cradle*), incorporando na dimensão ambiental as considerações econômicas e sociais (SHELDON, 2017). O problema é que essa ainda é uma análise muito complexa e faltam informações disponíveis sobre o impacto de várias substâncias e processos (RAFIAANI *et al.*, 2018; SIERRA; YEPES; PELLICER, 2018), devido ao problema já abordado acima, de processos inovadores que ainda não foram implementados e seus impactos não foram estudados, mas também da própria dificuldade em definir indicadores que podem ser quantitativamente mensurados, como os indicadores da

dimensão social (BOSTRÖM, 2012), conforme discutido na seção 5.1.2 Métricas verdes e indicadores sociais. A própria complexidade se manifesta na ideia de “ciclo de vida,” pois é preciso definir onde começa e onde termina a vida do produto, o que delimitará a extensão e complexidade da análise. O resultado da avaliação muda bastante se o processo a ser considerado leva em conta apenas a transformação material na indústria (*gate to gate*) ou expande a avaliação até a extração do recurso natural (*cradle to gate*). Ainda, a avaliação do uso e descarte dos processos é mais complexa, pois têm maior interação com questões sociais, políticas e aspectos culturais, como os padrões de consumo das sociedades. Conforme aponta Debref (2012), a dificuldade com as questões sistêmicas é justamente definir os limites do sistema em questão.

Um ponto importante de análise sobre a questão das métricas é o significado da própria avaliação em si. Conforme Kalberg (1980), a racionalidade instrumental (formal) é aquela obcecada pelos números e pela quantificação, calculados a partir de regras criadas por outros indivíduos e que não refletem nem se compatibilizam com os valores do sujeito. Assim, a avaliação de tecnologia é um campo de estudo que envolve muita a discussão da tecnocracia e da racionalidade instrumental. Ela pode se basear em abordagens que consideram a superioridade dos especialistas em avaliar uma inovação tecnológica quantitativamente, em geral, ou considerar a pluralidade de valores e a expansão do espaço de alternativas que pode ser conquistada pelo debate amplo com a sociedade.

Enquanto estratégias de avaliação tecnológica, podemos citar a *Constructive Technology Assessment* (CTA), surgida dentro do movimento CTS, principalmente na Dinamarca, Holanda e Alemanha. Seus proponentes (SCHOT; RIP, 1997; VAN DEN ENDE *et al.*, 1998) acreditam que o curso tecnológico é socialmente determinado e defendem, portanto, a ampliação do processo de decisão, incluindo o máximo possível de atores sociais relevantes, objetivando um alinhamento ótimo entre desenvolvimento tecnológico e social. Conforme discutiremos na seção 5.1.4 Participação social democrática na atividade científica, a participação social na definição da agenda de pesquisa e na regulação da atividade científico-tecnológica pode contribuir para enriquecer as práticas, os valores e os resultados ambientais e sociais da QV.

3.5 TEORIA E PRÁTICA: UNIDAS

Para Agazzi (1996) e Ferré (1995b), a diferenciação entre racionalidade teórica e racionalidade prática não passa de um artifício formal. Na realidade, essas duas inteligências

agem de forma inter-relacionada, ou seja, teoria e prática estão unidas. Não há como pensar a ciência moderna como apenas fruto da inteligência teórica e, de forma análoga, a tecnologia moderna como consequência apenas da inteligência prática. Nas palavras de Ferré: "A ciência moderna, como tem se desenvolvido desde o século XVII, é o produto das inteligências prática e teórica, assim como o é a tecnologia moderna. Nenhuma [ciência ou tecnologia] deu à luz a outra. Elas são gêmeas não-idênticas dos mesmos pais" (FERRÉ, 1995b, p. 44).

Monasterín (2008) argumenta, igualmente, que a racionalidade teórica subjaz à racionalidade prática, sendo que a racionalidade prática pressupõe a racionalidade teórica. É necessário estar consciente de suas crenças sobre um fenômeno para empreender uma ação. O contrário, todavia, não é preciso, pois é possível ter uma crença racional sem empreender uma ação, ou sem ter o conhecimento dos meios necessários para implantá-la.

A união das inteligências teórica e prática possibilitou expandir as possibilidades da inteligência prática em suas diversas dimensões (FERRÉ, 1995a, 1995b): interesses, objetivos, meios, significado de sucesso e explicitação. Os quais passamos a expor a seguir.

Sobre os interesses e objetivos, a racionalidade prática, interessada apenas em alcançar seus fins, ganha da racionalidade teórica a disciplina mental para aplicar e desempenhar sua atividade. Quanto aos objetivos, a racionalidade prática quer que seja *eficaz*, mas ganha da racionalidade teórica a possibilidade de explorar a *eficiência*: de melhorar os resultados e aplicar o método em outras situações. Ao entender como as coisas funcionam, a Razão vislumbra novas possibilidades a partir dos métodos práticos tradicionais e novos métodos são possíveis - "a busca deliberada de invenções começa" (FERRÉ, 1995b, p. 39, tradução nossa).

A Química, cujas proto-ideias remetem aos laboratórios dos artesões e alquimistas, não teria se configurado como uma ciência se não passasse a disciplinar (dar ordem) às suas práticas e ideias. Os estudos de classificação dos materiais e as análises de substâncias permitiram ao químico expandir o seu poder de transformação de alguns materiais para virtualmente todos os materiais existentes e criar uma miríade de outras substâncias. Podemos dizer, então, que a racionalidade prática deu o objetivo à química em produzir, sintetizar, mas foi a racionalidade teórica que dotou a prática de sistematização e da disciplina necessária para desenvolver sua atividade.

Os meios desenvolvidos pelas duas racionalidades também se reforçam elas são aplicadas em conjunto. A racionalidade prática procura apenas satisfazer suas necessidades com simplicidade. A racionalidade teórica quer o detalhamento, a precisão e a exatidão. A junção das duas resulta numa racionalidade prática em que a eficácia não é mais o suficiente:

os resultados têm de ser precisos e as falhas têm de estar num valor exato. Os padrões da racionalidade teórica podem ser eventualmente ideais e impossíveis de atingir (devido a seus detalhes), mas são importantes para disciplinar a racionalidade prática.

Tais padrões podem ser, por exemplo, a incorporação das medidas dentro das atividades químicas e sua importância para a criação da experimentação na Química — Lavoisier seria um bom exemplo. Na QV, o padrão pode ser a síntese benigna, a busca por resultados eficazes (desempenhando uma finalidade) evitando falhas ambientais, conforme ressaltam Anastas e Williamson (1996, p. 2):

O que está sendo discutido quando o termo *design* benigno ou química ambientalmente benigna é usado é simplesmente um ideal. Buscar fazer a Química mais benigna sempre que possível é meramente um objetivo. [...] Química benigna é meramente uma afirmação que coloca o objetivo na perfeição (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 2, tradução nossa).

Quanto ao sucesso de uma atividade, ele não tem mais apenas a ver apenas com o resultado das ações (racionalidade prática), tem que estar de acordo com os ideais da racionalidade teórica de verdade e entendimento. A racionalidade teórica não jaz na eficácia de um método (não perpetua o obscurantismo pragmático — o apego irracional às práticas consolidadas), ela quer saber como funciona e seguir o caminho "real". O conhecimento vulgar, meramente tácito e prático, não é mais tolerado. Cada componente de um sistema técnico tem que ter sua contribuição explicitada. Mesmo a ação individual tem de ter sua participação detalhadamente clara, de forma que o funcionamento possa ser descrito e repetido.

O desenvolvimento da experimentação nas ciências em geral é um dos exemplos mais visíveis desse novo ideal de explicitação e de sucesso das racionalidades: não basta apenas produzir um fenômeno, é necessário entender a sua causa e as inter-relações que geram os resultados. Llored (2016) explora esse conceito ao falar da interdependência do objeto da Química de seu contexto, dos instrumentos de investigação e dos níveis de análise, de forma que a Química gera um conhecimento que não só produz novas substâncias, mas mostra a sua interdependência com a técnica, com o meio reacional e com níveis diferentes de análise, fazendo uma síntese integrada entre propriedades macroscópicas e submicroscópicas.

No entanto, nessa união de teoria e prática, a experimentação não tem apenas papel instrumental e acessório. O experimento representa um diálogo entre a teoria e o mundo. Ele deve satisfazer os requisitos da teoria, mas também deve se adequar ao mundo para que produza algum efeito (LELAS, 1993). Como coloca Feenberg (2006), um dispositivo já

contém em si uma ideia e uma finalidade, que é trazida à tona pelo seu criador. Esse agente, que também pode ser chamado de *designer*, tem que usar um princípio teórico geral para realizar uma organização particular da matéria no mundo, permitindo que a energia flua e produza um resultado, de forma que há um saber tecnológico ligado às condições de aplicação em um contexto particular (JARVIE, 1966), que pode seguir critérios variados de eficiência (SKOLIMOWSKI, 1966). O que Jarvie, Skolimowski e Lelas alertam é o fato de que a tecnologia não é mera aplicação teórica e que existem conhecimentos específicos desenvolvidos pela prática tecnológica.

O grande ganho da racionalidade prática ao se unir com a racionalidade teórica é sair de sua condição de “eficaz no contexto” e alastrar seus métodos por diferentes contextos, por meio da visão sinóptica (de sinopse) da teoria. Contudo, a racionalidade teórica tem entre uma de suas características uma falha: a falta de uma base para a escolha. A racionalidade teórica pode criar especulações brilhantes sobre a realidade, mas não oferece em si mesma um critério para avaliar a validade dessas especulações. Aqui entra a contribuição da racionalidade prática, pois ela fornece um caminho para pôr em prática uma teoria, de forma que teoria e artefato passam a existir juntos: o barômetro só existe para provar a pressão atmosférica; a luneta ganha seu uso astronômico no estudo do movimento dos planetas. Por meio dos artefatos, a inteligência teórica ganha o que lhe faltava para testar as suas brilhantes especulações, de forma que "A ciência moderna seria impensável sem seu incorporamento em instrumentos e aparatos" (FERRÉ, 1995b, p. 44).

Agazzi (1996) sintetiza as contribuições que a união entre racionalidade teórica e racionalidade prática trouxe:

- Refinamento da escala da racionalidade teórica (uma mudança qualitativa da cognição): agora ela alcança o microscópico e obtém detalhamento minucioso, com o auxílio dos microscópios, por exemplo. Mas também alcança a inclusão global, por meio dos telescópios, dos espectrômetros, alcançando o quase infinitamente grande. Mas também conseguiu, com a racionalidade prática, alcançar aquilo que não tinha pensado antes, que a mente puramente especulativa não tinha como alcançar, como a radiação (contador Geiger, raio-X).
- Novos meios para viver "bem e melhor" (mudança quantitativa): as tecnologias baseadas em teorias forneceram meios para multiplicar as possibilidades da vida

humana na terra. A população mundial cresceu grandemente em virtude disso, embora a qualidade de vida não seja garantida a todos, infelizmente.

Em suma, tentamos focalizar nossa análise na distinção entre racionalidades, movimentos da razão que se alternam entre teoria e prática. Uma distinção rígida entre ciência e tecnologia se mostraria problemática, devido ao imbricamento desses campos na contemporaneidade e a pouca exploração filosófica dessa complexidade. Como alerta Schummer (1997), a ciência praticada hoje é muito diferente daquela ciência e tecnologia proposta por Aristóteles: os objetos agora são quase todos mutáveis e o método é diferente — experimental. Também, os fins e a atividade das ciências contemporâneas são diferentes da ciência e tecnologia aristotélica: as teorias são submetidas ao teste experimento até a exaustão e não são apenas constructos teóricos; a atividade científica também se estabelece em redes de cooperação e em fronteiras disciplinares cada vez mais tênues (como é o caso da QV), o que dificulta dizer qual o objetivo do conhecimento produzido (para a evolução da própria área, do campo, das interdisciplinaridades? Para a síntese de produtos em si? Para aplicações socialmente relevantes?). A química recorre a diversos métodos de raciocínio e justificação de suas teorias, de forma que a separação entre ciência teórica pautadas em leis e tecnologia que lida com sistemas complexos e específicos ou apenas a eficiência não faz sentido para a pluralidade metodológica aplicada nas ciências contemporâneas. Também a ideia de que a ciência descobre e propõe leis e que a tecnologia inventa e cria regras para o *design* não ajuda a fazer distinções, pois elas se baseiam em pressupostos filosóficos sobre como se dá a atividade de pesquisa ou por critérios arbitrários do que são regras e leis científicas.

Corroboramos as ideias de Schummer (1997a) que uma distinção entre ciência e tecnologia tem que ser desenvolvida baseada na forma em que a ciência e tecnologia são desenvolvidas atualmente. Também não faz sentido descrever ciência e tecnologia como uma atividade indiferenciada, pois isso não melhora a nossa capacidade de entender, descrever, explicar e agir sobre a ciência e tecnologia. Nosso intuito em explorar as formas de racionalidade subjacentes à Química (Verde) foi o de mostrar a pluralidade e complexidade do raciocínio químico, contribuindo para o melhor entendimento sobre a prática química e possibilitando a emergência de novas reflexões sobre o fazer e o ensinar a Química (Verde).

4 VALORES NA QUÍMICA VERDE: considerações da ética

No capítulo anterior, discutimos a presença da racionalidade prática na Química e na Química Verde. Vimos que diversos autores recorrem à história da Química e à própria atividade química atual para mostrar uma imagem mais complexa e realista dessa ciência. A ideia de que a ciência seja apenas contemplação e explicação do mundo (racionalidade teórica) se mostra insuficiente para descrever a complexidade da Química (Verde), uma área-atividade que apresenta, além de seu *status* científico, uma aproximação com a engenharia e o *design* (ANASTAS; WARNER, 1998; ANASTAS; EGHBALI, 2010).

Como vimos, um grande traço distintivo da racionalidade prática é a finalidade fora de si e a exploração das possibilidades de existência — mais do que dizer *o que é*, diz *o que poderia ser*. Ao adentrar no campo das possibilidades, a razão procura os meios para atribuir uma causa, uma intenção, para aquilo que é possível. “Por que devo fazer? Por que devo agir dessa forma?” São questões que a racionalidade prática se faz e uma vez estabelecidas suas respostas ela se pergunta: “Como fazer? Como realizar a minha intenção?” Assim, a prática (do grego *práxis*) atua de duas formas, no julgamento do dever em realizar uma ação e no julgamento dos métodos necessários para alcançá-lo (AGAZZI, 1996). O primeiro âmbito é o que se relaciona com ética e política, o segundo é o que se relaciona com a técnica. Uma vez que a *práxis* demanda uma racionalidade voltada para as questões morais e aos valores da ação, quais são os valores atribuídos pelos químicos verdes à sua prática? Esses valores têm possibilidade (ou poder) para serem colocados em prática?

Nesse sentido, este capítulo discute os valores na prática da QV em seu aspecto mais ético. Essa discussão é importante para entender quais os objetivos da QV e os argumentos que os químicos verdes usam para justificar suas práticas, o que contribui para entendermos a influência da racionalidade prática para a evolução desse campo e, posteriormente, a compreendermos como a QV e o Ensino de Químico podem se relacionar. Iniciamos a discussão por discutir o que são os valores, seus tipos e suas características na seção **4.1 Valores na Prática Científica**. Na seção **4.2 Valores da Prática em Química Verde**, analisamos o *corpus* analítico em busca de indícios dos valores práticos e teóricos da QV. Finalmente, na seção **4.3 Tensões nos Valores da Química Verde** fazemos uma síntese do sistema de valores presente na QV e discutimos algumas tensões entre eles, reforçando aspectos discutidos no âmbito político.

4.1 VALORES NA PRÁTICA CIENTÍFICA

A ciência e a tecnologia podem ser consideradas tanto como um sistema de conhecimentos: o *saber o quê (know-what)* da ciência e o *saber como (know-how)* da tecnologia. Mas também *designam a atividade* do pesquisador/cientista e do tecnólogo/engenheiro, aqueles que efetivamente fazem ciência e tecnologia respectivamente. Assim, quando se fala *a* ciência ou *a* QV está se fazendo referência a uma atividade desenvolvida por sujeitos sociais com um corpo de conhecimentos historicamente estruturado. Sobre um sistema de conhecimentos não há como estabelecer juízos morais (qual conhecimento é bom e qual é mau), senão juízos de valores epistêmicos (qual conhecimento é verdadeiro ou falso, provável ou improvável, exato ou inexato, etc.). Também sobre os conhecimentos da tecnologia não há como estabelecer juízos morais, senão os juízos de valores técnicos (qual conhecimento é mais eficaz ou eficiente). Entretanto, ao se considerar a prática desenvolvida pelo cientista ou engenheiro/tecnólogo, ela pode ser moralmente avaliada.

Agazzi (1996) define um juízo de valor como uma consideração do *dever ser*, próprio da racionalidade prática. Em sentido semelhante, Cupani (2007, p. 116) define os valores como "aquelas preferências enunciadas em forma de imperativos ou de enunciados incondicionais". Cupani (2007) cita Hempel (1965) para diferenciar entre juízos de valor categóricos e instrumentais. Os juízos de valor categóricos são normativos, prescritivos, e apresentam-se na forma de argumentos do tipo “x é bom”, “x é justo”, “deve-se fazer x”, sendo característicos da vida moral e da teoria ética. Já os juízos de valor instrumentais são descritivos, indicam os meios pra alcançar determinados fins, são regras de ação passíveis de teste. Por isso, são os valores considerados em juízos de conhecimentos científicos e técnicos, pois permitem justificar a validade de um conhecimento científico ou testar a eficácia de um projeto técnico: “para alcançar x, deve-se fazer y”.

Sobre a presença de valores categóricos na prática científica e tecnológica, Cupani (2007) disserta que eles se apresentam na motivação para a pesquisa, na metodologia de pesquisa e apenas de forma indireta no produto científico (conhecimento). Na motivação, os juízos de valores são aplicados individualmente ou socialmente, na forma de uma predileção do pesquisador por uma linha de pesquisa ou na forma de linhas de pesquisa legitimadas e promovidas socialmente (por meio de regulação, proibição e promoção de linhas, por vias públicas ou privadas). Na metodologia, os valores instrumentais são mais fortes. Entretanto, há também valores categóricos, que condicionam a percepção do sujeito para o que pode ser

considerado como evidência e também na forma de leitura e interpretação das informações. Isso é semelhante ao que Fleck (2010) diria sobre as conexões ativas, as condições socialmente dadas, que direcionam o pesquisador para conhecer a realidade. Já no produto da prática científica, o sistema de conhecimentos, os valores categóricos assumem um sentido semântico-pragmático, fazem parte de qualificadores da prática científica e do valor intrínseco do conhecimento, mas não constituem o valor que justifica sua validade ou verdade. Os valores categóricos estão indiretamente relacionados.

Echeverría (2003) propõe um sistema axiológico, de aspecto formalista e sem base empírica, para avaliar os valores. Ele estabelece 12 categorias para valores, embora não negue a possibilidade de serem analisados de forma diferenciada. Essas categorias são:

1. Valores básicos: alegria, amor, bem-estar, crescimento, felicidade, força, grandeza, interesse, maturidade, prazer, prudência, saúde, segurança, seriedade, vida, etc.;
2. Valores religiosos: autoridade, caridade, devoção, divindade, esperança, fé, graça, hierarquia, mistério, obediência, piedade, pureza, respeito, etc.;
3. Valores militares: altruísmo, dever, disciplina, fidelidade, hierarquia, heroísmo, lealdade, patriotismo, obediência, segredo, vitória, triunfo, etc.;
4. Valores morais: altruísmo, amizade, autonomia, benevolência, bem, bondade, compaixão, dignidade, fidelidade, generosidade, gratidão, honestidade, prudência, respeito, responsabilidade, tolerância, verdade, virtude, etc.;
5. Valores estéticos: harmonia, beleza, clareza, correção, criatividade, prazer, elegância, equilíbrio, originalidade, sensibilidade, sutileza, etc.;
6. Valores sociais: antiguidade, cooperação, diligência, estabilidade, excelência, êxito, fama, fraternidade, gênero, igualdade, intimidade, liberdade, mérito, nobreza, ordem, paz, prestígio, profissionalidade, reconhecimento, segurança, solidariedade, etc.;
7. Valores políticos: autonomia, autoridade, controle, democracia, estabilidade, hegemonia, governabilidade, igualdade, independência, justiça, liberdade, maioria, ordem, paz, poder, prudência, representatividade, respeito, tolerância, etc.;
8. Valores jurídicos: autonomia, clareza, equidade, formalismo, durabilidade, estabilidade, garantias, imparcialidade, independência, justiça, legalidade, legitimidade, liberdade, publicização, representatividade, segurança, transparência, universalidade, etc.;

9. Valores econômicos: benefício, qualidade, comércio, competitividade, custo, desenvolvimento, eficácia, generosidade, liberdade, maximização, propriedade, rentabilidade, riqueza, etc.;
10. Valores ambientais: biodiversidade, conservação, equilíbrio, não-poluição, minimização de impactos, renovabilidade, sustentabilidade, etc.;
11. Valores técnicos: aplicabilidade (eficácia), competência, correção, durabilidade, eficiência, confiabilidade, flexibilidade, habilidade, inovação, integrabilidade, rapidez, robustez, sensibilidade de uso, utilidade, versatilidade, etc.;
12. Valores epistêmicos: adequação empírica, clareza, coerência, contrastabilidade, fecundidade, generalidade, engenhosidade, inteligibilidade, originalidade, precisão, publicização, reprodutibilidade, rigor, simplicidade, verdade, verificação, verossimilhança, etc.

Os valores, não infreqüentemente, estão organizados na forma de sistemas, aos quais o sujeito adere, de forma livre ou por imposição hierárquica. A atribuição racional de uma finalidade e uma justificação para esse sistema de valor é uma questão da ética (AGAZZI, 1999). Seguindo a filosofia aristotélica, um juízo moral pode ser estruturado logicamente, partindo da descrição da situação (*o que é*), seguido do estabelecimento de uma premissa prescritiva (valor ou sistema de valores que embasa a ação) e uma conclusão normativa (*o que deve ser*) (MEHLICH *et al.*, 2017). Na descrição da situação pode entrar o conhecimento científico, uma descrição do que é o mundo. Porém, a prescrição de valor é definida culturalmente e justificada eticamente. A partir da adoção de um valor, pode-se invocar os conhecimentos da técnica (valores instrumentais) para encontrar os melhores meios para alcançar esses valores. Essa é uma consideração importante para a forma de análise dos artigos feitas a seguir. Os químicos verdes não vão dizer seus valores diretamente, na forma de “x é bom” ou “meu valor é x”. Eles vão usar os valores em suas argumentações, na justificação e defesa de suas práticas.

Ao se considerar a racionalidade como a atribuição de finalidade e justificação de uma ação (teórica ou prática), vê-se que para uma atividade ser realmente racional ela deve considerar a sua consistência teórica, moral e técnica, pois a própria argumentação racional da moral invoca a cooperação das racionalidades teórica e prática (MEHLICH *et al.*, 2017). Também, a própria prática científica e tecnológica incorpora a justificação de seus conhecimentos com base em valores epistêmicos e técnicos (respectivamente), mas também

exige a justificação moral da ciência e tecnologia como prática humana, desenvolvida pelos cientistas e engenheiros/tecnólogos.

Nesse sentido, ao considerar a QV como uma atividade que envolve a racionalidade prática, nos deparamos com a necessidade de refletir sobre como os valores (epistêmicos, técnicos, éticos, ambientais, etc.) são justificados pelos seus praticantes.

Vemos que a questão dos valores da atividade científica contemporânea se torna cada vez mais complexa. A Química tem uma vinculação histórica com a indústria e a QV continua esse legado ao propor uma revisão dos processos industriais e compatibilizar a prática ambientalmente benigna com a viabilidade econômica (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996). Chamizo (2013) aproxima a Química, como um todo, da tecnociência, pelo seu compromisso com a síntese e inovação. Embora não analisemos a extensão e força dessas relações entre a ciência¹¹, a tecnologia e o contexto econômico (principalmente industrial), consideramos que eles também estão imbricados na QV e contribuem para a complexidade dos valores considerados em sua prática. Nosso objetivo é fazer uma discussão desses diversos valores que parecem perpassar a QV, mas antes faremos uma incursão sobre o conceito de responsabilidade e considerações gerais sobre a moral da prática sintética dos químicos.

4.2 VALORES DA PRÁTICA EM QUÍMICA VERDE

No relato de uma pesquisa científica diversos valores se fazem presentes, estejam eles explícitos na argumentação do texto ou subentendidos na própria prática científica e na sua comunicação. Ao se publicar um texto, as revistas geralmente requerem ineditismo, coerência metodológica e teórica, tanto interna quanto com a literatura prévia. Ou seja, há um sistema de valores mais ou menos homogêneo que é adotado durante a prática e comunicação científica em geral. Porém, analisaremos aqueles valores que são considerados diferenciais da prática em QV. Procuramos nos textos menções diretas ou indiretas de qualificadores que tornam a QV valorosa na visão de seus autores, qualidades que são valorizadas ou evitadas na QV. Assim, procuramos fazer uma exploração de possíveis práticas que os químicos verdes consideram boas ou más. A mencionada análise será realizada sobre o conjunto dos doze

¹¹ O conceito de tecnociência é polissêmico e apresenta graus diversos de amplitude. Echeverría (2003) ressalta a influência da política científica e do meio econômico na gênese e desenvolvimento da tecnociência. Pickstone (2005), referência de Chamizo (2013), enfoque a questão mais metodológica da prática tecnocientífica, seu vínculo com a síntese e inovação, abarcando tangencialmente o econômico. Lacey (2008) anda de forma mais transversal entre esses temas, ligando a atividade interna da ciência (sua metodologia e valores, principalmente) com valores e condicionamentos externos, ainda que não focalize numa análise política ou econômica (como faz Echeverría).

textos representativos dos *hubs* intelectuais da QV (Quadro 7, p. 54) e um texto representativo da autoridade intelectual do campo, o livro *Green Chemistry: theory and practice* de Anastas e Warner (1998), especialmente os capítulos 1 e 4.

4.2.1 Valores Práticos da Química Verde

Anastas e Warner (1998) mencionam no prefácio do livro *Green Chemistry: theory and practice* que a QV não é um julgamento moral da Química, visto que o corpo de conhecimentos da Química não é bom nem mau, são apenas explicações de fenômenos naturais regidos pelas leis da Física. Entretanto, os autores concordam que os químicos têm responsabilidade pelas suas ações, assim colocando o caráter moral na *prática* química. Se os conhecimentos da Química não estão sujeitos a julgamentos morais, a prática Química (a escolha das pesquisas, a forma como a pesquisa é feita e a aplicação de seus resultados) é sim moralmente criticável.

Houve uma mudança discreta nos valores da QV e na sua organização desde a sua emergência, o que fica bem evidente nas publicações de seu maior expoente e fundador, Paul T. Anastas. No livro em coautoria com Williamson em 1996, são apresentados os quatro componentes básicos da QV, um protótipo dos 12 Princípios que seriam publicados nos anos seguintes: 1) natureza da matéria prima, 2) natureza dos reagentes ou transformações, 3) natureza das condições de reações e 4) natureza do produto final. Em seguida, os autores apresentam os problemas e as soluções para cada componente (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996).

Matérias-primas e materiais de partida alternativos. O objetivo de utilizar matérias-primas mais benignas para o meio ambiente é reduzir o risco à saúde humana e ao meio ambiente, reduzindo os riscos desse material inicial. (p. 7)

Transformações sintéticas alternativas e reagentes alternativos. No objetivo de reduzir o risco para a saúde humana e o meio ambiente por meio da eliminação ou redução de substâncias tóxicas, existem oportunidades significativas para substituir produtos químicos mais benignos pelos reagentes necessários para realizar transformações específicas ou alterar as próprias transformações reais. (p. 9)

Condições de reação alternativas. [...] Muitos solventes, especialmente os solventes orgânicos voláteis amplamente utilizados, estão sujeitos a um maior escrutínio e restrição regulatória com base em preocupações com sua toxicidade e suas contribuições à poluição do ar e da água. É por essas razões econômicas e ambientais que grande parte da pesquisa e desenvolvimento em condições de reação da Química Verde é focada em solventes alternativos. (p. 11)

Produtos alternativos e moléculas alvo. O objetivo de projetar produtos químicos mais seguros é direto e extremamente complexo. É bem reconhecido que, em muitos casos, a parte de uma molécula que fornece sua atividade ou função pretendida é

separada da parte de uma molécula responsável por suas propriedades perigosas ou toxicidade. (p. 12)

O problema encontrado em todos os quatros componentes é a toxicidade e o perigo a acidentes (flamabilidade, explosão, volatilidade, etc.) e a proposta para a resolução desse problema é justamente mudar a *natureza* dos materiais e processos para evitar esses perigos. Os valores iniciais da QV, portanto, estavam ligados a evitar a toxicidade e evitar os perigos físicos, abrangendo as dimensões ambientais e de saúde. Isso parece ser decorrência da maneira diferenciada dos químicos verdes em encarar a gestão de risco, focalizando na diminuição dos perigos intrínsecos aos compostos e processos, nomeadamente a toxicidade e periculosidade física, em vez de pautar somente no controle da exposição. No fim do primeiro capítulo do livro *Green Chemistry: designing chemistry for the environment*, Anastas e Williamson (1996) abordam componentes que são fundamentais para a QV, mas que não são classificados nos quatro componentes básicos propostos, justamente por não abordarem perigos intrínsecos, incorporando agora aspectos como a economia atômica e a catálise, por exemplo. Essa afirmação dos autores corrobora que os primeiros valores da QV eram a prevenção da toxidade e dos perigos intrínsecos, conforme a influência do PPA.

Com a publicação da obra basilar da QV, *Green Chemistry: theory and practice*, Anastas e Warner (1998) introduzem e sistematizam outros valores na QV, que são repercutidos nas publicações de 1999 (ANASTAS, 1999; CLARK, 1999; VARMA, 1999) e discutidas no artigo de 2010 (ANASTAS; EGHBALI, 2010), todos aqui analisados. Os 12 Princípios incorporam a redução de resíduos, o uso de materiais renováveis e a eficiência material e energética como valores a serem praticados na QV (Figura 9) (ANASTAS; WARNER, 1998; ANASTAS; EGHBALI, 2010).

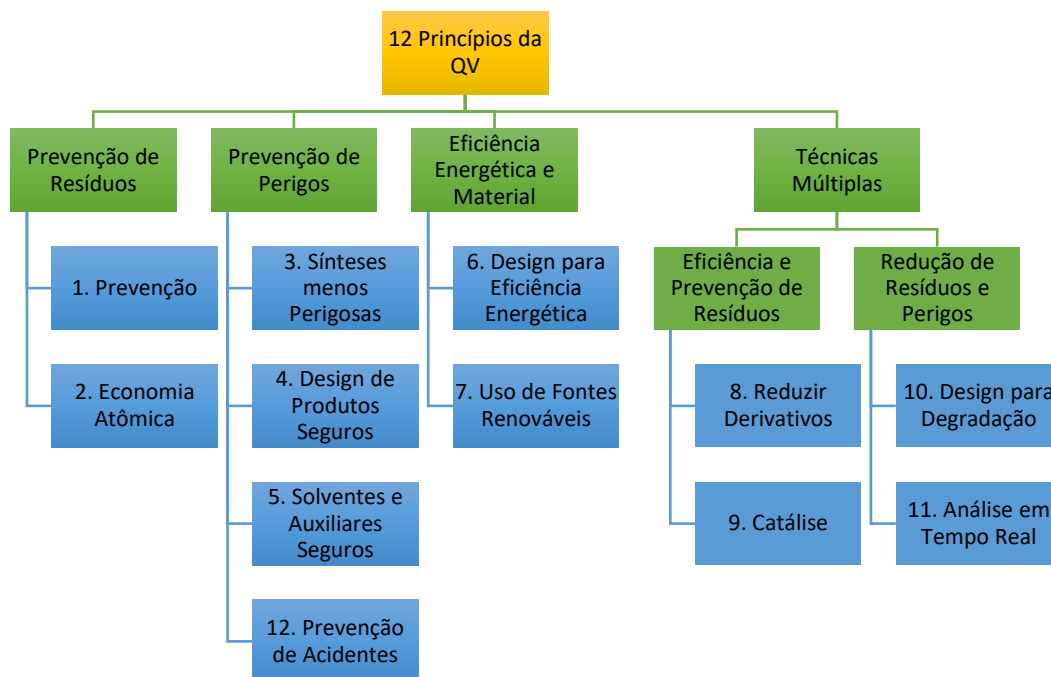


Figura 9: Valores associados aos 12 Princípios da Química Verde.
Fonte: os autores.

Conforme discutem Anastas e Warner (1998), os princípios 1 e 2 colocam a necessidade de prevenir a geração de resíduos, entendidos como qualquer material que não tenha seu valor realizado ou energia que não seja utilizada. Princípios 3, 4, 5 e 12 são os derivados dos 4 componentes básicos apresentados em 1996 (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996), colocando a necessidade de prevenir processos, produtos e auxiliares que sejam perigosos (fisicamente ou tóxicos). Os princípios 6 e 7 inserem um novo valor, a eficiência energética e material, a partir da consideração do problema do esgotamento dos recursos naturais, principalmente os derivados do petróleo. Esses princípios, do 1 ao 7, parecem se configurar como as regras gerais da QV das quais se derivam estratégias mais específicas. Princípios 8 e 9 abordam a questão da eficiência, empregando as regras de redução de resíduos e de renovabilidade de materiais. Princípio 10 aborda a questão da biodegradabilidade e biocompatibilidade, desenvolvendo a regra de não toxicidade. Finalmente, o princípio 11 chama a atenção para o papel da Química Analítica para o desenvolvimento da QV, tanto em processos analíticos verdes, quanto no monitoramento da veracidade de outros processos (ANASTAS, 1999), incorporando atenção aos perigos e geração de resíduos.

Os 12 Princípios colocam claramente os valores ambientais no âmbito da QV. Conforme aponta Llored e Sarrade (2016), o grande avanço da QV em relação à química

tradicional é a incorporação do ambiente como parte da prática e do conhecimento químico, de forma que os objetos da Química (Verde) são criados na relação com o meio reacional, as teorias e métodos utilizados pelos cientistas e o ambiente como um todo. Enquanto a prevenção (de resíduos, de toxicidade, de perigos) demonstra ser o valor principal da QV, outros valores também estão associados ao campo e não estão explicitamente colocados nos seus Princípios, é o caso da eficiência, eficácia e economia, geralmente inter-relacionados e usados como instrumentos para promover os valores ambientais explicitamente defendidos.

A eficácia diz respeito ao que é possível de acontecer, aproximando a racionalidade prática (o fazer) da racionalidade teórica (explicação do mundo). Na QV, a eficácia se apresenta tanto na defesa da possibilidade de realizar uma química benigna (eficácia ambiental), quanto na possibilidade de fazer uma química economicamente viável (eficácia econômica). A eficácia ambiental é mencionada nos primeiros trabalhos da QV e é usada como meio de convencer aos demais químicos que é possível fazer uma química ambientalmente benigna, sendo um valor direcionado à própria comunidade de químicos (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS, 1999). Os proponentes da QV recorrem a casos exemplares de sucesso acadêmico, à prêmios e aplicações industriais para mostrar a viabilidade da pesquisa em QV.

Para uma ampla variedade de produtos químicos, a atividade de um produto químico em questão no ambiente pode estar relacionada à estrutura molecular do produto, ou seja, como os átomos da molécula estão conectados. Com uma combinação de um conhecimento da natureza das propriedades perigosas de um produto químico com a capacidade de manipular a estrutura do produto químico, um químico possui a capacidade e a habilidade de atenuar o risco (ANASTAS, 1999, p. 170, tradução nossa).

Usando os extensos dados disponíveis sobre efeitos na saúde humana e impactos ecológicos para uma ampla variedade de produtos químicos e classes de produtos químicos, os químicos podem fazer escolhas informadas sobre quais produtos químicos seriam mais favoráveis para uso em uma síntese ou processo específico (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 2, tradução nossa).

O argumento de eficácia geralmente é estruturado da seguinte forma: a Química é poluente, então devemos prevenir a poluição (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS; WARNER, 1998; CLARK, 1999). O que não deve ser entendido como uma derivação valorativa (o que *deve ser*) a partir de uma descrição (o que *é*) do mundo. Existe um hiato entre *o que é* e *o que deve ser* que não pode ser integralmente preenchido pela lógica (CUPANI, 2007) — não dá para deduzir o que deve ser (enunciado categórico) a partir do que é (enunciados descritivos). Essa é a base da teoria crítica (NOBRE, 2004), de que os

enunciados das ciências sociais (nos moldes positivistas) não justificam a realidade social como ela deveria ser, apenas mostram, no máximo, como ela está.

A partir da constatação da Química como poluente, os químicos poderiam ter escolhidos não fazer nada, não enxergar a poluição como um problema. O fato de a poluição ser vista como um problema já indica que havia um valor prévio que a abomina (poluir é ruim) e que coloca a prevenção como algo valoroso (prevenir é bom). Anastas e Williamson (1996) recorrem à responsabilidade do químico para lidar com a poluição química que já era um fato, ou seja, os autores recorrem ao valor de responsabilidade e prevenção da poluição para promover a QV, ressaltando que a prevenção não é somente desejada, como também é possível. A poluição e acidentes químicos já estavam sendo considerados problemas há algum tempo, aparecendo diversas vezes no Relatório Brundtland como um problema, conforme relatam Marques e Machado (2014).

A eficácia econômica também aparece nos primeiros trabalhos da QV, mas ela está voltada a convencer aos industriais que a QV pode ser uma solução viável para eles (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS, 1999; CLARK, 1999; POLIAKOFF *et al.*, 2002; SHELDON, 2014, 2017). Essa argumentação também segue o padrão anterior, com o pesquisador recorrendo a casos exemplares da viabilidade econômica e do interesse industrial na QV, mas esse valor também aparece nos resultados de trabalhos mais específicos a estratégias verdes, como os trabalhos de Varma e outros pesquisadores (VARMA, 1999; POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a, 2010b; SÁ *et al.*, 2014) que estudam, propõem e avaliam catalisadores verdes, constantemente ressaltando os menores custos de sua estratégia.

Os químicos que trabalham para esse objetivo fizeram avanços dramáticos em tecnologias que não apenas abordam questões de impactos ambientais e à saúde, mas o fazem de maneira a satisfazer a eficácia, eficiência e critérios econômicos que são cruciais para que essas tecnologias sejam incorporadas ao uso generalizado (ANASTAS, 1999, p. 168, tradução nossa).

A indústria e a academia agora estão reagindo a esses desafios e muitos estão vendo as oportunidades - sejam eles na obtenção de financiamento para pesquisas, oportunidades sem precedentes para traduzir novas químicas mais ecológicas do banco de pesquisa para a planta de produção ou na obtenção de vantagem comercial com a aplicação de novos processos de tratamento de resíduos ou a comercialização de novos produtos ou tecnologias ecológicas (CLARK, 1999, p. 2, tradução nossa).

A adequação de vários métodos para a oxidação de álcoois secundários na síntese de produtos químicos finos e APIs pode ser retratada incorporando-os em um diagrama de Venn (Esquema 5b). Tecnologias que caem na zona representando as três características desejáveis - ampla utilidade (escopo), escalabilidade e verde - são sustentáveis (SHELDON, 2017, p. 25, tradução nossa).

Já a eficiência está relacionada com a capacidade de fazer melhor e geralmente é associada a quatro âmbitos diferentes:

1. Eficiência na conversão de matéria em produto funcional;
2. Eficiência o uso de energia;
3. Velocidade na realização do processo;
4. Seletividade;
5. Estabilidade (precisão).

A eficiência material, energética e a seletividade, itens 1, 2 e 4, estão intrinsecamente relacionadas ao alcance dos valores fundamentais da QV, i.e., a prevenção da geração de resíduos e substâncias perigosas. A velocidade na realização do processo tem mais importância industrial, com a produção em série de mercadorias. A estabilidade ou precisão dos processos também tem um componente de importância industrial, mas também é um valor necessário na pesquisa acadêmica, por exemplo, na recuperação e reuso de catalisadores (VARMA, 1999; SÁ *et al.*, 2014). Alguns exemplos podem ser vistos abaixo:

A Química Verde está usando química para prevenção da poluição (ANASTAS, 1999, p. 168, tradução nossa).

O catalisador (uma enzima) é derivado de recursos renováveis e é biocompatível, biodegradável, essencialmente não perigoso e não tóxico (SHELDON, 2017, p. 32, tradução nossa).

Os químicos estão sob crescente pressão para desenvolver novos métodos, que devem ser rápidos e ambientalmente benignos (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010b, p. 749, tradução nossa).

Consequentemente, novos sistemas de catalisadores que permitem transformações químicas rápidas e seletivas com excelente rendimento do produto, combinados com a facilidade de separação e recuperação de catalisadores, são altamente desejados para processos de fabricação de produtos químicos “ecológicos”. (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010b, p. 744, tradução nossa).

Assim, a eficiência e a eficácia são mais próximas do conceito de valor instrumental, um valor necessário para o alcance de um valor categórico, com fim em si mesmo. No caso da QV, esse valor categórico é ambiental, relacionado com a prevenção. Mas há também uma finalidade econômica na eficiência e eficácia, tanto no sentido de economizar material e energia, quanto no sentido maior de produção, distribuição e consumo de bens e serviços, como visto no trecho a seguir de Poliakoff *et al.* (2002, p. 808, tradução nossa)

As empresas buscam maximizar a lucratividade sem violar a regulamentação ou ofender excessivamente a opinião pública. Portanto, novos processos de Química Verde serão introduzidos apenas se eles puderem proporcionar um retorno rápido o suficiente para serem atraentes para gerentes e investidores. Um processo novo e mais ecológico não será viável, a menos que ofereça vantagem química sobre os

processos atuais e seja suficientemente lucrativo para compensar os custos de desligamento.

Anastas e Beach (2007) sinalizam o fator econômico como inerente ao próprio significado do termo verde na QV, aliando o objetivo ambiental ao lucro: “Foi dito que o termo Química Verde foi derivado das conotações duplas da palavra "verde" relacionadas ao meio ambiente e à cor do dólar americano” (ANASTAS; BEACH, 2007, p. 20, tradução nossa). Clark (1999) faz uma detalhada análise dos custos dos resíduos para a atividade química, elencando o fator econômico como um dos principais, senão o principal, motivador para a adoção e desenvolvimento da QV.¹² Poliakoff *et al.* (2002) ressalta que as próprias agências de financiamento exigem pesquisas que sejam de interesse industrial e vantajosas economicamente:

O interesse acadêmico em Química Verde é reforçado pela crescente exigência das agências financiadoras de que a pesquisa acadêmica deva abordar questões de qualidade de vida e seja comercialmente mais explorável, e pelo aumento da "terceirização" da pesquisa industrial para as universidades (POLIAKOFF *et al.*, 2002, p. 807, tradução nossa).

Há uma necessidade dos trabalhos em QV em ressaltar a componente econômica de seus processos, que, conforme citação acima, tem a função de atrair a atenção do setor industrial e econômico, mas também de atrair investimentos na pesquisa. Sheldon relata, em dois artigos, que essa argumentação mais incisiva das vantagens econômicas é necessária, pois a QV não tem um componente econômico explícito, conforme trechos abaixo. Isso pode ser visto nos 12 Princípios da QV, os quais não fazem menções diretas ao fator econômico.

Curiosamente, o conceito de Química Verde não tem um elemento econômico (SHELDON, 2014, p. 950, tradução nossa).

No entanto, o fato de não haver nenhum componente econômico implícito na Química Verde é visto como uma grande falha pela indústria, que prefere, portanto, o conceito de desenvolvimento sustentável (SHELDON, 2017, p. 23, tradução nossa).

Em diversos textos o fator econômico é citado como uma vantagem (ou valor) da QV em geral ou aos próprios processos verdes que são propostos, que são valorizados pelos seus benefícios ambientais e econômicos, nomeadamente a redução de custos de produção. Abaixo apresentamos alguns exemplos.

¹² Conferir a Figura 2 do artigo de Clark (1999, p. 3).

Vários exemplos econômicos do uso de lignina macromolecular já foram demonstrados (GILLET *et al.*, 2017, p. 4226, tradução nossa).

Portanto, do ponto de vista econômico, fica claro que não apenas queremos ter uma tecnologia sustentável, mas queremos que ela seja neutra em custos e no mínimo rentável, quando possível (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 5, tradução nossa).

Os protocolos de fabricação podem se tornar econômicos, mais ecológicos e mais sustentáveis, projetando e usando de forma vigilante os catalisadores, o que reduz o desperdício de produtos químicos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a, p. 1091, tradução nossa).

No entanto, a adição desses materiais como susceptores¹³ na mistura de reação aumentou o custo total do protocolo. Idealmente, se os nanomateriais puderem desempenhar um papel duplo de catalisador e susceptor, todas as vantagens relacionadas poderão ser desfrutadas sem a necessidade de qualquer material adicional como susceptores (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010b, p. 750, tradução nossa).

As tecnologias de Química Verde foram pesquisadas e desenvolvidas na indústria, tanto por seus benefícios ambientais quanto econômicos, e foram implementadas com sucesso por algumas das maiores empresas produtoras de produtos químicos do mundo, bem como por pequenas empresas (ANASTAS, 1999, p. 170 tradução nossa).

A 'economia ambiental' (*enviro-economics*) se tornará a força motriz para novos produtos e processos. Isso pode ser visto considerando a escalada e os vários "custos de desperdício" (CLARK, 1999, p. 2, tradução nossa).

A QV parece se aproximar da ideia da possível compatibilidade entre as dimensões ambiental e econômica. Winterton (2003) alega que a demanda por materiais e serviços para manter o estilo de vida de uma população crescente pode aumentar o impacto ambiental, a menos que se criem tecnologias que façam uso mais eficiente dos recursos. Não obstante, Manley, Anastas e Cue (2008) são mais diretos ao dizer que tentar “balancear” as dimensões econômica, ambiental e social inevitavelmente resultará em concessões, por isso a QV deve buscar uma interação sinérgica por meio de inovações que permitam melhorar a eficiência e agregar valor a produtos, servindo como um diferencial no crescente mercado das *commodities*. A sinergia é uma forma ainda mais otimista de dizer que é possível preservar o ambiente ao mesmo tempo em que se criam tecnologias, lembrando a consideração básica da Economia Ambiental (COSTANZA, 1989), uma vertente econômica otimista da tecnologia, que encara o capital feito pelo homem (*man-made capital*) como equivalente e intercambiável com o capital natural, sendo a inovação tecnológica o caminho para a compatibilização economia-ambiente, conforme aponta Debref (2012).

¹³ Uma material capaz de absorver radiação eletromagnética e convertê-la em calor.

Convém ressaltar que o problema não é a economia em si, mas a forma como ela é feita, baseada na acumulação acelerada de capital. A economia, entendida como produção, distribuição e consumo de bens e serviços, é parte constituinte da vida em sociedade. Mas as formas pelas quais ela opera podem ser variadas e mais ou menos incompatíveis com o ambiente.

A inovação tecnológica é o grande mote da QV e seu tipo básico de ação (ANASTAS; KIRCHHOFF; WILLIAMSON, 2001; ANASTAS; KIRCHHOFF, 2002; ANASTAS, 2003; WINTERTON, 2003; KIRCHHOFF, 2005; ANASTAS; BEACH, 2007; MANLEY; ANASTAS; CUE, 2008), conforme visto na fala “Química Verde é sobre inovação - melhoria contínua” (MANLEY; ANASTAS; CUE, 2008, p. 743, tradução nossa). Anastas e Beach (2007, p. 20) ressaltam que o “verde” da QV também representa o conceito de “recente, novo”. Outros trabalhos, ver trechos abaixo, ressaltam o papel da inovação tanto para as aplicações industriais da QV, quanto para o seu corpo de conhecimento.

O objetivo da Química Verde é reduzir os riscos associados a produtos e processos essenciais não apenas para manter a qualidade de vida alcançada pela sociedade através da Química, mas também para avançar ainda mais as conquistas tecnológicas da Química e fazê-lo de maneira sustentável. maneira (ANASTAS, 1999, p. 169, tradução nossa).

O campo recebeu amplo interesse na última década devido à sua capacidade de aproveitar a inovação química para atender simultaneamente às metas ambientais e econômicas (ANASTAS; EGHBALI, 2010, p. 301, tradução nossa)

O impulso para a tecnologia limpa na indústria química, com uma ênfase crescente na redução de resíduos na fonte, exigirá um nível de inovação e novas tecnologias que a indústria química não vê há muitos anos (CLARK, 1999, p. 2, tradução nossa).

Convém ressaltar que a correlação entre inovação tecnológica e aumento da produtividade é um debate extenso e ainda não resolvido na literatura, conhecido como paradoxo da produtividade, exemplificado no caso de a revolução das tecnologias de informação e comunicação não ter gerado o aumento de produtividade esperado (BRYNJOLFSSON, 1993). Pesquisas atuais mostram que a correlação positiva ou negativa entre inovação tecnológica e produção depende do contexto econômico do país (KIJEK; KIJEK, 2018) e de mudanças em todo o sistema tecnológico, não de apenas uma tecnologia (BRYNJOLFSSON; ROCK; SYVERSON, 2017; WACHTER; HOWELL, 2018). Debref (2012) analisa criticamente o significado e a possibilidade de inovações ambientais usando a QV como um exemplar, encontrando que o conceito de “inovação ambiental” não é definido e, não obstante, as estratégias apelam para a ecoeficiência, perdendo seu sentido ambiental ao serem sufocadas por princípios econômicos, como maximização do lucro. No caso da QV,

queremos instigar a provocação de que a inovação tecnológica não garante o aumento da produtividade nem a proteção ambiental se não houver um sistema político e tecnológico que suporte essas inovações. Isso significa mudar a estrutura industrial e social para uma abordagem mais ambientalmente benigna.

Outro ponto de contenda na suposta compatibilidade entre economia e ambiente por meio da inovação é a ineficiência intrínseca das tecnologias. Conforme discutido pela Economia Ecológica (GEORGESCU-ROEGEN, 1971; COSTANZA, 1989; RØPKE, 2004; BARBOSA; MARQUES, 2015), embasada na segunda lei da termodinâmica, qualquer processo somente ocorre com a degradação de uma parte da energia total em energia sem utilidade (anergia) e transformação da matéria de um estado de baixa entropia (alta organização) para um estado de alta entropia (baixa organização, alta estabilidade), considerando o universo (ambiente + sistema) em análise. De forma que a ideia de uma economia circular (ou fechada) é inconcebível, já que a energia total é sim mantida durante todo o processo, mas a sua possibilidade de utilização é sempre diminuída (GEORGESCU-ROEGEN, 1971; LATOUCHE, 2012; BARBOSA; MARQUES, 2015). Os processos de reuso e reciclagem de materiais, ainda que importantes, não são de graça, mas exigem a aplicação de fluxos energéticos e mais degradação de matéria e energia (dos combustíveis) (MARQUES; MACHADO, 2014). Não bastasse o limite físico imposto para as tecnologias, que inexoravelmente conduzem para a degradação ambiental, há também os problemas de eficiência tecnológica: nem sempre os rendimentos teóricos são atingidos na prática (WINTERTON, 2003). Sobre essa eficiência tecnológica a QV pode efetivamente agir, mas sem a pretensão de um impacto físico, ambiental e social nulo.

As ideias de uma economia circular, considerando ciclos fechados de matéria e energia, tem permeado discussões recentes da QV, mas poucos se têm atentado para suas limitações entrópicas (PFALTZGRAFF *et al.*, 2013; DODSON *et al.*, 2015; HUNT *et al.*, 2015; CLARK *et al.*, 2016; SHELDON, 2016, 2017; MARION *et al.*, 2017; ANASTAS *et al.*, 2018; NÁRAY-SZABÓ; MIKA, 2018). Além da promoção da QV para o *design* de substâncias para possibilitar a facilidade no reuso e reciclagem (entropicamente limitados, como já expusemos), tem-se falado bastante no uso de fontes renováveis para evitar a depleção de recursos naturais e *design* para a biodegradação. São iniciativas tecnológicas importantes com ganho ambiental de grande potencial. Entretanto, mudar todo o sistema industrial para o uso de fontes renováveis exigiria uma grande porção de terras aráveis, competindo com a produção de alimentos, sem contar nas questões de tempo e insumos para o crescimento da biomassa necessária e das questões logísticas, como o transporte de grande

quantidade desses materiais dos polos agrícolas para os centros urbanos (MARION *et al.*, 2017). Debref (2012) aponta que a ideia de uma economia circular está pautada no aumento da eficiência das transformações ocorridas dentro do ciclo de transformação e produção, conduzindo a uma aceleração do processo de degradação material e energética. O autor ainda acrescenta que a busca de inovação tecnológica pode ter o efeito oposto ao desejado, já que ela pode acelerar a criação de produtos e serviços, rapidamente consumidos pela população, acelerando o esgotamento dos recursos que, inicialmente, a inovação tecnológica pretendia proteger (DEBREF, 2012).

4.2.2 Valores Teóricos da Química Verde

A QV é também uma prática acadêmica ou teórica, conforme discutido no capítulo 2, que também incorpora valores epistêmicos (ou cognitivos). Embora os valores epistêmicos tenham sido menos enfatizados nas publicações analisados, eles ficaram evidentes em alguns momentos.

Principalmente nos trabalhos iniciais da QV, houve ênfase na fecundidade e poder explicativo, valores cognitivos (LACEY, 2008b), do campo emergente. Os autores argumentaram que a QV era possível e apresentava possibilidades de criar uma química radicalmente diferente da que estava sendo praticada. Anastas e Williamson (1996) fazem uma analogia de que elencar um objetivo para a Química em determinado momento, como a síntese de produtos naturais, pode acabar criando uma “avenida” de práticas e conceitos inovadores. No prefácio do livro *Green Chemistry: theory and practice*, Anastas e Warner iniciam o texto assim:

A Química Verde (QV) não é diferente da Química tradicional na medida em que ela abraça a mesma criatividade e inovação que têm sido centrais para a Química clássica. A QV apenas persegue essas mesmas ideias com considerações adicionais a aquelas historicamente incorporadas no *design* e implementação da Química. [...] Pesquisa básica em QV é necessária. A descoberta e desenvolvimento de transformações químicas fundamentais que não são danosas ao ambiente serão a força motora que move o campo para frente. Aplicações dessas descobertas serão e têm sido utilizadas por razões econômicas e científicas. [...] É o químico que faz as descobertas. É o químico que cria as ferramentas, os métodos sintéticos, que são usados pela indústria. (ANASTAS; WARNER, 1998, p. v-vi)

Também o livro anterior de Anastas (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996) ressalta o papel inovador da QV.

Este volume detalha como químicos de todo o mundo estão usando sua criatividade e inovação para desenvolver novos métodos sintéticos, condições de reação, ferramentas analíticas, catalisadores e processos sob o novo paradigma da Química Verde (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 3, tradução nossa).

Utilizando o conhecimento que os químicos sintéticos possuem, é possível reduzir bastante os riscos associados a determinados produtos químicos, mantendo o desempenho e a inovação esperados da indústria química (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 13, tradução nossa).

Em trabalhos posteriores, o caráter inovador, simples e eficiente do conhecimento químico produzido é ressaltado, especialmente nos artigos de Varma, por serem pesquisas *em QV* e não *sobre QV*.

Além disso, os pesquisadores e educadores de química mais bem-sucedidos serão aqueles que podem apreciar o valor da Química Verde na inovação, aplicação e ensino (CLARK, 1999, p. 8, tradução nossa).

Foi desenvolvido um novo conceito de nano-organocatalisador, apoiando a glutatona totalmente benigna e naturalmente abundante em nanopartículas magnéticas (POLSHETTIWAR; VARMA, 2010a, p. 1096, tradução nossa).

Neste artigo, discutiremos os desenvolvimentos, atividades exclusivas e alta seletividade de nano-organocatalisadores (SÁ *et al.*, 2014, p. 1091, tradução nossa).

Um dos pontos de partida para a inovação da QV é justamente a possibilidade de fazer uma pesquisa química ambientalmente benigna. Diversas pesquisas (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS, 1999; CLARK, 1999; ANASTAS; EGHBALI, 2010; SHELDON, 2014, 2017) argumentam que há um repertório de pesquisas acumulados durante os anos que permite a QV organizar sua prática para um *design* benigno, o que fica evidente no trecho a seguir:

A Química Verde utiliza as informações agora disponíveis para a comunidade científica sobre a toxicidade e outros perigos causados por certos produtos químicos, a fim de avaliar completamente o impacto negativo e positivo da Química que está sendo projetada. Bancos de dados com informações sobre propriedades perigosas de produtos químicos estão disponíveis apenas recentemente. Em anos anteriores, a ausência desses dados significava que os químicos não podiam avaliar efetivamente as consequências das substâncias químicas que estavam sendo projetadas e sintetizadas. Como esse não é mais o caso e os dados existem, é de responsabilidade dos químicos e da comunidade química usar essas informações (ANASTAS, 1999, p. 168, tradução nossa).

O trecho acima, publicado em 1999, afirma a existência de pesquisas e bases de informação sobre a periculosidade de produtos químicos. Mas em 2000 Thornton (2000) publica um artigo dizendo que as informações sobre a periculosidade e impactos ambientais das substâncias química são incipientes e que muitas pesquisas são necessárias para fazer uma avaliação adequada. Pesquisas atuais sobre avaliação ambiental, econômica e social de produtos e processos químicos pontuam a insuficiência de informações sobre os impactos de

recursos, processos e produtos químicos (BOSTRÖM, 2012; SHELDON, 2017; IOFRIDA *et al.*, 2018).

A constatação acima alerta para a dificuldade de estabelecer um terreno de imparcialidade ou objetividade para a pesquisa científica no contexto atual, tão influenciada por interesses das grandes corporações econômicas. Conforme denunciado por Lacey (2008b), existe a falsa compreensão de que a ciência é imparcial ou objetiva, ou seja, que suas teorias são derivadas de testes empíricos rigorosos e exaustivos, quando na verdade a pesquisa é direcionada por temas que sejam de interesses econômicos. Assim, hipóteses, impactos ou alternativas científicas ou tecnológicas que não sejam de interesse comercial são frequentemente ignoradas pelas agências de financiamento de pesquisa e praticamente nenhuma investigação sistemática empírica é realizada sobre essas teorias negligenciadas criando a falsa sensação de domínio teórico-conceitual do mundo, uma falsa sensação de objetividade. A influência das agências de financiamento no direcionamento da QV para pesquisas que geram interesse econômico já foi alertada por Poliakoff *et al.* (2002).

Um bom exemplo para reflexão sobre a imparcialidade da QV é surgido pelo artigo de Clark (1999, p. 2, tradução nossa), que diz “O aminodiacetato dissódico (DSIDA) é um intermediário essencial na fabricação do RoundupTM, o herbicida ecológico.” Resta saber em que aspectos o glifosato (RoundupTM) pode ser considerado “ambientalmente amigável,” principalmente quando pesquisas apontam seus impactos ecológicos, sua toxicidade (DEFARGE *et al.*, 2016; BRITO; YADA, 2019) e decisões judiciais têm reconhecido seu caráter cancerígeno (PASSE, 2019). Pode-se afirmar também que na época, 1999, não havia pesquisas indicando a toxicidade do glifosato, o que só reforça o argumento de que a objetividade das pesquisas é um tema complicado e que a benignidade dos produtos e processos potencialmente verdes precisa ser avaliada de forma cuidadosa.

Como discutimos, a QV vai além dos valores epistêmicos, incluindo também valores ambientais e econômicos. Esses valores nos fazem refletir sobre o que seria a autonomia e a neutralidade científica, se existirem. A autonomia seria a capacidade de orientar a metodologia e os critérios cognitivos apenas por valores epistêmicos, rejeitando na prática científica valores não científicos (LACEY, 2008b). Porém, já discutimos que a QV incorpora os valores ambientais e econômicos na escolha das suas linhas de pesquisa e na própria definição das metodologias (catálise, sem solvente, com radiação de micro-ondas, etc.). Também, a definição das linhas de pesquisa da QV é influenciada pelos interesses das agências de fomento, que direcionam a pesquisa para o interesse industrial e geração de tecnologias comercializáveis.

A neutralidade científica é vista tanto como a ausência de valores éticos e sociais como nas consequências lógicas das teorias e nas aplicações dos produtos da ciência (LACEY, 2008b). Winterton (2003) discute algo parecido com essa preocupação, criticando a aproximação da QV com ideologias políticas e a visão pós-moderna (relativista) da ciência. Para o autor, o químico pode ser apaixonado por um viés político e isso pode inclusive influenciar sua escolha de uma linha de pesquisa, mas ele deveria usar sua *expertise* para discutir as implicações da ciência de forma imparcial, balanceada, desinteressada e objetiva. Enfim, o químico deveria agir como um consultor, oferecendo informação objetiva para a tomada de decisão, conforme afirma Winterton (2003, p. 16, tradução nossa):

Por outro lado, inevitavelmente e adequadamente, os cientistas também se sentem apaixonados por muitas coisas e também desejam se envolver no processo político. Parte dessa paixão, de fato, conduzirá seu trabalho científico. No entanto, para serem mais valiosos e credíveis no debate sobre desenvolvimento sustentável, os cientistas, inclusive os químicos, devem entusiasmar apaixonadamente o interesse por seu trabalho enquanto usam seus conhecimentos para discutir suas implicações desapaixonadamente, de maneira equilibrada, desinteressada e objetiva.

Entretanto, esse desinteresse é questionável, já que a decorrência das pesquisas em QV são direcionadas, ao menos em parte, a processos industriais e produção de mercadorias. Ao trabalhar “como consultor” o químico não está sendo neutro, imparcial ou objetivo, está apenas atendendo aos interesses e valores de um outro grupo, seja a indústria ou o governo para o qual ele age “como consultor”. Essa não neutralidade, heteronomia¹⁴ e não objetividade da QV não chega a ser um problema exclusivamente seu. Lacey (2008a) argumenta que grande parte da ciência contemporânea é praticada com base nos valores do progresso econômico e tecnológico, inundando a ciência de valores e interesses éticos e sociais. Para o autor, o problema é a ciência não reconhecer a sua parcialidade e não neutralidade, perpetuando o mito dessa ciência positivista. Não obstante, Lacey (2008b, 2008a) defende que a verdadeira neutralidade, imparcialidade e autonomia são adquiridas justamente na democratização dos valores e interesses que influenciam a atividade de pesquisa, investigando criteriosamente outras hipóteses que não sejam necessariamente de interesse econômico-industrial (objetividade/imparcialidade), incluindo interesses de diversos grupos sociais na delimitação da agenda científica (autonomia) e na aplicação de resultados científico-tecnológicos (neutralidade).

A negociação de valores, no entanto, não é um processo simples. Os grupos sociais têm possibilidades de ação distintas e influência política diversas. De forma que determinados

¹⁴ Oposto de autonomia. Significa subordinação ou sujeição à vontade de outrem ou a uma lei exterior imposta.

valores são colocados em prática, enquanto outros são marginalizados. Daí decorre a necessidade de analisar o caráter político da QV, o que faremos na seção seguinte.

4.3 TENSÕES NOS VALORES DA QUÍMICA VERDE

Na Figura 10 apresentamos os principais valores da QV organizados em um sistema. Os químicos verdes, nas produções analisadas, valorizam o caráter novo do conhecimento científico, seu poder explicativo e sua fecundidade teórica. Já no âmbito prático, o ambiente e a economia são os valores categóricos, para os quais a eficiência e a eficácia agem como valores instrumentais.



Figura 10: Principais valores da Química Verde.

Fonte: os autores.

Como discutimos anteriormente, o valor econômico é usado pelos químicos verdes como uma forma de convencer a indústria, e em certa medida a sociedade que vivem numa economia de mercado, a adotar práticas com valores ambientais. Entretanto, a influência econômica é tão forte que os valores econômicos acabam por funcionar como um valor categórico para os próprios químicos verdes. Eles acabam circunscrevendo a sua prática pelo que é economicamente viável. A dúvida que resta responder é qual seria o valor primordial para a QV, o econômico ou o ambiental? Em caso de uma prática muito ambientalmente benigna, mas economicamente inviável, os químicos verdes proporiam a sua adesão pela indústria? Seria essa tecnologia uma tecnologia verde?

Essas são questões complicadas e ainda não debatidas o suficiente. Conforme aponta Schummer, a Química não tem seus objetivos sociais explícitos e definidos. Um artigo publicado em 2019 (ANASTAS; ZIMMERMAN, 2019), no entanto, traz alguns elementos para contribuir para o debate. Os autores defendem, no âmbito da QV, uma prática química que não atente contra a vida, que busque a paz, que não cause dependência (econômica ou biológica) e que coloque o bem-estar social acima dos ganhos econômicos. Ainda que seja um avanço, essa é uma publicação recente e ainda carece de detalhamento sobre como alcançar esses objetivos, pois se QV continuar a agir como um movimento social de elite (WOODHOUSE; BREYMAN, 2005), tentado convencer os industriais da sua viabilidade econômica, muito dificilmente ela vai conseguir colocar os valores ambientais acima dos econômicos.

Contudo, a incompatibilidade entre economia e ambiente não é ignorada por todos os químicos verdes. Howard-Greenville *et al.* (2017) mostram que há uma pluralidade de visões dentro da QV com valores distintos, que reforçam os elementos encontrados nessa pesquisa. Os autores fazem entrevistas com químicos defensores da QV atuantes em diversas ocupações, como pesquisadores, educadores/comunicadores e gestores/solucionadores de problemas. Para os químicos-pesquisadores o valor máximo da QV é a evolução da ciência e a descoberta, uma visão teórica ou acadêmica. Para os químicos-resolvedores de problemas, filiados a empreendimentos práticos e industriais, a QV apresenta oportunidades de alocação eficiente de recursos, visão pragmática. Para os educadores químicos, a QV apresenta um sistema de valores ambientais forte e uma nova forma de relação com o mundo, uma visão mais moralizante. Os autores também notaram que essas visões entravam em choque nos discursos dos defensores da QV (Figura 11).

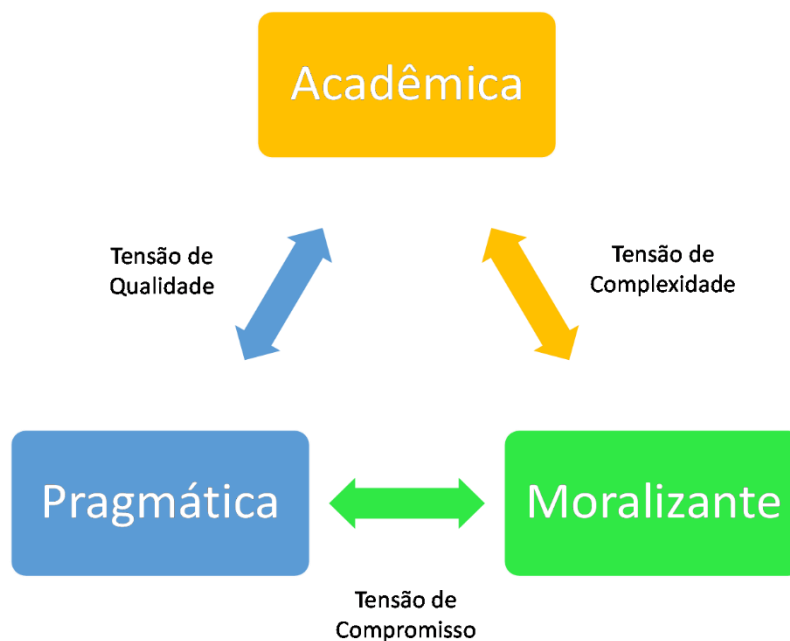


Figura 11: Diferentes visões dos defensores da QV e suas tensões de valores.
 Fonte: adaptado de Howard-Greenville *et al.* (2017).

Entre as visões dos químicos acadêmicos e os pragmáticos há a tensão de qualidade: os acadêmicos acham que direcionar a Química para a resolução de problemas práticos diminui o seu valor enquanto conhecimento científico, de alguma forma limita as possibilidades de formulações teóricas. A tensão de complexidade surge entre os valores das visões acadêmica e moralizante: para os acadêmicos, a QV diminui seu grau de liberdade na pesquisa e também circunscreve a criatividade química às possibilidades metodológicas e instrumentais verdes, diminuindo a complexidade de suas pesquisas. Para a visão acadêmica, a visão moralizante cria uma polarização dentro da Química em geral, entre aqueles que são bons/verdes e os que são ruins/vermelhos, atrapalhando o desenvolvimento de pesquisa de ponta. Constatamos essas tensões na necessidade dos químicos verdes em ressaltar o grau de inovação dos conhecimentos que eles constroem, da qualidade de suas pesquisas. A própria promoção dos 12 Princípios como um sistema inter-relacionado de regras para o *design* (ANASTAS; EGHBALI, 2010) parece advir dessa necessidade de mostrar a complexidade e criatividade do conhecimento da QV.

A tensão de compromisso surge entre as visões pragmáticas e moralizantes pela incompatibilidade da hierarquia de valores: para os pragmáticos, questões práticas (especialmente econômicas) devem limitar a adoção de alternativas verdes; para os moralizantes, o valor ambiental da QV deve ser o principal e ser aplicado em todas as práticas (de pesquisa ou industriais). Essa tensão reflete a incompatibilidade entre interesses

econômicos e ambientais, resulta da própria dificuldade em realizar a interação sinérgica entre esses dois domínios como propõe a QV. Ao mesmo tempo, os químicos verdes precisam mostrar para o setor industrial que seus conhecimentos são inovadores e economicamente viáveis como estratégia para propiciar a mudança e promover os valores ambientais no sistema industrial.

Foram feitas duas propostas de superação dessas tensões pelos defensores da QV (HOWARD-GRENVILLE *et al.*, 2017). A primeira é a subsunção das visões pragmáticas e moralizantes aos valores da visão acadêmica, desenvolvendo métricas mais claras e efetivas para avaliar o que é verde. A segunda é a aceitação da pluralidade de visões dentro da QV e encarar a dificuldade de avaliar o grau de verdura como uma maneira de equilibrar as três visões, evitando julgar as práticas como vermelhar ou ruins, evitando direcionar toda a pesquisa para problemas práticos ou industriais e evitando reduzir a pesquisa apenas a investigação teórica e formalista do mundo.

A tensão entre os valores internos da QV é grande e a estratégia tecnocrática que ela usa para exercer influência no âmbito governamental e econômico reforça essas tensões. Essas tensões entre os valores ambientais e econômicos só reforçam a necessidade de a QV assumir um papel de movimento social mais forte, relacionando-se mais ativamente com movimentos ambientais, da sustentabilidade e com outros grupos sociais para criar uma pressão mais forte e efetiva, pois a influência política dos setores econômico-industriais é grande e talvez só a QV (como um grupo de especialistas) não seja capaz de transformar as práticas industriais ou mesmo a Química. Na formação desse grande movimento social encabeçado pelos químicos verdes, a educação química desempenha um papel primordial, não só na formação de especialistas que levem a QV para a indústria num movimento tecnocrático, mas também no estabelecimento de diálogo com a população em geral, na criação de uma prática em QV socialmente engajada e efetiva em implementar os valores ambientais.

Discutiremos no capítulo a seguir aspectos mais pertinentes ao âmbito técnico da QV, o *como fazer*. Também faremos uma síntese das racionalidades vistas até o momento e abordaremos o fato de a QV possuir elementos de uma racionalidade instrumental. No último capítulo, discutiremos mais a fundo o papel da educação na busca da superação dessa racionalidade instrumental e na formação desse suporte social para a QV.

5 VALORES NA QUÍMICA VERDE: considerações da política e da racionalidade instrumental

No capítulo anterior discutimos o primeiro âmbito axiológico da racionalidade prática, mais ligado à justificativa do que é bom ou ruim dentro da QV. Neste capítulo, discutimos o segundo âmbito relacionado aos valores, a política, que tem a ver com a possibilidade e o dever de colocar esses valores em ação.

Na seção **5.1 A Química Verde tem Política?** apresentamos uma definição de política e analisamos as características políticas da QV em várias de suas produções científicas, indicando quem são seus atores, suas relação com a sociedade como um todo (**5.1.1**), as métricas de avaliação de impactos na dimensão social (**5.1.2**), as relações com governo (**5.1.3**) e participação democrática que ela possibilita (**5.1.4**).

Na seção seguinte, **5.2 Teoria Tradicional e Teoria Crítica: racionalidade instrumental na Química Verde**, fazemos uma síntese de todos os tipos de racionalidade discutidos até o momento, racionalidade teórica e racionalidade prática e suas subdivisões (racionalidade técnica, racionalidade ética e racionalidade política). A partir dessa síntese, defendemos a tese de que a QV apresenta características de racionalidade instrumental, mas também avanços em relação à química tradicional. Fechamos a seção com alguns indícios de superação da racionalidade instrumental pela racionalidade crítica.

5.1 A QUÍMICA VERDE TEM POLÍTICA?¹⁵

Em um provocativo texto, Langdon Winner (1980) questiona se “Os artefatos têm política?” e defende o argumento que sim, eles têm. Para esse autor, política (*politics*)¹⁶ é um arranjo de poder e de autoridade que se dá nas associações humanas e em suas atividades (WINNER, 1980, p. 123). Sartori (1973) detalha a definição de política e encontra a fonte do poder político na capacidade e legitimidade do Estado em exercer a força na coletividade, decorrendo que a política tem a ver com decisões coercitivas com influências na coletividade.

¹⁵ O conteúdo desta seção foi adaptado e previamente publicado (MARCELINO; SJÖSTRÖM; MARQUES, 2019).

¹⁶ Política pode significar na língua portuguesa a arte ou ciência de exercer o poder (*politics* em inglês) ou a aplicação dessa arte e ciência em questões práticas definindo cursos de ação (*policy* em inglês). Neste texto, assumimos o sentido mais geral, de *politics*.

Outros atores sociais, como as corporações e entidades civis, não têm poder político em si mesmas, mas podem exercer influência na política (SARTORI, 1973).

Winner (1980) disserta sobre duas maneiras em que os artefatos contêm política: 1) os impactos das tecnologias nas sociedades; 2) condições sociais requeridas ou compatíveis com determinadas tecnologias. No primeiro caso, tem-se a instância em que a invenção, *design* ou arranjo de um determinado artefato se transforma em um meio de organizar um assunto da comunidade, estando mais voltado aos impactos das tecnologias na sociedade. Um exemplo é o planejamento urbano, com assentos propositalmente desconfortáveis para impedir a ocupação por longos períodos ou mesmo para que moradores de rua não possam se deitar (COX; COX, 2015).

Winner (1980) argumenta que as tecnologias servem a interesses que nem sempre são intencionais, mas que, no entanto, reproduzem padrões de poder já fixados na sociedade. O movimento das pessoas deficientes nas últimas décadas requerendo a acessibilidade mostra que os criadores de tecnologia, em seus diversos âmbitos, ignoraram a existência e os interesses desse grupo. As tecnologias reproduzem valores e buscam objetivos definidos socialmente, sejam eles explícitos ou implícitos.

Sobre a maneira dos artefatos requererem ou serem compatíveis com determinados arranjos sociais, existem dois argumentos de que as tecnologias são inerentemente políticas. O primeiro argumento diz que para uma tecnologia existir é necessário (de modo prático) que condições sejam satisfeitas, diz que a existência de um modo específico de produção exige uma autoridade (ordem) social para que esse modo de produção ocorra. É o caso da energia nuclear que exige uma elite militar que a controle, pois é uma forma de energia altamente centralizada e desigual, com grandes possibilidades catastróficas, o que exige o controle sobre as suas atividades. Um segundo argumento diz que as tecnologias não *necessitam* de pré-requisitos sociais para existir, mas que elas são mais compatíveis com determinadas configurações sociais. Como o caso da matriz de energia solar, que possui fonte descentralizada e permite que comunidades individuais possam acessá-la mais facilmente e desfazem a necessidade de um controle central. Nesse sentido, a energia solar não *necessita* de uma sociedade democrática, porém é *mais compatível* com a democracia.

O autor (WINNER, 1980) termina o texto pondo em dúvidas se há mesmo *necessidade* de gestão centralizada e autoritária em grandes sistemas tecnológicos. E completa a crítica: mesmo que haja uma necessidade prática de gestão autoritária (hierárquica, centralizada e especializada), essa forma de gestão seria eticamente correta? De acordo com

Fiorino (1990) a participação social democrática nos processos de decisão sobre empreendimentos científico-tecnológicos é justificada por argumentos instrumentais, normativos e substantivos:

- Argumento instrumental (porque funciona): a participação democrática possibilita menor resistência social, maior adoção tecnológica, apoio popular ao empreendimento e maior confiança nas instituições;
- Argumento normativo (porque democracia é um valor em si mesmo): participar na decisão de processos que afetam a vida pública é uma característica inalienável de ser cidadão que, por fim, é característica básica do sujeito que vive em sociedade;
- Argumento substantivo (porque altera a própria natureza do empreendimento): os leigos possuem conhecimentos diferentes, mas igualmente úteis para o processo de decisão. A população em geral, principalmente aquela diretamente envolvida com uma alternativa tecnológica, têm mais conhecimentos dos problemas, do contexto em que estão inseridos, dos seus objetivos e de seus desejos. Abordar esses conhecimentos na tomada de decisão confere uma maior complexidade e maior adequação das soluções aos problemas reais.

A análise do caráter político da QV é feita aqui por nós pela investigação na literatura sobre: quem são os sujeitos afetados pelas práticas da QV, ou seja, para quem a QV é feita; quem são os sujeitos que decidem os rumos de ação da QV, seus temas, seus objetivos e seus instrumentos; qual o papel da QV na relação com a tomada de decisão governamental. Para tanto, tomamos 50 textos como *corpus* para essa análise, seguindo os critérios:

- Treze trabalhos selecionados dos hubs e autoridades intelectuais da QV (conferir Quadro 7, p. 54);
- Marques e Machado (2014) investigam 19 revisões referenciadas em livros-texto de QV que relacionam a QV com sustentabilidade, das quais selecionamos treze que traziam aspectos políticos (conferir Apêndice B – Trabalhos analisados sobre Química Verde e Política);
- Vinte e quatro trabalhos selecionados do *Green Chemistry Journal* (termo de busca: *social life cycle sustainab**; *social metric sustainab**) em março e

novembro de 2019, abordando avaliação de indicadores sociais na QV (conferir Apêndice B – Trabalhos analisados sobre Química Verde e Política).

Os trechos que relacionam QV com participação social, seja na definição de agenda científica, na regulação da atividade de pesquisa ou nos impactos sociais, foram extraídos e analisados conforme temas de análise descritos abaixo.

- Sociedade implícita na ideia de responsabilidade social;
- Compatibilidade entre economia e ambiente, com benefícios indiretos para a sociedade;
- Regulação da QV por meio de políticas científicas;
- Indicadores sociais em métricas de avaliação.

Abaixo, apresentam-se os resultados dessa pesquisa.

5.1.1 Química Verde: seus atores e seus beneficiários

A dimensão social da QV raramente é debatida. Dos doze trabalhos do *corpus* de análise, apenas sete traziam alguma menção às questões políticas (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS, 1999; CLARK, 1999; POLIAKOFF *et al.*, 2002; ANASTAS; EGHBALI, 2010; GILLET *et al.*, 2017; SHELDON, 2017). Nas subseções seguintes (5.1.15.1.2e 5.1.1.3) discutem-se aspectos políticos presentes nesses 7 textos e nos demais 38 textos selecionados.

Geralmente, a QV é vista no âmbito da indústria, da academia e do governo (ANASTAS, 1999; POLIAKOFF *et al.*, 2002; ANASTAS; EGHBALI, 2010; SHELDON, 2017). Anastas e Beach (2007) ressaltam o papel das pesquisas acadêmicas de inovação, da educação de profissionais da Química e do engajamento da indústria como os fatores que impulsionam as práticas da QV. Já Kirchhoff (2005) resalta as necessárias interações entre academia, indústria e governo para fomentar a QV.

No texto de 1996, Anastas e Williamson (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996, p. 1, tradução nossa) veem a sociedade mais como um grupo afetado pela química, não havendo menções sobre participação social na sua prática: “Os impactos da Química que projetamos como químicos são sentidos pelas pessoas que entram em contato com as substâncias que fabricamos e usamos e pelo ambiente em que estão contidas.” Especialmente para Clark

(1999), ao analisar os desafios e oportunidades da QV, a imagem que a população tem da Química é um fator prejudicial para o desenvolvimento da QV. A sociedade também aparece como um agente importante em estabelecer pressões no governo para a criação de regulações ambientais mais rígidas (ANASTAS *et al.*, 1999) por meio de seu olhar detalhado sobre a indústria química, embora os processos para valorizar e promover o apoio popular não sejam abordados no texto. Assim, a visão crítica da sociedade sobre a indústria parece ser vista com muito receio e muitas vezes é ignorada. Por exemplo, ao falar dos fatores de sucesso para o desenvolvimento da QV, Anastas e Eghbali (2010, p. 309) dizem que “as conquistas no campo da QV até agora são impressionantes devido aos cientistas na academia, indústria e institutos de pesquisas ao redor do mundo” e aponta como desafios futuros o pensamento sistêmico dos químicos e o domínio da catálise multifuncional e das forças fracas na síntese. Ou seja, o apoio do público ainda não é visto como um fator necessário para o sucesso da QV.

A dimensão social aparece de forma tangencial nas discussões sobre sustentabilidade na QV, na forma da promoção de uma atividade química que não cause impactos à saúde, utilizando processos e substâncias atóxicas. Isso fica claro quando os autores relacionam a QV com a busca da minimização de impactos ambiental, da viabilidade econômica e da *responsabilidade social* (MANLEY; ANASTAS; CUE, 2008; MATUS, 2009; JIMÉNEZ-GONZÁLEZ; WOODLEY, 2010). Conforme aponta Poliakoff *et al.* (2002) “a QV é um componente maior da ciência subjacente ao ‘*responsive care*’ program da indústria química e do ‘desenvolvimento sustentável.’” O *Responsible Care Program* é uma iniciativa autônoma de grandes corporações químicas iniciada em 1989 no âmbito da *Chemical Manufacturing Association* (CMA), almejando uma prática com melhor performance ambiental e de segurança, melhorando a percepção pública da Química. O Programa surge como resposta aos desastres químicos no início do século XX (MATUS, 2009) e atualmente a ideia do programa evoluiu para incorporar discussões sobre os direitos dos trabalhadores (seguridade social, auxílio comunitário) e treinamento profissional entre outros (GONZÁLEZ-GARCÍA; GULLÓN; GULLÓN, 2019).

Entretanto, conforme apontam King e Lennox (2000), o intuito inicial da CMA era evitar custos para as empresas com ações judiciais e políticas de regulação rígidas, o que corrobora os intuítos da QV de ser um movimento não-regulatório e focalizado na auto-adesão do setor industrial (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; WOODHOUSE; BREYMAN, 2005). De acordo com Givel (2007), há uma contradição inerente aos programas de *corporate social responsibility* (CSR): seus partidários dizem que é possível conciliar os interesses das corporações com os da comunidade, mas o intuito da CSR é justamente modificar a percepção

do público sobre as práticas químicas e se opor à regulações restritivas de processos e produtos para não aumentar os seus custos. Assim, a ideia de responsabilidade social se torna o elo mais forte da QV com a sustentabilidade social, mas sua falta de clareza na definição pode significar uma “manobra política” das corporações para manterem os interesses econômicos acima dos ambientais e sociais.

Woodhouse e Breyman (2005) criticam o caráter elitista da QV ao focalizar os objetivos de sua atividade, bem como pautar a sua promoção na pesquisa e inovação e na busca de compatibilização entre eficiência econômica e ambiental. Para os autores, a QV se assemelha a um movimento social cujos atores são os cientistas e tecnólogos altamente especializados, corporações industriais e instituições governamentais, o que conduz suas práticas a um movimento tecnocrático, em que as decisões são tomadas apenas por especialistas. Para os autores isso é prejudicial à própria QV, pois ela segue um ritmo lento dos congressos, publicações acadêmicas e treinamento profissional, produzindo pouco impacto nos grandes sistemas industriais, já que evitam desafiar seus interesses.

Howard-Greenville *et al.* (2017) apontam que a QV é um campo de pesquisa que emerge a partir dos esforços dos próprios químicos, sem uma pressão externa que os antagonize ou os coaja, ou seja, não há especificamente uma mudança jurídica, regulatória, organizacional ou tecnológica que os químicos verdes estejam procurando responder ou rebater. A prática da QV parece surgir de fatores visionários e oportunos, ou seja, de valores próprios dos químicos verdes. Assim, embora os químicos verdes pareçam adotar uma hierarquia horizontal entre seus membros, esse grupo não é homogêneo e atribui diferentes objetivos às práticas da QV, sejam eles a inovação, a resolução de problemas práticos ou o compromisso com uma ética ambiental, conforme discutimos anteriormente. Também discutimos que, ainda que não haja hierarquia entre essas três visões para defender a QV, o fator econômico (pragmático) tem grande influência política e acaba sendo incorporado mesmo na argumentação mais acadêmica da QV.

Os autores defendem que a abertura de diálogo com a grande população e seus setores organizados, como os movimentos ambientais, possibilitaria angariar um respaldo da sociedade e uma pressão pública por verdadeiras transformações, aproximando-se do argumento instrumental para a democratização da agenda científico-tecnológica conforme exposto acima.

5.1.2 Métricas verdes e indicadores sociais

A avaliação do grau de sustentabilidade das práticas da QV continua sendo um desafio. As métricas propostas pela QV até o momento focalizam a eficiência dos processos com relação a massa e energia (Fator E, Intensidade de Massa, Economia Atômica), algumas trabalham com riscos intrínsecos dos produtos químicos, como modificações no Fator E (SHELDON, 2017), mas a avaliação da sustentabilidade dos processos é mais abrangente e os pesquisadores têm sugerido a Análise do Ciclo de Vida (LCA, do inglês *Life Cycle Assessment*) como uma alternativa viável, ainda que difíceis de realização. Embora a LCA possibilite uma avaliação mais compreensiva e holística das práticas industriais, ela é comumente reduzida aos aspectos econômicos e ambientais, devido à falta de clareza dos indicadores sociais e de maneiras efetivas de como avaliá-los (YASUI, 2003; MCKENZIE, 2004; RAFIAANI *et al.*, 2018; SIERRA; YEPES; PELLICER, 2018). Mesmo os indicadores ambientais são de difíceis medições nas LCA propostas, devido a deficiência de dados disponíveis sobre os impactos de sua produção, consumo e descarte (KRALISCH; OTT; GERICKE, 2015; ZHENG *et al.*, 2018).

Horváth *et al.* (2017) e Náráy-Szabó e Mika (2018) propõem métricas de sustentabilidade para a QV que são focalizadas em indicadores ambientais, apenas. Jiménez-González e Overcash (2014) fazem uma revisão dos processos de LCA na indústria farmacêutica, mas não relata a avaliação da dimensão social. Kralisch, Ott e Geriche (2015) fazem um tutorial-review sobre a LCA nos processos químicos verdes e relatam apenas uma estratégia de avaliação conjunta das dimensões social, econômica e ambiental na QV, o SEECube da BASF (KOLSCH *et al.*, 2008). Nessa metodologia de LCA, a dimensão social considera indicadores de condição de trabalho, toxicidade, investimentos e economia local, questões de gênero e seguridade social.

A avaliação da dimensão social pode ser feita por metodologias chamadas de *Social Life Cycle Analysis* (LCA-Social) (RAFIAANI *et al.*, 2018; SIERRA; YEPES; PELLICER, 2018). A LCA e também a LCA-Social são voltadas para a avaliação de processos que já estão efetivados (uma avaliação de impacto), enquanto a QV é voltada à pesquisa e ao *design*, em que os processos são geralmente exploratórios e ainda não aplicados em grande escala, o que dificulta a avaliação de ciclo de vida (ECKELMAN, 2016). Isso pode abrir caminhos para interações importantes entre QV e sociedade, caso se proponham processos de avaliação democráticos e construtivos, em vez de focalizar a avaliação *ex-post facto*. Esse é o caso da *Constructive Technology Assessment* (SCHOT; RIP, 1997; RIP, 2018), uma abordagem que

prevê a participação social ampla nos processos de *design* de tecnologias, em que o público contribui no estabelecimento de uma agenda de pesquisa socialmente comprometida e na criação de indicadores sociais relevantes para todos os *stakeholders*, possibilitando uma adesão tecnológica mais efetiva, representatividade de objetivos e pluralidade de valores. Esse pode ser um caminho interessante para a QV trilhar, ampliando os seus agentes e membros além dos setores industriais, acadêmicos governamentais, incluindo a população em geral como um forte parceiro para promover transformações sociais e preservação ambiental. Isso representaria adotar uma nova forma de racionalidade.

A questão é complexa e extrapola o campo de expertise dos químicos (verdes). É necessário estabelecer diálogos, primeiramente, com pesquisadores que adotam e desenvolvem métricas de sustentabilidade e sociólogos para buscar a construção de indicadores sociais aceitáveis e eficazes para avaliar os impactos da Química (Verde). Também é importante que esses indicadores coloquem a necessidade de fortalecer o diálogo da QV com a população em geral e com os tomadores de decisão. A QV, conforme vem sendo praticada, precisa ampliar o rol de seus membros, extrapolando o âmbito da academia e provocando mobilização social para gerar a pressão popular necessária para pôr em prática as transformações que ela pretende. As parcerias com movimentos ambientalistas e outros grupos civis organizados podem ajudar a divulgar as práticas e objetivos da QV, enquanto possibilitam à mesma repensar e enriquecer seus objetivos. A educação Química, até então focalizada em formar profissionais químicos altamente especializados na questão ambiental, necessita também abranger a divulgação da QV para a formação do cidadão não especialista, portanto, favorecendo a criação de uma cultura do ambiente.

5.1.3 Relações da Química Verde com as decisões governamentais

Há muito tempo se discute sobre o papel da Ciência na tomada de decisões políticas e sobre as relações entre Ciência e Sociedade. Haas e outros pesquisadores (ADLER; HAAS, 1992; HAAS, 1992b, 1992a) propuseram uma estrutura teórica para explicar a função da pesquisa científica nas decisões tomadas pelos Estados após as Grandes Guerras, cunhando o conceito de Comunidade Epistêmica (CE). As comunidades epistêmicas funcionam como uma teoria para explicar as relações entre tomadores de decisão e especialistas (CE como conceito), bem como redes de pesquisadores que respondem a uma demanda social ou, mais especificamente, do Estado (CE como objeto da pesquisa em ciência política). Elas surgem como fim do colonialismo, em que as Nações passam a ser confrontadas com os impactos de

suas ações (poluição, toxicidade, exaurimento de recursos naturais, etc.) dentro de seus territórios, ao mesmo tempo em que são confrontadas abertamente pela população. Os Estados passam a agir como reguladores, criando instituições responsáveis por fiscalizar e regulamentar certos tipos de atividades perigosas. É o caso do surgimento da EPA, locus de discussão e criação de várias regulamentações ambientais importantes, como o PPA (Ato de Prevenção da Poluição) em 1990 (US EPA, 1990).

O período pós-Grandes Guerras é marcado pela inclusão massiva de cientistas e técnicos em instituições governamentais, cuja principal função é fornecer informações para que os governantes possam tomar as decisões mais acertadas, conforme aponta Stephen *et al.* (2011, p. 382, tradução nossa) “Uma visão comum dentro de um campo de pesquisa relacionado às comunidades epistêmicas é que o objetivo de uma comunidade epistêmica é construir a ‘verdade,’ ou pelo menos o conhecimento que pode ser aceito como a verdade pelos tomadores de decisão.” O sucesso de uma comunidade epistêmica, portanto, é dependente não só da sua capacidade em gerar um entendimento consensual sobre o problema em questão, mas também de realizar alianças com detentores de poder.

No entanto, essa forma de entender a formulação de políticas tem sido questionada pelo seu caráter tecnocrático (FARQUHARSON, 2003), ou mesmo sendo acusada de “positivista” (TOKE, 1999). Farquharson (2003) e Toke (1999) criticam as comunidades epistêmicas (CE) por enfatizarem o papel da rede de especialistas sobre a tomada de decisão, ignorando o papel de outros autores, como os grupos de interesse, os movimentos sociais ou mesmo os não-especialistas.

A QV já foi analisada sob o viés das CE anteriormente (EPICOCO; OLTRA; SAINT JEAN, 2014). Não discutiremos aqui se a QV se comporta estritamente como uma CE, mas apontaremos alguns pontos de divergência (a função dos especialistas) e alguns de congruência (a ação tecnocrática) entre esses dois campos (QV e CE).

A QV emerge na esteira do PPA (US EPA, 1990), que coloca como prioridade: 1) a prevenção e redução na fonte, quando possível; 2) reciclagem, quando não for possível a prevenção; 3) tratamento dos resíduos, quando não for possível prevenir ou reciclar. O PPA criou o *Office of the Administrator* dentro da EPA responsável por coordenar os escritórios regionais e de ambientes específicos e também por estabelecer metodologias avaliação da redução da poluição, facilitar cooperações, facilitar a adoção de técnicas de redução por empresas, estabelecer programas de treinamento, identificar barreiras para a redução da poluição e fazer recomendações ao Congresso, e criar um painel consultivo composto por

representantes da indústria, do Estado e grupos de interesse para assessorar na coleção e disseminação de informações.

A mudança da política de permissão e controle da poluição para as medidas de redução na fonte começa na década de 1970, após a publicação do livro *Primavera Silenciosa* (CARSON, 2010) em 1962 e uma sequência de impactos ambientais globais e em solo estadunidense (ACS, 2015). Na década de 1980, indústria e governos começam a forjar interações internacionais que pavimentam o caminho para o PPA e entre a miríade de termos para essa nova postura da Química (química ambientalmente benigna, química limpa, etc.) surge o termo “Green chemistry” no Office of Pollution Prevention and Toxins, na EPA.

A Química Verde está sendo promovida pela EPA porque cumpre a missão da agência de proteger a saúde humana e o meio ambiente. Também está sendo promovido pela National Science Foundation como parte de sua missão de apoiar e promover pesquisas científicas básicas e inovadoras. O Departamento de Energia (DOE) está envolvido em programas de Química Verde porque espera que o país se beneficie do aumento da eficiência energética e da redução de poluentes do aquecimento global (DOBLE; KRUTHIVENTI, 2007, p. 6, tradução nossa).

Até esse momento, a QV se aproxima do conceito das comunidades epistêmicas, tendo seu contexto de emergência em grupos de especialistas que auxiliam na tomada de decisões governamentais e na regulação das atividades dentro de um território. É evidente a importância da EPA para a criação do PPA e mesmo da QV no contexto estadunidense. Essa relação agora tem sido promovida no sentido da busca de maiores incentivos governamentais para a implementação de tecnologias verdes (uma forma de política positiva) (DOBLE; KRUTHIVENTI, 2007) ou mesmo o controle de substâncias químicas com base em seu desempenho funcional ou grupo químico pós-fabricação (forma de política negativa) (THORNTON, 2000; ANASTAS *et al.*, 2018; ANASTAS; ZIMMERMAN, 2019). Nesse sentido, o conceito de CE e a QV se aproximam em seu sentido tecnocrático, cujos elementos já foram apontados por Woodhouse e Breyman (2005).

Uma diferença fundamental entre o conceito de CE e a QV, no entanto, está no papel que os especialistas desempenham na ação política a ser tomada. Nas CE, os pesquisadores buscam fundamentar uma tomada de decisão pelos governantes na forma de uma política regulatória, geralmente restritiva. Mas a QV é adversa a esse tipo de regulação e sua gênese está fortemente ligada a evitar políticas negativas (sanções, restrições e multas) sobre a atividade industrial (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS *et al.*, 1999; POLIAKOFF *et al.*, 2002; CLARK, 2006). Embora a QV seja defendida em seu mais importante livro (ANASTAS; WARNER, 1998) como uma alternativa proativa às regulações

de permissão e controle baseadas na diluição dos poluentes vigentes até a década de 1990, ou seja, a QV como uma política alternativa de regulação, no ano seguinte Anastas publica um artigo em que ressalta o papel da QV para evitar regulações restritivas:

O custo de desenvolver regulamentos pode ser reduzido ou mesmo eliminado porque a Química Verde é essencialmente de natureza não reguladora. Da mesma forma, os custos de litígios e execução podem ser reduzidos ou eliminados porque a proteção ambiental dentro de um regime de Química Verde é voluntária (ANASTAS *et al.*, 1999, p. 118, tradução nossa).

Ao promover uma prática proativa na prevenção da poluição, a QV espera se colocar fora do âmbito das regulações (POLIAKOFF *et al.*, 2002), evitando as sanções econômicas de regulação que podem ser vistas como uma “taxa ambiental”, conforme relatam Anastas e Williamson (1996, p. 6). Nesse mesmo livro (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996), os autores criticam a externalização dos custos decorrentes dos impactos ao ambiente e à saúde, que são pagos pelo público em geral. A QV possibilitaria diminuir ou evitar a geração desses custos. Mas diversos autores também defendem que o governo deveria investir dinheiro público na promoção de pesquisas e na adoção de tecnologias verdes (POLIAKOFF *et al.*, 2002; GILLET *et al.*, 2017). Claro que a perspectiva preventiva é melhor do que a de “taxação ambiental,” mas também não se pode transferir todo o custo da pesquisa de tecnologias verdes para o Estado. Esse é um custo que tem de ser compartilhado entre indústria e poder público ou, ainda melhor, liderado pela indústria.

A QV possui um histórico de relações complexas entre pesquisadores e agentes políticos que talvez transbordem os limites conceituais das CE. A CE explica o crescente interesse da academia pela QV por meio da tomada de posição de poder por aliados da QV, vide a posição privilegiada de Paul Anastas dentro da EPA. Mas os objetivos e estratégias dos pesquisadores da QV divergem da estrutura das CE, ao defenderem um autorregulação do empreendimento científico e industrial. Essa é uma característica que tem sido relacionada com o Estado Liberal ou Neoliberal (BOBBIO, 2000; FRIED, 2001) e é pauta das discussões sobre qual deveria ser a intervenção do Estado na vida privada ou na economia como um todo, uma discussão complexa e extensa para ser desenvolvida nesse trabalho. Fica o alerta, no entanto, de que o objetivo de autorregulação (ou desregulação) Liberal é uma utopia, pois o Estado é frequentemente convocado para equilibrar o mercado em períodos de crise e também por que os efeitos do liberalismo econômico, como a alta desigualdade na acumulação de capital, que são nefastos e mesmo contraditórios com o seu regime (as grandes corporações acabam por controlar a suposta “mão invisível” do mercado) (FRIED, 2001).

Um modelo de Estado (Neo)Liberal, no entanto, não pressupõe nem elimina a democracia (BOBBIO, 2000) e seus princípios, o que conduz ao tema da próxima seção.

5.1.4 Participação social democrática na atividade científica

Quando se propõe maior participação social na ciência e tecnologia, ouve-se provocações sobre qual a capacidade do público leigo em decidir assuntos tão técnicos. Por exemplo, como a sociedade pode decidir entre um processo em fluxo contínuo ou em batelada? A pergunta tem seu fundamento, mas também sua limitação. Ela considera a Química apenas como uma atividade técnica hipotética, descolada do mundo real. Sobre a questão do processo ser contínuo ou em batelada, poderíamos acrescentar as perguntas: qual o problema ele visa a responder? Qual a solução proposta? Quem são os beneficiados, os excluídos e os prejudicados pelo processo? Esse processo é necessário, bom ou justo? Aqui, situamos a atividade química no mundo real e vemos que a Química não é uma mera atividade teórica (que explica o que é o mundo), mas é uma atividade prática, que intervém no mundo e transforma-o (HACKING, 1983; SCHUMMER, 1997b; BENSUAUDE-VINCENT, 2014).

Schio (SCHIO, 2009) discute o processo proposto por Aristóteles para explicar a ação humana:

- Desejo: é o princípio da ação, o que o homem quer alcançar. Na Química, pode ser estudar as propriedades e composição de um material, criar uma substância ou resolver um problema, seja ele da vida cotidiana ou da própria ciência;
- Deliberação: é a análise regressiva dos meios eficazes de produzir o efeito desejado, adentrando o ignorado e o contingente. Nesse processo, recorre-se à frônese, a sabedoria prática, a razão calculadora e opinativa, que trata do contingencial, do mutável e do particular.
- Percepção: é a avaliação técnica dos meios analisados na deliberação com base em sua eficácia para alcançar os fins;
- Escolha: é a avaliação técnica dos meios analisados na deliberação com base em sua eficiência; o melhor meio possível;
- Ato: é o resultado do processo, é a ação em curso.

Pensar uma atividade química que seja puramente teórica, sem nenhuma aplicação relevante para a sociedade ou nenhum impacto ambiental ou social seria negar a própria história da Química e também a sua responsabilidade. O fato é que a Química produz materiais, interfere no mundo, engaja-se na resolução de problemas, revê suas práticas, além de pesquisar teoricamente a matéria. Nesse tipo de atividade química, o desejo não é apenas do cientista, mas *pode* ser um desejo coletivo, da sociedade, que às vezes se dá na forma de demanda. O uso do verbo *pode* ressalta a necessidade de não presumir os desejos da sociedade, mas institui a necessidade de investigá-los sistematicamente.

Na etapa de deliberação, é importante reconhecer que resolver um problema prático requer mais do que conhecer a aplicar conhecimentos universais (as leis da ciência), pois a ciência é construída a partir de modelos, de idealizações do mundo. Os problemas práticos são idealizáveis, mas não são ideais; suas numerosas variáveis não podem ser eliminadas à força. Logo, apenas os cientistas não são capazes fazer um levantamento amplo das alternativas possíveis para alcançar o desejo formulado anteriormente. É necessário dialogar e buscar com outros grupos sociais alternativas viáveis.

A grande contribuição da ciência, no entanto, está em fornecer conhecimentos que melhorem a percepção e possibilitem uma escolha mais adequada. A partir do espaço de alternativas criado com participação ampla da sociedade, é possível avaliar quais meios (ou métodos) são eficazes e mais eficientes. Todavia, a sociedade também é requerida a pensar os valores e os tipos e padrões aceitáveis de riscos inerentes aos processos. É necessário discutir com a população quais os riscos ela considera aceitáveis e quais ela considera intoleráveis em determinado contexto, principalmente levando em consideração as pessoas e o ambiente que serão diretamente impactados. Finalmente, a ação é realizada e a sociedade pode ser convidada a acompanhar e avaliação o desempenho da ação, bem como os seus impactos. Pois a ação tem sempre um grau de imprevisibilidade e o acompanhamento dos seus resultados é necessário.

Esses argumentos ficam mais claros quando, por exemplo, se analisa a crise sanitária causada pela encefalopatia espongiforme bovina (a doença da vaca louca). De acordo com Irwin (2012) as medidas de controle foram impostas sem nenhum diálogo com os trabalhadores dos abatedouros que as deveriam por em prática, que encararam as recomendações dos especialistas como fora da realidade ou sem nenhum sentido prático. Mats Utas (THE NORDIC AFRICA INSTITUTE, 2014) relata sobre o insucesso do controle do ebola como decorrente das determinações dos especialistas que ignoraram o contexto das

populações vulneráveis e impuseram normativas das quais a população não entendia a necessidade, como evitar contato com os mortos, evitar contatos físicos, hábitos de higiene e distância mínima entre as habitações. Tratava-se muito mais do que explicar o funcionamento das medidas ou educar cientificamente a população. A questão principal era também negociar com a população medidas viáveis de controle da propagação da doença, constando o que era possível de ser realizado e o que não era. Assim, poderiam ser sugeridas outras formas de controle, considerando as impossibilidades da população.

Samagaia (2016) discute diversas formas historicamente construídas de relação entre ciência e tecnologia, conhecidas na literatura por termos como divulgação ou comunicação científica. Uma das concepções dessa relação é a divulgação científica baseada no déficit cognitivo, em que a população leiga é encarada como uma massa com conhecimentos homogêneos e insuficientes para entender os assuntos científicos e que, não obstante, é movida pelo medo irracional à ciência. Não podemos afirmar que os pesquisadores em QV veem a sociedade dessa forma, mas o intuito de mudar a imagem da Química por meio da QV é uma constante, conforme apontam alguns autores (AMATO, 1993; CLARK, 1999; PRADO, 2003; CANN; DICKNEIDER, 2004; LEITNER, 2004; SJÖSTRÖM, 2006; CHANSHETTI, 2014). Samagaia (2016) discute que a sociedade é complexa, com grupos de agentes sociais com diferentes histórias e diferentes proximidades ao conhecimento científico, de forma que não existe “a imagem” da Química, mas diversas imagens. Ao propor a abordagem dialógica na divulgação científica, ou comunicação científica como a autora chama esse caso específico (SAMAGAIA, 2016), o público é visto como detentor de conhecimentos, valores e interesses específicos que podem contribuir para a prática científica e não apenas como uma massa quimicofóbica a ser convencida dos benefícios da ciência.

A sociedade pode influenciar a ciência, sendo mais do que consumidores responsáveis que escolhem o produto mais ambientalmente benigno. A sociedade pode influenciar na agenda científica, debater os problemas que deveriam ser abordados pelos cientistas, apoiando suas pesquisas e mesmo se organizando para coletar dados para enriquecer as investigações científicas.

5.2 TEORIA TRADICIONAL E TEORIA CRÍTICA: RACIONALIDADE INSTRUMENTAL NA QUÍMICA VERDE

Na década de 1930, autores alemães influenciados pelas obras de Marx fazem uma reflexão crítica sobre a razão e seu papel na sociedade contemporânea. Eles consideram o ideal de razão da Modernidade de ser um organizador da vida, conduzindo a uma sociedade perfeita e progredida. Adorno e Horkheimer, pioneiros desse movimento que viria a ser conhecido de Teoria Crítica, consideram que o objetivo da razão Moderna era libertar os homens dos mitos que obscureciam o seu entendimento, mas denunciam que a razão acabou por se tornar em um mito, convertendo-se em algo que é em si mesmo irracional. Eles chamam a essa forma de razão de racionalidade instrumental, a razão a serviço dos mecanismos de reprodução da cultura e da sociedade de classes — a indústria cultural (NOBRE, 2004).

Já salientamos que razão tem como um dos significados a faculdade que diferencia o homem dos demais animais e objetos do mundo, que permite avançar além das crenças míticas e agir efetivamente no mundo (MONASTERÍN, 2008). Na Teoria Tradicional o homem tem a razão condicionada e substituída pela racionalidade instrumental, conforme aponta Nobre (NOBRE, 2004, p. 91):

Trata-se de uma racionalidade que pondera, calcula e ajusta os melhores meios a fins dados exteriormente ao agente. [...] No capitalismo administrado, a razão se vê reduzida a uma capacidade de adaptação a fins previamente dados de calcular os melhores meios para alcançar fins que lhe são estranhos. Essa racionalidade é dominante na sociedade não apenas por moldar a economia, o sistema político ou a burocracia estatal, ela também faz parte da socialização, do processo de aprendizado e da formação da personalidade. [...] seria como dizer que a forma de pensamento ilusória e parcial própria da Teoria Tradicional é não apenas dominante, mas também a única forma possível de racionalidade sob o capitalismo administrado. Sendo assim, a racionalidade como um todo reduz-se a uma função de adaptação à realidade, à produção do conformismo diante da dominação vigente.

Nesse ponto, convém diferenciar a racionalidade técnica (constituente da racionalidade prática) da racionalidade instrumental (um tipo de corrupção da racionalidade em si) nesta pesquisa. A racionalidade prática, conforme Agazzi (1996b), trata tanto do âmbito da moral (se uma ação é correta, justa, boa), quanto do âmbito da técnica (se a ação é eficaz ou eficiente). Mas a racionalidade instrumental é aquela que provoca a cisão entre moral e técnica, passando a operar de um modo quase automático, desconsiderando (ou considerando acriticamente) a coerência entre as técnicas adotadas e os valores pretendidos. Na racionalidade instrumental, o sujeito realiza juízos apenas sobre meios para alcançar fins dados: para fazer isso, devo fazer aquilo. Não se estabelece um juízo de valor categórico, um

valor em si para a atividade, seja porque o sujeito está submetido a estruturas que impõem as finalidades da ação (MILLI, 2019) ou porque não refletiu criticamente sobre as possibilidades de transformação da realidade (KALBERG, 1980; RITZER, 2013).

A racionalidade teórica diz como as coisas são e a racionalidade prática diz como as coisas deveriam ser. Mas para os teóricos críticos, não se pode desvincular teoria e prática, pois só se chega a entender as coisas como elas são ao se pensar o como elas deveriam ser. Nesse sentido, teoria e prática são religados e a razão assume os contornos de uma dialética negativa. Enquanto em Hegel a razão era positiva, por mostrar o particular como uma manifestação do total, para a Teoria Crítica a razão é negativa, por apontar o real enquanto possibilidade, o que poderia ser, o devir, o *ser mais* (FARINON, 2010; MAAR, 2003).

A Teoria Tradicional, estruturada na racionalidade instrumental, considera o sujeito que conhece separado do sujeito que age, conforme salienta Nobre (2004, p. 35):

Entendida assim, a teoria científica coloca como tarefa unicamente o estabelecimento de vínculos necessários entre os fenômenos naturais a partir de leis e princípios mais gerais. Com isso, o cientista é aquele que observa os fenômenos e estabelece conexões objetivas entre eles, quer dizer, conexões que se dão na natureza independentemente de qualquer intervenção de sua parte.

Na QV isso parece ficar evidente na defesa que Winterton (2003) faz do químico como um consultor. O consultor não age, apenas emite opinião sobre um assunto para que outra pessoa possa agir.

Por esses motivos, a Teoria Tradicional cria a especialização, a análise parcial e reduzida de recortes da realidade. Destituída da crítica, na forma de “o que poderia ser”, ela aceita os fenômenos que se apresentam como naturais, independentes da história e dos sujeitos. Embora ela pretenda ser uma razão atemporal, ela somente descreve a realidade a partir de visões parciais e delimitadas em uma época: apresenta recortes da realidade que são temporais e organizados em uma lógica também pontualmente localizada (NOBRE, 2004). Acima discutimos extensamente como os valores econômicos ou valores do progresso tecnológico acabam condicionando a ação e os valores ambientais da QV. Os valores econômicos são tidos como naturais ou pelo menos não são questionados, como uma realidade objetiva e inexorável.

Alguns trabalhos analisam a presença de valores e as justificativas societárias para uma prática química, o que pode alertar para alguma vinculação da QV com a racionalidade instrumental.

Chamizo (2011) faz um estudo das transformações na prática da Química e aponta cinco revoluções teórico-metodológicas.¹⁷ Para ele, estamos vivendo a quinta revolução na Química, que representa a época de assumir as culpas, iniciada com a publicação dos estudos sobre o impacto dos clorofluorcarbonos na atmosfera. Pelo menos nos discursos, alega Chamizo (2011), a Química assume sua responsabilidade, criando códigos de conduta, participando na criação de regulações de produtos químicos e estabelecendo princípios e ideais de ação ambientalmente benigna, como a QV. Mas serão preocupações reais? O autor ressalta que durante esse período muitos institutos de pesquisa, enfrentando a má imagem da Química no período pós Grandes Guerras, esconderam a Química sob o nome de outras disciplinas, como com a biologia formando a bioquímica. Chamizo (2011) provoca, então, perguntando se a Química não estaria apenas tentando mudar a sua imagem: "em poucas palavras se maquia[ndo] de 'verde'" (CHAMIZO, 2011, p. 329, tradução nossa).

Sjöstrom (2007) analisou os discursos (visões filosóficas, visões políticas e valores — implícitos ou explícitos — que dominam as concepções e práticas) de químicos atuantes em distintas ocupações sobre a sua própria atividade química. O autor argumenta que os químicos têm uma visão modernista¹⁸ da Química, em que a natureza está à disposição do homem para ser dominada e que os eventuais problemas tecnocientíficos da Química são resolvidos com mais inovações tecnocientíficas. Um ponto importante observado por Sjöstrom (2007, 2013) é a dificuldade dos químicos, e também dos filósofos, em estabelecer um objetivo para a Química. A falta de clareza das suas finalidades dificulta entender quais são os valores que embasam a Química e avaliar efetivamente quanto ao cumprimento de seu papel social. No entanto, o autor considera que, na falta de discussão esclarecida, o discurso societário da Química coloca como objetivo principal dar suporte às inovações e educar os estudantes para a engenharia e indústrias — uma redução das finalidades aos meios (de produção).

Pitanga, Santos e Ferreira (2017) analisam artigos sobre Química Verde, tecnologias

¹⁷ Primeira Revolução (1770-1790): Química Quantitativa, linguagem; Segunda Revolução (1855-1875): Química molecular, valência, tabela periódica e organização da Química como uma comunidade organizada; Terceira Revolução (1904-1924): Físico-química e eletromagnetismo; Quarta Revolução (1945-1965): A revolução "instrumental", pela inserção massiva de instrumentos científicos nos laboratórios, e; Quinta Revolução (1973-1993): a revolução "ambiental" ou Tecnociência, pautada pela preocupação com a atividade industrial e seu impacto na sociedade.

¹⁸ Referente à ciência moderna, iniciada em meados do século XVI e que vinculava a observação, a experimentação e aparatos tecnológicos (como o telescópio), que prezava pelos valores: quantitativo, experimental, instrumental, sistemático, objetificante, reducionista e futurista (SJÖSTRÖM, 2007).

limpas e sustentabilidade publicados na Revista Química Nova nos anos de 1999 e 2015. Embora a amostra seja restrita a uma revista apenas, focalizada no público brasileiro, os autores concluem a pesquisa com um alerta: de que a QV emerge no contexto das preocupações ambientais, mas é praticada com vistas à redução do pagamento de multas, a evitar o esgotamento dos recursos e a aumentar a eficiência energética e material. Nesse sentido, finalizam os autores, a preocupação (ou justificativa) da QV deixa de ser o ambiente em si e passa a ser a busca da sustentabilidade econômica da atividade química industrial. São apontamentos importantes, mas convêm ressaltar. Os autores usam como termos de busca "Química Verde, *green chemistry*, tecnologia limpa, síntese verde e sustentabilidade", abrangendo não só a QV, mas a relação QV-ambiente (enviesando toda a busca). Ainda que a Química Nova represente um importante canal de comunicação para os químicos, ela não é uma revista especializada em QV, nem possui grande alcance na comunidade internacional, visto que publica majoritariamente em língua portuguesa. Uma pesquisa mais bem centrada no desenvolvimento e aplicação da QV continua necessária para mostrar os seus discursos e finalidades.

De forma igualmente instigante, Sjöstrom, Eilks e Zuin (2016) criticam uma possível aproximação da QV com a racionalidade instrumental, por meio da redução da prevenção e da sustentabilidade à metodologias pautadas na inovação técnica. Os autores apresentam a prevenção como um valor categórico da QV (um fim em si mesmo), a partir do qual são derivados os outros 11 Princípios na forma de soluções técnicas para a pesquisa e indústria (valores instrumentais). Para esses autores a QV apresenta uma natureza mais instrumental, de como fazer, sendo que a justificativa do porquê empreender essa ação parece estar sendo vinculada irrefletidamente aos discursos de desenvolvimento sustentável. Como ressaltado pelos autores, o desenvolvimento sustentável pode não representar uma mudança efetiva e verdadeiramente transformadora para a proteção ambiental, mas apenas uma revisão dos processos produtivos sem afetar natureza desses processos, promovendo apenas a ecoeficiência¹⁹ (mesma crítica tecida por Freitas e Marques (2017) à abordagem instrumental da sustentabilidade). Porém, a discussão sobre a presença da racionalidade instrumental na QV é um problema de pesquisa que carece de aprofundamento e de investigação crítica e

¹⁹ A ecoeficiência surge da gestão empresarial com foco no desenvolvimento econômico por meio do uso parcimonioso de recursos com alta eficiência produtiva, propiciada, principalmente, pela inovação tecnológica (LÉNA, 2012). Conforme alertam alguns autores, a inevitabilidade da degradação entrópica da energia impõe limites à ecoeficiência, possibilitando apenas proteger o esgotamento de recursos naturais, mas não impedi-lo (BARBOSA; MARQUES, 2015).

sistemática, essencial para conduzir uma reflexão apurada sobre suas influências no Ensino de Química (Verde).

Como discutimos anteriormente, a QV também se caracteriza como uma prática, usando as racionalidades do tipo ética, política e técnica. O principal valor formulado para a QV pelos seus proponentes é a prevenção dos impactos ambientais (4.2 Valores da Prática em Química Verde), conforme estipulados pelos 12 Princípios, que funcionam como regras de *design* molecular objetivando a eficiência da conversão material e energética (ANASTAS; EGHBALI, 2010). Entretanto, para que esses valores articulados nos discursos e nas tradições explicativas sejam manifestados nas políticas e programas institucionais (governamentais, industriais, acadêmicas, etc.) e expressos na prática de seus atores, os químicos verdes têm de lidar com uma situação problemática: os interesses econômicos. Não basta apenas desenvolver uma prática ambientalmente benigna, ela tem que ser também economicamente viável ou mesmo economicamente vantajosa.

Como discutimos na seção 4.2.1 Valores Práticos da Química Verde, os químicos verdes usam o argumento econômico para convencer aos demais químicos e industriais sobre a viabilidade da QV, propondo a interação sinérgica entre interesses ambientais e econômicos. Entretanto, existe uma tensão ou incompatibilidade (GEORGESCU-ROEGEN, 1971; MEADOWS, 1972; COSTANZA, 1989) entre essas dimensões, de forma que o valor econômico, que a princípio era um valor instrumental apenas para convencer aos industriais, acaba se tornando um valor categórico, superior aos próprios interesses ambientais. No esquema da Figura 12, vê-se que a QV age num pequeno espaço, sendo que há um grande escopo de práticas ambientalmente benignas que não são economicamente vantajosas e que, portanto, não são exploradas ou desenvolvidas. Por outro lado, há um grande espaço de alternativas economicamente vantajosas e que não são necessariamente benignas ao meio ambiente e essas práticas têm sido desenvolvidas na história da indústria química, conforme relatam os próprios químicos verdes: “Consequently, environmentally (and economically) inferior technologies are often used to meet stringent market deadlines” (SHELDON, 2017, p. 23). Embora o autor considere essas práticas “economicamente inferiores,” elas são adotadas por razões de mercado, de forma que há uma vantagem econômica em mantê-las.

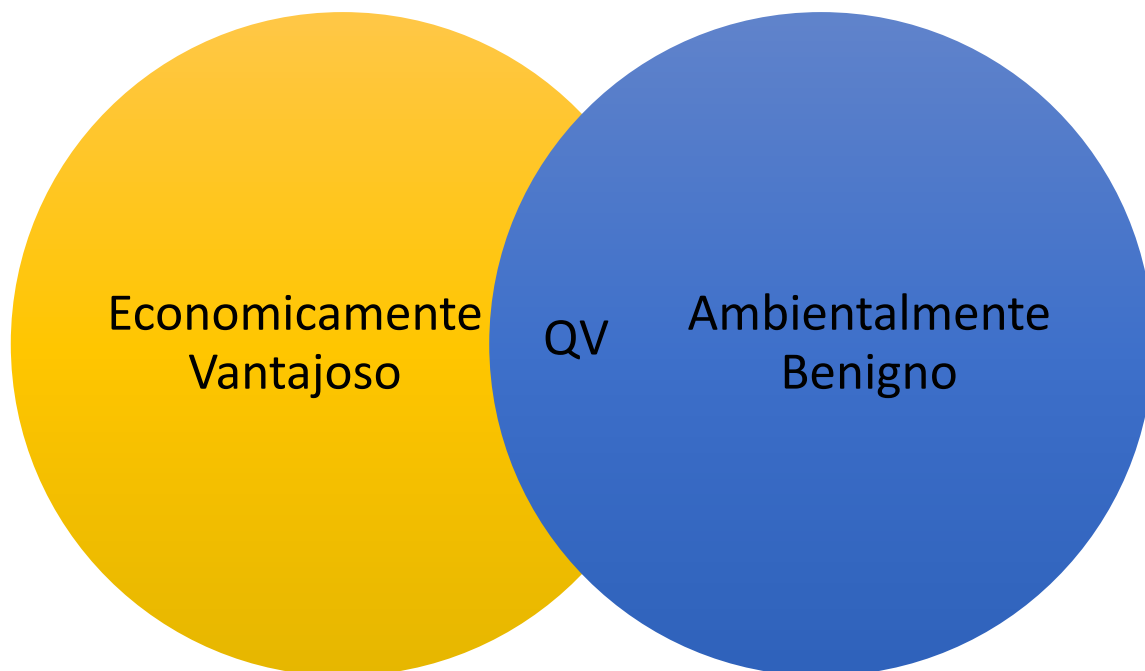


Figura 12: Campo de valores em que a Química Verde (QV) atua.

Isso demonstra que a QV tem possibilidade de ação limitada frente ao poder econômico e que economia e ambiente não competem em patamares equilibrados. O sistema industrial tem se baseado em tecnologias economicamente vantajosas por mais de um século e só recentemente está revendo suas práticas, de forma que as condições sistêmicas são mais benéficas à dimensão econômica do que à dimensão ambiental. Nesse contexto, é compreensível que os valores econômicos acabem solapando os valores ambientais. Mas isso tem a ver também com o modo pelo qual a QV busca implementar suas práticas, o que discutiremos abaixo.

O grande mote da QV para a suposta sinergia entre valores econômicos e ambientais é a inovação tecnológica, que muda discretamente ao longo do tempo. Nos primeiros trabalhos, Anastas e outros pesquisadores (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS; WARNER, 1998) defendem a importância de mudanças incrementais na prática industrial por meio da QV, de forma que somativamente o sistema possa ser transformado. A partir de 2010, Anastas e Eghbali (2010) começam a defender mais assertivamente a necessidade de aplicar os 12 Princípios de forma sistêmica, inter-relacionada, não mais de forma incremental. Isso reflete as discussões na literatura sobre os graus de inovação, que podem ser incrementais, radicais ou sistêmicos (OLTRA; SAINT JEAN, 2009). No primeiro grau de inovação, incremental, são adicionadas opções tecnológicas sem, no entanto, implicar em mudança de comportamento dos produtores ou consumidores. Na forma radical, ocorrem mudanças nos

processos de produção, no uso dos produtos e nas organizações. A síntese dessas duas gera a forma sistêmica, que vai além das fronteiras das organizações, implicando mudanças no sistema econômico, nas instituições, nas tecnologias e na territorialidade (DEBREF, 2012). A questão das análises sistêmicas é dependente das fronteiras definidas para o sistema, o que também vai influenciar a percepção do grau de inovação. Conforme argumenta Debref (2012), uma inovação vista como radical pelos químicos (verdes) pode ser encarada de forma instrumental pela indústria, se ela usar a inovação apenas como um apêndice ao seu processo já consolidado. Essa dificuldade já foi notada pelos próprios químicos verdes, que encaram a dificuldade das indústrias em modificar o seu processo de produção como uma barreira para a adoção da QV (CLARK, 1999, 2006; SHELDON, 2017).

Para entender o grau de inovação da QV é necessário discutir como ela negocia os seus valores com a sociedade. Convém ressaltar que a sociedade atual é hegemonicamente governada pelos valores do progresso tecnológico, que valoriza a capacidade humana de controlar (ou dominar) os objetos naturais, dá alta importância para as inovações que permitam aplicações tecnológicas para todos os setores da vida priorizando a definição de problemas, de forma a serem solucionados por inovações tecnológicas, culminando na pressuposição da legitimidade da inovação que tolera certos graus de impacto sociais e ambientais em nome do controle na natureza e da produção de tecnologias (LACEY, 2008a, 2008b). Conforme alerta Lacey (2008a, 2008b), a maior parte das pesquisas é desenvolvida com base nos valores do progresso tecnológico que, como podemos ver, estão entranhados nos valores econômicos: a produção de tecnologias comercializáveis.

Lacey (2008b) argumenta que um indivíduo encontra quatro estratégias de interação entre seus valores pessoais e os valores sociais: resignação, adaptação, reforma e revolução. Na resignação, o sujeito se conforma que seus valores não se encaixem no sistema social e que não há possibilidade de transformação. O sujeito adota uma postura fatalista e abre mão de sua agência, sujeita-se aos valores hegemônicos e pode atuar como uma engrenagem doente. Já na forma de adaptação, o sujeito não chega a perceber que seus valores são diferentes dos valores sociais por uma vontade de se incluir no sistema que lhe parece maravilhoso, por uma capacidade de auto compreensão limitada ou por autoengano deliberado. Aqui observa-se o caso exemplar de semiformação (*halbbildung*) (ADORNO; HORKHEIMER, 1985; MAAR, 2003; NOBRE, 2004), a formação do sujeito para se integrar ao sistema (re)produtivo da sociedade e não questionar os valores e procedimentos hegemônicos. Discutiremos mais sobre a semiformação abaixo.

No modo reformista (LACEY, 2008b), o sujeito empreende esforços para fazer a transformação do sistema hegemônico de dentro para fora, de cima para baixo, lutando para conquistar espaço político dentro das organizações e inserir seus valores nas esferas de decisão. Essa parece ser a forma como agem os químicos verdes, tentando convencer aos industriais que suas inovações tecnológicas atendem tanto aos valores econômicos quanto aos ambientais. Também a estratégia de fortalecimento da QV, por meio de formação de especialistas que articulem e expressem seus valores ambientais, relembra a forma reformista (WOODHOUSE; BREYMAN, 2005). A QV tenta ocupar lugares de poder dentro da sociedade, seja na academia, na indústria ou no governo, e exercer desses lugares a sua influência transformativa. Com base na interação reformista, a QV busca integrar os valores ambientais dentro do sistema econômico. Como argumentamos anteriormente, esses valores são incompatíveis (GEORGESCU-ROEGEN, 1971; COSTANZA, 1989; RØPKE, 2004) e pode ocorrer da QV se subsumir nos valores econômicos.

A forma reformista com a qual os químicos verdes buscam promover a integração sinérgica entre economia e ambiente parece se aproximar, no máximo, do grau radical de inovação tecnológica. Podem ocorrer modificações na produção, no uso e mesmo na estrutura das indústrias, caso os químicos verdes consigam cooptar funções de poder dentro desses setores. Entretanto, transformações verdadeiramente sistêmicas precisariam também transformar o próprio sistema econômico, suas instituições e suas fronteiras. A integração sistêmica dos valores ambientais vai além da mera incorporação de inovações ambientalmente benignas dentro das fábricas (*gate to gate*), ou mesmo além dos processos de extração e transformação (*cradle to gate*). As fronteiras do sistema químico são as fronteiras do sistema humano, em seus aspectos ambientais/naturais, sociais, culturais e tecnológicos. Aqui também há de se refletir que estamos analisando a forma de raciocinar dos químicos. Educadores, governantes e gestores podem ter outras formas de promover e justificar a QV (HOWARD-GRENVILLE *et al.*, 2017).

Conforme argumentamos, há uma incompatibilidade entre as estratégias pelas quais a QV busca expressar os seus valores na prática e a forma como articula e expressa seus valores nos discursos. A estratégia reformista pela QV acaba abrindo mão do estudo de tecnologias que seriam ambientalmente benignas por não serem economicamente viáveis, de forma que a QV pode acabar por se tornar um instrumento para a dimensão econômica, decorrendo que sua racionalidade se tornaria instrumental, como pode ser visto no trecho:

O interesse acadêmico em Química Verde é reforçado pela crescente exigência das agências financiadoras de que a pesquisa acadêmica deva abordar questões de

qualidade de vida e seja comercialmente mais explorável, e pelo aumento da "terceirização" da pesquisa industrial para as universidades (POLIAKOFF *et al.*, 2002, p. 807, tradução nossa).

A última forma de interação entre valores pessoais e sociais é a revolução (LACEY, 2008b). Nessa, a transformação se dá de baixo para cima, incorporando o que é de fora para dentro do movimento. A revolução começa com o sujeito procurando outros sujeitos e grupos sociais que compartilham os mesmos valores, divulgando esses valores e criando um movimento que conquiste o poder para implementar seus valores. Está nas mãos desse movimento a possibilidade de reformar ou revolucionar todo o sistema. É justamente essa forma que está ausente na QV, conforme argumenta Woodhouse e Breyman (2005), e que pode direcionar a QV para a racionalidade crítica, característica da Teoria Crítica. Essa abordagem revolucionária não foi encontrada nos discursos de pesquisadores em química (SJÖSTRÖM, 2007), mas seus elementos apareceram em discursos de educadores e comunicadores da QV (HOWARD-GRENVILLE *et al.*, 2017), mostrando que a educação em QV pode contribuir para uma evolução mais crítica do campo (ZUIN, 2011; MENDES; SANTIN FILHO, 2016; SANDRI, 2016; SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016).

A Teoria Crítica tem o pressuposto de que conhecer é vislumbrar o que pode ser transformado e, por isso mesmo, exige um compromisso ético com os caminhos a serem seguidos. O primeiro significado de Teoria Crítica é, portanto, o compromisso com a emancipação dos sujeitos — a libertação das amarras históricas que impedem a sua subjetivação. Decorre, da religação entre teoria e prática na forma de uma dialética negativa e de uma práxis, que o comportamento crítico é uma denúncia da realidade, na forma de uma descrição do que é no presente, e um anúncio do que pode ser a partir do que já está posto. Assim, o que já existe não é naturalizado em posturas fatalistas, mas é considerado como um obstáculo para outras formas de realidade que sejam mais democráticas (FARINON, 2010; MAAR, 2003).

Na Figura 13, apresentamos uma relação entre as formas de interação entre valores pessoais com os valores sociais e os tipos de racionalidade. As formas de resignação e adaptação estão mais voltadas para a racionalidade instrumental, pois o sujeito ignora seus próprios objetivos e valores e se torna um instrumento para realizar os objetivos de outra pessoa ou grupo social. Nesse caso, o sujeito abandona sua autonomia ou nem percebe que está agindo de forma heterônoma. No polo oposto, a reforma e a revolução então mais próximas da racionalidade crítica, pois reconhecem que há uma divergência entre os valores socialmente hegemônicos e os valores pessoais e tenta, em diferentes medidas, expressar os

valores próprios. A diferença primordial jaz no grau de aceitação da macroestrutura, que é maior da abordagem reformista e bem menor na abordagem revolucionária.

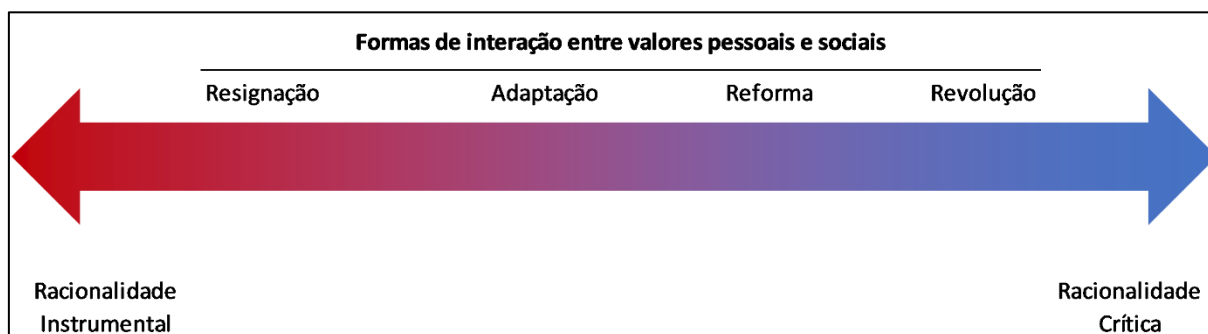


Figura 13: Formas de interação entre valores pessoais e sociais e tipos de racionalidade.
Fonte: adaptado de Lacey (2008b).

Enfim, a QV apresenta um avanço em relação à química tradicional, ao reconhecer e assumir o valor da prevenção aos impactos ambientais. Porém, há espaço para evoluir a QV em direção a uma abordagem mais crítica. Essa evolução é necessária tanto do ponto de vista técnico, político e ético. No âmbito técnico, já fizemos várias críticas às possibilidades da inovação tecnológica em produzir uma transformação efetiva para a prevenção dos impactos ambientais, seja pela complexidade dos sistemas socio-técnicos ou pela ineficiência termodinâmica intrínseca às tecnologias.

Também a estratégia política dos químicos verdes de angariar adeptos em locais de poder na academia, indústria ou governo se mostra insuficiente, pois envolve grande negociação e concessão aos valores econômicos, hegemônicos e poderosos, como o foco na criação de tecnologias que sejam concomitantemente economicamente viáveis e ambientalmente amigáveis. Ao se organizar como um movimento de elite econômica e intelectual (WOODHOUSE; BREYMAN, 2005), os praticantes da QV diminuem a possibilidade de interação com a sociedade como um todo e diminuem a possibilidade de uma prática científico-tecnológica democrática.

Como discutimos anteriormente, na seção 5.1.1 Química Verde: seus atores e seus beneficiários, a população acaba sendo vista pelos químicos verdes como consumidores cujo espectro de ação fica limitado ao consumo consciente, o que em última instância reifica²⁰ esses sujeitos, considerando-os apenas como peças para movimentar o sistema econômico. O

²⁰ Reificar: 1. contemplar uma realidade abstrata como uma coisa concreta; 2. Atribuir o caráter de coisa a; coisificar. 3 FILOS Ficar alienado, sem reação (MICHAELIS, 2020).

próprio objetivo de mudar a imagem que a população tem da Química, bastante evidenciado no artigo de Clark (1999) e na imagem da Química no Relatório Brundtland (MARQUES *et al.*, 2014), parece tecnocrático, pois ignora que esses sujeitos têm opiniões e interesses que podem não ser convergentes com a agenda científica definida pela elite (acadêmica, industrial e governamental) e que seus questionamentos podem ser pertinentes. Do ponto de vista ético, os sujeitos leigos têm suas possibilidades de ação, portanto de humanização, diminuídas pela estratégia reformista do movimento de elite da QV, contrariando a ideia de democracia e autonomia como valores categóricos ou direitos humanos fundamentais.

A transição da Teoria Tradicional para a Teoria Crítica não é obtida, argumentam seus teóricos, apenas pela descrição teórica da realidade atual, incorrendo em um fatalismo, ou pelo mero anúncio idealista de uma realidade possível e utópica. Essa transformação é, no entanto, possível ao se desvelar a realidade presente como um obstáculo para um novo projeto social, construído a partir dela. Isso significa que é necessário desvelar os mecanismos pelo qual a Teoria Tradicional, e a racionalidade instrumental, se reproduz na sociedade, ou seja, desvelar a semiformação cultural (*Halbbildung*).

Formação cultural (*Bildung*) é o processo pelo qual os sujeitos se apropriam da Cultura — os padrões de relacionamento de uma sociedade (sua língua, escrita, vestimentas, valores, formas de se relacionar com a Natureza, etc.). Ao considerar que ser humano é ser capaz de se distanciar da realidade natural, dos instintos primais dos animais, e vislumbrar uma sobre-realidade a ser construída, a verdadeira Cultura é aquela que permite ao sujeito transformar os padrões de relações sociais, de participar e transformar a sua realidade. A *semicultura*, no entanto, não é uma etapa anterior à Cultura, senão a sua antagonista. Semicultura são os padrões sociais que impedem a transformação e que primam pela reprodução de uma forma de sociedade e, por impedir o compromisso com o que pode ser, despojam o homem de sua característica primordial. A apropriação da semicultura é o que se chama, de forma sintética, de semiformação.

Finalmente, a superação da Teoria Tradicional pela Teoria Crítica passa pelo desvelamento da racionalidade instrumental que mantêm a reprodução cultural por meio da semiformação. Como já ressaltado, esses mecanismos não se manifestam apenas nas Ciências, mas perpassam todas as formas de interação humana, como as tecnologias e também a educação.

Nesse sentido, Milli (2019) aponta, a partir de relações entre Paulo Freire, Ludwick Fleck e Antônio Severino, que nem sempre a apropriação do conhecimento científico por

meio da educação possibilita uma práxis autêntica, ou seja, transformadora e condizente com a humanização e autonomia dos sujeitos. Isso decorre do fato de o conhecimento historicamente disponível ter sido construído sobre práticas produtivas e práticas sociais específicas com valores e interesses de grupos sociais determinados, de forma que as soluções possíveis atendem à manutenção da posição de superioridade da visão daquele grupo. Milli (2019) também ressalta o papel de opressão de estilos de pensamento consolidados, pois eles delimitam os conhecimentos que podem ser considerados verdadeiros e válidos, demarcando a formulação de problemas e criando um campo específico do que é possível e viável. A conclusão que podemos tirar da análise do autor é cruel: a racionalidade instrumental está sempre presente no núcleo da ciência, pois é ela que garante a coesão das ideias no estilo de pensamento, o que Fleck (2010) chama de harmonia das ilusões. A racionalidade instrumental se manifesta no mecanismo de persistência do estilo do pensamento, o esforço coletivo, conforme argumenta Fleck (2010), para ignorar, adaptar e racionalizar informações que contradigam ao estilo de pensamento. Esse fato também foi notado por Bachelard (1996), que coloca o apego ao conhecimento como um obstáculo para o avanço do conhecimento científico, ideia que leva o autor a instituir a necessidade de crítica constante ao que se acredita ser verdadeiro, colocando a verdade sempre no devir, no amanhã.

Na QV, a negociação reformista entre os valores ambientais com os valores econômicos pode conduzir à harmonia das ilusões do sistema capitalista, ou seja, à ilusão da compatibilidade entre crescimento econômico e preservação ambiental já manifestada no conceito de desenvolvimento sustentável (WCED, 1987a), conforme apontam Marques e Machado (2014). No momento, as respostas disponibilizadas pela QV para o problema da insustentabilidade ambiental são pautadas nos valores do progresso tecnológico, reforçando os interesses do Capital. Os químicos verdes precisam assumir, portanto, os postulados termodinâmicos como reveladores da insustentabilidade, desapegando-se, assim, da ideia de DS e da racionalidade instrumental.

Porém, a constatação da racionalidade instrumental na QV não impede que avanços sejam realizados. Para tanto, é necessário incluir no próprio núcleo da QV, no seu círculo esotérico de pensamento, o diálogo com outros grupos sociais, o diálogo com outros valores e interesses, de forma a pluralizar os interesses de investigação e fornecer outras respostas para o problema da degradação ambiental que não estejam necessariamente vinculadas ao crescimento econômico, mas que possibilitem os valores da participação popular (LACEY, 2008a): solidariedade, bem-estar de todas as pessoas, emancipação e pluralidade e diversidade

de valores. Essa forma de definição democrática da agenda científica tem sido defendida por diversos autores da educação científica (AULER; DELIZOICOV, 2001; DELIZOICOV; AULER, 2011; ROSO; AULER, 2016). Discutiremos as contribuições da educação científica e tecnológica para direcionar a QV para a racionalidade crítica no capítulo seguinte.

6 QUÍMICA VERDE E ENSINO DE QUÍMICA: relações para superação da racionalidade instrumental

A tentativa de compatibilização pela QV entre economia e ambiente pode levá-la à racionalidade instrumental, conforme argumentamos anteriormente. Isso acontece na medida em que os valores e interesses econômicos deixarem de ser questionados e as estratégias da QV se pautarem no movimento de elite. Portanto, se a QV for ensinada tal qual vem sendo praticada (até agora), isso pode desenvolver a formação de sujeitos semiformados (ZUIN, 2006; SJÖSTRÖM, 2013), adaptados à hegemonia dos interesses econômicos e adeptos da racionalidade instrumental. Entretanto, há também possibilidades de superação da racionalidade instrumental dentro da própria QV que serão discutidos a partir do Ensino de Química para o desenvolvimento da racionalidade crítica, tomando em consideração o caráter prático da QV discutido anteriormente.

Para Sjöström e Talanquer (2014), o objetivo da Educação Química é formar cidadãos letrados e profissionais responsáveis. Ser cientificamente letrado, para os autores, é ter conhecimentos sobre: os conceitos científicos e modelos; os processos científicos e; os contextos sociais em que a ciência seja relevante. Essa visão integrada do Ensino de Química (com foco no cidadão letrado) é chamada pelos autores de Ensino de Química Humanista (*Humanistic Chemistry Teaching*). Porém, o título do artigo em questão (SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014) talvez reflita melhor o conceito: Educação Química Humanizadora (*Humanizing Chemistry Education*), pois o foco não é apenas em assumir uma visão humanista (relacionada aos assuntos, natureza, bem-estar e valores humanos), mas de promover esse compromisso com o humano — uma prática humanizadora.

Santos (2011) aponta a polissemia do conceito de cidadania e defende a visão de que “o ensino de ciências contribuirá para a formação da cidadania na medida em que favorecer a participação dos alunos na vida comunitária” (SANTOS, 2011, p. 302). O ensino para a cidadania envolve, na visão do autor, o domínio conceitual da Química, mas também saber fazer, identificar e debater juízos de valor na esfera jurídica, ética e política. Neste capítulo, fazemos proposições para o Ensino de Química (Verde) contribuir para a formação da cidadania, considerando os tipos de racionalidade discutidos nos capítulos anteriores. Trata-se de um texto na forma de ensaio teórico, ancorado nas informações empíricas e análises realizadas anteriormente neste texto.

Discutimos nos capítulos anteriores as características da racionalidade prática na QV, indicando elementos de sua racionalidade técnica, ética e política. Isso dá características

específicas à forma de pensar do químico (verde), que precisa ser criticamente inserida no Ensino de Química, o que é o tema da seção **6.1 O Modo de Conhecer do Químico (Verde)**. Na a seção **6.2 Ensino de Química: educação tecnológica e científica**, a partir da consideração da QV como uma atividade bastante permeada pela racionalidade prática, especialmente a racionalidade técnica, discutiremos a importância de pensar o Ensino de Química como educação tecnológica, além de educação científica. Os conceitos fundamentais da educação em *design* podem contribuir para um melhor entendimento dos conteúdos educacionais da QV, conforme será discutido na seção **6.2.1 Conceitos fundamentais da Educação Tecnológica e educação em design**.

Para Sjöström (2007; 2013), o Ensino de Química e a Química Verde têm uma natureza metacientífica, semelhante àquela da Filosofia, História e Sociologia da Ciência. São campos de pesquisa que não se preocupam apenas com produzir conhecimento, mas que investigam a própria produção do conhecimento em si, que entendem o conhecimento *dentro* da cultura e *como* cultura. A relação entre Química (Verde) e cultura será discutida na seção **6.2.2 Pensamento Sistêmico (Crítico)**. Finalmente, a importância de uma educação voltada para a formação cultural (*Bildung education*) será discutida na seção **6.3 Educação para Formação Cultural**.

6.1 O MODO DE CONHECER DO QUÍMICO (VERDE)

Conforme já visto, ao investigar a forma como os químicos desenvolvem sua prática, alguns autores (CHAMIZO, 2011, 2013; TALANQUER, 2013; SEVIAN; TALANQUER, 2014) identificam que ela tem um caráter tecnocientífico (PICKSTONE, 2005), voltado para a síntese de novas substâncias e inovação tecnológica. Esses autores consideram que a Química estuda o mundo por meio da intervenção que provoca nele. Não é uma mera atividade contemplativa, mas que transforma ativamente a materialidade da realidade. Tais conceitos foram explorados no Capítulo 2, na seção 3.1 Química: teoria ou prática?. A QV apresenta as características tecnológicas ainda mais fortes do que na Química, conforme discutido na seção 3.2 Química Verde: teoria ou prática?, corroborando a ideia de McLuhan (1994) de que uma inovação tecnológica é uma mudança na escala, na velocidade, no grau de atuação de uma tecnologia no mundo.

Esses autores defendem que há uma forma de raciocínio²¹ dos químicos, uma maneira distinta de abordar os problemas da realidade, que cabe também para a QV. Para Sevian *et al.* (2015), o pensamento químico envolve o conhecimento, raciocínio e práticas que caracterizam a atividade química, as quais são voltada para o desenvolvimento e aplicação de conhecimento químico para análise, síntese e transformação da matéria para fins práticos. Para Mocellin (2015), o estilo químico de raciocinar tem a ver com síntese, controle e transformação.

Entretanto, a imagem positivista (ou universalista) das Ciências, com moldes nos objetivos epistêmicos clássicos da Física, desconsiderou a característica tecnológica da Química, reduzindo seu ensino à transmissão de modelos (dos jeitos de pensar por modelagem), supervalorizando estratégias quantitativas em vez das qualitativas, baseando-se no uso de algoritmos, conforme denuncia Talanquer (2013). Nesse sentido, a Química é apresentada no seu ensino sem seu caráter qualitativo, de pensamento baseado em regras e generalizações empíricas, com raciocínio baseado em casos e, mais gravemente, acaba sendo isolada de sua dimensão social, política, econômica, ambiental e ética — dicotomicamente atribuídas à tecnologia. A Química é apresentada no Ensino de Ciências na Educação Básica de forma descritiva, destituída de seu poder prático de seus objetivos analíticos, sintéticos e transformativos (SJÖSTRÖM, 2013; TALANQUER, 2013).

A transformação da Química escolar necessita de uma mudança na imagem da Química e das pressuposições sobre seus objetivos epistêmicos (TALANQUER, 2013). É preciso romper barreiras para um Ensino de Química mais autêntico, significativo e relevante, juntando os aspectos sintáticos da Química (organização dos seus elementos conceituais) com os aspectos éticos. É preciso eliminar a separação artificial entre a Química como conteúdo, a Química como processo (investigativo e de *design*) e a Química como agente social (TALANQUER, 2013).

Talanquer (2013) também ressalta que a tendência da literatura em ensino de química é apontar as estratégias pedagógicas mais centradas no aluno, baseadas em projetos e investigação. Mas, o conteúdo de Química ensinado continua o mesmo: aplicação de algoritmos e modelos mentais para explicar o mundo. O problema do ensino atual é apresentar a Química de forma substantiva (o que sabemos e como podemos explicar) em vez de trazer a Química de forma criativa (como pensamos e o que podemos fazer com essa forma de

²¹ O termo é “estilo de raciocínio”, pois pressupõe um caráter mais racional do que estilo de pensamento (puramente intelectual e individual), conforme alerta Mocellin (2015) embasado em Hacking (1983). Raciocínio *designa* uma ação mais pública, de argumentação e também de intervenção e manipulação.

raciocínio). Formar um cidadão quimicamente responsável não é a mesma coisa que formar um indivíduo (um químico, professor ou cidadão em geral) bem-informado. Formar para a responsabilidade exige mais do que explicar os fenômenos, mas de mostrar como a Química mudou o mundo, o reconstruiu e possibilitou ao homem interagir de formas mais efetivas com o ambiente (TALANQUER, 2013).

O Ensino de Química, a partir dessa visão sintática e ética, não se baseia em sequência de conteúdos, mas em mostrar os objetivos e a forma de pensar dos químicos, por meio de quatro perguntas básicas (TALANQUER, 2013):

1. O que é isso? — questão de Análise;
2. Como fazer isso? — questão de Síntese;
3. Como transformar isso? — questão de Transformação;
4. Como explicar isso? — questão de Modelagem.

Essas questões salientam a racionalidade teórica (o que é o mundo) e a racionalidade técnica (como fazer para transformar o mundo) no pensamento químico. Sjöström (2007) refelete sobre os conhecimentos da Química e propõe que o conhecimento químico seja abordado em três dimensões:

1. Ontológica: as teorias químicas sobre a realidade;
2. Epistemológica: as perspectivas filosóficas e sociológicas sobre a produção do conhecimento químico da realidade e;
3. Ética: o papel da Química na sociedade.

Considerando as quatro perguntas que orientam o pensamento químico e as três dimensões do conhecimento escolar da Química, vemos que a racionalidade prática é contemplada em sua totalidade. A dimensão teórica e técnica aparece nas ideias de Talanquer (2013) e a dimensão ética e política aparece mais fortemente nas proposições de Sjöström (2007).

Especialmente para a QV, tão próxima do *design* e dos processos tecnológicos, as questões de síntese, transformação e ética são bastante importantes e deveriam ser consideradas prioritariamente em seu ensino. O fato de que a QV tem uma natureza tecnológica tão importante nos leva a defender que o Ensino de Química, verde ou não, deveria se aproximar da educação tecnológica, tema da próxima seção.

6.2 ENSINO DE QUÍMICA: EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA E CIENTÍFICA

O título dessa seção pode soar estranho, já que inverte a hierarquia historicamente construída entre tecnologia e ciência, com o conhecimento teórico supostamente superior aos conhecimentos práticos (técnicos). Com o presente título, queremos ressaltar o caráter tecnológico da Química, especialmente da QV, colocando em evidência a necessidade de discutir a educação tecnológica dentro da Química.

A educação tecnológica (ET) é um conceito que só está sendo discutido ativamente nas últimas décadas (KANGAS; SEITAMAA-HAKKARAINEN, 2017), mas que tem uma história rica e que reflete a importância da tecnologia nas sociedades moderna e contemporânea. A ET passou por alguns estágios, como a educação em artesanato, educação vocacional, educação CTS, conceitos fundamentais da tecnologia e conhecimentos do século XXI, conforme analisa De Vries (2017a). O início da ET é a educação em artesanato (*craft education*) com objetivo de ensinar competências para fazer produtos úteis, tanto na educação vocacional quanto na educação geral. Nos seus primórdios, a educação em artesanato tinha grande importância social e acadêmica, principalmente com o desenvolvimento da revolução industrial, que transforma a educação em artesanato do âmbito manual para o uso de máquinas, serialização da produção, padronização e produção em quantidade. A relação da ET com a educação vocacional (ou profissional), no entanto, afetou o seu *status* entre as disciplinas acadêmicas, vistas como superiores, e a ET acabou relegada ao treinamento profissional de grupos sociais marginalizados em alguns países (GOODSON, 2001).

O movimento CTS,²² surgido em meados do século XX como crítica aos impactos sociais de inovações científicas e tecnológicas, pareceu trazer à tona a tecnologia. Porém, em seus anos iniciais, o movimento entendeu tecnologia como ciência aplicada, escondendo a sua componente de *design*, i.e., o âmbito da tomada de decisões baseadas em critérios além de conhecimentos científicos. A vinculação da educação científica (EC) e ET tirou a necessidade de se criar uma disciplina de tecnologia, pois agora se tinha a imagem de que trabalhar com ciência era o mesmo que trabalhar com tecnologia, o que dificultou a evolução e reconhecimento da educação tecnológica e de suas características particulares, conforme relata De Vries (2017a). Parte desse problema é que a ET estava na fase de educação em

²² Convém ressaltar que CTS é um movimento amplo, com várias frentes, algumas com abordagens mais tradicionais e outras com abordagens mais críticas (PEDRETTI; NAZIR, 2011).

artesanato e seus educadores não terem um *background* científico, ficando de fora das discussões do CTS.

No fim da década de 1980, emerge o conceito de alfabetização científica ou letramento científico (*scientific literacy*), com um caráter menos “ativista” do que o CTS (sic, DE VRIES, 2017a), abarcando o desenvolvimento da habilidade de criticar a tecnologia e de ser apto a viver e trabalhar em uma sociedade tecnológica, fazendo uso responsável e criativo da tecnologia. Também surge nos EUA documentos sobre literacia científica e tecnológica, bem como o termo educação tecnológica em seus quatro eixos principais: manufatura, construção, transporte e comunicação. O uso do termo literacia indica que a educação tecnológica não é apenas tarefa de uma disciplina específica, mas é um resultado que também deve ser alcançado em conjunto, inclusive pelas disciplinas da educação científica (DE VRIES, 2017a). O termo também criou a necessidade de discutir o que é a tecnologia sobre a qual o indivíduo deve ser literado, abrindo caminho para o maior desenvolvimento da filosofia da tecnologia.

O movimento *Science, Technology, Engineering and Mathematics* (STEM) pode ser considerado como um ressurgimento do movimento CTS, agora com a devida ênfase à tecnologia e ao *design*, colocando a diferença entre educação tecnológica e educação em engenharia (DE VRIES, 2017a). A primeira está vinculada a educação de princípios mais qualitativos, de criação de modelos e voltada ao ponto de vista do consumidor. A educação em engenharia é mais quantitativa, discute aspectos específicos dos modelos e coloca o ponto de vista no desenvolvimento de produtos.

Três fatores problemáticos se fizeram presentes no início da ET (DE VRIES, 2017a): tecnologia como trabalho artesanal, como educação vocacional de baixo *status* e como ciência aplicada. Nenhum desses problemas (e estratégias da ET) abordou uma questão central: o *design*. A disciplina de *design* surge na Inglaterra e País de Gales durante a década de 1980, evoluindo da disciplina “artesanato” (*crafts*) para formar “*design* e tecnologia” (*Design & Technology*, D&T) (DE VRIES, 2017a). Por um lado, a disciplinar D&T ressaltou o *design* como um campo de conhecimentos e divulgou sua importância, mas também levantou dúvidas sobre o caráter disciplinar e sua base epistemológica, o que ameaçou a existência da disciplina e seu status acadêmico. Essas críticas vieram majoritariamente de fora da disciplina, pois na época da educação para o artesanato os conceitos fundamentais da disciplina não eram um problema a ser abordado pelo campo, já que a questão era o saber-fazer.

A busca pelos conceitos fundamentais ou centrais da ET não foi um problema em suas décadas iniciais na maioria dos países. Porém, nos países do bloco comunista, havia especial interesse em teorizar sobre o conteúdo das escolas politécnicas, visto que, para essas nações, o domínio dos meios de produção é onde o poder social se encontrava. Uma das grandes teorias sobre a prática surgida nesse contexto é a praxiologia, o estudo do *design* como práxis (GASPARSKI, 1983). Também na Alemanha Ocidental, capitalista, houve o desenvolvimento de teorias voltadas ao pensamento sistêmico, buscando teorias gerais que pudessem explicar a prática (BAILEY, 2001, 2006; DE VRIES, 2017a). O pensamento sistêmico começou a se desenvolver nos EUA a partir de 2010 com estudos sobre como os estudantes suecos e holandeses aprendem sistemas. A data também marca o foco de Anastas e Eghbali (2010) na natureza sistêmica dos 12 Princípios da QV.

A última tendência a influenciar a educação tecnológica ocorreu a partir da formulação dos conhecimentos para o século 21 que colocam a criatividade, cooperação, resolução de problemas e capacidade de comunicação como objetivos a serem desenvolvidos na educação e a ET parecia ser a disciplina mais adequada para ensiná-los (DE VRIES, 2017a). Esses conhecimentos parecem decorrer da ideia de “competências chave” desenvolvidas na Alemanha Ocidental durante a década de 1980 a partir da percepção de companhias industriais da necessidade de mão de obra com conhecimentos gerais de tecnologia para acompanhar o ritmo acelerado de inovação e de capacidade de resolução de problemas e comunicação para garantir a implementação de novos negócios (DE VRIES, 2017a).

Atualmente, a ET continua a enfrentar constante ameaça de ser retirada dos currículos. Há grande demanda dos governos por resultados práticos, como aumento de matrículas em cursos de engenharia e ciência, ainda que a existência do ensino de matemática e outras disciplinas científicas nunca seja questionada, o que ressalta o persistente baixo status da ET (DE VRIES, 2017a).

A seguir, exploramos alguns elementos da ET, como seus conceitos fundamentais, a importância da educação em *design* e do pensamento sistêmico.

6.2.1 Conceitos fundamentais da Educação Tecnológica e educação em *design*

Discussões recentes na ET colocam o objetivo dessa educação para o mercado de trabalho e também no desenvolvimento de valores. Rossouw *et al.* (2011) encontram cinco

temáticas importantes para ET na literatura da área, descrevendo grandes categorias de conceitos fundamentais para a ET:

- *Design*: otimização e concessão, critérios e restrições, iteração;
- Modelagem: representacional, explicatória, preditiva;
- Sistemas: sistemas/subsistemas, input-processo-output, feedback e controle;
- Recursos: materiais, energia, informação, tempo, ferramentas, humanos, capitais;
- Valores humanos: sustentabilidade, avaliação tecnológica, criatividade/inação, decisões éticas.

Esses temas se dividem em 38 competências (HACKER; BARAK, 2017), sendo que 14 delas adquirem alta importância, conforme estudo Delphi²³ que contou com opinião de especialistas em educação, especialistas em tecnologia, educadores em engenharia e professores de educação tecnológica no ensino médio (HACKER, 2017), conforme Quadro 10.

Quadro 10: Principais competências da Educação Tecnológica e seus temas.

Temas	Competências
Design	1. Explicar por que uma decisão de <i>design</i> foi feita, usando meios verbais e visuais.
	2. Iterativamente fazer <i>design</i> e construção, em modelo ou escala real, de produtos, sistemas, processos modelos ou ambientes que atendam aos requisitos e os critérios de performance.
	3. Engajar em atividades de resolução de problemas em grupos para criativamente gerar várias soluções alternativas de <i>design</i> e documentar o processo que resultou no projeto final.
	4. Resolver problemas de <i>designs</i> pela identificação e aplicação de conceitos científicos apropriados.
	5. Resolver problemas de <i>designs</i> pela identificação e aplicação de conceitos matemáticos apropriados.
Modelagem	6. Usar modelagem representacional para apresentar a essência de um <i>design</i> .
	7. Desenvolver um teste justo, mudando variáveis, e usá-lo para analisar as

²³ Um método de previsão e tomada de decisão baseada em conhecimentos de especialistas organizados em grupo ou individuais.

	possibilidades e limitações de um modelo físico ou virtual.
Recursos	8. Identificar e discutir questões ambientais, de saúde e segurança envolvidas na implementação de um projeto em engenharia.
	9. Uso correto e seguro de ferramentas e máquinas para produzir um produto ou sistema desejado.
	10. Avaliar informação científica e tecnológica pela veracidade e autenticidade das fontes.
	11. Identificar e discutir questões de privacidade envolvendo o uso de recursos de informação.
Sistemas	12. Nomear e explicar um diagrama de um sistema tecnológico familiar, como sistema de ar condicionado, que especifique os componentes: inputs, processos, outputs, respostas e controles.
	13. Identificar e explicar a função de subsistemas interatuantes e que formam um sistema maior.
Valores humanos	14. Mostrar evidências da consideração de fatores humanos (ergonomia, segurança, eficácia para os objetivos humanos e ambientais) quando propor uma solução de <i>design</i> .

Fonte: adaptado de Hacker e Barak (2017).

A maioria das competências está relacionada ao tema do *design*, mostrando sua importância para a atividade tecnológica e para a ET. Em seguida, o tema dos recursos é o que mais tem categorias relacionadas. Esses focos da ET relembram características da QV, já que sua prática também é bastante voltada para o *design* e para a gestão de recursos, como visto nos capítulos anteriores. É preocupante, no entanto, que os valores humanos apareçam apenas em uma competência e bastante direcionados para a criação de produtos que sejam socialmente aceitos ou valorizados.

As competências acima relacionam conhecimentos (teóricos e práticos) que podem ser apreendidos a partir da QV. Os alunos podem aprender a justificar escolhas, por exemplo: de *design* em valores técnicos, epistêmicos e sociais; que o *design* se baseia no planejamento sucessivo de melhorias no empreendimento e na sua avaliação; e a importância de considerar o uso eficiente dos recursos. Mas o mais importante das competências acima é colocar o estudante como *designer*, refletindo ativamente sobre o processo de criação. Esse processo é importante não somente para formar novos especialistas (engenheiros, químicos verdes ou *designers*), mas para desenvolver de forma reflexiva as capacidades de criatividade e o entendimento de como se dá o processo de inovação científico-tecnológica. Os bacharéis, técnicos e tecnólogos em Química têm maior proximidade com disciplinas tecnológicas em

sua formação, mas a ET precisa ser também abordada na educação básica e formação de professores de forma crítica e reflexiva. Trata-se de pensar o conhecimento químico relacionado às respostas das perguntas propostas por Talanquer (2013): O que é isso? Como fazer isso? Como transformar isso? Como explicar isso? Também aborda a questão que pode ser formulada a partir das considerações de Sjöström (2007): por que devo fazer isso?

Silva e Santos (2014) relatam a incipiência da educação científica em assuntos morais ou valores humanos. As escassas pesquisas sobre o tema tratam de atitudes e posicionamento de alunos frente a temas sociais, mesma tendência encontrada na ET (HAUPT, 2017). Para Silva e Santos (2014), a educação para a cidadania deve oferecer aos alunos as possibilidades de identificar os valores (julgamentos morais) em tomadas de decisões e as ferramentas necessárias para mediar os conflitos entre os valores que, muitas vezes, são opostos.

Conforme vimos acima, esses conhecimentos da ET são bastante defendidos como conhecimentos próprios da Química (CHAMIZO, 2011, 2013; TALANQUER, 2013). Talanquer (2013) argumenta que diversas pesquisas recentes em Ensino de Química mostram o papel do pensamento baseado em modelos (modelagem, explicação e argumentação). Porém, ele enfatiza que também é importante mostrar outras formas de pensar largamente utilizadas na Química, que se aproximam mais do pensamento em engenharia: o pensamento baseado em regras e o pensamento baseado em casos.

Nesse sentido, Chamizo (2013) defende a aprendizagem por resolução de problemas para apresentar aos jovens as implicações das tecnologias químicas e para possibilitar a alguns deles (os interessados) prosseguir nos estudos acadêmicos em química. A resolução de problemas pode ser de dois tipos (CHAMIZO, 2013): PS1²⁴ — tipicamente conceitual; e PS2 — que envolve repercussões práticas, enraizadas no mundo real, na forma de resolução de casos. Os bons solucionadores de problemas são aqueles que dominam os princípios e fatos básicos, sendo capazes de inventar e usar modelos para resolver situações práticas reais. É necessária uma astúcia (*cunning*) para usar os recursos à disposição para se alcançar um determinado fim e, por isso, essa astúcia é racional, pois usa os conhecimentos disciplinares para encontrar a solução. A modelagem centrada no estudante é um processo que imita a forma como o cientista químico investiga o mundo e também deve ser direcionada para a criação de novos materiais (CHAMIZO, 2013).

²⁴ *Problem Solving* (PS): resolução de problemas, conforme uso do autor (CHAMIZO, 2013).

Por outro lado, Chamizo (2013) e Sevian *et al.* (2015) defendem que o Ensino de Química deveria começar a ensinar os estudantes a construírem modelos (modelagem) e não somente a usarem modelos. Os modelos assumem um papel prático, de intervenção, não apenas de representação da realidade. Três condições são necessárias para isso:

1. Conhecimento (tanto quanto possível) da porção do mundo a ser estudada;
2. Escolher e combinar um conjunto de itens considerados importantes para aquele objetivo (como analogias);
3. Imaginação e criatividade para projetar o modelo mental compatível com aquela parte do mundo a ser estudada.

Essas condições básicas são muito semelhantes à descrição geral do trabalho do *designer* (PYE, 2007; ANASTAS; EGHBALI, 2010; KANGAS; SEITAMAA-HAKKARAINEN, 2017), de que *design* é a aplicação de um princípio conhecido a uma condição específica, um rearranjo de um sistema particular em um determinado recorte da realidade, controlando (o máximo possível) o fluxo de energia para obter resultados favoráveis.

De acordo com Haupt (2017), *design* é a alma da tecnologia; fazer projetos é a forma como a tecnologia é praticada. O objetivo de aprender *design* é entender como *design* e tecnologia afetam o mundo e como se dá nossa existência em torno desses sistemas de artefatos (KANGAS; SEITAMAA-HAKKARAINEN, 2017). O processo de *design* é parecido com a aprendizagem por investigação, envolvendo tarefas como fazer questões, planejar investigação, usar fontes de informação, analisar dados, comunicar resultados, bem como reconhecer e analisar explicações e predições alternativas (HENNESSY; MURPHY, 1999). É um processo cíclico de construção, avaliação e revisão em que novos conceitos científicos e tecnológicos são usados em cada ciclo da atividade, alterando variáveis, explorando a eficiência dos artefatos (KANGAS; SEITAMAA-HAKKARAINEN, 2017). Geralmente são projetos desenvolvidos em período longo, com a criação de artefatos e uso de tecnologias.

Kangas e Seitamaa-Hakkarainen (2017) propõem a estratégia *Learning by Collaborative Design* (LCD) como uma metodologia de ensino para a educação básica em que os alunos se engajam em cristalizar, externalizar, compartilhar e desenvolver artefatos de conhecimento, como rascunhos ou protótipos. O conhecimento é encarado no âmbito do *design*, cujo foco é a utilidade, adequação, eficiência e o potencial de desenvolvimento das ideias. O processo da LCD é espiralado, em ciclos ascendentes de complexidade; cada etapa

corresponde a novos conhecimentos integrados ao processo (a iteratividade do *design*). A LCD é baseada nas fases: 1) criar o contexto de *design*; 2) definir a tarefa e as condições limite; 3) criar representações conceituais ou visuais; 4) avaliar ideias e limites do *design*; 5) conectar-se a comunidade de peritos e coletar dados; 6) experimentar e testar as hipóteses de *design* por meio de rascunhos, modelos e protótipos; 7) avaliar as funções dos protótipos; 8) elaborar uma síntese das ideias do *design* e reprojeter (KANGAS; SEITAMAA-HAKKARAINEN, 2017).

Os problemas a serem abordados pela LCD, ou qualquer estratégia para educação tecnológica, não podem ser muito abertos, caso contrário, esses problemas não incentivariam a criatividade e as soluções seriam as tradicionais. Nas tarefas envolvendo o *design* para a QV, os limitantes parecem ter sido definidos nos seus 12 Princípios: a redução do resíduo, a prevenção da periculosidade e o aumento da eficiência energética e material (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS; WARNER, 1998; ANASTAS; EGHBALI, 2010). As possibilidades de representações conceituais e visuais são ricas, englobando tanto as estratégias da tecnologias (plantas, *blueprints*, diagramas, maquetes, etc.) como a linguagem química, que integra os níveis macroscópico, submicroscópico e representacional (JOHNSTONE, 1993). A comunicação com a comunidade de especialistas da QV pode ser dar por meio de contatos virtuais com pesquisadores do campo, em contato com pesquisadores da universidade ou eventos de divulgação científica e extensão. A avaliação e experimentação dos projetos de *design*, no caso da QV, pode ser realizada em atividades de laboratório ou por meio de avaliações semiquantitativas apenas dos projetos. Uma estratégia interessante para avaliação de verdura química em contextos de educação básica é a Estrela Verde, uma representação gráfica de um conjunto de métricas que possibilita uma análise holística²⁵ da verdura química (RIBEIRO; COSTA; MACHADO, 2010a, 2010b). A Estrela Verde pode ser usada para avaliar experimentos realizados em laboratório ou apenas os seus projetos (os roteiros), sendo uma boa estratégia para o *design* iterativo dos produtos químicos, abrindo possibilidades para estudos da segurança dos produtos químicos, em termos de saúde humana e ambiental (DUARTE; RIBEIRO; MACHADO, 2014), o que é importante à formação da cultura do ambiente.

Projetos de *design* podem ser relativos a fenômenos culturais ou tópicos interdisciplinares, sendo que o sentido do problema é desenvolvido pelo professor, que

²⁵ Holística aqui se refere mais a visão integrada no âmbito tecnológico.

direciona a atividade para o grau de conhecimentos dos estudantes, mas também pelos estudantes que emolduram o problema com base em seus valores e definem a tarefa a ser desenvolvida com base em interesses individuais ou sociais (HENNESSY; MURPHY, 1999). Mas também tem de ficar claro para os estudantes que os problemas de *design* são sempre mal definidos e mal estruturados, no sentido de que eles são complexos, com finalidades abertas e dinâmicos (GOEL; PIROLI, 1992) e a natureza do *design* é incompleta, ambígua e vaga (HAUPT, 2017). É incompleta porque *design* é planejamento e seu fim só se estabelece após a execução do projeto. Ambiguidade e imprecisão têm a ver com a complexidade dos elementos que interatuam num sistema. Essas características dos sistemas do *design*, ou de qualquer sistema prático, tornam necessária a constante reflexão e análise da atividade, interpretando novas informações que surgem de fontes internas ou externas. Assim, *design* tem a ver com lidar com as incertezas e se preparar para elas.

A natureza das incertezas conduz às formas como elas podem ser abordadas. Há incertezas técnicas, metodológicas e epistemológicas. As desconfiças sobre a precisão e confiabilidade dos dados determinam as incertezas técnicas, que pedem uma avaliação mais controlada e sistemática da situação. As incertezas quantos aos procedimentos científicos e ferramentas analíticas são as metodológicas. A incerteza epistemológica se verifica no questionamento da própria veracidade do quadro de conhecimentos em que o problema é formulado. A QV aborda as incertezas metodológicas associadas às ferramentas de controle da poluição, questionando se elas são realmente eficazes no tratamento e controle dos resíduos poluentes (ANASTAS; WILLIAMSON, 1996; ANASTAS; WARNER, 1998). Do ponto de vista epistemológico, Thornton (2000) critica elementos fundamentais da gestão de risco na Química que embasam a política de permissão e controle, o que ele chama de paradigma do risco. O autor questiona a veracidade dos conceitos de capacidade assimilativa do ambiente em absorver e degradar poluentes e de grau de exposição, a quantidade máxima de poluentes que o ambiente pode assimilar. O autor também ressalta a falta de pesquisas e a complexidade de se investigar os impactos das substâncias químicas devido às suas interações sinérgicas e bioacumulação na cadeia alimentar. A partir dessas incertezas, o autor formula a necessidade de incluir o princípio da precaução na gestão de risco da Química, cunhando quatro pilares de ação: descarga zero de poluentes, produção limpa (prevenção proativa), exigir dos produtores de substâncias químicas pesquisas sistemáticas sobre a segurança dos produtos e gestão de classes inteiras de produtos, em vez de gestão de substâncias individuais (THORNTON, 2000).

Lacey (2008a) também critica as incertezas epistemológicas da ciência praticada com interesses na produção de inovações tecnológicas para controle da natureza. Para o filósofo, focalizar a agenda científica em apenas uma estratégia metodológica e em valores de dominação do ambiente deixa todo um campo de alternativas sem investigação e traz incertezas sobre os conhecimentos e produtos científico-tecnológicos. Se somente uma estratégia de pesquisa é empregada, como ter certeza de que conhecimentos gerados por outras estratégias não são melhores, questiona o autor. Assim, ele considera o princípio da precaução como fundamental para a criação do pluralismo metodológico na atividade científico-tecnológica, desenvolvendo a pesquisa ampla e sistemática de várias possibilidades de se abordar um problema, incluindo interesses, valores e conhecimentos de vários sujeitos na definição da agenda científica (LACEY, 2008a, 2008b).

Sjöstrom (2013) enfatiza a necessidade de considerar as incertezas no conhecimento, por exemplo, decorrentes da "quimicalização" (conferir seção 3.1 Química: teoria ou prática?). A partir dessas considerações, defendemos a importância de abordar o princípio da precaução no Ensino de Química. Conforme aponta Souza (2016), as várias definições do princípio da precaução funcionam como exemplares das relações entre ciência, tecnologia e sociedade, com algumas redações do princípio sendo subutilizadas para fazer a manutenção de interesses hegemônicos. A autora também defende o princípio da precaução como um guia útil nas discussões sociocientíficas (SOUZA, 2016), defendendo o uso da definição do princípio proposta pela Comissão Mundial sobre a Ética do Conhecimento Científico e Tecnológico da Unesco (COMEST) por ser mais clara e possibilitar um melhor diálogo:

Quando atividades podem conduzir a dano moralmente inaceitável, que seja cientificamente plausível, ainda que incerto, devem ser empreendidas ações para evitar ou diminuir aquele dano. “Dano moralmente inaceitável” refere-se a dano para os seres humanos ou para o ambiente, que seja uma ameaça à vida ou à saúde humanas, ou que seja sério e efetivamente irreversível, ou injusto com as gerações presentes e futuras, ou imposto sem a adequada consideração dos direitos humanos daqueles afetados. O juízo de plausibilidade deve estar fundado em análise científica. As análises devem ser contínuas, de modo que as ações escolhidas sejam submetidas a revisão. “Incerteza” pode aplicar-se, mas não necessita limitar-se, à causalidade ou aos limites do dano possível. “Ações” são intervenções empreendidas antes que o dano ocorra que buscam evitar ou diminuir esse dano. Deve-se escolher ações que sejam proporcionais à seriedade do dano potencial, com consideração de suas conseqüências positivas e negativas, e com uma avaliação tanto da ação como da inação. A escolha da ação deve ser o resultado de um processo participativo (COMEST, 2005, p. 14, tradução nossa).

Considerar as incertezas durante um processo de *design* ajuda a delimitar, portanto, a própria confiabilidade e abrangência dos resultados. Por isso as primeiras etapas da LCD envolvem a construção do contexto do *design* e de suas tarefas e limitações, pois a forma

como o problema é entendido e quais relações causais são estabelecidas influencia a tarefa a ser projetada e os limites de ação do *designer* (KANGAS; SEITAMAA-HAKKARAINEN, 2017). Por exemplo, quando se parte do pressuposto que a forma como a economia está sendo desenvolvida e o ambiente são compatíveis por meio da inovação tecnológica, conforme característica da QV discutida anteriormente, a decorrência é focalizar o *design* na criação de novas tecnologias mais eficientes. Se, no entanto, parte-se da consideração da incompatibilidade entre as dimensões anteriores e a limitação entrópica da eficiência, a alternativa seria mexer no próprio ritmo de crescimento econômico e encontrar alternativas socioculturais, ou seja, seria necessário ampliar o sistema em análise (GEORGESCU-ROEGEN, 1971; LATOUCHE, 2012).

Em pesquisa sobre as publicações sobre estratégias docentes para educação em *design* entre 2011 e 2016, Haupt (2017, p. 652, tradução nossa) encontrou que 41% das 194 pesquisas analisadas seguem a estratégia cognitivo-construtivista, usando termos como “transferência de conhecimento, modelos mentais, resolução de problemas, aprendiz cognitivo, competência técnica e literado tecnologicamente”. Logo em seguida, há a tendência sócio-construtivista com 26% das pesquisas e 23% na perspectiva de tecnologia educacional.

Como base na dimensão de análise do *design* como objeto de pesquisa (HAUPT, 2017), 32% dos 194 artigos analisam o *design* no âmbito epistemológico, ou seja, do conhecimento conceitual e entendimento, conhecimento procedimental e integração entre ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM). No âmbito ontológico (36%), os trabalhos discutiram processos mentais isolados que contribuíram para o *design* de artefatos e a solucionar problemas tecnológicos, como orientação para objetivos, representação, processamento de informação, tomada de decisão, estrutura do problema e pensamento sistêmico. A maioria dos artigos abordou o *design* do ponto de vista metodológico (40%), abordando sequências de atividades ou processos práticos, como pesquisa, interpretação, ideação, comunicação, descoberta, heurística, etc.

Discussões axiológicas foram as menos realizadas com relação ao *design* (11%), restringindo-se a discutir gênero, percepções, escolhas e atitudes frente às tecnologias, ou seja, avaliação pós-fato da tecnologia. O desafio continua a ser abordar a complexidade dos valores, tais como ambientais, econômicos, éticos, estéticos e políticos (HAUPT, 2017). Essa é a chave dos estudos pautados no Pensamento Sistêmico Crítico, que abordaremos a seguir.

6.2.2 Pensamento Sistêmico (Crítico)

A definição básica de sistema é a interação entre um número de elementos, separados de uma vizinhança²⁶ externa e estabelecendo trocas com ele por meio de inputs e outputs (OLSSON; SJÖSTEDT, 2005). É um campo interdisciplinar e que não respeita as divisões disciplinares para abordar os sistemas.

Pensamento sistêmico é uma maneira de entender as coisas que já aconteceram, de encontrar as causas dos fenômenos e novas possibilidades, expandindo as fronteiras dos sistemas e encontrando dimensões escondidas. O pensamento sistêmico é necessário porque as soluções tecnológicas vão além de responder a uma demanda individual, sendo soluções para os desejos e necessidades da sociedade (SVENSSON, 2017). Para Ulrich (2001) o propósito fundamental do pensamento sistêmico é a melhoria (inovação) do sistema, não a apreensão do sistema em si.

O pensamento sistêmico começa por questionar sobre o propósito do sistema para depois descrever suas partes. Essa é uma característica essencial para a resolução de problemas e de diversas outras estratégias, pois não existe apenas uma forma de pensamento sistêmico (ULRICH, 1994, 2001). Essa forma de pensar pode ser entendida como a busca de solução de problemas do mundo, envolvendo (SVENSSON, 2017): encontrar a causa do problema, criar modelos, identificar valores, e viver e experienciar um sistema.

Parece haver uma tendência na educação tecnológica em considerar os sistemas apenas como sistemas tecnológicos, ignorando elementos sociais, culturais e políticos como constituintes dos seus sistemas em análise. No *Handbook of Technology Education* (DE VRIES, 2017b), há um capítulo voltado a educação em sistemas que focaliza apenas o sistema tecnológico, formado por máquinas e o sistema sócio-técnico, conforme chama Svensson (2017), sendo constituído por aquilo que pode ser representado materialmente como componentes físicos, uma estrutura para entender o mundo natural e construído com um todo feito de partes e com relações com a vizinhança. Alguns métodos comumente usados para descrever, desenvolver e controlar sistemas tecnológicos são *System Dynamic Model* (SDM), *Life Cycle Analysis* (LCA) e *Material Flow Analysis* (MFA) (SVENSSON, 2017). Embora haja uma tendência de análise dos sistemas tecnológicos, eles não são os únicos, há também os sistemas de máquinas, de organismos, sistema social, sistema psicológico, sistema sócio-

²⁶ Em inglês, *environment* ou *surrounding*. O termo vizinhança foi adotado para não causar confusão com o termo ambiente.

técnico e o grande sistema ciência-tecnologia-sociedade-psicologia (INGELSTAM, 2002). Embora nem todos vão virar desenvolvedores de modelos ou de sistemas tecnológicos, é bem provável que todos iremos interagir com eles.

Conforme alerta Svensson (SVENSSON, 2017), é importante focalizar o estudo dos sistemas em seu propósito, em vez da descrição das suas partes. O propósito dos sistemas acaba se perdendo rapidamente nas análises, especialmente em sistemas sócio-técnicos, em favor de descrições mais mecânicas. Conforme ressalta Ulrich (1994, 2001), o propósito de todo sistema é a sua melhoria, o aumento de sua eficiência. Mas como argumentamos anteriormente, seção 4.2.1 Valores Práticos da Química Verde, a eficiência é a melhoria de um objetivo socialmente definido, o que nos leva para a importância da definição do propósito dos sistemas.

A inovação (ou melhoria) de um sistema só é melhoria a partir do ponto de vista das fronteiras desenhadas para o sistema. Churchman (1979) introduziu a ideia na teoria de sistemas de que as fronteiras entre sistema e vizinhança não são dadas pela realidade, mas são construídas pelos sujeitos cognoscentes. As fronteiras dos sistemas representam a abrangência do conhecimento a ser construídos e o grau de democracia do processo de tomada de decisão. Quanto maior a fronteira de um sistema, mais informações sobre o sistema são coletadas e organizadas e mais pessoas podem participar da construção desse conhecimento, o que ficou conhecido como o *problema das fronteiras* (MIDGLEY, 1995; MIDGLEY; MUNLO; BROWN, 1998).

Não obstante, Churchman (1979) denuncia a *falácia da vizinhança (environmental fallacy)* quando projetos são desenvolvidos a partir de necessidades claras e urgentes (como o controle do abuso de drogas) ou de consequências impactantes (como o esgotamento dos recursos naturais), mas que ignoram a vastidão da vizinhança (o que está fora do sistema), o que leva ao desastre e ao caos social. Ao ignorar a vizinhança ou considerá-la de forma reduzida, esses projetos de intervenção implementam imperativos falaciosos que desencadeiam uma série de reações no sistema e fora dele. As reações provocadas pelo projeto de intervenção no ambiente acabam por gerar resultados “inesperados” e opostos aos objetivos iniciais. Por exemplo, ao implantar uma política rígida de controle do abuso de drogas por meio de aplicação da lei, aumenta-se o comércio de droga ilegal, que não obstante sobem de preço o que aumenta o número de viciados que cometem crimes, aumentando a criminalidade.

A falácia das vizinhanças questiona quais são os elementos que deveriam ser considerados como participantes do sistema e quais deveriam ser considerados parte do ambiente (fora do sistema). Como um sistema é uma abordagem metodológica para estudar relações entre elementos por meio da construção de modelos simplificados da realidade que é complicada, complexa ou perversa (SVENSSON, 2017), cada sistema pode ser considerado como uma das possíveis formas de interpretar a realidade (CHURCHMAN, 1979; MIDGLEY, 1995; MIDGLEY; MUNLO; BROWN, 1998). Daí a importância de partir da definição dos propósitos para estudar os sistemas, pois é o propósito atribuído ao sistema que vai definir em grande parte a sua fronteira.

O Pensamento Sistêmico Crítico (PSC) é o desenvolvimento da racionalidade prática, que usa a Heurística Sistêmica Crítica (HSC) para promover acordos sobre o que deve ser feito. O PSC difere das visões tradicionais de pensamento sistêmico, que objetivam ajudar a decidir como fazer as coisas sem questionar os valores e interesses envolvidos na ação. Para Churchman (1979), os sistemas consideram o ambiente, ainda que possam errar sobre ele, evitando a falácia ambiental e buscando unificar toda a realidade humana, já que o objetivo principal dos sistemas é o planejamento justificado para otimizar os sistemas humanos. De acordo com Midgley (1995) existem três compromissos do Pensamento Sistêmico Crítico:

- **Consciência crítica:** exame contínuo de pressuposições e das condições que as originam;
- **Emancipação:** garantir que a pesquisa focaliza “melhorias,” definidas temporal e localmente, considerando questões de poder;
- **Pluralismo metodológico:** usar uma variedade de métodos de pesquisa de maneira coerente, consciente de suas fraquezas e forças, para abordar uma variedade de questões.

Ulrich (1994) define o caráter crítico do pensamento como a necessidade de não deixar qualquer hipótese além do questionamento. O caráter sistêmico advém da necessidade do pensamento em colocar fronteiras nos objetos que pretende conhecer. Tanto o caráter crítico quanto o sistêmico são afetados por relações de poder que direta ou indiretamente coagem os indivíduos a tomarem pressuposições como verdadeiras e a naturalizarem as fronteiras dos sistemas. As fronteiras dos sistemas e os julgamentos de valores estão intimamente ligados na concepção do autor, pois os valores guiam a definição de limites ao sistema que, por sua vez, limitam os valores que podem ser colocados em prática; igualmente,

as fronteiras do sistema e os juízos de valor interferem nos fatos que são observados e são também transformados por eles (ULRICH, 2000, 2001) (Figura 14). Portanto, debater os limites do sistema é um processo ético com desdobramentos políticos (relações de poder) e epistêmicos (delimitação e validade do conhecimento). Olsson e Sjöstedt (2005) defendem que a definição das fronteiras de um sistema é mais bem realizada no diálogo com diferentes grupos de interesses, pois aumenta a variedade de visões e possibilidades de representações do sistema, o que condiz com os valores da participação popular, a superação dos valores do progresso tecnológico e ressignificação da neutralidade da ciência (LACEY, 2008a).

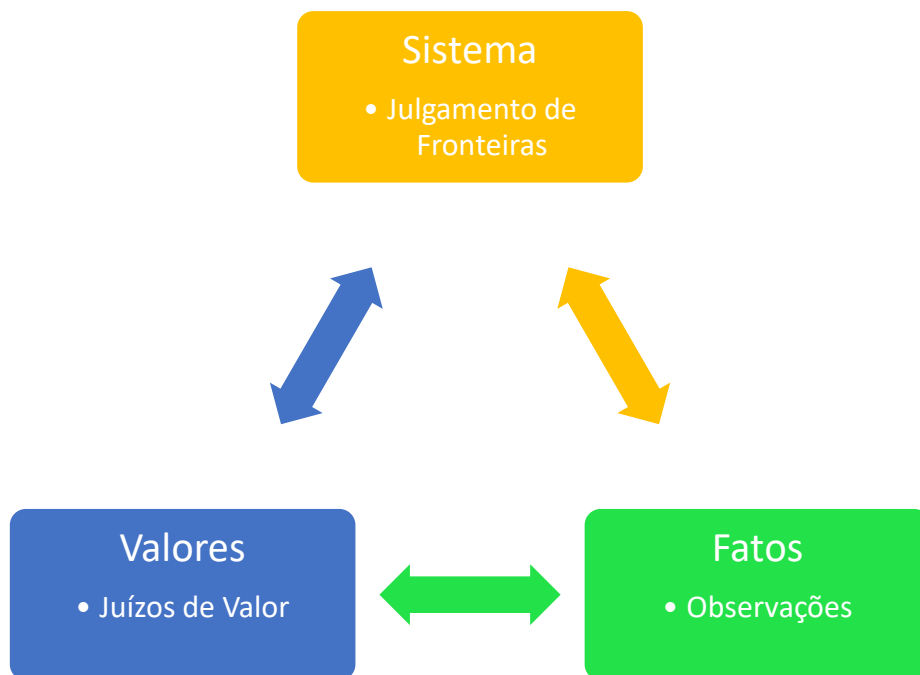


Figura 14: Interdependência entre fronteiras de um sistema, juízos de valor e observação de fatos.
Fonte: adaptado de Ulrich (2000).

Com base no problema da definição de fronteira, a HSC é uma estratégia de *design* no âmbito do PSC que objetiva fazer o exame crítico do conteúdo normativos (valores) empregados na delimitação das fronteiras do sistema, nos critérios de validação do conhecimento construído sobre o sistema e nos critérios de avaliação dos resultados e impactos das intervenções feitas no sistema (MIDGLEY, 1995). Para Ulrich a delimitação das fronteiras não é um problema sobre qual *é* a fronteira, mas de qual *deveria ser* a fronteira (justificação ética e política). O autor propõe doze questões como parte da HSC, apresentadas no Quadro 11.

Quadro 11: Questões, categorias e sujeitos da Heurística Sistêmica Crítica (HSC).

Questão da HSC	Categorias da HSC	Sujeitos
1. Quem é/deveria ser o cliente (beneficiário) do sistema?	Fontes de motivação	Envolvidos
2. Qual é/deveria ser o propósito do sistema (metas e benefícios oferecidos)?		
3. Qual é/deveria ser a medida de sucesso do sistema ou seus critérios de eficiência?		
4. Quem são/deveriam ser os responsáveis pelas decisões (quem tem o poder)?	Fontes de poder	
5. Quais componentes (recursos e controles) do sistema são/deveriam ser controlados pelos responsáveis pela decisão?		
6. Quais os recursos ou condições são/deveriam ser parte do ambiente do sistema (fora do controle e representação)?		
7. Quem está/deveria estar envolvido como planejador?	Fonte de conhecimento	
8. Quem são/deveriam ser os especialistas e quais são/deveriam ser suas especialidades e seus papéis?		
9. Como os envolvidos garantem/deveriam garantir que o seu planejamento terá sucesso?		
10. Quem são/deveriam ser os representantes dos cidadãos afetados pelo sistema? Quem pode ser afetado?	Fonte de legitimação	Afetados
11. Aos cidadãos afetados é/deveria ser dada a oportunidade de emancipar-se dos especialistas e garantir sua autonomia?		
12. Que visão de mundo está/deveria estar embasando o desenho do sistema? De quem é/deveria ser essa visão?		

Fonte: adaptado de Ulrich (1994).

As questões da HSC foram propostas para o processo de *design*, mas elas mostram um grande potencial educativo. Elas servem como uma ferramenta de análise sistêmica da complexidade de um sistema, dos valores que o subjazem e dos sujeitos que são incluídos na ação, enfim, é uma ferramenta que possibilita desenvolver a racionalidade crítica. A HSC pode ser usada para avaliar projetos específicos da QV e guiar atividades educacionais de *design* verde, possibilitando refletir sobre os condicionantes sociais e políticos de uma

atividade química específica. Conforme discutimos na seção 5.2 Teoria Tradicional e Teoria Crítica: racionalidade instrumental na Química Verde, a QV pode se desenvolver a partir da racionalidade instrumental por tomar como dado e inevitável os valores e poderes econômicos mas também pode adotar outro caminho. A HSC pode ajudar alunos da educação básica, graduando em química e mesmo pesquisadores da QV a ressaltar os valores e interesses econômicos de sua prática, bem como enriquecer os projetos com maior participação popular. Inclusive, se adotada a perspectiva HSC, trazer ao ensino os resultados inovadores quando se adotam fronteiras distintas dos sistemas tradicionais.

A importância de abordar os sistemas na educação tecnológica têm sido apontada em diversas pesquisas. Importantes conceitos sobre sistemas tecnológicos são input (entradas), output (saídas), fluxo, componentes, relações, processos, *feedback* (respostas) e subsistemas (SVENSSON, 2017). Na perspectiva Crítica, além dos elementos tecnológicos, os sistemas também têm valores, interesses e relações de poder (ULRICH, 1994; MIDGLEY, 1995). Svensson (2017) investiga os conhecimentos de alunos da educação básica sobre sistemas tecnológico e encontra que, em geral, os estudantes conseguem fazer uma descrição linear dos sistemas, descrevendo seus inputs e outputs primários, mas têm dificuldade de entender a função dos componentes e o processo em questão, como seu papel na transporte, transformação, armazenamento ou controle. A autora ainda pede cuidado para não reduzir o ensino de sistemas a conceitos científicos ou a artefatos individuais e salienta que não há na literatura muita informação sobre como ensinar sistemas, quais os conceitos ou melhores estratégias (SVENSSON, 2017).

No âmbito do Ensino de Química, o PSC não é muito difundido. Em pesquisa no portal eletrônico do *Journal of Chemical Education*, encontramos apenas três trabalhos com o termo “*critical system thinking*” (ZOLLER, 1993, 2012; JANSEN-VAN VUUREN; BUCHANAN; MCKENZIE, 2013) e nenhum com o termo “*critical system heuristics*” ou “*critical heuristic*” no corpo dos textos. Em compensação, o termo “*systems thinking*” aparecem em 64 artigos publicados entre 2009 e 2019 no mesmo jornal. O resultado é impactante, visto que em 2019 a revista publicou um número especial sobre pensamento sistêmico e Química Verde e sustentável (JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION, 2019). A partir disso, podemos inferir que o pensamento sistêmico aparece no Ensino de Química principalmente em sua forma não-crítica ou, se aborda o pensamento sistêmico crítico, não cita explicitamente o termo. Mais pesquisas são necessárias, especialmente nesse número especial do *Journal*, para entender a forma como os químicos (verdes) têm adotado ou

proposto o pensamento sistêmico, se é de forma instrumental (sistema químico igual a sistema tecnológico, QV como movimento de elite e baseado na compatibilidade entre economia e ambiente) ou de forma crítica (sistema químico como cultura e dentro da cultura, promovendo ampla participação social democrática e estabelecendo uma postura crítica sobre a relação economia e ambiente).

Na próxima seção, explicamos com maior detalhe um quadro teórico para a formação de sujeitos dentro da racionalidade crítica. Tomamos como ponto de partida o entendimento de química como cultura para propor uma formação para a reflexividade (SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016) e para a cidadania (SANTOS, 2011; SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014).

6.3 EDUCAÇÃO PARA FORMAÇÃO CULTURAL

O conceito de formação cultural (*Bildung*) se vincula à questão da ética, procurando iluminar a base de valores que um indivíduo adere, impedindo que ele assuma a racionalidade instrumental (agir meramente pelos interesses de outros, como um instrumento). Também aborda fortemente a questão ética do compromisso com a distribuição de direitos e mazelas na sociedade, criando um vínculo com o outro e propondo a superação do individualismo.

O pensamento sistêmico crítico tem muita convergência com as tendências críticas da educação, principalmente as baseadas na Escola de Frankfurt, brevemente introduzidas na seção 4.2 (Teoria Tradicional e Teoria Crítica: racionalidade instrumental na Química Verde), e no conceito de formação cultural (ZUIN, 2006, 2011; GOMES, 2010), que descreve o movimento de incorporação do indivíduo na Cultura. Só há *Bildung* se há possibilidade de criação, liberdade de transformação da Cultura e responsabilidade pelos atos autônomos. Caso a Cultura impossibilite isso, temos a *Halbildung* — semiformação cultural, uma eterna repetição da sociedade por meio de dispositivos culturais.

Para Sjöström (2013), *Bildung* é a tomada de consciência dos vieses que embasam as opiniões e ações de um indivíduo, contrastada com o contexto social em que vive. A partir das justificativas feitas dentro da própria cultura, o indivíduo pode então se distanciar dela e propor, criativamente, reformulações em suas bases de pensamento. Sjöström (2013) complementa a ideia de formação cultural, considerando-a como a competência para auto-determinação (autonomia, seguir os valores próprios), participação construtiva na sociedade e

solidariedade para com as pessoas limitadas em suas capacidades de autodeterminação e participação.

Para Sjöström (2007), *Bildung* é um conceito fundado em três pilares:

1. Visão holística, inteligência em lidar com o tempo, espaço e a cultura;
2. Sabedoria ou abordagem crítica e ideologicamente reflexiva (justificar o conhecimento com base nos seus valores e visão de mundo);
3. Frônese, sabedoria da *práxis*, que trata de colocar em prática as ideologias pessoais, como ações bem arrazoadas e responsáveis. Não só saber *como* fazer, mas *por quê*.

O conceito de *Bildung* permite uma ação social mais responsável, considerando a interação entre indivíduos e ambientes dentro de um mesmo sistema. Ela também permite considerar a responsabilidade e criatividade dos indivíduos, ao estimular que eles reflitam sobre os valores que embasam suas crenças e ações e sobre os objetivos que pretendem alcançar. O engajamento político inerente ao conceito de formação cultural e o seu processo dialógico têm sido apontados como coerentes com as propostas pedagógicas de Paulo Freire (GUILHERME; MORGAN, 2018). Os três pilares de *Bildung* também corroboram os objetivos do PSC: consciência crítica, emancipação e pluralismo metodológico (MIDGLEY, 1995).

Sjöström (2013) justifica a necessidade de uma educação voltada para a formação cultural, devido ao estado de sociedade de risco: a crescente complexidade e imprevisibilidade das inovações tecnocientíficas, ou seja, seu caráter de sistema complexo. A sociedade de risco necessita de uma educação para formar cidadãos que entendam o mundo e tomem decisões informadas. Isso requer um meio termo entre o cientificismo (arrogância científica) e o ceticismo (descrença total). É o que Sjöström (2013) chama de sabedoria prática (frônese), a habilidade de saber e duvidar, entre os extremos da confiança no conhecer e da dúvida paralisante, corroborando o primeiro objetivo do PSC, a consciência crítica. A frônese rememora a ideia de conscientização e práxis em Freire, o engajamento contínuo, crítico e dialógico dos indivíduos no seu contexto histórico, desvelando situações-problemas em sua realidade como emaranhadas na própria estrutura social sobre a qual os sujeitos podem agir e transformar na busca de um inédito-viável (FREIRE, 2013).

Baseados na natureza ontológica, epistemológica e ética da formação cultural, Sjöström e Talanquer (2014) formulam um modelo teórico do conhecimento escolar da Química que integra os aspectos formais da Química a seus componentes sociais e

humanistas. Eles partem do triângulo de Johnstone (1993), que envolve os aspectos básicos do conhecimento químico, para construir uma estrutura que gradualmente incorpore as relações da Química com a sociedade e aspectos humanistas. Na Figura 15 apresentamos o modelo teórico formulado pelos autores (Figura 15a) e também propomos uma representação para o conhecimento da QV (Figura 15a).

Na base da pirâmide temos o triângulo de Johnstone (1993), representando as dimensões envolvidas na construção do conhecimento químico: as propriedades macroscópicas (MACRO) e comportamento das substâncias; os modelos submicroscópicos (MICRO) usados para descrever, explicar, prever e intervir nas propriedades das substâncias e produzir fenômenos e; as representações simbólicas (SIMBÓLICO) desenvolvidas para representar entidades, conceitos e fenômenos químicos. Nesse nível fundamental, aprende-se *o que é* a Química, seus conceitos, sua linguagem e seus modelos. Se o Ensino de Química for praticado apenas nesse nível, dificilmente se conseguirá abordar a QV, por exemplo. Como discutimos anteriormente e corroborado por Llored e Sarrade (2016), a característica primordial da QV é a consideração do ambiente e dos valores ambientais, incorporados na definição do próprio objeto de pesquisa (Figura 15b).

Incorporar o ambiente não é tarefa fácil, no entanto. Trata-se de entender a complexidade de relações que são estabelecidas entre o ambiente e as entidades química, suas interações sinérgicas e o papel que desempenham no ecossistema. Conforme apontou Thornton (2000), são raras as pesquisas sobre os impactos das substâncias químicas que considerem a complexidade do ambiente. Para Leff (2001), o grande desafio para a superação da crise ambiental é produzir conhecimentos adequados para abordar a natureza sistêmica do ambiente; a crise ambiental é uma crise calcada na ignorância ambiental. Portanto, abordar o ambiente no nível fundamental do conhecimento Química envolve abordar os 12 Princípios da QV, mas vai além disso, incorporando a investigação das interações ecológicas e como isso pode influenciar no *design*.

a)	b)
----	----

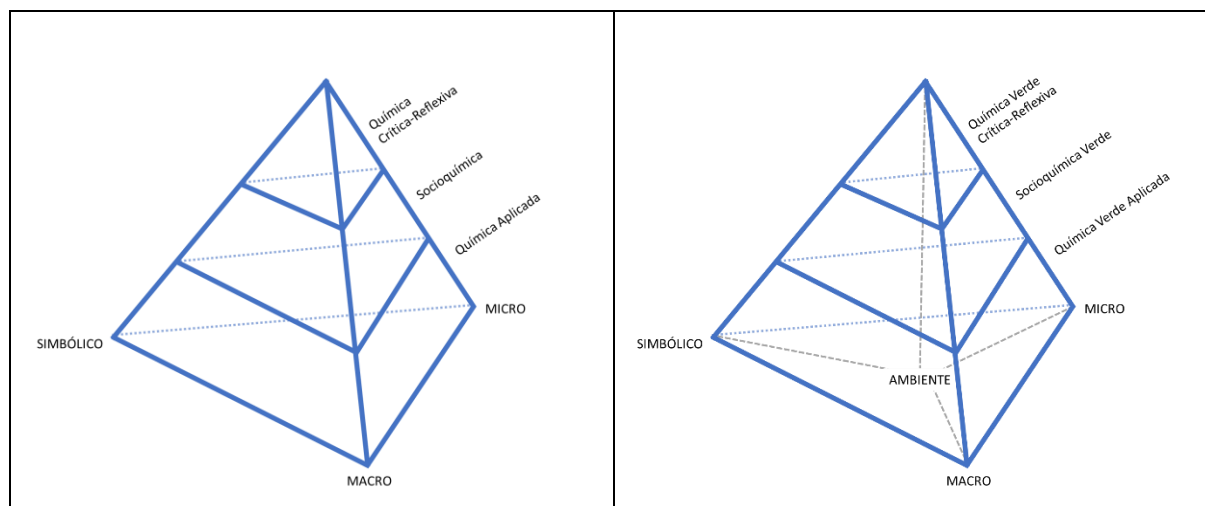


Figura 15: Tetraedro de Sjöström, incluindo diferentes níveis de complexidade da discussão do elemento humano no conhecimento escolar a) da Química e b) da Química Verde.
Fonte: adaptado de Sjöström e Talanquer (2014).

Logo acima desse triângulo se erige um primeiro estrato da pirâmide, a Química Aplicada (Figura 15). Nessa abordagem, o contexto é usado como um exemplo para mostrar um uso prático da Química, de forma instrumental. Há uma forte vinculação com a questão industrial e produtiva, apresentada apenas de forma técnica. O contexto é tido como a aplicação direta de conceitos, algo muito corriqueiro no Ensino de Química, conforme explicam os autores (SJÖSTRÖM, 2013; SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014). Trata-se de ensinar somente as aplicações diretas da Química, de aprender *o que faz* a Química. Esse primeiro nível está relacionado com a forma de *Aplicação/Design* no CTS, em que os conhecimentos científicos são usados como instrumentos para criar e produzir na sociedade. O Ensino de Química nesse nível não conseguirá ensinar a QV em si, apenas a usará como exemplos de práticas e conhecimentos da Química que têm algum impacto benéfico no ambiente, demonstrando o seu valor de eficácia ambiental, econômica ou ambos. Na forma de Química Verde Aplicada (Figura 15b), o intuito não é aprender a fazer QV, somente se exprime e informa que ela existe como uma aplicação da Química.

O nível intermediário de relação entre a Química e os fatores humanos, em sua discussão e ensino, é a Socioquímica (Figura 15a). Esse nível envolve abordagens que tratam dos conhecimentos sistêmicos da Química, referindo-se a perspectivas históricas, sociológicas, culturais e políticas. É uma meta-química (assim como a Filosofia da Química), que trata de analisar a própria produção do conhecimento químico. É uma forma interessada nos aspectos epistemológicos da Química e como a sociedade influencia na construção do conhecimento e como é influenciada pelas inovações tecnocientíficas — ensinar e aprender

como é feita a Química. Na Socioquímica Verde (Figura 15b), entram questões pertinentes ao caráter social da QV, os problemas que conduziram à sua emergência e como seus princípios respondem a esses problemas.

Em seu nível maior, Crítico-Reflexivo, a relação entre Química e os elementos humanos adquire um caráter crítico: de apontar o que é no presente (diagnóstico) e fazer proposições sobre como pode ser (prognóstico) (NOBRE, 2004). Assim, esse nível se divide em um aspecto sociocultural e um sociopolítico. No âmbito sociocultural, procura-se localizar criticamente a criação de um conhecimento químico em seu tempo, desvelando os valores, os interesses e os objetivos que permearam a emergência daquele conhecimento e não de outro. Na questão sociopolítica, discute-se a tomada de decisão ideologicamente informada, propondo ações com base em um compromisso ético, por exemplo, a emancipação humana e sua autonomia (MAAR, 2003; NOBRE, 2004; ZUIN, 2006; FARINON, 2010). Em seu nível Crítico-Reflexivo, é onde se analisam as incertezas da produção de conhecimento em Química e as suas decorrências morais. Conforme diz Sjöström (SJÖSTRÖM, 2013, p. 1883, tradução nossa): "A Educação Química crítica deveria se preocupar com os aspectos éticos da Química, os riscos e as incertezas; ela é sobre avaliação, balanceando e valoração dos benefícios e dos riscos". Ela trata da prudência (frônese) em equilibrar a confiança na capacidade de conhecer, com a desconfiança sobre o que se conhece.

No nível da Química Verde Crítico-Reflexiva (Figura 15b), pode-se analisar os valores que embasam as escolhas por determinadas linhas de pesquisa (como os líquidos iônicos, por exemplo) ou mesmo criticar as pressuposições da QV. Aqui, pode ser discutida a (in)compatibilidade entre o atual modelo econômico e o ambiente com base na tomada de decisão e ações empreendidas pelos químicos verdes.

Nesses dois níveis maiores, Socioquímica e Crítico-Reflexivo, o ensino da QV pode efetivamente ser praticado se potencializa para fazer emergir uma Química compromissada com a sustentabilidade. Entra em questão a importância de ensinar as práticas, estratégias e conhecimentos da QV como uma possibilidade de enfrentar os problemas ambientais. Também é possível considerar uma análise dos valores, interesses e impactos da QV na sociedade e no ambiente, para o qual a HSC pode ser de grande contribuição.

Um adendo importante para o esquema da Figura 15 é que ela deixa subentendido que a definição do conteúdo de ensino se dá a partir da própria disciplina de referência. A partir do tetraedro, parece que os professores construiriam o programa de ensino a partir dos conceitos e práticas da Química, variando o grau de relação que fazem entre esses conteúdos e a sociedade e cultura. Entretanto, outra forma de encarar esse processo é o conteúdo de ensino

ser definido a partir da realidade dos educandos, junto com os educandos, e o tetraedro mostraria o grau de profundidade com o qual esse conteúdo previamente selecionado será trabalhado com eles. Essa, em linha de máxima, é a proposta freireana de educação dialógica e problematizadora, que parte das situações reais surgidas no processo de investigação temática e que imobilizam a ação dos sujeitos (as situações-limite) para organizar o currículo voltado para a superação dessa realidade na busca do inédito-viável, soluções possíveis, mas que ainda não foram percebidas pelos sujeitos (FREIRE, 2010, 2013; MILLI, 2019). Inclusive, a dialogicidade e conscientização para criticidade em Freire foram comparadas com os princípios do HSC por Mejía (2004), encontrando similaridades e complementaridades entre as propostas.

Ao se abordar os riscos na educação, têm-se dois desafios: lidar com a incerteza do conhecimento e; lidar com a dualidade das consequências científicas (boas e más), o que pode ser abordado pelo diálogo com os estudos CTS. Contudo, o movimento CTS é um conceito guarda-chuva, que assume diversas abordagens, inclusive a sua forma que explicitamente assume o ambiente em seu acrônimo, o CTSA. Pedretti e Nazir (2011) fazem uma revisão da literatura dos quarenta anos do movimento CTSA e propõem quatro categorias de abordagens dentro do movimento:

1. *Aplicação/Design*: resolução de problema, entendendo a aplicação prática da Química.
2. *Raciocínio Lógico e Histórico*: entender o caráter histórico da ciência; resolver problemas considerando evidências empíricas.
3. *Sociocultural*: como questões socioculturais influenciam a prática científica.
4. *Centrada em valores e Sócio-eco-justiça*: decisões e ações ideologicamente informadas.

Auler e Delizoicov (2001) argumentam sobre as relações entre o movimento CTS, isto é, relações entre as ideias de Paulo Freire e o campo da Alfabetização Científica e Tecnológica (ACT). Para os autores, a ACT, assim como o CTS, abarca uma variedade de abordagens, que vão desde uma forma reduzida até uma ampliada. Na forma reduzida, a ACT entende que o indivíduo é mal-informado e que a mera apropriação de conceitos científicos é suficiente para que ele possa tomar uma decisão. Não se adota, ademais, uma postura crítica frente à ciência e sua imagem é de um construto neutro, salvacionista e superior na tomada de decisões. Já na perspectiva ampliada, entende-se que a imagem da ciência é permeada de mitos e que a prática científica não é neutra (senão eivada de interesses e valores), nem salvacionista (pois nossos problemas não podem ser resolvidos apenas com a inovação

tecnológica, mas necessitam de uma transformação sociocultural), muito menos superior nas decisões (visto que ela é influenciada por interesses, nem sempre consegue abordar a complexidade dos fenômenos e também porque ser democrático significa considerar a participação ampla da sociedade). Assim, a ACT ampliada parte da desvelação dos mitos da prática científica e da promoção da participação social (por meio dos grupos de interesse) na definição da agenda científica, por meio da dialogicidade e da problematização (AULER; DELIZOICOV, 2001).

Nesse sentido, a ACT ampliada está relacionada com o forma 4 do CTS (PEDRETTI; NAZIR, 2011), centrada em valores e na sócio-eco-justiça. Também Sjöström e Talanquer (2014) entendem que a Educação Química Humanizadora está próxima do modelo 4. É o tipo de abordagem que está estreitamente relacionada com a educação voltada para a formação cultural, já que permite ao educando vislumbrar o sistema de valores sobre os quais embasa sua decisão, agir criticamente sobre eles e inserir-se criticamente na cultura.

Conforme discutimos na seção 5.1.4 Participação social democrática na atividade científica, a ação socialmente engajada não se trata de sujeitos agindo individualmente, mas coletivamente. A educação voltada para a cidadania exposta no nível Crítico-Reflexivo ou na forma 4 do CTS, desenvolvida por Predetti e Nazir (2011), trata de desenvolver nos/com os educandos a consciência dos próprios valores e dos valores dos outros (educandos, instituições, sociedade em geral), analisando as formas como esses valores se relacionam, são silenciados ou como podem ser promovidos. A educação Crítico-Reflexiva (e Educação Química Crítica/Humanizadora) possibilita a organização de coletivos com interesses compartilhados que podem, então, exercer influência na tomada de decisões sobre assuntos científicos, tecnológicos e demais políticas públicas.

Para possibilitar a racionalidade crítica, a própria natureza da Química (Verde) precisa ser revista por meio do Ensino de Química. Sua suposta autonomia e neutralidade precisam ser questionadas; os interesses que perpassam sua atividade, desvelados e; uma participação democrática de grupos de interesse precisa ser incentivada. Nesse sentido, alguns autores (AULER; DELIZOICOV, 2001; DELIZOICOV; AULER, 2011; MILLI, 2019) defendem que o papel do Projeto Latino-Americano de CTS (PLACTS) é justamente esse: de desvelar a imagem mítica da ciência (sua suposta neutralidade, a crença na sua capacidade de decidir melhor e de nos salvar de todo e qualquer problema) e promover uma política científica voltada aos interesses locais e regionais, possibilitando o diálogo entre os diversos grupos de interesse e a diversificação da agenda de pesquisa (dos interesses, estratégias e objetivos da investigação).

Conforme argumentamos até o momento, a racionalidade preponderante na QV avançou em relação à Química Tradicional ao incorporar os valores ambientais, mas ainda precisa evoluir para processos mais democráticos e pluralismos de valores e estratégias. A QV tem uma forma de pensar baseada no *design*, em que a modelização, a utilização eficiente dos recursos e o pensamento sistêmico são pontos de destaque, que precisam ser valorizados no Ensino de Química, tanto para promover soluções criativas, quanto para estabelecer uma compreensão crítica do processo de inovação tecnológica. Desenvolver o pensamento sistêmico crítico pode conduzir a compreensões e ações novas e efetivamente transformadores da realidade, considerando a complexidade das relações entre sociedade e ambiente para a busca da sustentabilidade. Ou seja, também a nível de conteúdo técnico há algo a ser mudado no Ensino de Química para evoluir para uma maior racionalidade crítica na QV. Acreditamos que o Ensino de Química que considere criticamente as contribuições da educação tecnológica, do pensamento sistêmico crítico, da formação cultural e de abordagens CTS centradas em valores e sócio-eco-justiça (como o PLACTS) pode contribuir para direcionar a QV para a superação de sua racionalidade instrumental e uma efetiva “revolução” das práticas químicas, seja pela formação de profissionais químicos reflexivos, capazes de avaliar criticamente a prática química e propor mudanças, seja pela formação ampla de cidadãos capacitados para se organizar e conquistar a representação de seus interesses e valores, inclusive dentro da própria QV.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentamos na Introdução, o objetivo desta pesquisa é discutir as relações entre os tipos de racionalidade presentes nas produções dos químicos praticantes da QV e sinalizar implicações ao Ensino de Química. Para tanto, a partir de um levantamento de mais de 14 mil textos, selecionamos por critérios bibliométricos 13 trabalhos do campo em QV e investigamos os elementos característicos da racionalidade prática, seus aspectos da racionalidade técnica, os valores que perpassam essas produções e a forma como esses valores e técnicas são negociados politicamente. A partir da discussão desses tipos de racionalidade, debatemos esses elementos em termos da racionalidade instrumental e da racionalidade crítica, fazendo relações com o Ensino de Química.

A partir das análises do *corpus* definido, encontramos que os praticantes da QV têm características poiéticas, indo além da mera explicação da realidade como ela é, também criando objetos e fenômenos no mundo. Há um grande interesse desses químicos na produção de inovações tecnológicas, sejam produtos ou processos, criadas a partir de metodologias de intervenção na realidade: os objetos de pesquisa geralmente não são estudados tal qual se apresentam no mundo, mas são criados a partir de relações entre o mundo, as técnicas e instrumentos de investigação, o meio reacional e o ambiente (LLORED; SARRADE, 2016). Enfim, essas são características do *design*, uma campo tecnológico do qual a QV se aproxima, conforme defendem seus próprios praticantes (ANASTAS; EGHBALI, 2010), sendo que os 12 Princípios da QV são considerados como regras de *design* que estipulam restrições a serem consideradas no projeto, ou seja, evitar os impactos ambientais. Essas são características de racionalidade técnica, indicando, portanto, a existência de uma racionalidade prática na QV. Nesse sentido, a QV apresentou metodologias de pesquisa semelhantes à da Química em geral, mas a QV se mostrou diferente ao incorporar o valor ambiental e considerar o ambiente na definição de seu objeto de pesquisa, como discutido a seguir.

Outra característica da racionalidade prática é a existência da racionalidade ética e política. Discutimos, portanto, os principais valores expressos pelos químicos verdes, que tratam das dimensões ambiental e econômica. Os valores ambientais são relativos à prevenção dos impactos da Química no ambiente e saúde humana, decorrendo a prevenção da: toxicidade, geração de resíduos, da não renovabilidade, dos perigos físicos, da não biocompatibilidade, da ineficiência energética e material. Os valores econômicos não aparecem explicitamente nos 12 Princípios da QV, mas foram argumentos muito utilizados para convencer aos demais químicos, indústrias e governo sobre a viabilidade econômica das

práticas verdes, seja pela redução do custo com o tratamento de resíduos, com atendimento a regulações ambientais ou pelo aumento da competitividade e diferencial gerado pela inovação tecnológica. Esses são elementos da racionalidade ética na QV.

A partir da consideração de política como arranjos de poder e autoridade nas relações humanas (WINNER, 1980), discutimos as estratégias da QV para implementar suas técnicas e valores voltados ao ambiente. A dimensão social é raramente discutida nos trabalhos sobre QV, estando vinculada à questão da prevenção de impactos à saúde e a participação dos indivíduos como consumidores. Para se promover, a QV se baseia na formação de especialistas adeptos aos seus 12 Princípios, na criação de argumentos e inovações que atendam aos interesses industriais e no estabelecimento de relações com os governos, o que tem sido comparado a um movimento social de elite acadêmica e econômica (WOODHOUSE; BREYMAN, 2005), aproximando a QV de aspectos tecnocráticos. Nos textos analisados, os químicos verdes apresentam a QV como um movimento de autorregulação, que pretende evitar leis restritivas sobre a atividade química industrial, ideias que remontam ao *Corporate Social Responsibility*, um acordo feito entre grandes corporações químicas para minimizar os impactos ambientais e mudar a percepção do público sobre a atividade química. Autores têm criticado esse acordo por tentar direcionar os entendimentos do público para atender aos interesses das corporações (GIVEL, 2007). Por fim, os impactos e interesses sociais são os menos avaliados em comparação às dimensões ambiental e econômica (VAN SCHOU BROECK *et al.*, 2018). Essas são as características da racionalidade política na QV.

A interação lógica entre os elementos da racionalidade prática (técnica, ética e política) e da racionalidade teórica pode ser chamada de racionalidade crítica: a racionalidade que coloca a emancipação como compromisso máximo das ações humanas e a dúvida metódica como o compromisso crítico (ADORNO; HORKHEIMER, 1985; NOBRE, 2004). A racionalidade instrumental ocorre quando algum elemento da racionalidade não participa dos julgamentos ou quando é subentendido e toda a razão passa a funcionar como instrumento para alcançar objetivos que são apenas hipotéticos, pressupostos e sem reflexão crítica (KALBERG, 1980; ZUIN, 2006, 2011; SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016). Essas formas de racionalidade foram discutidas nas tensões entre economia e ambiente que surgiram nos documentos analisados, de forma que indícios da racionalidade instrumental na QV surgiram principalmente na racionalidade política e na racionalidade ética.

Apontamos essas relações ao discutir como os químicos verdes usam a estratégia reformista para implementar valores ambientais num contexto social em que os valores

econômicos são hegemônicos. Essa estratégia se dá pela ocupação de lugares de poder, a partir dos quais os valores serão colocados em prática, ou seja, pela formação sólida de químicos nos princípios e estratégias da QV a serem implementados nas indústrias, pelo convencimento dos líderes industriais de que a QV atende aos seus interesses e pela influência na esfera governamental. Essa estratégia é criticada pela necessária concessão de valores ambientais aos interesses econômicos hegemônicos, reduzindo as possibilidades de uma transformação efetiva do sistema (industrial e social) em direção a uma relação mais duradoura com o ambiente. Assim, a estratégia reformista revela certo grau de agência e autonomia, pois os sujeitos tentam expressar e implementar seus valores. Isso demonstra que a QV tem algum grau de criticidade e faz avanços em relação à Química Tradicional, incorporando os valores ambientais nas suas regras de *design* e na definição de seu objeto de pesquisa. Mas a estratégia reformista ainda guarda resquícios da racionalidade instrumental ao submeter os seus valores aos interesses dos grupos sociais no poder, algo em que a QV pode evoluir.

Conforme apontamos, o problema da racionalidade instrumental é ético e técnico. O âmbito ético se relaciona ao processo de reificação (coisificação) dos sujeitos, que têm seus valores e interesses desconsiderados e submetidos aos interesses e valores sociais dominantes. Ou seja, pela estratégia reformista a QV deixa de incorporar valores, interesses e conhecimentos de grupos sociais igualmente interessados na sustentabilidade. Disso decorre o problema técnico, que é a limitação das pesquisas aos temas que são de interesse comercial. Os conhecimentos gerados pela QV só são valiosos (têm valor) se são, ao mesmo tempo, ambientalmente amigáveis e economicamente viáveis. O direcionamento das pesquisas para atender *somente* aos interesses econômicos limita as possibilidades de enfrentamento da crise ambiental, desconsidera linhas de pesquisa que poderiam ser ambientalmente eficazes e ignora que conhecimentos de outros grupos sociais possam também contribuir para a sustentabilidade.

A alternativa para a estratégia reformista é a revolucionária, em que os sujeitos conquistam o poder para a transformação por meio da formação de grandes grupos sociais com interesses compartilhados. Trata-se de um movimento de baixo para cima, de criar uma base social que crie pressões para que a elite atenda aos seus interesses ou mesmo de conquistar a mudança das relações de poder. Para alcançar esse nível de racionalidade crítica, a QV precisaria buscar parcerias com movimentos sociais de interesses no ambiente e na sustentabilidade e divulgar os seus valores ambientais entre a população em geral. É necessário que a QV reconheça e divulgue as limitações das inovações tecnológicas, para que

a ampla sociedade possa reorganizar a distribuição de seus recursos e ressignificar a ideia de desenvolvimento, não mais como crescimento econômico, mas como melhoria do bem-estar social (LATOUCHE, 2012; BARBOSA; MARQUES, 2015). Também o apoio social é importante para que a QV tenha possibilidades de ação efetiva, promovendo a evolução da Química.

A educação apresenta grande potencial para responder a essas características das racionalidades da QV. Por um lado, isso significaria que o Ensino de Química precisa considerar o caráter prático da Química em geral e da QV em específico, abordando a sua natureza tecnológica e suas dimensões ética e política. No âmbito técnico, o Ensino de Química tem muito a se desenvolver com a Educação Tecnológica, abordando o processo de criação de soluções tecnológicas e suas relações com a sociedade. Elencamos 14 competências tecnológicas que podem ser desenvolvidas pela QV em cinco grandes temas: *design*, modelagem, sistemas, recursos e valores humanos. Desses, o *design* é considerado a alma da tecnologia e a educação em *design* pode ajudar a compreender os limites e possibilidades da ação humana por meio das tecnologias. A atividade de projetar é iterativa (realizada em ciclos de complexidade ascendente), direcionada a resolver tarefas específicas, baseada no controle de matéria e energia para desempenhar funções desejadas e evitar funções indesejadas e contingencial (os resultados têm grau de imprevisibilidade que precisam ser avaliados). Saber como funciona a atividade tecnológica, possibilita a químicos, tomadores de decisão e público em geral a ter uma visão mais condizente do processo tecnológico e a evitar a criação de imagens míticas e salvacionistas da tecnologia (AULER; DELIZOICOV, 2001). Uma das questões centrais do *design* é estipular quais são as suas restrições: os efeitos que têm de ser evitados e as impossibilidades técnicas. O processo de *design* é complexo e a tomada de decisão não jaz somente sobre critérios epistêmicos ou científicos, há grande margem para desenvolver a criatividade (PYE, 2007).

Discutimos, então, as possibilidades do PSC, em especial da HSC, para estabelecer os princípios éticos e políticos do processo de *design*. O PSC desvela as possibilidades criativas do *design* e coloca a necessidade de discutir crítica e amplamente os valores e interesses subjacentes à definição de um sistema (tecnológico), pois para os defensores do PSC os limites do sistema não são dados pela natureza, mas suas fronteiras são criadas por interesses sociais. A HSC fornece um conjunto de doze questões que possibilitam a melhoria do processo de tomada de decisão sobre quais são as fronteiras de um sistema, questionando quais são as fontes de motivação, fontes de poder, fontes de conhecimento e fontes de legitimação do *design*.

Essa forma crítica do pensamento sistêmico pode contribuir muito para a Educação Científica e Tecnológica e para o Ensino de Química (Verde). Junto com a educação em *design*, o PSC fornece estratégias para a formação de químicos, tomadores de decisão e cidadãos em geral, considerando uma imagem crítica da atividade científica e tecnológica e as possibilidades de intervenção social desses diferentes sujeitos. Conforme defendemos anteriormente, há relações de proximidade entre o PSC, os princípios educacionais de Paulo Freire e a educação para formação cultural (*Bildung education*) (MEJÍA, 2004; GUILHERME; MORGAN, 2018). A formação cultural considera a Química *como* cultura (com seus símbolos, rituais e práticas) e *dentro* da cultura (em relação com símbolos, rituais, práticas e interesses de grupos sociais distintos) (SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014). Considerar a educação para a formação cultural é considerar a educação para a cidadania (SANTOS, 2011; ROSO; AULER, 2016), desenvolvendo nos educandos os conhecimentos necessários para a transformação da cultura e da sociedade, ou seja, para a transformação da própria Química (Verde). Isso se dá por meio de um ensino que trabalhe a linguagem formal da Química, os seus contextos de aplicação, as condições históricas e sociais que geraram determinados conhecimentos e práticas e a o posicionamento crítico e reflexivo sobre os valores e visões de mundo subjacentes a esses conhecimentos e práticas da Química (Verde) (SJÖSTRÖM; TALANQUER, 2014; SJÖSTRÖM; EILKS; ZUIN, 2016).

A partir do exposto, corroboramos nossa hipótese de que há elementos de racionalidade instrumental nas práticas e discursos da QV, mas que também há possibilidades de superação dessa racionalidade no desenvolvimento de uma racionalidade crítica por meio da educação científica e tecnológica, para fazer evoluir toda a Química para uma ciência engajada na salvaguarda do ambiente.

Essa pesquisa apresenta, inexoravelmente, alguns limites que podem ser explorados em pesquisas futuras. Embora o *corpus* tenha sido definido a partir de critérios bibliométricos que suportam a sua representatividade, futuras pesquisas podem investigar um número maior de publicações. Outra questão que pode ser mais bem trabalhada é a ampliação das atividades desenvolvidas pelos sujeitos investigados. A Química é uma ciência complexa e com muitas ramificações: educação, academia e indústria, por exemplo. Seria importante investigar os tipos de racionalidades que se apresentam nos discursos e práticas de educadores, industriais e formuladores de políticas públicas sobre a QV. Especialmente no Ensino de Química, o pensamento sistêmico tem de ser investigado, já que é um tema que tem despertado interesse dos educadores em Química (Verde) e tem grandes possibilidades de promover maior racionalidade crítica na QV e na Química em geral.

REFERÊNCIAS

- ACS. *12 Principles of Green Chemistry*. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>>. Acesso em: 28 maio 2018.
- ACS. *History of Green Chemistry*. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/history-of-green-chemistry.html>>. Acesso em: 28 maio 2018.
- ADLER, E.; HAAS, P. M. Conclusion: epistemic communities, world order, and the creation of a reflective research program. *International Organization*, v. 46, n. 1, p. 367–390, jan. 1992.
- ADORNO, T.; HORKHEIMER, M. *Dialética do esclarecimento*. São Paulo, SP: Zahar, 1985.
- AGAZZI, E. *El bien, el mal y la ciencia: las dimensiones éticas de la empresa científico-tecnológica*. Madrid: Tecnos, 1996a.
- AGAZZI, E. Límites éticos del quehacer científico y tecnológico. *Arbor*, v. 162, n. 638, p. 241–263, 28 fev. 1999.
- AGAZZI, E. Racionalidad teórica y racionalidad práctica. In: AGAZZI, E. *El bien, el mal y la ciencia: las dimensiones éticas de la empresa científico-tecnológica*. Madrid: Tecnos, 1996b. p. 201–227.
- AMATO, I. The Slow Birth of Green Chemistry. *Science*, v. 259, n. 5101, p. 1538–1541, 12 mar. 1993.
- ANASTAS, P. T. *et al.* Peer Reviewed: Promoting Green Chemistry Initiatives. *Environmental Science & Technology*, v. 33, n. 5, p. 116A-119A, mar. 1999.
- ANASTAS, P. T. *et al.* The Green ChemisTREE: 20 years after taking root with the 12 principles. *Green Chemistry*, v. 20, n. 9, p. 1929–1961, 2018.
- ANASTAS, P. T. Green Chemistry and the Role of Analytical Methodology Development. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, v. 29, n. 3, p. 167–175, set. 1999.
- ANASTAS, P. T. Meeting the challenges to sustainability through green chemistry. *Green Chemistry*, v. 5, n. 2, p. G29–G34, 8 abr. 2003.
- ANASTAS, P. T.; BEACH, E. S. Green chemistry: the emergence of a transformative framework. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 1, n. 1, p. 9–24, mar. 2007.
- ANASTAS, P. T.; EGHBALI, N. Green chemistry: principles and practice. *Chemical Society Reviews*, v. 39, n. 1, p. 301–312, jan. 2010.
- ANASTAS, P. T.; KIRCHHOFF, M. M. Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry. *Accounts of Chemical Research*, v. 35, n. 9, p. 686–694, 1 set. 2002.
- ANASTAS, P. T.; KIRCHHOFF, M. M.; WILLIAMSON, T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry. *Applied Catalysis A: General*, v. 221, n. 1–2, p. 3–13, nov. 2001.

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York, N.Y: Oxford University Press, 1998.

ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. (Org.). *Green Chemistry: Designing Chemistry for the Environment*. 1 edition ed. Washington, DC: American Chemical Society, 1996.

ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. Green Chemistry: An Overview. In: ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. (Org.). *Green Chemistry: Designing Chemistry for the Environment*. Washington, DC: American Chemical Society, 1996. v. 626. p. 1–17. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-1996-0626.ch001>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*, v. 21, n. 24, p. 6545–6566, 2019.

ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, 10 dez. 2006.

AULER, D.; DELIZOICOV, D. Alfabetização científico-tecnológica para quê? *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)*, v. 3, n. 2, p. 122–134, 2001.

BACHELARD, G. *Formação do Espírito Científico*. Rio de Janeiro: Contraponto Editora, 1996.

BAILEY, K. D. Living systems theory and social entropy theory. *Systems Research and Behavioral Science*, v. 23, n. 3, p. 291–300, 23 maio 2006.

BAILEY, K. D. Systems Theory. In: TURNER, J. H. (Org.). *Handbook of Sociological Theory*. New York: Springer US, 2001. p. 379–401. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/0-387-36274-6_19>. Acesso em: 29 dez. 2019.

BARBOSA, L. C. A.; MARQUES, C. A. Sustentabilidade Ambiental e Postulados Termodinâmicos à Luz da Obra de Nicholas Georgescu-Roegen. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 1124–1132, 31 mar. 2015.

BENSAUDE-VINCENT, B. Philosophy of chemistry or philosophy with chemistry. *HYLE–International Journal for Philosophy of Chemistry*, v. 20, n. 1, p. 58–76, 2014.

BOBBIO, N. *Liberalismo e Democracia*. Edição: 1ª ed. São Paulo: Brasiliense, 2000.

BORNEMANN, L.; MUTZ, R. Growth rates of modern science: A bibliometric analysis based on the number of publications and cited references. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, v. 66, n. 11, p. 2215–2222, 29 abr. 2015.

BOSTRÖM, M. A missing pillar? Challenges in theorizing and practicing social sustainability: introduction to the special issue. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, v. 8, n. 1, p. 3–14, abr. 2012.

BRAGA, G. M. Relações Bibliométricas Entre a Frente de Pesquisa (Research Front) e Revisões da Literatura: Estudo Aplicado a Ciência da Informação. *Ciência da Informação*, v. 2, n. 1, 1973. Disponível em: <<http://revista.ibict.br/ciinf/article/view/20>>. Acesso em: 21 maio 2018.

BRITO, M. A.; YADA, M. M. IMPACTOS DO HERBICIDA GLIFOSATO NA SAÚDE HUMANA. *SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga*, v. 5, n. 1, p. 349–360, 22 dez. 2019.

BRYNJOLFSSON, E. The productivity paradox of information technology. *Communications of the ACM*, v. 36, n. 12, p. 66–77, 1 dez. 1993.

BRYNJOLFSSON, E.; ROCK, D.; SYVERSON, C. *Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics*. Working Paper, nº 24001. Chicago: National Bureau of Economic Research, nov. 2017. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w24001>>. Acesso em: 13 fev. 2019.

CANADA. *Canadian Environmental Sustainability Indicators: Air pollutant emissions*. research. Quebec: Environment and Climate Change Canada, 12 set. 2011. Disponível em: <<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators/air-pollutant-emissions/volatile-organic-compound-emissions.html>>. Acesso em: 6 jun. 2018.

CANN, M. C.; DICKNEIDER, T. A. Infusing the Chemistry Curriculum with Green Chemistry Using Real-World Examples, Web Modules, and Atom Economy in Organic Chemistry Courses. *Journal of Chemical Education*, v. 81, n. 7, p. 977, jul. 2004.

CARSON, R. *Primavera Silenciosa*. Edição: 1ª ed. São Paulo: Gaia, 2010.

CGEE. *Química verde no Brasil, 2010-2030*. Brasília, DF: CGEE, 2010.

CHAMIZO, J. A. La imagen pública de la química. *Educación Química*, p. 12, 2011.

CHAMIZO, J. A. Technochemistry: One of the chemists' ways of knowing. *Foundations of Chemistry*, v. 15, n. 2, p. 157–170, jul. 2013.

CHANSHETTI, U. Green Chemistry: Environmentally Benign Chemistry. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science*, v. 1, n. 1, p. 110–115, 2014.

CHEN, C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 57, n. 3, p. 359–377, 1 fev. 2006.

CHEN, C. *How to Use CiteSpace*. [S.l.]: Leanpub, 2015. Disponível em: <<https://leanpub.com/howtousecitespace>>. Acesso em: 21 maio 2018.

CHEN, C. Science Mapping: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Data and Information Science*, v. 2, n. 2, p. 1–40, 21 jan. 2017.

CHEN, C. Searching for intellectual turning points: progressive knowledge domain visualization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 101 Suppl 1, p. 5303–5310, 6 abr. 2004.

CHEN, C.; IBEKWE-SANJUAN, F.; HOU, J. The structure and dynamics of cocitation clusters: A multiple-perspective cocitation analysis. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 61, n. 7, p. 1386–1409, 14 jun. 2010.

CHOUDARY, B. M.; KANTAM, M. L.; KAVITA, B. Mg-Al-O-But-Hydrotalcite: a mild and ecofriendly catalyst for the cyanoethylation of alcohols and thiols†. *Green Chemistry*, v. 1, n. 6, p. 289–292, 1 jan. 1999.

CHRISTIE, M. Philosophers versus chemists concerning ‘laws of nature’. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, v. 25, n. 4, p. 613–629, 1994.

CHURCHMAN, C. W. *The systems approach and its enemies*. New York: Basic Books, 1979.

CLARK, J. H. *et al.* Circular economy design considerations for research and process development in the chemical sciences. *Green Chemistry*, v. 18, n. 14, p. 3914–3934, 11 jul. 2016.

CLARK, J. H. Green chemistry: challenges and opportunities. *Green Chemistry*, v. 1, n. 1, p. 1–8, 1 jan. 1999.

CLARK, J. H. Green chemistry: today (and tomorrow). *Green Chemistry*, v. 8, n. 1, p. 17–21, 23 dez. 2006.

COLLINSON, S. R.; THIELEMANS, W. The catalytic oxidation of biomass to new materials focusing on starch, cellulose and lignin. *Coordination Chemistry Reviews, The Life and Career of Daryle H. Busch*: v. 254, n. 15, p. 1854–1870, 1 ago. 2010.

COMEST. *The Precautionary Principle*. , n° World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology. Paris: UNESCO, 2005. Disponível em: <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000139578>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

COSTANZA, R. What is ecological economics? *Ecological Economics*, v. 1, n. 1, p. 1–7, fev. 1989.

COX, M. I. P.; COX, E. P. INTERDIÇÕES AO CORPO NO CORPO DA CIDADE: ARQUITETURA, URBANISMO, DISCURSO E CONTROLE SOCIAL. *revista Linguasagem*, v. 24, n. 1, 31 dez. 2015. Disponível em: <<http://www.linguasagem.ufscar.br/index.php/linguasagem/article/view/161>>. Acesso em: 9 set. 2019.

CROSS, R. T.; PRICE, R. F. The History of Chemistry. The Case of the Supposed Isomerism of the Hydrocarbon Ethane in the Construction of Knowledge: Implications for chemical education. *Research in Science & Technological Education*, v. 19, n. 2, p. 159–170, nov. 2001.

CUPANI, A. A CIÊNCIA E OS VALORES HUMANOS: REPENSANDO UMA TESE CLÁSSICA HUMANOS: REPENSANDO UMA TESE CLÁSSICA. *Philosophos - Revista de Filosofia*, v. 9, n. 2, 24 dez. 2007. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/philosophos/article/view/3036>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

DAVIS, P. M.; COCHRAN, A. Cited Half-Life of the Journal Literature. *arXiv:1504.07479 [cs]*, arXiv: 1504.07479, 28 abr. 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1504.07479>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

DE VRIES, M. J. 8 Technology Education: An International History. In: DE VRIES, M. J. (Org.). *Handbook of technology education*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017a. p. 73–99.

DE VRIES, M. J. *Handbook of technology education*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017b.

- DEBREF, R. The Paradoxes of Environmental Innovations: The Case of Green Chemistry. *Journal of Innovation Economics Management*, v. n^o9, n. 1, p. 83–102, 16 abr. 2012.
- DEFARGE, N. *et al.* Co-Formulants in Glyphosate-Based Herbicides Disrupt Aromatase Activity in Human Cells below Toxic Levels. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 13, n. 3, p. 264, 26 fev. 2016.
- DELIDOVICH, I.; PALKOVITS, R. Catalytic versus stoichiometric reagents as a key concept for Green Chemistry. *Green Chemistry*, v. 18, n. 3, p. 590–593, 2016.
- DELIZOICOV, D.; AULER, D. Ciência, Tecnologia e Formação Social do Espaço: questões sobre a não-neutralidade. *Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 2, p. 247–273, 2011.
- DOBLE, M.; KRUTHIVENTI, A. K. Introduction. In: DOBLE, M.; KRUTHIVENTI, A. K. *Green Chemistry and Engineering*. San Diego, CL: Elsevier, 2007. p. 1–26. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012372532550002X>>. Acesso em: 17 dez. 2019.
- DODSON, J. R. *et al.* Bio-derived materials as a green route for precious & critical metal recovery and re-use. *Green Chemistry*, v. 17, n. 4, p. 1951–1965, 2015.
- DREWS, F. *Abordagem de temáticas ambientais no ensino de Química: um olhar sobre textos destinados ao professor da educação básica*. 2011. 236 f. Dissertação de Mestrado (Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- DUARTE, R. C. C.; RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Avaliação da “microverdura” de sínteses com a estrela verde. *Química Nova*, v. 37, n. 6, p. 1085–1093, 2014.
- ECHEVERRÍA, J. *La revolución tecnocientífica*. México: FCE, 2003.
- ECKELMAN, M. J. Life cycle inherent toxicity: a novel LCA-based algorithm for evaluating chemical synthesis pathways. *Green Chemistry*, v. 18, n. 11, p. 3257–3264, 2016.
- EPICOCO, M.; OLTRA, V.; SAINT JEAN, M. Knowledge dynamics and sources of eco-innovation: Mapping the Green Chemistry community. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 81, p. 388–402, jan. 2014.
- EWALD, F. Le retour du malin génie. Esquisse d’une philosophie de la précaution. In: GODARD, O. (Org.). *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*. Paris: INRA, 1997. .
- FARINON, M. J. Teoria Crítica e Educação: a dimensão ético-educacional do sujeito estético em Adorno. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE FILOSOFIA E EDUCAÇÃO, 5., 2010, Caxias do Sul. *Anais...* Caxias do Sul: UCS, 2010. p. 1–15. Disponível em: <http://www.ucs.br/ucs/tplcinfo/eventos/cinfo/artigos/artigos/arquivos/eixo_tematico9/Teoria%20critica%20e%20educacao.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2017.
- FARQUHARSON, K. Influencing Policy Transnationally: Pro-and Anti-Tobacco Global Advocacy Networks. *Australian Journal of Public Administration*, v. 62, n. 4, p. 80–92, dez. 2003.
- FEENBERG, A. What Is Philosophy of Technology? In: DAKERS, J. R. *Defining Technological Literacy*. New York, N.Y: Palgrave Macmillan, 2006. p. 5–16. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1057/9781403983053_2>. Acesso em: 20 mar. 2018.

FERRÉ, F. Technology and practical intelligence. In: FERRÉ, F. *Philosophy of Technology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1995a. p. 30–40.

FERRÉ, F. Technology and theoretical intelligence. In: FERRÉ, F. *Philosophy of Technology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1995b. p. XX–XX.

FIORINO, D. J. Citizen Participation and Environmental Risk: A Survey of Institutional Mechanisms. *Science, Technology, & Human Values*, v. 15, n. 2, p. 226–243, 1990.

FLECK, L. *Genese E Desenvolvimento De Um Fato Científico*. Belo Horizonte: FABREFACTUM, 2010.

FREIRE, P. *Extensão ou comunicação?* 14a reimpressão ed. São Paulo, SP: Paz e Terra, 2010.

FREIRE, P. *Pedagogia do oprimido*. Edição: 54 ed. São Paulo: Paz & Terra, 2013.

FREITAS, N. M. DA S.; MARQUES, C. A. Abordagens sobre sustentabilidade no ensino CTS: educando para a consideração do amanhã. *Educar em Revista*, n. 65, p. 219–235, 2017.

FRIED, B. H. *The Progressive Assault on Laissez Faire: Robert Hale and the First Law and Economics Movement*. Cambridge: Harvard University Press, 2001.

GASPARSKI, W. A Praxiological Theory of *Design*. In: GASPARSKI, W.; PSZCZOŁOWSKI, T. (Org.). *Praxiological Studies*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1983. p. 281–312. Disponível em: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-009-6943-8_15>. Acesso em: 23 abr. 2018.

GEORGESCU-ROEGEN, N. *The Entropy Law and the Economic Process*. Lincoln, USA: Harvard University Press, 1971. Disponível em: <<https://www.amazon.com/Entropy-Law-Economic-Process/dp/0674281640>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

GIEGÉ, R. Crystallogenesis at the Heart of the Interplay between Science and Technology in the Quest to Comprehend tRNA Biology. *Crystal Growth & Design*, v. 13, n. 2, p. 405–414, 6 fev. 2013.

GILDING, M.; PICKERING, J. “May contain traces of biotech”: (re)defining the biotechnology field in Australia. The Australian Sociological Association Conference. p. R0129, 2011.

GILLET, S. *et al.* Lignin transformations for high value applications: towards targeted modifications using green chemistry. *Green Chemistry*, v. 19, n. 18, p. 4200–4233, 19 set. 2017.

GIVEL, M. Motivation of chemical industry social responsibility through Responsible Care. *Health Policy*, v. 81, n. 1, p. 85–92, abr. 2007.

GOEL, V.; PIROLI, P. The structure of *Design Problem Spaces*. *Cognitive Science*, v. 16, n. 3, p. 395–429, jul. 1992.

GOMES, L. R. Teoria crítica e educação política em Theodor Adorno. *Revista HISTEDBR On-Line*, v. 10, n. 39, p. 286–296, 2010.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; GULLÓN, P.; GULLÓN, B. Bio-compounds Production from Agri-food Wastes Under a Biorefinery Approach: Exploring Environmental and Social Sustainability. In: MUTHU, S. S. (Org.). *Quantification of Sustainability Indicators in the Food Sector*. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. Singapore: Springer Singapore,

2019. p. 25–53. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2408-6_2>. Acesso em: 7 fev. 2019.

GOODSON, I. F. Para Além do Monólito Disciplinar: tradições e culturas. In: GOODSON, I. F. *O currículo em mudança: estudos na construção social do currículo*. Porto: Porto Editora, 2001. p. 173–194.

GRÁCIO, M. C. C. Acoplamento bibliográfico e análise de cocitação: revisão teórico-conceitual. *Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação*, v. 21, n. 47, p. 82–99, 12 set. 2016.

GUILHERME, A.; MORGAN, W. J. Refletindo sobre o Papel do Professor: Buber, Freire e Gur-Ze'ev. *Educação & Realidade*, v. 43, n. 3, p. 783–798, set. 2018.

HAAS, P. M. Banning chlorofluorocarbons: epistemic community efforts to protect stratospheric ozone. *International Organization*, v. 46, n. 1, p. 187–224, jan. 1992a.

HAAS, P. M. Introduction: epistemic communities and international policy coordination. *International Organization*, v. 46, n. 1, p. 1–35, jan. 1992b.

HACKER, M. 15 Engineering and Technology Concepts: Key Ideas That Students Should Understand. In: DE VRIES, M. J. (Org.). *Handbook of technology education*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. p. 179–191.

HACKER, M.; BARAK, M. Important Engineering and Technology Concepts and Skills for All High School Students in the United States: Comparing Perceptions of Engineering Educators and High School Teachers. *Journal of Technology Education*, v. 28, n. 2, p. 31–52, 2017.

HACKING, I. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge Cambridgeshire ; New York: Cambridge University Press, 1983.

HAUPT, G. 46 Design in Technology Education: Current State of Affairs. In: DE VRIES, M. J. (Org.). *Handbook of technology education*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. p. 643–659.

HEMPEL, C. G. Science and Human Values. In: HEMPEL, C. G. *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. New York: The Free Press, 1965. p. 81–96.

HENAO, B. L.; STIPCICH, M. S.; MOREIRA, M. A. “Sustancia” en el devenir de la Química: dime cómo te buscan y te diré que eres. *Ciência & Educação*, v. 15, n. 3, 2009.

HENNESSY, S.; MURPHY, P. The Potential for Collaborative Problem Solving in Design and Technology. *International Journal of Technology and Design Education*, v. 9, n. 1, p. 1–36, jan. 1999.

HERNÁIZ, M. J. *et al.* Applied Biotransformations in Green Solvents. *Chemistry – A European Journal*, v. 16, n. 31, p. 9422–9437, 2010.

HORVÁTH, I. T. *et al.* Sustainability Metrics for Biomass-Based Carbon Chemicals. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 5, n. 3, p. 2734–2740, 6 mar. 2017.

- HOWARD-GRENVILLE, J. *et al.* “If Chemists Don’t Do It, Who Is Going To?” Peer-driven Occupational Change and the Emergence of Green Chemistry. *Administrative Science Quarterly*, v. 62, n. 3, p. 524–560, set. 2017.
- HUESEMANN, M. H. The limits of technological solutions to sustainable development. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 5, n. 1, p. 21–34, 1 mar. 2003.
- HUNT, A. J. *et al.* The importance of elemental sustainability and critical element recovery. *Green Chemistry*, v. 17, n. 4, p. 1949–1950, 2015.
- INGELSTAM, L. *System: att tänka över samhälle och teknik*. Eskilstuna: Energimyndigheten, 2002.
- IOFRIDA, N. *et al.* Why social life cycle assessment is struggling in development? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, n. 2, p. 201–203, fev. 2018.
- IRWIN, A. Risk, science and public communication. In: BUCCHI, M.; TRENCH, B. *Routledge Handbook of Public Communication of Science and Technology*. New York: Routledge, 2012. . Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9780203483794>>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- IVANKOVIĆ, A. Review of 12 Principles of Green Chemistry in Practice. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, v. 6, n. 3, p. 39, 2017.
- JACKSON, W. R.; CAMPI, E. M.; HEARN, M. T. W. Closing Pandora’s box: chemical products should be *designed* to preserve efficacy of function while reducing toxicity. *Green Chemistry*, v. 18, n. 15, p. 4140–4144, 2016.
- JANSEN-VAN VUUREN, R. D.; BUCHANAN, M. S.; MCKENZIE, R. H. Connecting Resources for Tertiary Chemical Education with Scientists and Students in Developing Countries. *Journal of Chemical Education*, v. 90, n. 10, p. 1325–1332, 8 out. 2013.
- JARVIE, I. C. The Social Character of Technological Problems: Comments on Skolimowski’s Paper. *Technology and Culture*, v. 7, n. 3, p. 384–390, 1966.
- JESSOP, P. G. Searching for green solvents. *Green Chemistry*, v. 13, n. 6, p. 1391, 2011.
- JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; OVERCASH, M. R. The evolution of life cycle assessment in pharmaceutical and chemical applications – a perspective. *Green Chem.*, v. 16, n. 7, p. 3392–3400, 2014.
- JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; WOODLEY, J. M. Bioprocesses: Modeling needs for process evaluation and sustainability assessment. *Computers & Chemical Engineering*, v. 34, n. 7, p. 1009–1017, jul. 2010.
- JOHNSTONE, A. H. The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, v. 70, n. 9, p. 701, 1 set. 1993.
- JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION. *Reimagining Chemistry Education: systems thinking, and green and sustainable chemistry*. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/toc/jceda8/96/12>>. Acesso em: 12 jan. 2020.
- KALBERG, S. Max Weber’s Types of Rationality: Cornerstones for the Analysis of Rationalization Processes in History. *The American Journal of Sociology*, v. 85, n. 5, p. 1145–1179, 1980.

KANGAS, K.; SEITAMAA-HAKKARAINEN, P. 42 Collaborative *Design Work in Technology Education*. In: DE VRIES, M. J. (Org.). *Handbook of technology education*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. p. 597–609.

KIJEK, T.; KIJEK, A. Is innovation the key to solving the productivity paradox? *Journal of Innovation & Knowledge*, fev. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2444569X18300179>>. Acesso em: 13 fev. 2019.

KING, A. A.; LENOX, M. J. Industry Self-Regulation without Sanction: the Chemical Industry's Responsible Care Program. *Academy of Management Journal*, v. 43, n. 4, p. 698–716, 1 ago. 2000.

KING, J. W.; HOLLIDAY, R. L.; LIST, G. R. Hydrolysis of soybean oil. in a subcritical water flow reactor. *Green Chemistry*, v. 1, n. 6, p. 261–264, 1 jan. 1999.

KIRCHHOFF, M. M. Promoting sustainability through green chemistry. *Resources, Conservation and Recycling, Sustainability and Renewable Resources*. v. 44, n. 3, p. 237–243, 1 jun. 2005.

KLEINBERG, J. M. Hubs, authorities, and communities. *ACM Computing Surveys*, v. 31, n. 4, p. 1–5, 1 dez. 1999.

KOLSCH, D. *et al.* How to measure social impacts? A socio-eco-efficiency analysis by the SEEBALANCE® method. *International Journal of Sustainable Development*, v. 11, n. 1, p. 1, 2008.

KOVAC, J. Theoretical and Practical Reasoning in Chemistry. *Foundations of Chemistry*, v. 4, n. 1, p. 163–171, 2002.

KRALISCH, D.; OTT, D.; GERICKE, D. Rules and benefits of Life Cycle Assessment in green chemical process and synthesis *design*: a tutorial review. *Green Chemistry*, v. 17, n. 1, p. 123–145, 2015.

KRIPKA, R. M. L.; SCHELLER, M.; BONOTTO, D. DE L. Pesquisa documental na pesquisa qualitativa: conceitos e caracterização. *Revista de Investigaciones UNAD*, v. 14, n. 2, p. 55, 24 nov. 2015.

LACEY, H. *Valores e atividade científica I*. São Paulo: Editora 34, 2008. v. 1. Disponível em: <<https://www.midialouca.com.br/filosofia/45444-valores-e-atividade-cientifica-1-lacey-hugh-9788573264043.html>>. Acesso em: 3 jan. 2020.

LACEY, HUGH. Crescimento Econômico, Meio-Ambiente E Sustentabilidade Social: a Responsabilidade dos Cientistas e a Questão dos Transgênicos. In: DUPAS, G. (Org.). *Meio-Ambiente E Crescimento Econômico: Tensões Estruturais*. São Paulo: Editora Unesp, 2008. p. 91–130. Disponível em: <<http://works.swarthmore.edu/fac-philosophy/212>>.

LANCEFELD, C. S. *et al.* Pre-treatment of lignocellulosic feedstocks using biorenewable alcohols: towards complete biomass valorisation. *Green Chemistry*, v. 19, n. 1, p. 202–214, 3 jan. 2017.

LATOUCHE, S. O decrescimento. Por que e como? In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. (Org.). *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade*. Rio de Janeiro: Garamond, 2012. p. 45–54.

LATOUCHE, S. *Pequeno Tratado do Decrescimento Sereno*. Edição: 1 ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2009.

LAWRENSON, S. *et al.* Greener solvents for solid-phase synthesis. *Green Chemistry*, v. 19, n. 4, p. 952–962, 21 fev. 2017.

LEFF, E. *Epistemologia Ambiental*. São Paulo: Cortez, 2001.

LEITNER, W. Focus on education in Green Chemistry. *Green Chemistry*, v. 6, n. 8, p. 351, 2004.

LELAS, S. Science as technology. *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 44, n. 3, p. 423–442, 1993.

LÉNA, P. Os limites do crescimento econômico e a busca pela sustentabilidade: uma introdução ao debate. In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. (Org.). *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, descrescimento e prosperidade*. Rio de Janeiro: Garamond, 2012. p. 23–54.

LI, C. J. Reflection and perspective on green chemistry development for chemical synthesis—Daoist insights. *Green Chemistry*, v. 18, n. 7, p. 1836–1838, 2016.

LLEVOT, A.; MEIER, M. A. R. Renewability – a principle of utmost importance! *Green Chemistry*, v. 18, n. 18, p. 4800–4803, 2016.

LLORED, J.-P.; SARRADE, S. Connecting the philosophy of chemistry, green chemistry, and moral philosophy. *Foundations of Chemistry*, v. 18, n. 2, p. 125–152, jul. 2016.

MAAR, W. L. Adorno, semi-formation and education. *Educação & Sociedade*, v. 24, n. 83, p. 459–475, 2003.

MACHADO, A. A. S. C. Dos primeiros aos segundos doze princípios da Química Verde. *Química Nova*, v. 35, n. 6, p. 1250–1259, 2012.

MACHADO, A. A. S. C. *Introdução às Métricas da Química Verde: uma visão sistêmica*. 1. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014. Disponível em: <<https://www.estantevirtual.com.br/livros/adelio-machado/introducao-as-metricas-da-quimica-verde-uma-visao-sistemica/3499175662>>. Acesso em: 6 jun. 2018.

MANLEY, J. B.; ANASTAS, P. T.; CUE, B. W. Frontiers in Green Chemistry: meeting the grand challenges for sustainability in R&D and manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 6, p. 743–750, abr. 2008.

MARCELINO, L. V.; MARQUES, C. A. Trends in Green Chemistry Research. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 27 maio 2019, Joinville. *Anais...* Joinville: SBQ, 27 maio 2019. p. 875. Disponível em: <http://www.s bq.org.br/42ra/anexos/42RASBQ_programa_e_resumos.pdf>. Acesso em: 23 set. 2019.

MARCELINO, L. V.; PINTO, A. L.; MARQUES, C. A. Intellectual Authorities and Hubs of Green Chemistry. In: International Conference on Data and Information in Online Environments - DIONE, 19 mar. 2020, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: [s.n.], 19 mar. 2020. p. accepted.

MARCELINO, L.; SJÖSTRÖM, J.; MARQUES, C. A. Socio-Problematization of Green Chemistry: Enriching Systems Thinking and Social Sustainability by Education. *Sustainability*, v. 11, n. 24, p. 7123, 12 dez. 2019.

- MARCELINO, LEONARDO VICTOR; MARQUES, C. A. Trends in Green Chemistry Research. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química - RASBQ, 27 maio 2019, Joinville. *Anais...* Joinville: SBQ, 27 maio 2019. p. 875. Disponível em: <http://www.s bq.org.br/42ra/anexos/42RASBQ_programa_e_resumos.pdf>. Acesso em: 23 set. 2019.
- MARCELINO, LEONARDO VICTOR; PINTO, A. L.; MARQUES, C. A. Scientific specialties in Green Chemistry. *Scientometrics*, submitted.
- MARION, P. *et al.* Sustainable chemistry: how to produce better and more from less? *Green Chemistry*, v. 19, n. 21, p. 4973–4989, 30 out. 2017.
- MARQUES, C. A. *et al.* Compreensões de Pesquisadores Químicos sobre Sustentabilidade Ambiental: possíveis influências na formação de professores de Química. *Revista Brasileira de Ensino de Química*, v. 9, n. 2, p. 79–91, 2014.
- MARQUES, C. A. *et al.* Sustentabilidade ambiental: um estudo com pesquisadores químicos no Brasil. *Química Nova*, v. 36, n. 6, p. 914–920, 2013.
- MARQUES, C. A.; MACHADO, A. A. S. C. Environmental Sustainability: implications and limitations to Green Chemistry. *Foundations of Chemistry*, v. 16, n. 2, p. 125–147, 1 jul. 2014.
- MATUS, K. *Green Chemistry: A Study of Innovation for Sustainable Development*. 2009. 422 f. PhD Dissertation (Public Policy Program) – Harvard University, Cambridge, MA, 2009.
- MCKENZIE, S. *Social sustainability: towards some definitions*. Magill, S. Aust: Hawke Research Institute, University of South Australia, 2004. Disponível em: <<http://www.unisa.edu.au/hawkeinstitute/publications/default.asp>>. Acesso em: 7 fev. 2019. (Hawke Research Institute working paper series, no. 27).
- MCLUHAN, M. *Understanding media: the extensions of man*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1994.
- MEADOWS, D. H. *Limits to Growth*. Place of publication not identified: Signet, 1972.
- MEHLICH, J. *et al.* The Ethical and Social Dimensions of Chemistry: Reflections, Considerations, and Clarifications. *Chemistry - A European Journal*, v. 23, n. 6, p. 1210–1218, 26 jan. 2017.
- MEJÍA, A. The problem of knowledge imposition: Paulo Freire and critical systems thinking. *Systems Research and Behavioral Science*, v. 21, n. 1, p. 63–82, 12 jan. 2004.
- MENDES, M. C.; SANTIN FILHO, O. Implicações da Inserção da Química Verde na Formação Inicial de Professores de Química. *Revista Brasileira de Ensino de Química*, v. 11, p. 11–124, 2016.
- MICHAELIS. *Reificar*. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/reificar/>>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- MIDGLEY, G; MUNLO, I.; BROWN, M. The theory and practice of boundary critique: developing housing services for older people. *Journal of the Operational Research Society*, v. 49, n. 5, p. 467–478, maio 1998.
- MIDGLEY, GERALD. What Is This Thing Called CRITICAL Systems Thinking? In: ELLIS, K. *et al.* (Org.). *Critical Issues in Systems Theory and Practice*. Boston, MA: Springer US, 1995. p. 61–

71. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-9883-8_7>. Acesso em: 12 jan. 2020.

MILLI, J. C. L. *A Investigação Temática à Luz da Análise Textual Discursiva: em busca da superação do Obstáculo Praxiológico do Silêncio*. 2019. 134 f. Dissertação de Mestrado (Educação em Ciências) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2019. Disponível em: <<http://www.biblioteca.uesc.br/biblioteca/bdtd/201710065D.pdf>>.

MISTRY, L. *et al.* Synthesis of ureas in the bio-alternative solvent Cyrene. *Green Chemistry*, v. 19, n. 9, p. 2123–2128, 8 maio 2017.

MOCELLIN, R. C. Estilo de raciocínio e capilaridade técnico-cultural na química no século XVIII. *Scientiae Studia*, v. 13, n. 4, p. 759–780, 2015.

MONASTERÍN, J. *Lo Mejor Posible*. Madrid: Alianza Editorial, 2008.

MORAES, R. Uma tempestade de luz: a compreensão possibilitada pela análise textual discursiva. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 9, n. 2, p. 191–211, 2003.

MORAES, R.; GALIAZZI, M. DO C. *Análise textual discursiva*. Ijuí: UNIJUI, 2007.

MUMFORD, L.; WINNER, L. *Technics and Civilization*. Chicago ; London: University of Chicago Press, 2010.

NAKANO, H.; KITAZUME, T. Friedel-Crafts reaction in fluorinated fluids. *Green Chemistry*, v. 1, n. 4, p. 179–181, 1 jan. 1999.

NÁRAY-SZABÓ, G.; MIKA, L. T. Conservative evolution and industrial metabolism in Green Chemistry. *Green Chemistry*, v. 20, n. 10, p. 2171–2191, 2018.

NOBRE, M. *A Teoria Crítica*. Rio de Janeiro: Zahar, 2004. . Acesso em: 4 set. 2016.

OLIVEIRA, M. M. DE. *Como fazer pesquisa qualitativa*. Petrópolis: Vozes, 2007.

OLSSON, M.-O.; SJÖSTEDT, G. Systems and Systems Theory. In: OLSSON, M.-O.; SJÖSTEDT, G. (Org.). *Systems Approaches and Their Application*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005. p. 3–29. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/1-4020-2370-7_1>. Acesso em: 12 jan. 2020.

OLTRA, V.; SAINT JEAN, M. Sectoral systems of environmental innovation: An application to the French automotive industry. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 76, n. 4, p. 567–583, maio 2009.

ORTEGA Y GASSET, J. *Meditação da técnica*. Rio de Janeiro: Livro Ibero-Americano, 1963. Disponível em: <http://sites.google.com/site/posdocentes/Meditacao_da_Tecnica.pdf>. Acesso em: 18 set. 2016.

PASSE, France. Denúncias judiciais nos EUA contra o agrotóxico glifosato da Bayer passam de 40 mil. *G1*, Rio de Janeiro, 30 out. 2019. Agro, p. 1.

PEDRETTI, E.; NAZIR, J. Currents in STSE education: Mapping a complex field, 40 years on. *Science Education*, v. 95, n. 4, p. 601–626, 2011.

- PENA-PEREIRA, F.; NAMIEŚNIK, J. Ionic Liquids and Deep Eutectic Mixtures: Sustainable Solvents for Extraction Processes. *ChemSusChem*, v. 7, n. 7, p. 1784–1800, 2014.
- PFALTZGRAFF, L. A. *et al.* Food waste biomass: a resource for high-value chemicals. *Green Chemistry*, v. 15, n. 2, p. 307, 2013.
- PICKSTONE, J. On knowing, acting, and the location of technoscience: A response to Barry Barnes. *Perspectives on Science*, v. 13, n. 2, p. 267–278, jun. 2005.
- PITANGA, Â. F.; SANTOS, L. D. DOS; FERREIRA, W. M. Os Discursos sobre Química Verde na Revista Científica Química Nova. *Enseñanza de las ciencias*, n. Extra, p. 3149–3154, 2017.
- POLIAKOFF, M. *et al.* Green Chemistry: Science and Politics of Change. *Science*, v. 297, p. 807–810, ago. 2002.
- POLSHETTIWAR, V.; VARMA, R. S. Green chemistry by nano-catalysis. *Green Chemistry*, v. 12, n. 5, p. 743–754, 11 maio 2010a.
- POLSHETTIWAR, V.; VARMA, R. S. Nano-organocatalyst: magnetically retrievable ferrite-anchored glutathione for microwave-assisted Paal–Knorr reaction, aza-Michael addition, and pyrazole synthesis. *Tetrahedron, Advances in Green Chemistry*. v. 66, n. 5, p. 1091–1097, 30 jan. 2010b.
- PRADO, A. G. S. Química verde, os desafios da química do novo milênio. *Química Nova*, v. 26, n. 5, p. 738–744, out. 2003.
- PRICE, D. J. DE S. Networks of Scientific Papers. *Science*, v. 149, n. 3683, p. 510–515, 30 jul. 1965.
- PYE, D. *The Nature and Aesthetics of Design*. London: A&C Black Visual Arts, 2007.
- QUADRELLI, E. A. 25 years of energy and green chemistry: saving, storing, distributing and using energy responsibly. *Green Chemistry*, v. 18, n. 2, p. 328–330, 2016.
- RAFIAANI, P. *et al.* Social sustainability assessments in the biobased economy: Towards a systemic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1839–1853, fev. 2018.
- RIBEIRO, M. G. T. C.; COSTA, D. A.; MACHADO, A. A. S. C. “Green Star”: a holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 3, n. 2, p. 149–159, 1 jun. 2010a.
- RIBEIRO, M. G. T. C.; COSTA, D. A.; MACHADO, A. A. S. C. Uma métrica gráfica para avaliação holística da verduza de reacções laboratoriais - “Estrela Verde”. *Química Nova*, v. 33, n. 3, p. 759–764, 2010b.
- RIP, A. Constructive Technology Assessment. In: RIP, A. (Org.). *Futures of Science and Technology in Society*. Technikzukünfte, Wissenschaft und Gesellschaft / Futures of Technology, Science and Society. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. p. 97–114. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-21754-9_6>. Acesso em: 13 fev. 2019.

RITZER, G. The Weberian Theory of Rationalization and the McDonaldization of Contemporary Society. In: KIVISTO, P. (Org.). *Illuminating Social Life: Classical and Contemporary Theory Revisited*. Thousand Oaks, CL: SAGE Publications, Inc., 2013. p. 29–50.

ROLOFF, F. B. *A circulação de conhecimentos em química verde em teses e dissertações: implicações ao seu ensino e à formação de professores de química*. 2016. 346 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/176688/345882.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

RØPKE, I. The early history of modern ecological economics. *Ecological Economics*, v. 50, n. 3–4, p. 293–314, out. 2004.

ROSO, C. C.; AULER, D. A participação na construção do currículo: práticas educativas vinculadas ao movimento CTS. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 22, n. 2, p. 371–389, jun. 2016.

ROSSOUW, A.; HACKER, M.; DE VRIES, M. J. Concepts and contexts in engineering and technology education: an international and interdisciplinary Delphi study. *International Journal of Technology and Design Education*, v. 21, n. 4, p. 409–424, nov. 2011.

SÁ, S. *et al.* Magnetically recyclable magnetite–palladium (Nanocat-Fe–Pd) nanocatalyst for the Buchwald–Hartwig reaction. *Green Chemistry*, v. 16, n. 7, p. 3494–3500, 24 jun. 2014.

SAMAGAIA, R. R. *Comunicação, divulgação e educação científicas: uma análise em função dos modelos teóricos e pedagógicos*. 2016. 354 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/169089>>.

SANDRI, M. C. M. *Contribuições do enfoque CTSA e da QV na formação de licenciandos em Química*. 2016. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

SANTORO, S. *et al.* Biomass-derived solvents as effective media for cross-coupling reactions and C–H functionalization processes. *Green Chemistry*, v. 19, n. 7, p. 1601–1612, 3 abr. 2017.

SANTOS, W. L. P. DOS. A Química e a formação para a cidadania. *Educación química*, v. 22, n. 4, p. 300–305, 2011.

SARTORI, G. What is “Politics”. *Political Theory*, v. 1, n. 1, p. 5–26, 1973.

SCERRI, E. R. Has the Periodic Table Been Successfully Axiomatized? *Erkenntnis*, v. 47, n. 1, p. 229–243, 1997.

SCHIO, S. M. Aristóteles e ação humana. *CONJECTURA: filosofia e educação*, v. 14, n. 1, 2009.

SCHOT, J.; RIP, A. The past and future of constructive technology assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 54, n. 2, p. 251–268, 1 fev. 1997.

SCHUMMER, J. Challenging standard distinctions between science and technology: The case of preparative chemistry. *HYLE–International Journal for Philosophy of Chemistry*, v. 3, p. 81–94, 1997a.

- SCHUMMER, J. Scientometric studies on chemistry II: Aims and methods of producing new chemical substances. *Scientometrics*, v. 39, n. 1, p. 125–140, 1997b.
- SEVIAN, H. *et al.* Concepción de la identidad química en estudiantes y profesores de química: Parte I-La identidad química como base del concepto macroscópico de sustancia. *Educación química*, v. 26, n. 1, p. 13–20, 2015.
- SEVIAN, H.; TALANQUER, V. Rethinking chemistry: a learning progression on chemical thinking. *Chem. Educ. Res. Pract.*, v. 15, n. 1, p. 10–23, 2014.
- SHELDON, R. A. Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: state of the art. *Green Chemistry*, v. 16, n. 3, p. 950–963, 25 fev. 2014.
- SHELDON, R. A. Green chemistry and resource efficiency: towards a green economy. *Green Chemistry*, v. 18, n. 11, p. 3180–3183, 2016.
- SHELDON, R. A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, v. 19, n. 1, p. 18–43, 3 jan. 2017.
- SHEZAD, N.; CLIFFORD, A. A.; RAYNER, C. M. Pd-catalysed coupling reactions in supercritical carbon dioxide and under solventless conditions. *Green Chemistry*, v. 4, n. 1, p. 64–67, 26 fev. 2002.
- SHI, Y. *et al.* Selective synthesis of 1-O-alkyl glycerol and diglycerol ethers by reductive alkylation of alcohols. *Green Chemistry*, v. 12, n. 12, p. 2189–2195, 1 dez. 2010.
- SIERRA, L. A.; YEPES, V.; PELLICER, E. A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 496–513, jun. 2018.
- SILVA, S. M. B.; SANTOS, W. L. P. DOS. Questões Sociocientíficas e o Lugar da Moral nas Pesquisas em Ensino de Ciências. n. 31, p. 124–148, 2014.
- SJÖSTRÖM, J. Green chemistry in perspective—models for GC activities and GC policy and knowledge areas. *Green Chemistry*, v. 8, n. 2, p. 130–137, 3 fev. 2006.
- SJÖSTRÖM, J. The discourse of chemistry (and beyond). *HYLE: International Journal for Philosophy of Chemistry*, v. 13, n. 2, p. 83–97, 2007.
- SJÖSTRÖM, J. Towards Bildung-Oriented Chemistry Education. *Science & Education-Netherlands*, v. 22, n. 7, p. 1873–1890, 2013.
- SJÖSTRÖM, J.; EILKS, I.; ZUIN, V. G. Towards Eco-reflexive Science Education: A Critical Reflection About Educational Implications of Green Chemistry. *Science & Education-Netherlands*, v. 25, n. 3–4, p. 321–341, maio 2016.
- SJÖSTRÖM, J.; TALANQUER, V. Humanizing Chemistry Education: From Simple Contextualization to Multifaceted Problematization. *Journal of Chemical Education*, v. 91, n. 8, p. 1125–1131, 12 ago. 2014.
- SKOLIMOWSKI, H. The Structure of Thinking in Technology. *Technology and Culture*, v. 7, n. 3, p. 371–383, 1966.

- SMALL, H. Co-citation in the scientific literature: A new measure of the relationship between two documents. *Journal of the American Society for Information Science*, v. 24, n. 4, p. 265–269, 1973.
- SNEDDON, H. Safety first. *Green Chemistry*, v. 18, n. 19, p. 5082–5085, 2016.
- SOUZA, L. C. A. B. *A Problematização do Princípio da Precaução na Formação do Técnico Agrícola: reflexões para o enfrentamento da racionalidade instrumental a partir de uma questão sociocientífica*. 2016. 351 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- STARK, A. *et al.* Ionic Liquids and Green Chemistry: A Lab Experiment. *Journal of Chemical Education*, v. 87, n. 2, p. 196–201, 12 jan. 2010.
- STEPHENS, J. C. *et al.* Characterizing the international carbon capture and storage community. *Global Environmental Change*, v. 21, n. 2, p. 379–390, maio 2011.
- SVENSSON, M. 32 Learning About Systems. In: DE VRIES, M. J. (Org.). *Handbook of technology education*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. p. 447–462.
- TALANQUER, V. School Chemistry: The Need for Transgression. *Science & Education-Netherlands*, v. 22, n. 7, p. 1757–1773, jul. 2013.
- THE NORDIC AFRICA INSTITUTE. *More than medicine needed against Ebola - The Nordic Africa Institute*. Disponível em: <<https://nai.uu.se/news/articles/2014/10/17/144303/>>. Acesso em: 1 dez. 2019.
- THORNTON, J. Beyond risk: an ecological paradigm to prevent global chemical pollution. *International journal of occupational and environmental health*, v. 6, n. 4, p. 318–330, 2000.
- TOBISZEWSKI, M.; NAMIEŚNIK, J.; PENA-PEREIRA, F. Environmental risk-based ranking of solvents using the combination of a multimedia model and multi-criteria decision analysis. *Green Chemistry*, v. 19, n. 4, p. 1034–1042, 21 fev. 2017.
- TOKE, D. Epistemic Communities and Environmental Groups. *Politics*, v. 19, n. 2, p. 97–102, maio 1999.
- TROST, B. M. The atom economy--a search for synthetic efficiency. *Science (New York, N.Y.)*, v. 254, n. 5037, p. 1471–1477, 6 dez. 1991.
- ULRICH, W. *Critical heuristics of social planning: a new approach to practical philosophy*. Chichester ; New York: J. Wiley & Sons, 1994.
- ULRICH, W. Reflective Practice in the Civil Society: The contribution of critically systemic thinking. *Reflective Practice*, v. 1, n. 2, p. 247–268, jun. 2000.
- ULRICH, W. The quest for competence in systemic research and practice. *Systems Research and Behavioral Science*, v. 18, n. 1, p. 3–28, 25 jan. 2001.
- US EPA, OCSPP. *Pollution Prevention Law and Policies*. Overviews and Factsheets. Disponível em: <<https://www.epa.gov/p2/pollution-prevention-act-1990>>. Acesso em: 28 maio 2018.

- US EPA, OECA. *National Environmental Policy Act*. Overviews and Factsheets. Disponível em: <<https://www.epa.gov/nepa>>. Acesso em: 28 maio 2018.
- VAN DEN ENDE, J. *et al.* Traditional and Modern Technology Assessment: Toward a Toolkit. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 58, n. 1, p. 5–21, 1 maio 1998.
- VAN SCHOUBROECK, S. *et al.* A review of sustainability indicators for biobased chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 115–126, out. 2018.
- VARMA, R. S. Solvent-free organic syntheses: using supported reagents and microwave irradiation. *Green Chemistry*, v. 1, n. 1, p. 43–55, 1 jan. 1999.
- VESTERINEN, V.-M.; AKSELA, M.; LAVONEN, J. Quantitative Analysis of Representations of Nature of Science in Nordic Upper Secondary School Textbooks Using Framework of Analysis Based on Philosophy of Chemistry. *Science & Education*, v. 22, n. 7, p. 1839–1855, jul. 2013.
- VIDAL, C.; GARCÍA-ÁLVAREZ, J. Glycerol: a biorenewable solvent for base-free Cu(I)-catalyzed 1,3-dipolar cycloaddition of azides with terminal and 1-iodoalkynes. Highly efficient transformations and catalyst recycling. *Green Chemistry*, v. 16, n. 7, p. 3515–3521, 24 jun. 2014.
- WACHTER, R. M.; HOWELL, M. D. Resolving the Productivity Paradox of Health Information Technology: A Time for Optimism. *JAMA*, v. 320, n. 1, p. 25, 3 jul. 2018.
- WAKAKI, T.; OISAKI, K.; KANAI, M. Elementary and systemic views of the generation of toxic substances. *Green Chemistry*, v. 18, n. 13, p. 3681–3683, 27 jun. 2016.
- WCED. *Our Common Future*. 1 edition ed. Oxford ; New York: Oxford University Press, 1987a.
- WCED. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. . New York, N.Y: Oxford University Press, 1987b. Disponível em: <<http://www.ask-force.org/web/Sustainability/Brundtland-Our-Common-Future-1987-2008.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.
- WELTON, T. Room-Temperature Ionic Liquids. Solvents for Synthesis and Catalysis. *Chemical Reviews*, v. 99, n. 8, p. 2071–2084, 11 ago. 1999.
- WINNER, L. Do Artifacts Have Politics? *Daedalus*, v. 109, n. 1, p. 121–136, 1980.
- WINTERTON, N. Sense and sustainability: the role of chemistry, green or otherwise. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 5, n. 1, p. 8–20, 1 mar. 2003.
- WOODHOUSE, E. J.; BREYMAN, S. Green Chemistry as Social Movement? *Science, Technology, & Human Values*, v. 30, n. 2, p. 199–222, abr. 2005.
- YAN, N.; XIAO, C.; KOU, Y. Transition metal nanoparticle catalysis in green solvents. *Coordination Chemistry Reviews*, Novel and Smart Materials: *Design, Synthesis, Structure, Properties and Applications*. In Celebration of the Centennial Anniversary of Chemical Research and Education at Peking University. v. 254, n. 9, p. 1179–1218, 1 maio 2010.
- YASUI, I. Metrics for Green and Sustainable Chemistry. *Green Chemistry*, v. 5, n. 5, p. G70, 2003.

ZHENG, J.-L. *et al.* Life-cycle assessment and techno-economic analysis of the utilization of bio-oil components for the production of three chemicals. *Green Chemistry*, v. 20, n. 14, p. 3287–3301, 2018.

ZOLLER, U. Science Education for Global Sustainability: What Is Necessary for Teaching, Learning, and Assessment Strategies? *Journal of Chemical Education*, v. 89, n. 3, p. 297–300, 14 fev. 2012.

ZOLLER, URI. Are lecture and learning compatible? Maybe for LOCS: Unlikely for HOCS. *Journal of Chemical Education*, v. 70, n. 3, p. 195, mar. 1993.

ZUIN, A. Á. S. A vingança do fetiche: reflexões sobre indústria cultural, educação pela dureza e vício. *Educ. Soc*, v. 27, n. 94, p. 71–90, 2006.

ZUIN, V. G. *A Inserção da Dimensão Ambiental na Formação de Professores de Química*. Edição: 1 ed. Campinas: Átomo, 2011.

ZUIN, V. G. A inserção da Química Verde nos programas de pós-graduação em Química do Brasil: tendências e perspectivas. *Revista Brasileira de Pós-Graduação*, v. 10, n. 21, 2013. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=18068405&AN=94867706&h=O8VxafyE3Q9jjXOJJoxUlynI%2BQgfFHOmNdBX6UidctzDwEzJ60PtB3MP%2B3CiBpJ7AV3maPfPgaL1yLmTq0hHtg%3D%3D&crl=c>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELA DE ANÁLISE DO CORPUS DA TESE

A lista de trabalhos analisados, das unidades de sentido (trechos dos textos) e dos termos significadores estão disponíveis no [link: https://bit.ly/2xhJKoD](https://bit.ly/2xhJKoD)

APÊNDICE B – TRABALHOS ANALISADOS SOBRE QUÍMICA VERDE E POLÍTICA

A lista a seguir contém as referências de revisões citadas em livros-texto de QV analisadas por Marques e Machado (2014) e artigos do Green Chemistry Journal selecionados pelos termos de busca: *social life cycle sustainab* e *social metric sustainab* em março e novembro de 2019, abordando avaliação de indicadores sociais na QV.

ANASTAS, P. T. Meeting the challenges to sustainability through green chemistry. *Green Chemistry*, v. 5, n. 2, p. G29–G34, 8 abr. 2003.

ANASTAS, P. T. *et al.* Peer Reviewed: Promoting Green Chemistry Initiatives. *Environmental Science & Technology*, v. 33, n. 5, p. 116A-119A, mar. 1999.

ANASTAS, P. T. *et al.* The Green ChemisTREE: 20 years after taking root with the 12 principles. *Green Chemistry*, v. 20, n. 9, p. 1929–1961, 2018.

ANASTAS, P. T.; BEACH, E. S. Green chemistry: the emergence of a transformative framework. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 1, n. 1, p. 9–24, mar. 2007.

ANASTAS, P. T.; KIRCHHOFF, M. M. Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry. *Accounts of Chemical Research*, v. 35, n. 9, p. 686–694, 1 set. 2002.

ANASTAS, P. T.; KIRCHHOFF, M. M.; WILLIAMSON, T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry. *Applied Catalysis A: General*, v. 221, n. 1–2, p. 3–13, nov. 2001.

ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. Green Chemistry: An Overview. In: ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. (Org.). *Green Chemistry*. Washington, DC: American Chemical Society, 1996. v. 626. p. 1–17. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-1996-0626.ch001>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

ANASTAS, PAUL T.; ZIMMERMAN, J. B. The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*, p. 10.1039.C9GC01293A, 2019.

CLARK, J. H. *et al.* Circular economy *design* considerations for research and process development in the chemical sciences. *Green Chemistry*, v. 18, n. 14, p. 3914–3934, 11 jul. 2016.

CLARK, J. H. Green chemistry: challenges and opportunities. *Green Chemistry*, v. 1, n. 1, p. 1–8, 1 jan. 1999.

CLARK, J. H. Green chemistry: today (and tomorrow). *Green Chemistry*, v. 8, n. 1, p. 17–21, 23 dez. 2006.

DODSON, J. R. *et al.* Bio-derived materials as a green route for precious & critical metal recovery and re-use. *Green Chemistry*, v. 17, n. 4, p. 1951–1965, 2015.

ECKELMAN, M. J. Life cycle inherent toxicity: a novel LCA-based algorithm for evaluating chemical synthesis pathways. *Green Chemistry*, v. 18, n. 11, p. 3257–3264, 2016.

HUNT, A. J. *et al.* The importance of elemental sustainability and critical element recovery. *Green Chemistry*, v. 17, n. 4, p. 1949–1950, 2015.

JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; OVERCASH, M. R. The evolution of life cycle assessment in pharmaceutical and chemical applications – a perspective. *Green Chem.*, v. 16, n. 7, p. 3392–3400, 2014.

JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C.; WOODLEY, J. M. Bioprocesses: Modeling needs for process evaluation and sustainability assessment. *Computers & Chemical Engineering*, v. 34, n. 7, p. 1009–1017, jul. 2010.

KIRCHHOFF, M. M. Promoting sustainability through green chemistry. *Resources, Conservation and Recycling, Sustainability and Renewable Resources*. v. 44, n. 3, p. 237–243, 1 jun. 2005.

KRALISCH, D.; OTT, D.; GERICKE, D. Rules and benefits of Life Cycle Assessment in green chemical process and synthesis *design*: a tutorial review. *Green Chemistry*, v. 17, n. 1, p. 123–145, 2015.

MANLEY, J. B.; ANASTAS, P. T.; CUE, B. W. Frontiers in Green Chemistry: meeting the grand challenges for sustainability in R&D and manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 6, p. 743–750, abr. 2008.

MARION, P. *et al.* Sustainable chemistry: how to produce better and more from less? *Green Chemistry*, v. 19, n. 21, p. 4973–4989, 30 out. 2017.

MATUS, K. *Green Chemistry: A Study of Innovation for Sustainable Development*. 2009. 422 f. PhD Dissertation (Public Policy Program) – Harvard University, Cambridge, MA, 2009.

MATUS, K. J. M.; XIAO, X.; ZIMMERMAN, J. B. Green chemistry and green engineering in China: drivers, policies and barriers to innovation. *Journal of Cleaner Production*, v. 32, p. 193–203, set. 2012.

MURPHY, J. N. *et al.* Wealth from waste: blue mussels (*Mytilus edulis*) offer up a sustainable source of natural and synthetic nacre. *Green Chemistry*, v. 21, n. 14, p. 3920–3929, 2019.

NÁRAY-SZABÓ, G.; MIKA, L. T. Conservative evolution and industrial metabolism in Green Chemistry. *Green Chemistry*, v. 20, n. 10, p. 2171–2191, 2018.

PFALTZGRAFF, L. A. *et al.* Food waste biomass: a resource for high-value chemicals. *Green Chemistry*, v. 15, n. 2, p. 307, 2013.

SHELDON, R. A. Green chemistry and resource efficiency: towards a green economy. *Green Chemistry*, v. 18, n. 11, p. 3180–3183, 2016.

SHELDON, R. A. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, v. 19, n. 1, p. 18–43, 3 jan. 2017.

TABONE, M. D. *et al.* Sustainability Metrics: Life Cycle Assessment and Green *Design* in Polymers. *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 21, p. 8264–8269, nov. 2010.

THOMASSEN, G.; VAN DAEL, M.; YOU, F.; *et al.* A multi-objective optimization-extended techno-economic assessment: exploring the optimal microalgal-based value chain. *Green Chemistry*, v. 21, n. 21, p. 5945–5959, 2019.

THOMASSEN, G.; VAN DAEL, M.; VAN PASSEL, S.; *et al.* How to assess the potential of emerging green technologies? Towards a prospective environmental and techno-economic assessment framework. *Green Chemistry*, v. 21, n. 18, p. 4868–4886, 2019.

THORNTON, J. Beyond risk: an ecological paradigm to prevent global chemical pollution. *International journal of occupational and environmental health*, v. 6, n. 4, p. 318–330, 2000.

THORNTON, J. Implementing green chemistry. An environmental policy for sustainability. *Pure and Applied Chemistry*, v. 73, n. 8, p. 1231–1236, 2001.

VAN SCHOUBROECK, S. *et al.* A review of sustainability indicators for biobased chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 115–126, out. 2018.

WINTERTON, N. Sense and sustainability: the role of chemistry, green or otherwise. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 5, n. 1, p. 8–20, 1 mar. 2003.

WOODHOUSE, E. J.; BREYMAN, S. Green Chemistry as Social Movement? *Science, Technology, & Human Values*, v. 30, n. 2, p. 199–222, abr. 2005.

YASUI, I. Metrics for Green and Sustainable Chemistry. *Green Chemistry*, v. 5, n. 5, p. G70, 2003.

ZHENG, J.-L. *et al.* Life-cycle assessment and techno-economic analysis of the utilization of bio-oil components for the production of three chemicals. *Green Chemistry*, v. 20, n. 14, p. 3287–3301, 2018.

ÍNDICE REMISSIVO

12 Princípios...	7, 21, 25, 68, 84, 86, 98, 100, 101, 105, 115, 137, 138, 152, 157, 171, 177, 178
Alfabetização Científica e Tecnológica.....	13, 174
Autonomia	24, 57, 95, 96, 111, 112, 142, 143, 144, 166, 169, 172, 175, 179
Bildung	8, 9, 33, 143, 147, 168, 169, 181, 196
Catálise	67, 69, 72, 74, 75, 76, 99, 103, 105, 111, 122
Cidadania.....	31, 146, 155, 168, 175, 181, 195
Compatibilidade Economia-Ambiente	106, 107, 144, 168, 173
Sinergia	106, 116, 137
Comunidade epistêmica.....	13, 126, 127, 128, 129
CTS.....	13, 14, 26, 33, 87, 150, 151, 171, 173, 174, 175, 187, 195
Deliberação.....	62, 130, 131
Desenvolvimento Sustentável.....	<i>Consulte Sustentabilidade</i>
Design..	7, 9, 17, 33, 61, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 82, 85, 90, 92, 93, 108, 109, 110, 115, 119, 125, 137, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 160, 161, 165, 167, 171, 175, 177, 179, 180, 181, 185, 188, 190, 200, 201
Economia.....	7, 19, 22, 24, 25, 26, 67, 81, 82, 83, 84, 87, 97, 99, 101, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 121, 122, 123, 124, 128, 129, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 148, 160, 168, 172, 173, 177, 178, 179, 180, 191
Custo	24, 26, 72, 96, 102, 104, 105, 106, 122, 123, 128, 129, 178
Economia Ambiental.....	86, 106
Economia Circular	108
Economia Ecológica.....	107
Eficácia...	26, 58, 68, 70, 79, 80, 83, 84, 89, 90, 94, 96, 101, 102, 103, 104, 113, 130, 154, 172
Eficiência...	16, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 58, 66, 67, 68, 70, 75, 76, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 89, 90, 92, 96, 100, 101, 103, 104, 106, 108, 113, 123, 124, 127, 130, 136, 137, 157, 160, 162, 163, 166
Emancipação.....	30, 141, 145, 164, 169, 172, 178
Ensino de Química Humanista	146
Entropia	61, 63, 68, 69, 81, 82, 83, 107, 108, 142
EPA.....	13, 14, 19, 20, 22, 126, 127, 128, 129, 197
Falácia da vizinhança.....	<i>Consulte Vizinhança</i>
Formação cultural.....	<i>Consulte Bildung</i>
Frênese	62, 130, 170, 172
Heteronomia	112
Heurística Sistêmica Crítica	7, 14, 33, 164, 165, 166, 167, 173, 181
Humanizador	<i>Consulte Ensino de Química Humanista</i>

Inovação.....	7, 21, 23, 24, 25, 30, 33, 50, 66, 68, 71, 81, 82, 83, 87, 96, 97, 106, 107, 108, 109, 110, 115, 121, 123, 135, 136, 138, 139, 140, 142, 147, 148, 150, 152, 153, 155, 159, 160, 162, 163, 170, 172, 174, 175, 177, 178, 180
Leis	24, 36, 58, 60, 61, 62, 63, 65, 68, 69, 92, 98, 131, 134, 178
Métricas ..	26, 33, 41, 42, 50, 51, 58, 76, 77, 79, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 116, 118, 121, 124, 125, 158, 194
Modelos	61, 64, 69, 129, 131, 146, 148, 149, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 161, 162, 163, 170, 173, 174, 195
Moral	29, 33, 94, 96, 97, 98, 133, 191
Paradoxo da produtividade	107
Participação social	88, 120, 121, 125, 129, 168, 174
Pensamento sistêmico.....	122, 152, 161, 162, 164, 168, 175, 181, 182
Pensamento Sistêmico Crítico.....	7, 8, 14, 33, 161, 164, 165, 167, 169, 170, 181
Perigos	7, 86, 99, 101, 110, 177
Pluralismo metodológico	164
Poluição	20, 22, 66, 70, 96, 99, 102, 103, 126, 127, 128, 159
Precisão.....	62, 70, 89, 96, 103, 158
Princípio da precaução.....	159, 160
Precaução	22
Princípio da prevenção	26
Prevenção	7, 20, 22, 25, 26, 31, 67, 73, 76, 80, 85, 86, 99, 101, 102, 103, 104, 127, 128, 136, 137, 142, 157, 159, 177, 178
Química Tradicional	52, 175, 179
Racionalidade	
Racionalidade instrumental ...	7, 17, 25, 26, 30, 31, 32, 33, 34, 87, 116, 117, 118, 132, 133, 134, 136, 137, 142, 143, 144, 145, 146, 167, 168, 169, 176, 177, 178, 179, 182, 197
Racionalidade prática ..	7, 28, 29, 30, 32, 33, 57, 58, 59, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 85, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 97, 101, 118, 133, 134, 147, 149, 164, 177, 178
Racionalidade teórica	28, 29, 30, 32, 57, 58, 59, 64, 65, 66, 68, 71, 88, 89, 90, 91, 93, 101, 118, 134, 149, 178
Rendimento.....	70, 84, 104
Resíduos ..	7, 20, 21, 22, 67, 73, 75, 76, 79, 80, 84, 86, 100, 101, 103, 104, 107, 127, 159, 177, 178
Seletividade	70, 75, 84, 103, 110
Solvente	
Sem solvente	69, 75, 77, 78
Solventes.....	72, 73, 77, 111
Sustentabilidade.....	23, 24, 25, 27, 58, 68, 78, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 96, 116, 120, 122, 123, 124, 125, 136, 137, 153, 173, 175, 179, 180, 187, 191
Termodinâmica.....	<i>Consulte Entropia</i>
Toxicidade	7, 21, 68, 75, 85, 86, 99, 100, 101, 110, 111, 124, 126, 177

Triângulo de Johsntone.....	170
Velocidade.....	65, 103
Vizinhança.....	161, 162, 163