

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E BIOFARMACÊUTICA

Marina Domingues Fernandes

O DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS DA ENERGIA DO
HIDROGÊNIO A PARTIR DO DESIGN DOMINANTE E PARADIGMAS TECNO-ECONÔMICOS

Belo Horizonte
2021

Marina Domingues Fernandes

O desenvolvimento de tecnologias viabilizadoras da energia do hidrogênio a partir do design dominante e paradigmas tecno-econômicos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Inovação Tecnológica.

Orientador: Rubén Dario Sinisterra Millán

Coorientadora: Márcia Siqueira Rapini

Belo Horizonte
2021

Ficha Catalográfica

F363d Fernandes, Marina Domingues
2021 O desenvolvimento de tecnologias viabilizadoras da energia do
T hidrogênio a partir do design dominante e paradigmas tecno-econômicos
[manuscrito] / Marina Domingues Fernandes. 2021.
210 f. : il.

Orientador: Rubén Dario Sinisterra Millán.
Coorientadora: Márcia Siqueira Rapini.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais –
Departamento de Química (Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica).
Inclui bibliografia.

1. Inovações tecnológicas – Teses. 2. Hidrogênio como combustível
– Teses. 3. Células à combustível – Teses. 4. Hidrogênio – Energia –
Teses. 5. Tecnologia e desenvolvimento econômico – Teses. I.
Sinisterra Millán, Rubén Dario, Orientador. II. Rapini, Márcia Siqueira,
Coorientadora. III. Título.

CDU 043



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Inovação
Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG

ATA DA SESSÃO DE DEFESA DA 15ª TESE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E BIOFARMACÊUTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, DA DISCENTE MARINA DOMINGUES FERNANDES, Nº DE REGISTRO 2016752364.

Aos 15 (quinze) dias do mês de julho de 2021, às 14 horas, na plataforma on-line Microsoft Teams, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelos Professores Doutores: Rubén Dario Sinisterra Millán do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG (Orientador), Márcia Siqueira Rapini do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG (Coorientadora), Mauricio Tiomno Tolmasquim do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, Paulo Emílio Valadão de Miranda do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ e do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, Clelio Campolina Diniz da Faculdade de Ciências Econômicas, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional - FACE - da UFMG e Francisco Horácio Pereira de Oliveira do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG, para julgamento da Tese de Doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica - Área de Concentração: Inovação Biofarmacêutica e Biotecnológica da discente Marina Domingues Fernandes, Tese intitulada: **“O desenvolvimento de tecnologias viabilizadoras da energia do hidrogênio a partir do design dominante e paradigmas tecno-econômicos”**. O Presidente da Banca abriu a sessão e apresentou a Comissão Examinadora, bem como esclareceu sobre os procedimentos que regem da defesa pública de tese. Após a exposição oral do trabalho pela discente e arguição pelos membros da Banca Examinadora na ordem registrada acima, com a respectiva defesa da candidata. Finda a arguição, a Banca Examinadora se reuniu, sem a presença da discente e do público, tendo deliberado unanimemente pela sua **APROVAÇÃO**. Nada mais havendo para constar, lavrou-se e fez a leitura pública da presente Ata que segue assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora e pelo Coordenador do Programa (via Sistema Eletrônico de Informações – SEI). Belo Horizonte, 15 de julho de 2021.

Professor Doutor Rubén Dario Sinisterra Millán (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professora Doutora Márcia Siqueira Rapini (Coorientadora)
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professor Doutor Mauricio Tiomno Tolmasquim
(Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE/)

Professor Doutor Paulo Emílio Valadão de Miranda

(Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ e Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE)

Professor Doutor Clelio Campolina Diniz

(Faculdade de Ciências Econômicas, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional - FACE - da UFMG)

Professor Doutor Francisco Horácio Pereira de Oliveira

(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professor Doutor Rubén Dario Sinisterra Millán

Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Emílio Valadão de Miranda, Usuário Externo**, em 15/07/2021, às 19:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcia Siqueira Rapini, Professora do Magistério Superior**, em 15/07/2021, às 21:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Tiomno Tolmasquim, Usuário Externo**, em 19/07/2021, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Horácio Pereira de Oliveira, Usuário Externo**, em 02/08/2021, às 15:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clélio Campolina Diniz, Servidor aposentado**, em 09/08/2021, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ruben Dario Sinisterra Millan, Professor do Magistério Superior**, em 13/08/2021, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).





A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0836356** e o código CRC **CBA78D44**.

Referência: Processo nº 23072.235991/2021-34

SEI nº 0836356



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós Graduação em Inovação
Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG

“O DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO A PARTIR DO DESIGN DOMINANTE E PARADIGMAS TECNO-ECONÔMICOS”

MARINA DOMINGUES FERNANDES, Nº DE REGISTRO 2016752364.

Tese **Aprovada** pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:

Professor Doutor Rubén Dario Sinisterra Millán (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professora Doutora Márcia Siqueira Rapini (Coorientadora)
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Professor Doutor Mauricio Tiomno Tolmasquim
(Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE)

Professor Doutor Paulo Emílio Valadão de Miranda
(Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ e Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE)

Professor Doutor Clelio Campolina Diniz
(Faculdade de Ciências Econômicas, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional - FACE - da UFMG)

Professor Doutor Francisco Horácio Pereira de Oliveira
(PPG em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da UFMG)

Belo Horizonte, 15 de julho de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Emílio Valadão de Miranda, Usuário Externo**, em 15/07/2021, às 19:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcia Siqueira Rapini, Professora do Magistério Superior**, em 15/07/2021, às 21:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Tiomno Tolmasquim, Usuário Externo**, em 19/07/2021, às 08:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Horácio Pereira de Oliveira, Usuário Externo**, em 02/08/2021, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clélio Campolina Diniz, Servidor aposentado**, em 09/08/2021, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ruben Dario Sinisterra Millan, Professor do Magistério Superior**, em 13/08/2021, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0836367** e o código CRC **6C6A7188**.

Agradecimentos

Agradeço aos cinco que me educaram, Rosana, Otávio, Nicolas, Vovó Lia e Vovô Osvaldo, pela vida, criação e apoio incondicional.

Agradeço ao meu grande companheiro de jornada, Victor, pela sensibilidade, paciência e contribuições.

Agradeço à Sasha e Iara pelos momentos de alegria.

Agradeço à família alemã Britta, Walter, Anna, Tim, Josa pelo acolhimento e apoio

Ao professor orientador professor Rubén responsável pelos mais sinceros carinhos.

À co-orientadora, professora Márcia pela paciência e dedicação profissional à supervisão e acompanhamento desta tese.

À professora Carlota Perez pelas portas abertas, pela hospitalidade e por ter me proporcionado um dos anos mais significativos da minha vida.

Ao professor Lundvall pelas conversas e discussões.

À professora Ana Valéria pela amizade e conselhos.

À professora Margrethe Holm Andersen pelos abraços e acolhimento.

Ao professor Rasmus Lema pela supervisão durante o doutorado sanduíche.

À Eni pelos inúmeros auxílios.

Aos familiares, vovó Ana, Tias Mônica, Mariangela, Bernadete, Hermina, aos tios Nilton, Paulos e Lu, aos primos, Ana Flávia, Danielle, Débora, Érika, Úrsula, Paulinho, Victor, Breno e Aninha.

Aos amigos Ana Clara, Isis, Luiz Henrique, Matheus, Thaisa, Taline, Letícia, Daniel, Jéssica, Tomás e Flávia.

Aos colegas e professores do curso.

Às instituições de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FAPEMIG pelos investimentos que proporcionaram esta tese

Aos brasileiros, que financiam meus estudos.

Resumo

A presente pesquisa teve como objetivo compreender como a dinâmica dos paradigmas tecno-econômicos influenciou o design de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível entre os anos 2000 e 2020. Mais especificamente, a pesquisa explorou as diferenças nas atividades de design tecnológico durante a transição entre os paradigmas tecno-econômicos referentes a Era do Automóvel e Produção em Massa (4ª Revolução Tecnológica) e a Era da Informação e Comunicação (5ª e atual Revolução Tecnológica). Foi também objetivo desta pesquisa analisar as diferenças nas atividades de design entre países líderes e/ou de rápida adoção tecnológica (centro) e países de desenvolvimento tecnológico tardio (periferia). A estratégia metodológica adotada no presente trabalho foi o estudo de caso através de uma pesquisa qualitativa, onde as principais fontes de evidências primárias foram entrevistas semiestruturadas, virtuais e presenciais, com diferentes agentes que atuam no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio ou de pilhas a combustível em uma escala global. A pesquisa foi conduzida a partir de duas lentes teóricas, a de paradigmas tecno-econômicos e a design dominantes. Ademais, para analisar as especificidades dos países periféricos, apoiou-se também nas abordagens teóricas estruturalistas e em uma vertente crítica à literatura de cadeias globais de valor. Os resultados apresentados indicaram que a mudança do paradigma tecno-econômico redefiniu os propósitos das atividades de design das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível alterando o problema percebido nessas atividades e o conjunto de tecnologias disponíveis e concorrentes para solucioná-lo, resultando em preferências diferentes no que diz respeito às tecnologias desenvolvidas ao longo do tempo e uma trajetória tecnológica com características distintas da anterior. Os resultados também indicam um aumento da influência dos países do centro na periferia no que diz respeito a expansão tecnológica, essa especialmente impulsionada pelas atuações das subsidiárias de empresas multinacionais e organizações multilaterais que subsidiam governos locais.

Palavras-chave: Tecnologias do hidrogênio, pilhas a combustível, inovação tecnológica, paradigmas tecno-econômicos, design tecnológico, cadeias globais de valor.

Abstract

This research investigated how the techno-economic paradigms' dynamics influenced the design of fuel cells and hydrogen technologies between the years 2000 and 2020. More specifically, the research explored the differences in design activities during the transition between the techno-economic paradigms referring to the Era of Automobile and Mass Production (4th Technological Revolution) and the Era Information and Communication (5th and current Technological Revolution). It was also investigated the differences in design activities between leading and/or rapid technological adoption countries (center) and late-comer countries (periphery). The methodological strategy adopted was a case study through a qualitative research, where the main sources of primary evidence were semi-structured, virtual and face-to-face interviews, with different agents developing fuel cells or hydrogen technologies in a global scale. The research was conducted from two theoretical lenses: dominant designs and techno-economic paradigms. Furthermore, to analyze the specificities of peripheral countries, the structuralism theory and a critical literature on global value chains supported the analysis. The results indicate that the techno-economic paradigm shift redefined the purposes of the design activities of fuel cells and hydrogen technologies. This changed the problem perceived in these activities and the set of available and competing technologies to solve it, resulting in different preferred technologic developments over time and in a technological trajectory with different characteristics from the previous one. The results also indicate an increase in the influence of the leading countries in the periphery, this especially driven by the actions of the subsidiaries of multinational companies and multilateral organizations that subsidize local governments.

Keywords: Hydrogen technologies, fuel cells, technological innovation, techno-economic paradigms, technological design, global value chains.

Lista de Figuras

Figura 1 Fases das revoluções tecnológica.	24
Figura 2 Revoluções tecnológicas.....	28
Figura 3 Sistemática da estrutura periférica.....	30
Figura 4 Sistemas de Energia e exemplificações	53
Figura 5 Consumo Global de Energia Primária	57
Figura 6 Relação entre as fontes primárias e serviços de energia.....	58
Figura 7 Relação entre as fontes renováveis e serviços de energia	62
Figura 8 Esquema ilustrativo da produção aos usos do hidrogênio.....	67
Figura 9 Processos de produção de hidrogênio.....	69
Figura 10 Alternativas para armazenamento de energia.....	73
Figura 11 Maturidade tecnológica de alternativas para armazenamento de energia	74
Figura 12 Esquema ilustrativo do funcionamento do "Power-to-gas"	75
Figura 13 Exemplificação de um sistema de pilha a combustível hipotético	78
Figura 14 Hierarquia de componentes de um sistema composto por pilha a combustível	79
Figura 15 Competitividade de custos de aplicações de hidrogênio	81
Figura 16 Modelo teórico implícito na pesquisa.....	86
Figura 17 Estrutura geral para categorização dos participantes da pesquisa	91
Figura 18 Agrupamento categorias inferidas em categorias teóricas	100
Figura 19 Produção de petróleo por região 1971-2019.....	109
Figura 20 Cronologia do período analisado na instalação dos paradigmas tecno-econômicos	118

Lista de Quadros

Quadro 1 Escolas econômicas comparadas	21
Quadro 2 Pontos de convergência entre estruturalismo e de sistemas de inovação	32
Quadro 3 Combinações de conversões de energia.....	54
Quadro 4 Prioridade das perguntas para seleção de participantes	92
Quadro 5 Composição da amostra	94
Quadro 6 Conferências e webinars atendidos	95
Quadro 7 Visitas realizadas.....	96
Quadro 8 Categorias de análise.....	99
Quadro 9 Enquadramento dos entrevistados segundo categoria teórica.....	101
Quadro 10 Diferenças nas atividades de design por período	117
Quadro 11 Preferências tecnológicas dado a problemática do aquecimento global	133
Quadro 12 Desenvolvimento das tecnologias entre 2000-2020.....	178

Lista de tabelas

Tabela 1 Características dos processos de produção de hidrogênio por matéria-prima	71
Tabela 2 Tipos de pilha a combustível e suas características	77
Tabela 3 Avanço das tecnologias do hidrogênio nos países membros da IPHE.....	82

Lista de abreviações

°C - Grau Celsius

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHK - Câmara Brasil-Alemanha

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

CC - Captura de carbono

CH₄ - Metano

CHR - Central hidrelétrica reversível

CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão

CO₂ - Dióxido de carbono

COPPE - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

DoE - Department of Energy

EECM - Estação Experimental de Combustíveis e Minérios

FCHJU - Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertakings

FNDCT - Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

GIZ - Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

H₂ - Hidrogênio

INT - Instituto Nacional de Tecnologia

IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IPHE - International partnership for hydrogen and fuel cells in the economy

J - Joule

J/m³ - Joule por metro cúbico

kW - Quilo watt

MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia

MCTI - Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação

MME - Ministério de Minas e Energia

NH₃ - Amônia

NIP - Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie

NOW - Nationale Organisation Wasserstoff

OEM - Original Equipment Manufacturer

PaC – Pilha a Combustível

PEMFC - Proton-exchange membrane fuel cell – Pilha à combustível de membrana polimérica trocadora de prótons

PIB - Produto Interno Bruto

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

ProCaC - Programa Brasileiro de Células a Combustível

PV - Fotovoltaico

SOEC - Solid oxide electrolyzer cell – eletrolizador de óxido sólido

SOFC Solid oxide fuel cell – pilha a combustível de óxido sólido

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

Unicamp - Universidade Estadual de Campinas

USP - Universidade de São Paulo

VW - Volkswagen

WHEC - World Hydrogen Energy Conference

Sumário

1.	Introdução	11
2.	Referencial Teórico.....	18
2.1.	Paradigmas tecno-econômicos	18
2.1.1.	Notas sobre o avanço tecnológico na periferia.....	29
2.2.	Trajetórias Tecnologias e Design Tecnológico	36
2.3.	Agenda verde.....	43
2.3.1.	O Crescimento Verde	43
2.4.	Transições Energéticas	52
2.4.1.	Sistemas de Energia e Transições Energéticas: definições	52
2.4.2.	Transição Energética e a Agenda Verde	59
2.5.	Tecnologias do Hidrogênio e Pilhas a Combustível	66
3.	Metodologia	83
3.1.	Situando o estudo	83
3.2.	O contexto do caso estudado	87
3.3.	Seleção da amostra e procedimentos de coleta de dados	90
3.4.	Tratamento dos dados.....	97
4.	Resultados e Análises.....	102
4.1.	Influência dos paradigmas tecno-econômicos nas atividades de design.....	102
4.2.	Atividades de design: a disputa pela dominância tecnológica	120
4.3.	O avanço das tecnologias na periferia.....	134
4.4.	A trajetória das tecnologias no Brasil.....	155
5.	Discussão e conclusão.....	177
6.	Referências.....	185
	Anexo 1: Perguntas questionário disponibilizado na WHEC	201
	Anexo 2: Roteiro de norteador das entrevistas	204

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global é resultado das atividades antropogênicas na Terra. Estima-se que essas atividades refletiram em um aumento de 1,0 °C na temperatura do globo em relação aos níveis pré-industriais (IPCC, 2019). Mais especificamente, o aumento da temperatura está relacionado às taxas de dióxido de carbono (CO₂) acrescidas na atmosfera oriundas da queima de recursos naturais com alto conteúdo de carbono. Como os diversos gases de efeito estufa, o CO₂ permite a penetração da radiação solar (radiação ultravioleta) na atmosfera, mas absorve ondas de radiação infravermelha (calor) refletidas da superfície da Terra, normalmente dissipadas de volta ao espaço. Para estabilizar a temperatura global em qualquer nível, as emissões "líquidas" de CO₂ precisariam ser reduzidas a zero, ou seja, a quantidade de CO₂ liberada na atmosfera deve ser igual à quantidade removida.

Dentre as intervenções humanas que resultam em um aumento da temperatura do globo, a queima de combustíveis fósseis é a principal, seguida da produção de metano (CH₄) (UNEP, 2020), majoritariamente derivadas da agropecuária e da produção de combustíveis fósseis (VAN DINGENEN *et al.*, 2018). Dado a urgência e risco da manutenção do curso das intervenções antropogênicas, agendas políticas de diversos governos tem criado instrumentos regulatórios, normativos, financeiros dentre outros visando reduzir as emissões de CO₂. Notadamente, em 2015, durante a COP21, 195 países se tornaram signatários do Acordo de Paris, um tratado internacional para fortalecer uma resposta global à ameaça das mudanças climáticas, objetivando esforços para manter o aumento da temperatura média abaixo de 2 °C, preferencialmente abaixo dos 1,5 °C (UN, 2015). Entretanto, até então, nem incentivos realizados ou os projetados para reduções das emissões de CO₂ irão surtir nos efeitos necessários para manter a temperatura nos níveis seguros acordados em Paris (IRENA, 2021). O aumento de 1,5 °C entre 2030 e 2052 é muito provável¹, o que trará riscos importantes e sem precedentes para os sistemas natural e humano (IPCC, 2019).

A transição energética para formas não-fósseis de geração e uso de energia é imprescindível para mitigar os efeitos relativos ao aquecimento global (IEA, 2018). Os principais esforços para redução das emissões de CO₂ dizem respeito ao setor elétrico, tanto para modificar as bases fósseis das matrizes elétricas, quanto para expandir a eletrificação dos sistemas de energia. Pondera-se, porém, que o setor elétrico contribuirá com um terço das modificações necessárias para zerar as emissões líquidas de CO₂,

¹ Intervalo de confiança de 90%-100%

sendo a fundamental reduzir as emissões também em outros setores como transporte e indústria (IEA, 2020a). Alcançar as metas do Acordo de Paris requer também a participação de novos componentes nos sistemas de energia, tais como o hidrogênio e seus derivados, mecanismos para sequestro de carbono e o uso da bioenergia com sequestro de carbono (IRENA, 2021). Por isso, uma parte importante das agendas políticas para mitigação do aquecimento global se concentra em criar incentivos para o desenvolvimento e implementação de tecnologias emergentes.

Ao mesmo tempo que a urgência climática é posta, após a crise de 2008 abriu-se uma janela de oportunidade para superar as dificuldades de recuperação econômica através de incentivos a implementação de tecnologias de cunho ambiental (FOUQUET; HIPPE, 2019; MAZZUCATO, 2015; PEREZ, 2016; SEMIENIUK; MAZZUCATO, 2019). O atual momento histórico converge o ambientalmente urgente, o economicamente necessário e o tecnologicamente possível, viabilizando uma agenda política global de forte apelo social, ambiental e econômico, denominada agenda verde (BERGH; DREWS, 2019; BOWEN; HEPBURN, 2014; IRENA, 2019; LIPSEY, 2019; MUNDACA; MARKANDYA, 2016; PEREZ, 2013, 2019; SCHAFFER; BERNAUER, 2014). O momento econômico é oportunizado pela necessidade de interromper o atual descompasso entre os retornos dos capitais financeiro e produtivo, referido como o período do ciclo capitalista da “economia de cassino”, onde os investimentos financeiros não encontram um lastro na economia real (PEREZ; LEACH, 2018). Dentro da perspectiva teórica da presente pesquisa, os ciclos econômicos, normalmente períodos espaçados por 60 anos, são demarcados por revoluções tecnológicas que estruturam paradigmas tecno-econômicos. Um paradigma tecno-econômico é um *modus operandi* imperativo e estreitamente relacionado a um conjunto de tecnologias pervasivas que revolucionam o *status quo* das relações sociais, econômicas e produtivas de um determinado período. Cada revolução tecnológica traz consigo um respectivo paradigma técnico-econômico que define o modelo e o território para as práticas “normais” de inovação (PEREZ, 2002, 2009). Na perspectiva de Perez (2002) adotada nesta tese, até o presente já ocorreram cinco revoluções tecnológicas sendo elas a Industrial, em 1771; a da Máquina a Vapor e Ferrovias (1829), a do Aço e Eletricidade (1875), a do Automóvel e Produção em Massa (1908) e a atual da Informação e Telecomunicações (1971).

A dinâmica cíclica dos paradigmas tecno-econômicos é iniciada por um surto tecnológico que consegue alavancar um rápido crescimento econômico. Aos poucos, os retornos dos investimentos nas tecnologias relacionadas decrescem, levando a um período, como o atual, de grande especulação

financeira. Por estarem desatrelados da economia real, os excessos financeiros culminam em sucessivas crises econômicas, uma vez que os ganhos financeiros são majoritariamente reinvestidos no próprio mercado financeiro, não ocasionando um aumento da capacidade produtiva e ganhos econômicos reais. O realinhamento entre os capitais financeiro e produtivo ocorre a partir da criação de um conjunto de regulações que indiquem possíveis direcionamentos tecnológicos preferíveis tornando vantajoso o investimento em atividades da economia real. Uma vez direcionados, investimentos para o desenvolvimento de novas tecnologias voltam a ser atrativos e menos arriscados, potencializando um período de oportunidades para o desenvolvimento econômico. O ciclo se fecha quando o paradigma atinge sua maturidade e os retornos das atividades decrescem novamente, favorecendo o surgimento de outro surto tecnológico (FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 2002; PEREZ; SOETE, 1988). É importante ressaltar que a presente pesquisa aceita as bases neoschumpeterianas de que o progresso tecnológico deve ser o ponto de partida para a análise do desenvolvimento econômico (ALBUQUERQUE, 2007; DOSI, 1982; FREEMAN, 1987; FREEMAN; PEREZ, 1988; MAZZUCATO; PEREZ, 2015; WINTER, 1984). Assim, o desenvolvimento de tecnologias é compreendido de uma forma ampla, envolvendo aspectos para além dos seus benefícios no aumento da produtividade econômica.

A presente pesquisa emerge do contexto do aquecimento global e dos obstáculos tecnológicos para a implementação de sistemas de energia com reduzida intensidade de carbono, focando em compreender a influência da urgência climática no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível são importantes alternativas para compor e viabilizar sistemas de energia menos intensivos em emissões de CO₂ (IEA, 2020a; IPCC, 2019; IRENA, 2018, 2019, 2021). Essas, ao mesmo tempo que disponibilizam um vetor energético possivelmente não fóssil, ampliam a possibilidade de eletrificação de setores intensivos em emissões de CO₂ que não são passíveis de eletrificação. É importante esclarecer que o desenvolvimento dessas tecnologias antecede a problemática exposta pelo aquecimento global, e por isso é possível verificar que diferentes contextos moldaram suas trajetórias. Ressalta-se também que, a presente pesquisa assume o posicionamento da vertente da agenda verde, que será explorada na seção 2.3, em que a urgência climática é o principal direcionamento tecnológico para realinhar os capitais financeiros e produtivos no atual paradigma tecno-econômico da Informação e Telecomunicações.

Pressupõem-se nesta pesquisa que o desenvolvimento tecnológico está diretamente associado, mas não restrito, a atividades recursivas e intencionais de problema-solução, denominadas atividades de design, que dão origem aos artefatos tecnológicos, ou tecnologias. Nesse sentido, tecnologias são consideradas objetos intencionalmente produzidos e cujas estruturas físicas são intrínsecas às suas funcionalidades e vice-versa (VACCARI, 2013). Durante as atividades de design, a tarefa dos agentes é buscar uma adequação entre o problema e o universo de tecnologias possíveis para solucioná-lo. O resultado dessa busca é um artefato tecnológico, ou seja, um objeto que cumpre o propósito de uma atividade de design (VISSER, 2009). Durante as fases iniciais do desenvolvimento, as soluções, ou seja, as tecnologias, conseguem ser apenas heurísticas (soluções boas o suficiente), uma vez que soluções ótimas requerem parâmetros inexistentes até então. As soluções iniciais derivam de problemas decompostos de forma pouco sistemática ou até mesmo arbitrária, priorizando o que se conhece de atividades ou experiências anteriores e transpondo as informações disponíveis para o contexto relativo a funcionalidade do artefato. Do mesmo modo, como os problemas são decompostos de diferentes maneiras, seus critérios de avaliação também resultam em soluções dependentes da combinação do conhecimento do agente e das informações disponíveis. Consequentemente, a despeito de similaridades em suas estruturas físicas, uma vez exposta a outros contextos, agentes ou conjunto de soluções, as atividades de design podem resultar em artefatos ontologicamente distintos, objetivando outros propósitos e funcionalidades.

A abordagem teórica das atividades de design permite compreender a influência dos contextos externos a essas atividades nos aspectos físicos e funcionais das tecnologias. Através da observação longitudinal das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível a pesquisa propõem construir uma ponte teórica entre os diferentes níveis de agregação dos paradigmas tecno-econômicos e as atividades de design. Auxiliada por um momento histórico de mudança do propósito das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, a pesquisa visa perceber a influência dos paradigmas tecno-econômicos na construção do contexto no qual as atividades de design dessas tecnologias estão justapostas.

O objetivo principal da presente pesquisa foi compreender como a dinâmica dos paradigmas tecno-econômicos influenciou o design das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível entre os anos 2000 e 2020. A pesquisa foi motivada pelo crescente entusiasmo acerca das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível a partir de meados de 2010, esse parecido com o *momentum* vivenciado pelos agentes desenvolvedores das tecnologias no final dos anos 1990 e início dos

anos 2000. Apesar das similaridades, o desenvolvimento das tecnologias *per se* apresentaram características consideravelmente distintas, essas pouco exploradas na literatura. **Foi também objetivo desta pesquisa analisar as diferenças nas atividades de design entre países líderes e/ou de rápida adoção tecnológica (centro) e países de desenvolvimento tecnológico tardio (periferia).** Esse objetivo foi motivado pelo aumento do interesse dos países do centro na implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia desde 2017, especialmente no que tange tecnologias viabilizadoras da produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água. Ressalta-se que, apesar de outros trabalhos contemplarem os avanços de tecnologias para geração de energia renováveis em países de desenvolvimento tardios (BISHOP; BRAHMBHATT, 2019; CHEN *et al.*, 2019; GOSENS, 2020; MUNDACA; MARKANDYA, 2016), a propagação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia ainda não foi explorada na literatura, sendo portanto a contribuição desta tese.

Outro aspecto que difere a atual pesquisa das demais diz respeito a metodologia e lentes teóricas utilizadas e, conseqüentemente o tipo de análise que se almeja com essa escolha. A estratégia metodológica adotada no presente trabalho foi o estudo de caso a nível das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, essas entendidas como um único grupo de tecnologias complementares. As principais fontes de evidências primárias foram entrevistas semiestruturadas, virtuais e presenciais, com diferentes agentes que atuam no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio ou de pilhas a combustível em uma escala global. Foram também consideradas outras fontes primárias, como observação em campo durante visitas e congressos, e fontes secundárias, como artigos acadêmicos, informações disponíveis em veículos noticiários e páginas na internet disponibilizadas por organizações estudadas. Os dados foram tratados utilizando o método de análise de conteúdo (BARDIN, 2011) e reportados através de narrativas e outras sistematizações como quadros.

Diferentemente de outros trabalhos encontrados na literatura, a presente pesquisa não recorreu a uma estratégia de pesquisa histórica, apesar de se beneficiar de dados secundários de estudos que utilizaram essa metodologia. Também não se tratou de uma investigação *a posteriori*, mas sim de uma investigação baseada na percepção dos agentes desenvolvedores que desconhecem os futuros desdobramentos das suas atividades para a efetiva implementação em larga escala dessas tecnologias.

A pesquisa foi amparada em duas lentes teóricas que propiciam transitar entre uma abordagem micro e macro fundamentada para as análises – os paradigmas tecno-econômicos (PEREZ, 2002, 2009,

2019) e as teorias de design (ABERNATHY; UTTERBACK, 1978; RITTEL; WEBBER, 1973a). Na teoria dos paradigmas tecno-econômicos Perez (2002) delimita os intervalos temporais da instauração, inflexão e maturidade das revoluções tecnológicas utilizados para definir o contexto e o *modus operandi* das atividades de design das tecnologias em análise. Já a teoria de designs fornece o instrumental analítico para relacionar as observações no nível da tecnologia ao contexto colocado pela teoria de paradigmas.

Em suma, o desenvolvimento e implementação de tecnologias para a geração e viabilização de sistemas de energia menos intensivos em emissões de CO₂ ao mesmo tempo que imprescindíveis para a manutenção das atividades bióticas e abióticas na Terra, são uma forma de acumulação de capital no médio longo prazo. A agenda verde é mais incisiva nos países centrais. Parcialmente porque esses países apresentam uma economia mais intensiva em uso de recursos energéticos, e por isso uma maior urgência nas mudanças no setor. Contudo, mais do que uma questão de urgência ambiental, a agenda verde é um poderoso pacto social entre empresas, governo e constantemente legitimado pela sociedade, onde os agentes abdicam do uso dos recursos disponíveis (financeiros, produtivos) no momento presente e apostam em um conjunto de tecnologias e instituições que irão garantir um retorno econômico, social e ambiental.

Não fazer parte desse pacto tem consequências, especialmente quando não se aposta em outras formas de acumular o capital excedente. A consequência mais perversa seria o próprio subdesenvolvimento, ou atraso econômico. Enquanto governos dos países industrializados marcham cada vez mais na direção de “esverdear” suas agendas de políticas públicas, práticas similares não são uma constante em países periféricos, como os latino-americanos. Assim, uma vez profetizada as apostas dos países centrais, ocorre uma explosão e expansão de todos os benefícios econômicos e tecnológicos. Esses, por sua vez, se expandem em direção a periferia, muitas vezes incapaz de gozar dos mesmos privilégios que o centro devido aos problemas estruturais relacionados ao desenvolvimento tardio desses países (FURTADO, 1920; PREBISCH, 1962).

O desafio nos países periféricos está posto, já que a expansão das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível é inevitável. Torna-se fundamental conhecer e caracterizar as facetas propositadas a essas tecnologias, especialmente a partir do contexto do aquecimento global para vislumbrar alternativas remanescentes para países periféricos no desenvolvimento dessas tecnologias.

Esta tese está organizada em outros quatro capítulos além desta introdução. O capítulo dois apresenta o referencial teórico e a revisão da literatura utilizada na pesquisa, dividido em quatro subseções: paradigmas tecno-econômicos, trajetórias tecnológicas e design dominante, agenda verde e tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. O capítulo três apresenta a metodologia, subdividida em: situação do estudo, exposição geral sobre o contexto do caso estudado, os métodos de seleção de amostra e procedimentos de coleta de dados e o método de tratamento dos dados. O capítulo quatro contém os resultados derivados da aplicação da metodologia apresentada, sendo este subdividido em quatro subseções: a influência dos paradigmas tecno-econômicos nas atividades de design, as atividades de design, o avanço das tecnologias na periferia e a agenda verde e o design tecnológico. Por fim são apresentadas as considerações finais sobre esta presente pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Paradigmas tecno-econômicos

Paradigmas tecno-econômicos são uma elaboração teórica-empírica neoschumpeteriana de estudos econômicos que, em alguma medida, visam compreender a causa da riqueza das nações. Essa abordagem não apenas reconhece o papel do progresso técnico, mas também formulam as causalidades dos modelos de desenvolvimento econômico a partir da tecnologia.

As principais teorias de desenvolvimento econômico se consolidaram na conjuntura pós-guerra, quando condições específicas relativas à reconstrução dos países evidenciaram a necessidade de uma atuação orquestrada e contextualizada para a retomada do crescimento econômico. Apesar da tardia consolidação do campo, os primórdios dos estudos de desenvolvimento econômico já estavam presentes nos princípios protecionistas mercantilistas da economia clássica no século XVI, ao reconhecerem a superioridade da produção de bens manufaturados em relação às matérias-primas.

A revolução marginalista no início do século XIX interrompe a lógica do pensamento econômico clássico, propondo uma nova teoria econômica micro fundamentada na alocação de recursos e teoria da troca e supondo que a constante maximização do bem-estar orientada pelo mercado garantiria o rompimento do subdesenvolvimento. Assim, as questões de crescimento, acumulação e excedente de produção foram restringidas a uma simplificação dos modelos da ortodoxia marginalista. A partir dos anos 1960, quando o contexto do pós-guerra exaure as possibilidades da economia marginalista em propor alternativas para o crescimento econômico, consolida-se um campo teórico específico para abordar problemas relativos ao desenvolvimento e estagnação (BASTOS, CARLOS PINKUSFELD; BRITTO, 2009). Nisso emergem teorias de desenvolvimento econômico, frequentemente argumentadas a partir do modelos de “dois setores” separando o setor agrícola e industrial, também denominados setores tradicional e moderno, como em Hirschman (1958) Lewis (1979), Nurkse (1952) e Rains e Fei (1961), onde a migração para o setor industrial moderno é um processo necessário para o desenvolvimento.

Dentre os modelos desenvolvimentistas, duas principais vertentes se propuseram à analisar a relação entre tecnologia e crescimento econômico (FAGERBERG; MOWERY; VERSPAGEN, 2009).

A primeira são modelos de crescimento neoclássicos² como em Solow (1957) e Romer (1990), nos quais mudanças tecnológicas são interpretadas a partir de hipóteses micro fundamentadas da ortodoxia econômica, como a racionalidade substantiva dos agentes e incertezas. Nesses modelos, incertezas são equacionadas em funções de distribuição probabilística, que por sua vez são percebíveis e calculáveis por agentes racionais. Em cenários de forte incerteza, como no caso de inovações radicais, os modelos neoclássicos não conseguem endogeneizar a mudança tecnológica. Alternativamente, na segunda vertente encontram-se as abordagens evolucionárias, que emergem a partir dos estudos de Joseph Schumpeter, notadamente a publicação da Teoria do Desenvolvimento Econômico (SCHUMPETER, 1911) impulsionadas por Nelson, Winter e Dosi (DOSI, 1984; NELSON, RICHARD R.; WINTER, 1973, 1974, 1982). Esses trabalhos abrem mão de uma modelagem quantitativa com forte consistência analítica para adotar modelos mais realistas e que conseguem incluir “micro complicações” dos processos de inovação (FAGERBERG; MOWERY; VERSPAGEN, 2009).

Os paradigmas tecno-econômicos se enquadram na perspectiva evolucionária. Vale ressaltar que a abordagem evolucionária é eclética, sendo os paradigmas tecno-econômicos apenas uma parcela desses estudos (FAGERBERG; VERSPAGEN, 2009). Apesar da grande diversidade, a abordagem evolucionária apresenta uma base teórica transversal que se difere dos estudos neoclássicos. A primeira e principal distinção é em relação ao pressuposto de racionalidade dos agentes encontrada na ortodoxia econômica. Diferentemente dos neoclássicos, a filosofia evolucionária refuta o axioma de racionalidade substantiva dos indivíduos e que esses tomam decisões maximizadas. Estudos evolucionários partem da ideia de racionalidade limitada, assumindo que indivíduos são incapazes de conhecer todas as suas oportunidades e por isso não tomam decisões ótimas. Estudos evolucionários pressupõem um comportamento regido pelo *modus operandi*, regras ou rotinas, sendo esse comportamento flexível e influenciado pelo contexto, como, por exemplo, resultados econômicos *ex post*.

Uma segunda importante distinção é que os modelos evolucionários não partem do princípio de equilíbrio econômico³, mas sim de que a economia está em constante desequilíbrio. O pressuposto de equilíbrio é especialmente problemático quando se busca compreender os processos de mudança

² Modelos neoclássicos utilizam uma base teórica similar aos marginalistas, partindo de conceitos como equilíbrio de mercado, racionalidade de agentes e maximização de utilidade.

³ Equilíbrio econômico diz respeito a um pressuposto dos modelos ortodoxos de que oferta e demanda se equilibram através de ajustes de mercado entre preço e quantidade

tecnológica, uma vez que o mesmo negligencia os processos intrínsecos a trajetória da invenção a inovação, assumindo que o mercado se equilibra simplesmente devido a oferta e demanda. Em um estágio inicial ou de alta incerteza, firmas, não tomam decisões baseadas em equilíbrio de oferta e demanda, mas, mais provavelmente, em decisões de outras naturezas que não estritamente econômicas, como tentativa e erro (NELSON; SCHUETTE; WINTER, 1975). Assim, a noção da trajetória tecnológica⁴ é um importante componente da análise econômica evolucionária, frequentemente e propositalmente excluída das abstrações recorrentes dos modelos neoclássicos. Os estudos evolucionários se apoiam fortemente em análises históricas, essas usadas para identificação de padrões relacionados ao processo de desenvolvimento (FAGERBERG; MOWERY; VERSPAGEN, 2009).

Uma terceira característica da abordagem evolucionária é em relação ao ponto de partida para as análises de desenvolvimento: os processos de mudança tecnológica. Enquanto outras abordagens teóricas de desenvolvimento econômico buscam endogenizar o “progresso técnico”, os modelos evolucionários assumem a equivalência entre o próprio progresso técnico (dado suas circunstâncias e dimensões) e o desenvolvimento. Dessa forma, a mudança tecnológica é a essência da abordagem evolucionária e compreender dinâmicas nacionais, regionais, institucionais e organizacionais ligadas a artefatos tecnológicos é o principal ponto de análise.

Por fim, uma quarta característica que compõem a base transversal evolucionária é a importância dos trabalhos elaborados pelo economista Joseph Schumpeter (1883 – 1950), especialmente no que diz respeito às suas contribuições acerca do tema das inovações. Schumpeter consegue avançar significativamente com as ideias clássicas da importância do progresso técnico para o desenvolvimento elaborando um pensar econômico singular de onde se ergue a escola de pensamento neoschumpeteriana ou evolucionária (CASTELLACCI *et al.*, 2004). O Quadro 1 sintetiza e diferencia as principais características das escolas econômicas apresentadas até então.

⁴Remete aos modelos heterodoxos como kaldorianos e pós-keynesianos com “causalidade cumulativa” ou “dependência de trajetória”

Quadro 1 Escolas econômicas comparadas

	Referências / Nomenclaturas	Séculos	Pressupostos (exemplos)	Fatores relacionados ao desenvolvimento
Escola Clássica	Economia clássica	XVI - XIX	Flexibilidade de preços, economia liderada pela oferta	Enriquecimento das nações, acumulação
Escola Neoclássica	Marginalista, ortodoxia	XIX	Racionalidade de agentes, otimização	Livre funcionamento do mercado, vantagens competitivas
Evolucionária	Neoschumpeteriana	XX	Dependência de trajetória, racionalidade limitada	Dinâmica tecnológica

Fonte: elaboração própria

Uma vez caracterizada a base teórica de estudos evolucionários, é possível conceituar e esclarecer especificidades do arcabouço teórico dos paradigmas tecno-econômicos. Uma ideia central nesse arcabouço é que existe alguma ciclicidade na economia, percebidas não apenas através de variáveis econômicas, mas também no todo social. Esses ciclos econômicos são induzidos pelas mudanças tecnológicas que se propagam pelos mais diversos campos econômicos, sociais e institucionais, promovendo surtos de desenvolvimento (SCHUMPETER, 1911, 1939). Os ciclos econômicos, também chamados de ondas, foram detectados por economistas e estatísticos no fim do século XIX e início do XX, quando observavam séries históricas por exemplo de taxas de preços, investimento e estoques de firmas, que foram esquecidos a partir da reforma marginalista. Apesar das séries apresentarem periodicidades e dados distintos, o esforço era de obter regularidades em variáveis econômicas no longo prazo. Dentre as diversas contribuições estatísticas de ciclos econômicos do período, três alicerçam a formulação teórica de Schumpeter (1939): a de Juglar (ciclos de 7-11 anos), Kitchen (ciclos de 3-5 anos) e, principalmente, a de Kondratiev (ciclos de 45-60 anos) (BARNETT, 1998). Embora não estivesse preocupado com a temporalidade dos ciclos, Schumpeter formula a base para uma teoria da natureza cíclica da economia capitalista quando estabelece que a causa da dinâmica do sistema está no lucro obtido através de inovações na esfera produtiva como forma de aumentar a produtividade e o retorno esperado de novos investimentos (PEREZ, 1983). O caráter cíclico se justifica devido ao retorno decrescente desses investimentos em função do tempo, estabelecendo uma relação inversa entre a difusão das inovações e sua taxa de retorno. Uma vez saturada as possibilidades de auferir lucros, a dinâmica do

sistema se reinstaura com realização de novas combinações (inovações), que novamente geram expectativas de lucro (SCHUMPETER, 1911, 1939).

A partir da associação entre a construção teórica schumpeteriana com noção de paradigmas de científicos de Kuhn (1962), Dosi (1982, 1984) formula o conceito de paradigmas tecnológicos. Kuhn (1962) sugere que as pesquisas científicas, em estado normal, pouco focam de fato em produzir novidades. Pelo contrário, atuam dentro de um paradigma onde regras selecionam e validam um resultado teórico ou empírico. Kuhn usa a metáfora de um quebra-cabeça para se referir a um paradigma, afirmando que as peças (ou pesquisas) que não compõem a totalidade a ser montada, são (in)validadas pelas próprias regras do jogo. Analogamente, um paradigma tecnológico se refere a um padrão “normal” para a solução de problemas tecnológicos (DOSI, 1982, 1984). Um paradigma tecnológico incorpora um cognitivo coletivamente conhecido e compartilhado que define as práticas de “como fazer e aprimorar” um universo de tecnologias. Paradigmas se definem a partir de um corpo de conhecimento que predomina, molda e limita o direcionamento do progresso tecnológico, independentemente de quaisquer fatores de indução de mercado (ex. custos, eficiência, externalidades) (CIMOLI; DOSI, 1994). Esse corpo de conhecimento é utilizado em atividades de “problema-solução”, referidas nesta tese como atividades de design, onde tanto o problema quanto a solução devem estar contidos no paradigma para que exista esforços concretos destinados às atividades. A solução é a materialização de tecnologias constituídas por fragmentos de conhecimentos, sejam eles científico ou técnico, tácito ou explícito, teórico ou algum outro.

A elaboração do conceito de paradigmas tecno-econômicos sucede e abrange os trabalhos de Dosi (1982, 1984). Enquanto os paradigmas tecnológicos abordam aspectos intrínsecos à dinâmica da tecnologia, paradigmas tecno-econômicos adicionam a perspectiva econômica retomando a formulação original de Schumpeter acerca dos ciclos econômicos. A principal interseção teórica entre as abordagens está na forte causalidade entre a mudança tecnológica e o comportamento do investimento (FREEMAN; LOUÇÃ, 2001; FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 1983), sendo então possível compreender os ciclos econômicos a partir da dinâmica tecnológica e do investimento. As principais contribuições para teoria de paradigmas tecno-econômicos foram dadas pela economista Carlota Perez em sua influente formulação sobre ondas longas de crescimento econômico - variando entre 40 a 60 anos (KANGER; SCHOT, 2019). Primeiramente, Perez (1983) estabelece como as grandes mudanças tecnológicas, denominadas mudanças no “meta-paradigma”, afetam toda a economia por um tempo prolongado, sendo,

portanto uma mudança para além da estrutura de preços relativos na economia, guiando os agentes em direção às novas tecnologias e insumos conforme suposto por Schumpeter (1942). Ela postula que qualquer mudança tecnológica “só poderia ocorrer através de um processo interativo e acompanhante de mudança social, política e administrativa” (PEREZ, 2002, p. x; prefácio Freeman). Dentre as justificativas para esse efeito se encontram o crescimento de novas indústrias e o rejuvenescimento de outras já estabelecidas e a difusão de novos insumos de baixo custo, esses predeterminantes da própria dimensão do impacto das tecnologias.

Uma de suas importantes contribuições para a teoria de paradigmas tecno-econômicos é o livro “Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages” (PEREZ, 2002), onde Perez inter-relaciona os fenômenos da mudança tecnológica, denotados revolução tecnológica ou surto tecnológico, e o capital financeiro. Perez (2002) fornece uma análise histórico-econômica da influência da mudança técnica nas mudanças de paradigma. Ela propõe que a mudança tecnológica pode trazer possibilidades econômicas antes inconcebíveis. A análise se inicia na revolução industrial inglesa, marcada por cinco ondas tecno-econômicas cíclicas: Era Industrial (1771), Era do Vapor e Ferrovias (1829), Era do Aço e da Eletricidade (1875), Era do Automóvel e Produção em Massa (1908) e Era da Informação e das Telecomunicações (1971). Cada uma das revoluções marca um ciclo com seu respectivo paradigma técnico-econômico que define o modelo e o território para as práticas “normais” de inovação (PEREZ, 2002).

Cada ciclo começa com uma revolução tecnológica (erupção) e sua instalação socioeconômica, quando o crescente paradigma tecno-econômico traz uma nova normalidade. Indústrias antigas se adaptam enquanto os novos participantes surgem à medida que o entusiasmo tecnológico cresce. Com a euforia de novas possibilidades econômicas (a “economia do cassino”), os investimentos se tornam “apostas” relacionadas a ganhos financeiros, sem lastro na real capacidade de produção. A dissociação entre a produção e o capital financeiro resulta em sucessivas bolhas financeiras, no período de inflexão, até o colapso do sistema. As perdas financeiras maciças durante a inflexão abrem oportunidades para uma brusca mudança institucional historicamente comandadas por governos. Ações dos governos, muitas vezes restringindo o “livre mercado”, passam a ser vistas como alternativas para controlar falhas que instigaram a falha do sistema. Até então, nos últimos quatro ciclos já concluídos, as regulações econômicas redirecionaram os investimentos especulativos para a produção real levando ao período de desenvolvimento do ciclo. No período de desenvolvimento há uma coerência e realinhamento dos

capitais financeiro e produtivo, levando a economia a um período de crescimento sustentado capaz de promover o desenvolvimento econômico. Quando as possibilidades de retorno da tecnologia se saturam o ciclo atinge sua maturidade. Esse período é marcado por um aumento da desigualdade social e uma agitação política causado pela exaustão do paradigma anterior em diferentes esferas que não apenas econômicas. Concomitantemente inicia-se um novo surto tecnológico, que encontra circunstâncias favoráveis a investimentos de alto risco devido a crescente busca de atividades produtivas que proporcionem um retorno financeiro melhor que aqueles já pífios das atividades do antigo paradigma (Perez, 2002). A ilustra as etapas do ciclo relacionando o grau de difusão da revolução tecnológica em relação ao tempo.

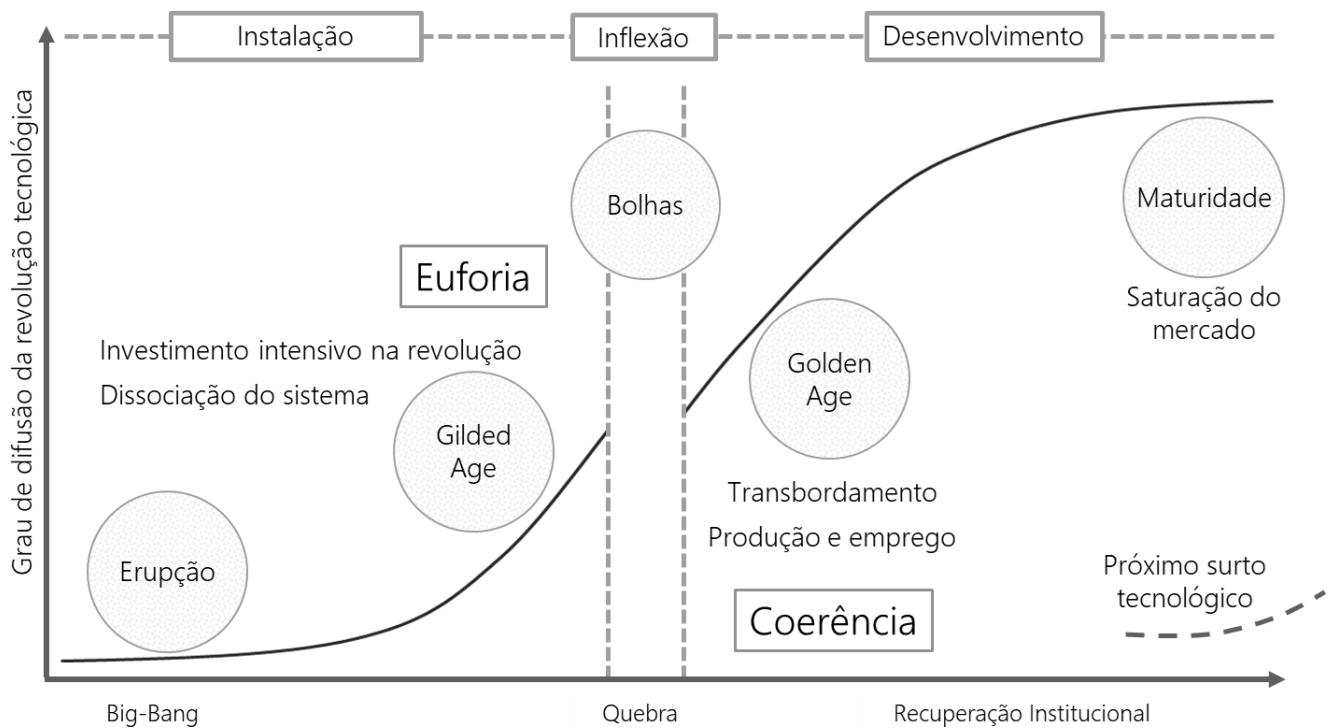


Figura 1 Fases das revoluções tecnológica. Retirado de Perez (2002)

A apresenta cinco fases das revoluções tecnológicas. O surto tecnológico se inicia com a erupção de uma tecnologia considerada o insumo da revolução. Três principais características garantem a esse insumo o seu potencial de erupção de um paradigma tecno-econômico: seu baixo e decrescente custo relativo, aparente disponibilidade ilimitada e um claro potencial para seu uso ou incorporação em outros produtos ou processos do sistema econômico (FREEMAN; PEREZ, 1988). A princípio, a tecnologia

surge como um meio de superação de algum gargalo relacionado a um conjunto de tecnologias antigas, dentro do senso comum do paradigma anterior. A tecnologia precisa demonstrar suas vantagens em um ou poucos setores e só depois extrapola para outras aplicações. Os novos fatores tecno-econômicos adquirem suas próprias dinâmicas gerando sucessivas inovações em um processo intenso e interativo que sobressalta os limites do crescimento em conjunto com o paradigma anterior (FREEMAN; PEREZ, 1988).

À medida que as novas tecnologias se instauram no sistema econômico, o ciclo do capitalismo se move em direção a etapa denominada “Gilded Age”⁵, quando o capital financeiro gradualmente prevalece em relação ao capital produtivo. Há um crescente e inevitável impulso para mudanças e uma intensa exploração das novas possibilidades desencadeadas pelas novas tecnologias, criando mercados e rejuvenescendo indústrias a partir de livre competição de fenômenos novos ainda não regulados. No momento da instalação do paradigma, as regulações de mercado são entendidas como um empecilho ao desenvolvimento. Ao mesmo tempo há uma inércia de rotinas organizacionais, das ideologias, dos padrões de investimentos. Mudanças trazem grandes custos sociais, perdas de empregos e qualificações, obsolescência de aparatos produtivos, abrindo espaços para polarizações políticas e ideológicas e aumento da desigualdade social.

O turbulento processo de difusão do paradigma desapareilha o sistema econômico e social, enfatizando a necessidade de mudanças no arcabouço regulatório, redefinição de comportamentos e instituições (ex. governamentais e financeiras) (MAZZUCATO, 2011). A evolução dessa etapa culmina em crises econômicas, também chamadas de bolhas financeiras, evidenciando a necessidade de uma reorientação econômica para o desenvolvimento. Essas crises (várias) não são um evento ou uma fase, mas sim uma mudança do contexto. Precisa-se balancear os interesses individuais e sociais para que o capitalismo volte a sua operação e apenas regulamentações no mercado financeiro não são suficientes para restabelecer essa harmonia. É necessário um conjunto de políticas capaz de guiar o comportamento do mercado, a partir da convergência de trajetórias de diversas indústrias, para atividades de inovação que gerem sinergias comuns.

⁵ Gilded Age se difere do Golden Age. O termo “gilded” se refere àquilo que reluz mas não é ouro, ao contrário do Golden que é relativo ao brilho dourado do próprio ouro (PEREZ, 2002).

No “Golden Age” ocorre o realinhamento entre o capital financeiro e o capital produtivo, sendo possível, então, obter um retorno financeiro a partir do investimento nas tecnologias do novo paradigma. É nessa fase em que as externalidades referentes a revolução tecnológica ganham direcionamento e conseguem ser o motor para o crescimento econômico. O ponto chave para o Golden Age é estabelecer uma direção para que as inovações possam prosperar (PEREZ, 2019), criando condições adequadas para o estabelecimento de uma sociedade coerente através de regulações e novos instrumentos institucionais. Assim, no Golden Age criam-se novos padrões de estilo de vida, compatíveis com o novo senso comum e com as novas possibilidades de bens e serviços disponíveis pela revolução tecnológica percebidas pelos agentes (governo, empresas, investidores) do sistema (PEREZ, 2016).

Cada revolução tecnológica apresenta suas distintas características históricas que resultam em oportunidades únicas para um surto de desenvolvimento econômico. A primeira revolução foi a Revolução Industrial na Inglaterra no fim do século 18, onde foram introduzidos a mecanização, que fundou as fábricas como unidades de produção utilizando energia da água para movimentação de moinhos interligados aos processos fabris. Recursos hídricos também foram usados para construção de uma rede de canais conectando os principais centros europeus aos portos, mudando radicalmente as formas e possibilidades de trabalhar e viver. A segunda revolução em 1829, teve seu início representada pelo teste do motor a vapor na ferrovia ligando Liverpool-Manchester. A expansão do horizonte a para criação de máquinas baseadas em carvão, motor a vapor e ferro possibilitou a criação de cidades indústrias, essas conectadas e alimentadas por uma central de energia utilizando carvão. A terceira revolução a partir de 1875, deu origem a era do aço e da engenharia pesada (elétrica, química, civil e naval), onde ferrovias transnacionais e navios a vapor transcontinentais se proliferaram, permitindo um intenso desenvolvimento do comércio internacional. Em 1908, inicia-se a era do automóvel e rodovias, do petróleo e plásticos, da eletricidade e da produção em massa. Houve mudanças drásticas nos padrões de consumo, conduzidos pelo “sonho americano” suburbano centrado na produção em massa. A quinta revolução, iniciada em 1971 com o lançamento do microprocessador da Intel é a era atual de tecnologias de informação e comunicação. A era é marcada pela velocidade das comunicações e uma intensificação da sociedade do conhecimento.

Para que uma revolução tecnológica se efetive em um paradigma tecnológico, é crucial que as tecnologias expandam suas lógicas e efeitos para os diversos setores econômicos. Por um lado, isso ocorre naturalmente, uma vez que os produtos não são desenvolvidos isoladamente, mas sim dentro de

um sistema tecnológico no qual fornecedores, consumidores, investidores e outros agentes participam e se reconfiguram de acordo com a orientação do novo paradigma. Isto significa que um conjunto de tecnologias já carrega consigo um potencial mobilizador da transformação necessária para a efetivação do paradigma. Porém somente essas externalidades, derivadas de um primeiro momento da revolução tecnológica, não garantem o potencial completo dos benefícios econômicos e sociais das novas tecnologias. Por exemplo, existe um efeito sinérgico entre a redução do custo de eletricidade devido a revolução petroquímica⁶ e a viabilização de equipamentos de linha branca. Entretanto, a mudança para padrão de consumo em massa necessário para essa sinergia, transpassa a concepção tecnológica, porque requereu criações institucionais, tais como a invenção do estado de bem-estar social e unidades sindicais que permitiram as condições necessárias para a existência de demanda em massa (ex. condições salariais para a compra de utensílios domésticos, jornada dupla feminina exigindo maior praticidade em tarefas domésticas).

Dessa forma, cada revolução viabiliza uma expressiva mudança nos padrões de vida através desse direcionamento, materializada em novas infraestruturas inter-relacionadas, equipamentos de produção e na variedade de bens e serviços disponíveis. Assim como da “Era do vapor, carvão, ferro e ferrovia” emergiu-se o estilo de vida Victoriano, ou da “Era do aço e engenharia pesada” emergiu-se a *Belle Époque* ou da “Era dos petroquímicos, carros e produção em massa” emergiu-se o “American Way of Life”, espera-se que da “Era da comunicação e informação” emerja o Crescimento Verde (PEREZ, 2016). A Figura 2 apresenta as revoluções tecnológicas de acordo com seus subseqüente “Golden Ages”.

⁶ A revolução petroquímica pertence a quarta revolução tecnológica (PEREZ, 2002)

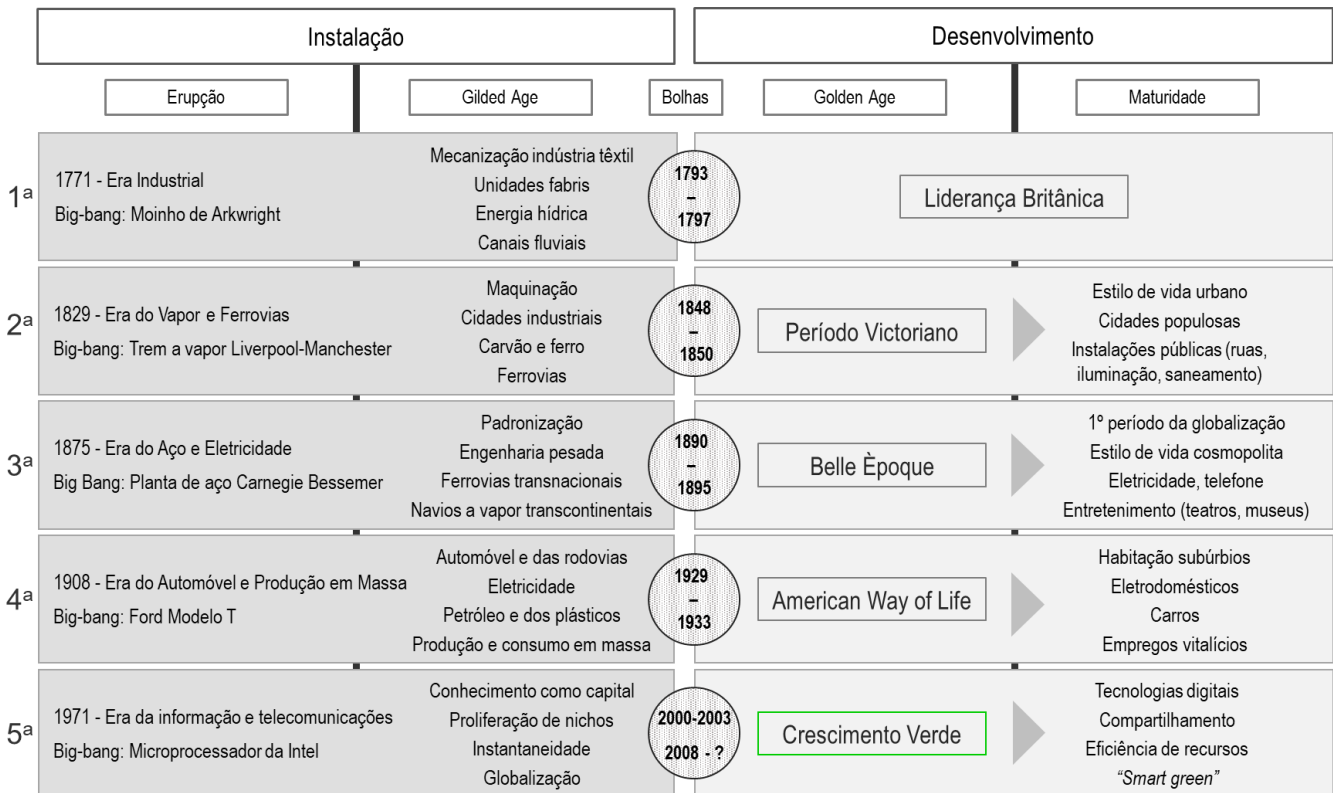


Figura 2 Revoluções tecnológicas, adaptado de Perez (2002, 2009, 2013, 2019)

Apesar da marcação cronológica, é importante observar que o “fim” de um paradigma tecno-econômico não está sincronizado com o início do subsequente. Alternativamente, da mesma forma como existe uma sobreposição de paradigmas tecno-econômicos, especialmente durante o período de instalação, um paradigma não interrompe completamente os anteriores.

As descrições de Perez sobre os paradigmas tecno-econômicos são uma das principais ferramentas analíticas do arcabouço teórico neoschumpetrian. A perspectiva histórica aliada a uma sistematização através da repetição dos ciclos esclarece o atrelamento entre a inovação (ou progresso técnico), o desenvolvimento econômico e toda sua natureza social e institucional.

2.1.1. Notas sobre o avanço tecnológico na periferia

O progresso tecnológico e seus benefícios econômicos, tais como surtos de desenvolvimento, não ocorrem de forma homogênea em todo o globo. De fato, Perez (2002) ressalta que os paradigmas tecno-econômicos apresentam uma propagação geográfica partindo dos países onde os surtos se iniciam em direção aos países centrais e em seguida para a periferia. Esta seção explora a dinâmica da difusão tecnológica na periferia abordando a condição do atraso econômico como causa e consequência para a distinção do fenômeno do progresso técnico quando comparado aos países centrais.

O ponto de partida é a própria conceituação de sistemas centro-periferia. O termo foi cunhado por Prebisch e amplamente aproveitado por vários outros pesquisadores latino-americanos, como Celso Furtado, que consolidaram a abordagem estruturalista no campo econômico. O principal diferencial da abordagem é perceber o atraso econômico enquanto um modo de ser específico e estruturado com raízes históricas, e não apenas uma condição temporária ou uma anomalia passível de abstração como tratado em teorias desenvolvimentistas (FURTADO, 1920; PREBISCH, 1962). Apesar de também entender o desenvolvimento econômico como um processo de acumulação de capital estritamente ligado ao progresso técnico, o estruturalismo não capta esse processo a partir de uma única economia capitalista (RODRÍGUEZ, 2009), mas sugere que os centros e periferias são “resultados da forma como o progresso técnico se propaga na economia mundial” (RODRÍGUEZ, 2009, p. 81).

Segundo essa vertente teórica, o atraso da estrutura produtiva é a característica primordial do subdesenvolvimento. A perpetuação da estrutura produtiva na periferia constrói seu caráter i) *especializado*⁷ em que parte substancial do recurso produtivo é destinado ao setor exportador primário pouco diversificado e ii) *heterogêneo*, com grandes diferenças de produtividade entre o setor exportador e o restante das atividades econômicas (RODRÍGUEZ, 2009). Já em países centrais, a estrutura produtiva é oposta – diversificada e homogênea.

Nos países que compõem a periferia, o atraso está associado à ideia de um “desenvolvimento para fora”, em que novas técnicas de produção são implementadas inicialmente em setores relacionados à exportação, esses comumente dedicados a atividades primárias devido ao caráter especializado dessas economias. A vertente teórica estruturalista, como outras do desenvolvimento econômico, assume que o

⁷ Por exemplo, especializado diz respeito a economias pouco diversificadas, como, no limite, uma monocultura voltada para exportação sem a existência de manufaturas (RODRÍGUEZ, 2009)

progresso técnico é mais intenso na indústria do que em atividades primárias, por isso o progresso técnico na periferia não provoca o mesmo crescimento da produtividade do trabalho como nos países centrais, onde o mesmo se concentra na indústria. O aumento da produtividade no campo expulsa a força de trabalho de atividades agrícolas, que por sua vez não é completamente absorvida nas escassas atividades industriais. Resulta disto, uma superabundância da força de trabalho subempregada que induz a baixa condição salarial. Isto, por sua vez, se traduz na deterioração dos termos de cambio que implicam na diferenciação do ganho médio real das economias periféricas, levando a um inevitável desequilíbrio externo da periferia (RODRÍGUEZ, 2009). Na periferia, esse ciclo vicioso da incorporação do progresso técnico inibe a acumulação conforme ocorre em países centrais. A Figura 3 apresenta um esquema explicativo do sistema centro-periferia.

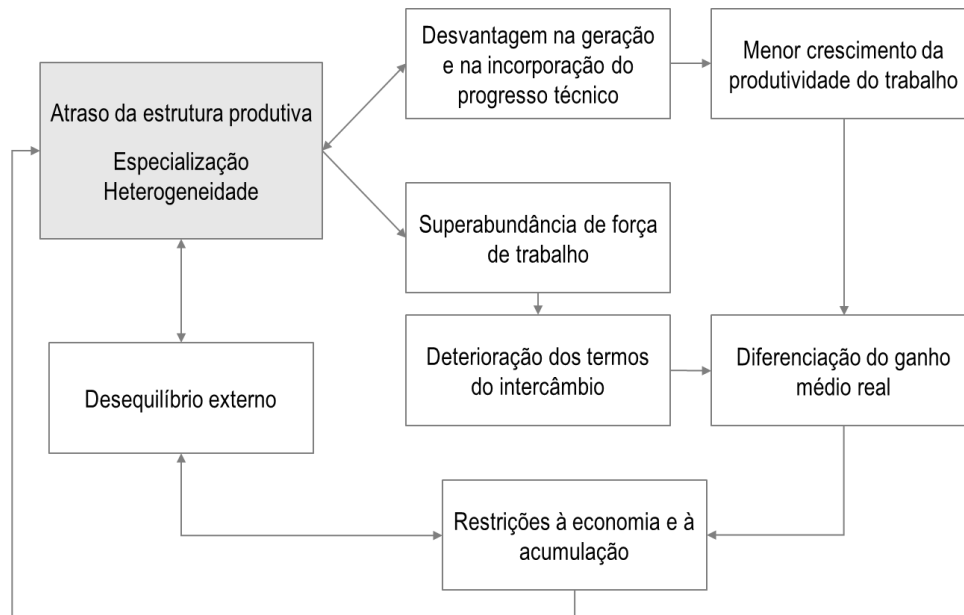


Figura 3 Sistemática da estrutura periférica. Fonte Rodriguez (2009, p. 85)

O atraso dos países periféricos não deve ser compreendido como uma fase do desenvolvimento econômico, mas sim como uma relação estrutural entre (i) o nível de acumulação; (ii) a sofisticação das técnicas produtivas; e (iii) a diversificação dos padrões de consumo de indivíduos e comunidades (ALBUQUERQUE, 2007). Acumular é, a princípio, transferir para o futuro o uso final de recursos já disponíveis para o consumo. Uma sociedade capitalista preserva suas características quando consegue renunciar o consumo de uma parte dos recursos que dispõe transformando o capital acumulado. Os ganhos de produtividade oriundos do progresso técnico são a principal forma da manutenção de um

excedente passível de acumulação, sendo que na ausência de novas tecnologias, a formação de capital necessariamente se satura (FURTADO, 1920). Percebe-se, dessa forma, que a incorporação do progresso técnico em atividades primárias menos produtivas e a deterioração dos termos de troca colocam em xeque a capacidade de países periféricos de acumular.

É possível dizer que existe uma inadequação da tecnologia no contexto periférico, onde os fatores de dotação não permitem a penetração tecnológica (ALBUQUERQUE, 2007). Furtado (1920) argumenta que a inadequação tecnológica se deve aos padrões de importação de tecnologias não alinhadas com as especificidades da demanda local. De fato, existe na periferia um padrão de consumo de uma elite minoritária que se assemelha aos existentes em países centrais. Porém, para a satisfação desse padrão de consumo, são estabelecidas proteções para a produção interna de bens de consumo e subsídios para a importação de bens de capital que criam, de forma sistemática, uma barreira para o desenvolvimento da indústria interna, reforçando, por sua vez, o excedente estrutural de emprego, ou superabundância da força de trabalho (FURTADO, 1920).

A capacidade de geração ou absorção de novas tecnologias (inovações) está diretamente associada com a intensidade com que o progresso tecnológico é internalizado localmente (FURTADO, 1961). Cada país, de acordo com sua trajetória, apresenta um sistema nacional de inovação (LUNDVALL, 1992; NELSON, 1993) único, construído a partir das interações entre atores-chave que objetivam a inovação a nível nacional. Esses atores-chave são representados por três entidades, governo, empresas e universidades, sendo exemplo dessas empresas públicas ou privadas, agências governamentais e universidades e institutos de pesquisa. As interações entre esses atores definem as “regras do jogo”, sendo essas reflexo de um conjunto de rotinas ou normas que regulam as relações na sociedade (EDQUIST; JOHNSON, 1997). Um sistema nacional de inovação pode ser categorizado de acordo com a sua maturidade, essa subdividida em três: i) sistemas maduros, que compreendem os países do centro e que garantem aos mesmos um elevado grau de participação no desenvolvimento de tecnologias; ii) sistemas imaturos, que incluem países periféricos da América Latina, países do Leste Europeu, África do Sul e países asiáticos e iii) sistemas rudimentares, que incluem países periféricos menos desenvolvidos (ALBUQUERQUE, 1999; RAPINI *et al.*, 2009). Sistemas imaturos podem ainda se subdividir em duas principais categorias, os sistemas de economias de rápido crescimento econômico, tais como China, Coreia do Sul e Taiwan, caracterizados por promover inovações de ciclos curtos e os sistemas de países emergentes, tais como Brasil, Argentina, Chile, México e África do Sul (LEE; LEE;

LEE, 2021). Quanto mais maduro é um sistema nacional de inovação, mais conhecidas e estabelecidas são as formas de se promover a inovação dentro do país, e por isso esses países conseguem, com maior intensidade, incorporar o progresso técnico em suas economias.

Existe uma relação estreita entre a trajetória de industrialização dos países do centro, a geração do progresso técnico e a capacidade de rápida acumulação (FURTADO, 1961; SZAPIRO; MATOS; CASSIOLATO, 2021). Entende-se também, na abordagem de sistemas nacionais de inovação, “que o desenvolvimento das capacidades científicas e tecnológicas internas é fundamental para o processo de desenvolvimento econômico em sua perspectiva mais ampla” (CHAVES *et al.*, 2020, p. 49). Nesse sentido há pontos de convergência teórica importantes entre a literatura estruturalista e a abordagem de sistemas nacionais de inovação, como sintetizado por Szapiro, Matos e Cassiolato (2021) no Quadro 2.

Quadro 2 Pontos de convergência entre estruturalismo e de sistemas de inovação

	Sistemas de Inovação	Estruturalismo Latino-americano
Progresso técnico (inovação) e desenvolvimento	Inovação como motor do capitalismo, transformando estruturas produtivas, tecnologias e instituições	Industrialização, progresso técnico e acumulação na raiz da dinâmica capitalista
Fatores não econômicos	Relações sistêmicas em rede de relações interinstitucionais. Trajetórias históricas cumulativas	Fatores sociais e institucionais influenciam trajetórias históricas de países
Caráter dual do desenvolvimento	Círculos virtuosos de desenvolvimento e círculos viciosos de subdesenvolvimento	Dualização do sistema capitalista: centro e periferia; desenvolvimento e subdesenvolvimento
Assimetrias de aprendizagem	“Brecha de aprendizagem” (learning devide)	Uso de tecnologias adequadas aos países avançados Limitações intelectuais para aproveitar avanços tecnológicos
Importância de políticas públicas	Internalizar os benefícios de novo paradigma tecno-econômico e minimizar seus custos	Ruptura com subdesenvolvimento; indução de mudança estrutural para endogeneização do progresso técnico

Fonte: Szapiro, Matos e Cassiolato (2021)

Países periféricos não dispõem da mesma estrutura para inovação que os países do centro. Mesmo quando presentes, como no caso de sistemas imaturos, as entidades governo, empresas e universidades não interagem com a mesma intensidade, levando a dificuldades no desenvolvimento e absorção de tecnologias de fronteira. Especialmente, mas não exclusivamente, no contexto latino-americano, a

estrutura especializada intensiva em atividades primárias dos países periféricos resulta em uma escassez sistemática de um setor industrial, capaz de acumular conhecimento e de gerar desenvolvimento tecnológico. Na periferia, a infraestrutura científica focaliza buscas ao invés de oferecer uma fonte direta de oportunidades tecnológicas, como ocorre no centro. Universidades e centros de pesquisas atuam como uma antena captando e traduzindo o conhecimento científico gerado no centro (ALBUQUERQUE; SILVA; PÓVOA, 2005). O processo de aprendizagem tecnológica ocorre de forma assimétrica ao redor do globo, uma vez que na periferia os sistemas nacionais de inovação local não garantem o acesso, a compreensão, a absorção, o domínio, o uso, e a difusão do conhecimento relacionado às tecnologias. Mesmo quando acessadas, as tecnologias frequentemente não se adequam aos países que não dispõem de um conjunto de conhecimentos necessários para o seu pleno uso (SZAPIRO; MATOS; CASSIOLATO, 2021).

Romper com a estrutura periférica, depende de um conjunto de ações intencionais que visem uma melhor inserção dos países periféricos em paradigmas tecno-econômicos em formação, já que há uma janela de oportunidade (LEE; MALERBA, 2017; PEREZ; SOETE, 1988) para o desenvolvimento de tecnologias estágios iniciais da aprendizagem tecnológica. Dentro da perspectiva teórica apresentada até então, a superação do subdesenvolvimento se dá através da redução da importância relativa das atividades primárias na economia, rompendo com a especialização produtiva voltada para a exportação de bens primários. Complementa-se a isto a necessidade de fortalecer os sistemas nacionais de inovação para aumentar a capacidade de gerar e absorver tecnologias como forma de romper com as estruturas viciosas da periferia.

Os arcabouços estruturalista e evolucionário se mostraram, portanto, relevantes frente à perspectiva das cadeias globais de valor (GEREFFI, 1994; GEREFFI; KAPLINSKY, 2001) que emergiam a partir dos anos 1990. A literatura acerca das cadeias globais de valor emergiu a partir do fenômeno da internacionalização de partes significativas das cadeias de valor de empresas multinacionais (denominadas também multinacionais), através da subcontratação (terceirização ou *outsourcing*) e dos processos de *offshoring*⁸. Em três décadas houve uma significativa mudança organizacional das multinacionais: nos anos 1970 ocorre a globalização financeira⁹, nos anos 1980 a globalização comercial,

⁸ Deslocamento da produção de uma região para outra com o objetivo de reduzir os custos de produção

⁹ Moedas passaram a circular globalmente (FLEURY; FLEURY, 2020)

fortemente impulsionada pela ascensão do neoliberalismo, e nos anos 1990 a globalização produtiva, quando as multinacionais passaram a se reestruturar. As multinacionais que antes apenas replicavam os padrões organizacionais das matrizes em suas subsidiárias, passaram a se estruturar a partir de uma gestão global, alinhando os objetivos das empresas de um mesmo grupo (FLEURY; FLEURY, 2020). O principal objetivo dessas empresas era otimizar suas estruturas de forma a reduzir os custos de transação, produzindo já a partir de demandas locais. Nota-se que esse fenômeno apresenta forte correlação com as tecnologias da informação e comunicação, uma vez que essas viabilizaram uma maior capacidade de gestão de subsidiárias a partir das matrizes (GEREFFI; HUMPHREY; STURGEON, 2005). Nesse sentido, a organização produtiva a partir de cadeias globais de valor é uma forma de produção significativa do paradigma tecno-econômico da 5ª Revolução Tecnológica, analogamente ao que foi, por exemplo, a produção em massa para a 4ª Revolução Tecnológica (KANGER; SCHOT, 2019).

Especialmente nos anos 1990, era muito forte o otimismo em relação a globalização produtiva. A literatura de cadeias globais de valor foi amplamente usada durante a expansão das políticas liberais iniciadas nos anos 1980, sugerindo que o pertencimento à cadeia de valor disponibilizaria um acervo de conhecimento oportunos a inovação local (GEREFFI; KAPLINSKY, 2001). Como se assumia um livre fluxo de conhecimento entre a empresa matriz e suas subsidiárias, as cadeias globais levariam a um intenso processo de aprendizagem por si só. Nesta direção, a proposta liberal se pautava na redução de tarifas de comércio e outras barreiras que dificultam a importação, e portanto o acesso às cadeias (SZAPIRO *et al.*, 2016). Aumentava a disputa pela instalação das multinacionais tanto em países desenvolvidos do centro, quanto nos periféricos. Reflexo disto foram políticas de reduções de impostos, desenvolvimento de distritos industriais e disponibilização de cadeias de fornecimento local às multinacionais (FLEURY; FLEURY, 2020).

Atividades econômicas e relações existentes dentro de uma cadeia global de valor são coordenadas através de uma estrutura de governança de natureza mercadológica ou não (GEREFFI; KAPLINSKY, 2001). As governanças podem ser estabelecidas através de relações i) de redes, onde as empresas são legalmente independentes e apresentam níveis de hierarquia independentes, ii) *quasi*-hierárquicas, onde as empresas são legalmente independentes, mas uma é subordinada a outra ou iii) hierárquicas, onde uma empresa pertence a outra (HUMPHREY; SCHMITZ, 2004). Quanto um país irá se beneficiar (como em *upgrading* de produtos locais) da inserção nessas cadeias está diretamente relacionado com a governança (GIULIANI; PIETROBELLI; RABELLOTTI, 2005), uma vez que é a

partir dessa coordenação que se estabelece o fluxo de conhecimento e a influência das subsidiárias no desenvolvimento de tecnologias.

As limitações ao crescimento econômico através da inserção em cadeias globais de valor começaram a dar seus primeiros sinais nos anos 2000, quando os países desenvolvidos questionavam a relação entre o aumento do desemprego local e o *offshoring*. De maneira muito mais proeminente, diversos estudos mostraram que a inserção dos países em desenvolvimento nessas cadeias, ao contrário do que havia sido proposto pelos defensores das cadeias globais de valor, não resultou em um aumento de competitividade de suas economias nem de suas inovações (LEE; MALERBA; PRIMI, 2020; SZAPIRO *et al.*, 2016). O que se constatou foi uma fragilização da capacidade de inovação local, onde ao invés dos países em desenvolvimento usufruírem do acesso a cadeia de valor, as multinacionais é que se beneficiaram do sistema de inovação local, (ex. estruturas como laboratórios) (ZUCOLOTO; CASSIOLATO, 2014). Assim, observa-se que existe uma forte divergência entre as agendas econômicas nas perspectivas evolucionárias e estruturalistas comparadas aos efeitos das cadeias globais de valor nos países em desenvolvimento.

Por fim, brevemente, vale a pena destacar o crescimento da financeirização como um novo regime de acumulação (VAN DER ZWAN, 2014). A financeirização se refere a transição do capitalismo industrial para o financeiro caracterizado pelo maior peso dado aos retornos financeiros nas economias (KRIPPNER, 2005). A financeirização das multinacionais afetou a forma como a indústria modela os seus investimentos, reduzindo a importância relativa das atividades produtivas *vis à vis* ao aumento das financeiras e, conseqüentemente, a dinâmica da inovação nessas empresas (ZUCOLOTO; CASSIOLATO, 2014). Dessa forma, se essa tendência já impacta os objetivos das multinacionais em relação a suas atividades em inovação, na periferia o fenômeno é refletido de forma ainda mais acentuada, limitando a geração local de conhecimento e inovação.

2.2. Trajetórias Tecnologias e Design Tecnológico

Enquanto as análises de paradigmas tecno-econômicos ampliaram o horizonte teórico econômico, pouco se aproveita dessas análises em termos práticos no desenvolvimento de tecnologias a nível de artefato. A alta abstração da teoria de paradigmas tecno-econômicos traz um grau de generalização que muitas vezes distorcem ou não são observados nas práticas de desenvolvimento de produto. Ademais, a teoria enfatiza a resultante dos aspectos técnicos, sociais, econômicos, frequentemente descartando outras práticas marginais que não contribuíram para a argumentação em torno de uma narrativa principal. Dentro desse arcabouço, pouca atenção é dada, por exemplo, a tecnologias que não se tornaram dominantes, quase assumindo sua extinção (KANGER; SCHOT, 2019). Há também poucos trabalhos que acompanham trajetórias tecnológicas para além de um único paradigma, condicionando a compreensão do processo de design tecnológico aos elementos contidos em uma temporalidade regida por um *modus operandi* vigente. As limitações explicitadas não diminuem a robustez teórica dos paradigmas tecno-econômicos, mas apontam direções a serem expandidas para que outras análises possam explorar o arcabouço.

Conforme colocado na seção 2.1 acima, a teoria de paradigmas tecno-econômicos conecta os ciclos de negócios (ondas de Kondratiev) de 40-60 anos às revoluções tecnológicas, que compreendem um conjunto de tecnologias pervasivas inter-relacionadas capazes de redefinir as estruturas econômicas, institucionais e sociais (FREEMAN; PEREZ, 1988). Dentro de um paradigma, um corpo de conhecimento acumulado define práticas de “como fazer e melhorar” tecnologias, definindo, portanto, a direção da mudança técnica (CIMOLI; DOSI, 1994). Metaforicamente, a base de conhecimento é como um motivo musical, um fragmento recorrente com inúmeras variações em uma composição, ou mesmo como um conjunto de tintas escolhidas por um pintor ao compor um quadro. Essa base de conhecimento opera como um tema para variações imagináveis que sublinham mudanças incrementais, construindo os parâmetros para a seleção e o design das tecnologias. Sempre que a base de conhecimento modifica, também se alteram os mecanismos que moldam o desenvolvimento de tecnologia.

As tecnologias compõem um paradigma como partes materializadas de conhecimento (DOSI, 1982), desenvolvidas sob especificações durante as atividades de design. Tecnologias são artefatos - objetos intencionalmente produzidos e cujas estruturas físicas são intrínsecas às suas funcionalidades e vice-versa (VACCARI, 2013). Conseqüentemente, “um avião (talvez acidentado ou abandonado) no

meio de uma floresta tropical não funcionará como tecnologia” (DUSEK, 1985), pois apesar de suas características físicas, “se tirarmos a intencionalidade, resta apenas uma coisa ontologicamente indistinguível de um objeto comum “(VACCARI, 2013). Da mesma forma, nem todos os artefatos são tecnologia (por exemplo, peças de arte). Tecnologias são artefatos complexos constituídos por componentes mantidos unidos por condições de consistência técnica (DOSI; GRAZZI, 2009). O design de um artefato tecnológico inclui uma compreensão mínima de tais componentes e, portanto, incorpora um extenso volume de conhecimento, local, cumulativo e inerente a um paradigma (CIMOLI; DOSI, 1994).

As atividades de design são tarefas recursivas e intencionais de problema-solução, orientadas pelo conhecimento e percepção dos agentes envolvidos no desenvolvimento de um artefato. A tarefa dos agentes é buscar uma adequação entre o problema e o universo de tecnologias possíveis para solucioná-lo. O resultado dessa busca é um artefato tecnológico, ou seja, um objeto que cumpre o propósito de uma atividade de design (VISSER, 2009). Um artefato é, portanto, uma das possíveis soluções endereçadas aos problemas percebidos dentro de um contexto (ALEXANDER, 1964; CLARK, 1985). O contexto define o ambiente da tarefa expondo aspectos externos e comuns a todas as atividades de propósito semelhante, como o próprio problema (GOEL; PIROLI, 1992). Problemas, porém, não são entidades externas e estáticas, mas processos racionalizados que dependem das suposições e etapas lógicas contidas no raciocínio dos agentes. Por isso, o mesmo contexto não resulta, necessariamente, em um único problema claro, especialmente no caso de problemas incompletos.

Problemas incompletos, mal-definidos ou não-estruturados, são aqueles que carecem de critérios de avaliação para os definirem suficientemente¹⁰. Nesse sentido, problemas incompletos só podem ser descritos adequadamente quando uma solução é antecipada (RITTEL; WEBBER, 1973b). Os problemas mal-definidos são percebidos através de sintomas, sendo que um mesmo sintoma pode se desdobrar em uma ampla variedade de problemas. Por exemplo, ao tentar entender os determinantes da baixa renda (um sintoma), um problema plausível poderia ser uma deficiência de habilidades cognitivas e ocupacionais na força de trabalho. Nesse caso, devido à forma como o problema foi descrito, o espaço

¹⁰ Ao contrário, problemas bem-estruturados tais como resolver um jogo de xadrez e definir um composto químico, são definidos dentro de um conjunto de princípios limitados que restringem o universo de soluções possíveis. Enquanto esses problemas podem ser sistematizados em propostas prescritivas, problemas incompletos diferem consideravelmente em sua natureza (RITTEL; WEBBER, 1973b)

de solução necessariamente abrange o sistema educacional (RITTEL; WEBBER, 1973b), portanto, a solução é intrínseca à definição do problema. Outros problemas poderiam ser derivados a partir desse mesmo sintoma, tal como um problema de distribuição de carga tributária. Novamente, ao descrever o problema, o universo de soluções já estaria posto. Além disso, uma vez que não há respostas verdadeiras ou falsas para esses problemas, não existe também “regras de interrupção” para encerrar as tarefas de problema-solução, cabendo o julgamento aos agentes de design, que provavelmente variam amplamente, encerrar essas atividades.

O design de artefatos tecnológicos, tais como inovações tecnológicas, está diretamente relacionado a problemas incompletos, apesar de envolver uma tarefa estruturada usando métodos científicos e ou de engenharia. Atividades de design bem definidas podem até prevalecer enquanto o artefato tecnológico não interage com o mundo real, como no caso de modelos teóricos, simulações e experimentos químicos ou físicos controlados. No entanto, o design um artefato tecnológico idealizado, de acordo com parâmetros desejáveis, é uma atividade consistentemente diferente daquela de projetar um artefato tecnológico que responda a demandas sociais, especialmente no caso de tecnologias não comprovadas ou de necessidades latentes, quando as estruturas se tornam muito menos evidentes.

Problemas decorrentes do mesmo conjunto de soluções podem ser hierarquizados em diferentes níveis. Por exemplo, o sintoma do aquecimento global pode ser problematizado como excesso de emissões antrópicas de CO₂ nos últimos séculos. Nesse caso, o conjunto de soluções para enfrentar esse problema está necessariamente relacionado à redução das taxas de CO₂, que é uma proposta de solução bastante ampla. Assim como outras proposições, a redução de CO₂ no setor de energia é um subconjunto de soluções dentro de outro mais amplo. Da mesma forma, novamente, a geração de energia renovável é outro subconjunto de solução em um nível ainda mais baixo. Problemas percebidos em níveis baixos são normalmente mais estruturados, mas menos propensos a fornecer uma boa solução geral (RITTEL; WEBBER, 1973b). Assim, existe uma relação importante entre a solução dada a um baixo nível de problematização e sua integração em um conjunto superior de problemas, visto que a solução geral deve ser boa o suficiente. Similarmente, artefatos (ou soluções) podem ser agrupados de acordo com seu princípio operacional - um propósito abstrato usado em muitos designs (GIBBONS, 2009) - onde quanto mais amplo o princípio, mais casos se enquadram nele. Por exemplo, o princípio operacional de um veículo voador inclui mais tecnologias do que um princípio de um veículo voador de rotor horizontal.

É possível observar padrões na evolução de novos artefatos tecnológicos (ABERNATHY; UTTERBACK, 1978; CLARK, 1985). Inicialmente, a fase referida como descoordenada (UTTERBACK; ABERNATHY, 1975), fluida (CLARK, 1985), tentativa e erro (DOSI, 1982) é caracterizada por uma grande diversidade e especulações sobre possíveis características do artefato. Durante esta fase, há um intenso acúmulo de conhecimento sobre os componentes e sua integração devido a um constante aprendizado proveniente de experimentos com tecnologias diferentes e desconhecidas. A incerteza é alta nessa fase. Para os que desenvolvem, existe uma grande variedade de combinações não-triviais de alternativas tecnológicas possíveis; e para os usuários, não há clareza sobre a funcionalidade do artefato tecnológico, dificultando suas assertividades sobre o propósito e a natureza do serviço oferecido pela tecnologia. A produção dessas tecnologias é feita manualmente, já que há pouco investimento na expansão da mecanização de tecnologias ainda não padronizada ou comprovadas.

Durante essa fase, as soluções conseguem ser apenas heurísticas (soluções boas o suficiente), uma vez que soluções ótimas requerem parâmetros inexistentes até então. Comumente, objetos simples criam diversas soluções iniciais que são cuidadosamente selecionadas e descartadas já que não há respostas certas ou erradas (GOEL; PIROLI, 1992). As soluções iniciais derivam de problemas decompostos de forma pouco sistemática ou até mesmo arbitrária, priorizando o que se conhece de atividades ou experiências anteriores e transpondo as informações disponíveis para o contexto relativo a funcionalidade do artefato. Do mesmo modo, como os problemas são decompostos de diferentes maneiras, seus critérios de avaliação também resultam em soluções dependentes da combinação do conhecimento do agente e das informações disponíveis. Feedbacks genuínos só são dados depois que o artefato interage com um ambiente externo, quando cada solução revela um conjunto de informações fundamentais para a continuidade das atividades de design subsequentes num processo de tentativa e erro. Assim esses processos iterativos de feedback apresentam consequências irreversíveis para a atividade de design, moldando a percepção interna e externa do artefato.

Conforme as evidências das preferências reveladas e se acumulam, a diversidade de alternativas diminui e o desenvolvimento dos artefatos converge resultando em um design dominante. Um design dominante se refere ao surgimento de uma melhor forma de construir e arquitetar um artefato. Ele concentra esforços difusos de se produzir diferentes artefatos conceituais em um único (ou poucos) design possível e preferível, abrindo caminhos para explorar economias de escala na produção e facilitando aos usuários a identificação da proposta de tecnologia (ABERNATHY; UTTERBACK,

1978). Assim, os mercados passam a ser definidos e as características dos produtos mais bem compreendidas e frequentemente padronizadas.

O surgimento de um design dominante também implica que algumas escolhas de design não são mais revisitadas em atividades de design posteriores. Dessa forma, uma vez estabelecida a dominância nos componentes centrais, empresas cessam investimentos em aprendizado sobre alternativas ao design escolhido (HENDERSON; CLARK, 1990). O design dos componentes periféricos é mais flexível, especialmente quando se trata de explorar diferentes nichos para se beneficiar de economias de escopo. Quando a incerteza diminui, empresas otimizam os fatores de produção, investindo na mecanização do processo, associando-se com fornecedores e reduzindo custos de transação (ROSENBERG, 1969). Mudanças se tornam menos prováveis e cada vez mais onerosas à medida que empresas investem em uma base tecnológica para uma linha de produção eficiente e intensiva em equipamentos que as coloca à frente na competição de preços.

Um design dominante extrapola a atividade de design, pois implica numa padronização de soluções heurísticas quase como se existisse uma maneira correta ou única de se conceituar um artefato. O conceito de design dominante transmite a ideia de que um artefato evolui continuamente, por meio de uma sequência de escolhas que segue os critérios de seleção com base nas necessidades dos usuários e nas possibilidades tecnológicas. O aprimoramento de soluções é uma resposta aos desequilíbrios provocados e moldados pelo direcionamento da mudança técnica (ROSENBERG, 1969). Desequilíbrios são descompassos tecnológicos. Por exemplo, no caso de carros elétricos, um “desequilíbrio” na infraestrutura de suprimento de eletricidade nos estacionamentos das cidades. Esses desequilíbrios, de certa forma, expõem novos problemas que orientam engenheiros, designers ou outros agentes no desenvolvimento de outros artefatos tecnológicos. Indubitavelmente, os desequilíbrios não são necessariamente percebidos ou solucionados previamente, levando a uma vasta variação de atividades de design.

As escolhas sequenciais¹¹ de artefatos preferíveis são tomadas com base nas oportunidades técnicas percebidas, condicionadas pelo conhecimento acumulado de processos de decisão anteriores. A escolha refina as possibilidades testadas, uma vez que essas não são igualmente atraentes (CLARK, 1985), sem implicar que as preferências e possibilidades técnicas sejam estáticas e irrevogáveis. Em vez

¹¹ O termo “sequenciais” não se refere a uma progressão linear, mas à ideia de dependência ou desdobramento de eventos.

disso, as escolhas sequenciais entram em um espiral de busca por melhorias marginais (“trajetória natural”) restritas e direcionadas por padrões de decisão relacionados a um corpo de conhecimento inerente a um paradigma tecnológico (NELSON; WINTER, 1982). Portanto, a evidência acumulada, que se relaciona a conhecimentos, rotinas, *modus operandi* e outros, ao mesmo tempo em que descarta alternativas menos atraentes, cria as bases para os processos de escolha subsequentes.

O objetivo fundamental de uma atividade de design é a difusão de um artefato, que solucione um problema contextual. A difusão tecnológica é o processo no qual indivíduos e empresas adotam (ou substituem) a nova tecnologia (HALL, 2005). Características mais estáveis e um artefato bem-definido facilitam a comunicação do objetivo de uma tecnologia, indicando uma relação positiva entre difusão e design dominante. Artefatos tecnológicos, mesmo que bem-definidos, difundem de maneira diferente sugerindo que aspectos externos, de alguma forma independentes da atividade de design, influenciam o processo de difusão. Por um lado, a difusão é parcialmente explicada pela percepção dos adotantes da vantagem do uso de um artefato em relação a outro. Por outro lado, a difusão pode também derivar da facilidade de um artefato em se integrar em uma estrutura sociotécnica, uma vez que a compatibilidade com as tecnoestruturas existentes reduz a incerteza relacionada à implementação da tecnologia, facilitando o processo de difusão. A compatibilidade estabelece elos de importantes para a assimilação da tecnologia. Ademais, quanto menos compatível a tecnologia, mais componentes devem ser incluídos nas atividades de design, aumentando a complexidade do artefato e dificultando sua difusão. A adoção de uma tecnologia apresenta custos que excedem os preços de aquisição, tais como investimentos complementares e aprendizado para o uso da tecnologia (HALL, 2005), esses influenciados pela a compatibilidade com o restante da estrutura existente. Esses custos também estão relacionados com características do mercado que podem impor barreiras aos processos de difusão tecnológica, tais como as relações das empresas existentes e novas, estrutura e tamanho do mercado e questões. Por fim, a adoção da tecnologia em si produz efeitos positivos para a sua própria difusão, uma vez que o uso de uma tecnologia comunica de forma efetiva sua funcionalidade a outros possíveis adotantes e também aumenta os feedbacks necessários para melhorias. Portanto, a observabilidade e o grau em que um artefato pode ser experimentado também influenciam o processo de difusão.

É importante ressaltar que assim que as condições para um design dominante são antecipadas, elas se tornam insumos para as atividades de design. Isso é especialmente relevante quando as tecnologias estão substituindo soluções anteriores com princípios operacionais muito semelhantes. Nesses casos, por

haver uma tecnologia já em operação, algumas condições, como preço, volume e compatibilidade de infraestrutura passam a restringir as atividades. É improvável que as tecnologias alternativas que visem a substituição de princípios operacionais semelhantes se prosperem sem uma alternativa ótima de Pareto (todos ganham). Quando o benefício é claro para quem produz e quem adota, as empresas competem querendo explorar as vantagens do pioneirismo. Caso contrário, as empresas podem desenvolver uma estratégia de "sentar e esperar" devido, por exemplo, aos altos custos de troca.

Por fim é importante frisar os principais pontos de interseção entre as teorias sobre design de tecnologias e paradigmas tecno-econômicos. Um primeiro aspecto é a importância do contexto para ambas as teorias. Para o design, o contexto delimita *o locus* de problematização das atividades, sendo a partir dele que se emergem os problemas bem como as restrições necessárias para o processo de seleção e descarte de possibilidades tecnológicas. Já para os paradigmas tecno-econômicos, o contexto é de onde se observa a atuação dos mecanismos econômicos inerentes aos ciclos do capitalismo. Por se tratar de um modelo de endogeneização do progresso técnico, existe, de alguma forma, uma independência dos mecanismos do modelo em relação ao contexto. Ao mesmo tempo, é da observância e recorrência da conjuntura histórica e de seus diversos contextos que esses mecanismos são formulados e constituídos. Outro ponto de interseção se refere ao processo de formação de um design dominante. Enquanto a teoria de designs foca no processo de evolução do ajuste entre problema e solução manifestado no artefato propriamente dito, a teoria de paradigmas tecno-econômicos aborda o desenvolvimento de um aparato social, produtivo e institucional em torno do desenvolvimento tecnológico e suas consequências para o paradigma em questão. Há também uma forte ressonância entre a lógica dos ciclos de desenvolvimento de artefatos tecnológicos e dos referentes às revoluções tecnológicas. O processo de convergência, seja esse de design de artefatos, ou de um propósito capaz de promover o direcionamento econômico, é fundamental para o dinamismo de ambos os modelos teóricos.

2.3. Agenda verde

A agenda verde se refere a um plano político-econômico visando o desenvolvimento e implementação de tecnologias, técnicas e regulações que incentive mudanças nas práticas sociais e econômicas em direção a um sistema produtivo menos ambientalmente agressivo. As consequências ambientais derivadas da geração de energia são um importante componente dessa diversa agenda, especialmente no tocante às emissões de gases do efeito estufa produzidos pelos sistemas de energia. As crescentes preocupações relativas ao aquecimento global trazem um caráter urgente a agenda verde, estando essa, por sua vez, cada vez mais incorporada às agendas políticas nacionais e aos acordos transnacionais. A presente seção tem como objetivo apresentar a perspectiva do “Crescimento Verde” para elaboração de alternativas de políticas públicas voltadas para aspectos da transição energética ambicionada pela agenda verde.

2.3.1. O Crescimento Verde

O “Crescimento Verde” é o termo utilizado para designar um conjunto de ações necessárias para conciliar o crescimento econômico sem prejuízos ambientais através de uma profunda mudança social, institucional e nas atividades produtiva. Apesar das discussões sobre o esgotamento dos recursos naturais serem antigas no pensamento econômico, o termo atual apresenta características que o difere das colocações passadas. A conceituação do termo ganha um maior potencial analítico quando articula os trabalhos referentes aos impactos antropogênicos no meio ambiente com o arcabouço teórico neo-schumpeteriano por meio dos paradigmas tecno-econômicos elaborado por Carlota Perez (2013). O desafio dos pesquisadores dessa comunidade é construir essa articulação, uma vez que esses aspectos estão dissociados em termos teóricos. Após a crise financeira de 2008 (e mais recentemente com a crise sanitária de 2020), essa construção passou a ser mais incisiva e tecnologias verdes assumiram uma aposta dupla: mitigar os desafios impostos pelo aquecimento global e retomar as atividades produtivas na economia (IEA, 2020d; MUNDACA; LUTH RICHTER, 2015).

Antes de iniciar a explanação teórica sobre o “Crescimento Verde”, é preciso esclarecer os dois termos separadamente uma vez que a terminologia pode ser usada para remeter a outros aspectos que não os tratados na presente tese. Primeiramente, especialmente numa perspectiva neo-schumpeteriana, a palavra “crescimento” contida no termo “Crescimento Verde” está diretamente relacionada com uma gradual transformação da economia por completa (MAZZUCATO; PEREZ, 2015), portanto mais

relacionada com o desenvolvimento do que apenas com o crescimento econômico. Em segundo lugar, é preciso estabelecer quais são os novos elementos conceituais acerca do Crescimento Verde que os diferem dos elaborados em outros momentos da teoria econômica e, para isso, é necessário definir o que se denota como “verde”. “Verde” está relacionado com aspectos ambientais ou ecológicos, mas não necessariamente com questões sociais, como por exemplo implica o termo “sustentável”. O termo se aproxima da definição de capital natural, no sentido que inclui nas análises econômicas um estoque, renovável ou não, de bens ou serviços naturais¹² valiosos para o futuro (COSTANZA; DALY, 1992).

O Crescimento Verde não remete a uma forma inédita de se pensar práticas econômicas para políticas públicas. Pelo contrário, a inclusão de aspectos ecológicos carrega uma conotação quase utópica, ou em desuso, em algum grau uma percepção minimamente ingênua, para não dizer equivocada ou apocalíptica, que subestima o real potencial criativo humano, capaz de solucionar (quase) todos os problemas de escassez enfrentados ao longo de mais de 200 anos de capitalismo (ROSENBERG, 1973). No que tange a “ingenuidade” da corrente tradicional anterior ao Crescimento Verde, muito se relaciona com a baixa precisão de Malthus e os neo-Malthusianos ao estipularem, no século 18 e 19, um fim ou forte escassez de produtos agrícolas, especialmente direcionados à alimentação, devido à diferença entre os crescimentos populacional e de produtividade do campo (MALTHUS, 1798). Apesar de vários fatores terem afortunadamente impossibilitado sua previsão, Malthus elabora a relação entre o desenvolvimento, enriquecimento e melhorias nas condições de vida (destacadamente devido a avanços da medicina) e o crescente uso dos recursos naturais disponíveis. Similarmente, outros economistas clássicos como Ricardo (1817) também apontaram essa relação, sugerindo que restrições à disponibilidade de recursos naturais poderia ser um limitante ao crescimento econômico.

A especialização industrial no século XIX desviou a atenção dos economistas para a importância dos capitais de produção, distanciando-os do debate de escassez iniciado pela economia clássica (FOUQUET, 2019). A disponibilidade de recursos naturais em uma economia nunca foi, todavia, esquecida, a exemplo dos fatores de dotação das funções de produção econômica¹³. Entretanto, as

¹² Termo se opõe ao “human-made capital”, que inclui por exemplo conhecimento e manufaturas (COSTANZA; DALY, 1992)

¹³ Na teoria econômica três fatores influenciam as produções em um nível macroeconômico – trabalho (recursos humanos), terra (recursos naturais) e capital (maquinários, ferramentas e ativos financeiros). Esses fatores se combinam resultando em um dado nível agregado de produção, denominado função de produção. Modelos econômicos frequentemente caracterizam economias ou por sua abundância de terras (ricas em recursos naturais) ou de trabalho (normalmente economias

análises, tanto clássica quanto neoclássica, consideram os recursos naturais como um fator de dotação binário (presente ou ausente) em uma localidade geográfica, desconsiderando sua possibilidade de esgotamento e implicações de seus usos em longo prazo. O Crescimento Verde retoma parte da discussão clássica de escassez de recursos, mas não se limita a esta análise, buscando redefinir a noção desses recursos ao incorporar a distinção entre recursos naturais renováveis e não renováveis e percebê-los enquanto um fluxo de estoques com valor para manutenção da atividade econômica futura.

Existiu no período pós-guerra, entre 1950 e 1980, uma série de elementos que permitiram a retomada das discussões de escassez e ao mesmo tempo proporcionaram um acúmulo de conhecimento em relação a interferência antropogênica no meio ambiente. A começar pelo crescimento da ideia da interferência negativa do homem na natureza, principalmente após ataques nucleares e o vasto uso de tecnologias em aplicações militares, contrastando com os anos 1930, quando havia um otimismo sobre o uso de tecnologias para solucionar problemas ambientais como secas, desertos, ciclos de chuvas, enchente e outros, inclusive acreditando-se que avanços tecnológicos permitiriam tornar desertos em grandes florestas. Enquanto na década de 1930 a fumaça produzida pelas fábricas alegrava a população, uma vez que o céu sujo significava empregos, nos anos 1950, médicos alertavam para os problemas da poluição do ar. As preocupações antes com a pobreza foram substituídas por preocupações com as condições crônicas de saúde (WEART, 2008). A tecnologia, antes tida como um aliado, passa ter uma conotação de repúdio entre ambientalistas anti-desenvolvimentistas, críticos em relação à condução das práticas da época, que se somavam a outros sentimentos relativos à guerra fria.

Outro elemento que possibilitou a retomada das discussões de escassez foi o alto investimento disponível, no caso estadunidense, em áreas que permitissem expansão do conhecimento para aplicações militares. A compreensão das complicações climáticas se consolidou em um interesse para as atividades militares, a exemplo de sua importância para tomada de várias decisões estratégicas, como o próprio ataque na Normandia das tropas britânicas aos Nazistas no Dia-D¹⁴. Ademais, nesse mesmo sentido, acreditava-se que o homem pudesse deter, pelo menos localmente, o controle de condições climáticas¹⁵

industrializadas), mostrando que apesar de coadjuvante, esses modelos percebem a existência da relação dos recursos naturais na função de produção.

¹⁴ O sucesso do ataque foi parcialmente atribuído ao meteorologista James Stagg, que desaconselhou a troca da data da ofensiva devido a uma forte previsão de chuva no canal britânico.

¹⁵ Uma das direções de pesquisa popularizada nos anos 1950 eram os esquemas para provocar a chuva "semeando" nuvens com fumaça de iodeto de prata, por exemplo (WEART, 2008).

para favorecer atividades como agricultura, e mais do interesse do contexto da guerra fria, ataques militares. O interesse e a disponibilidade de recurso levaram a expansão de áreas como a geologia e meteorologia, que abrangiam, mesmo que de forma marginal, estudos sobre o efeito da emissão de CO₂ na atmosfera (WEART, 2008).

Por fim, destaca-se ainda que os crescentes e visíveis indícios das consequências negativas geradas pelo paradigma de produção em massa também contribuíram para a reformulação do Crescimento Verde em seus moldes atuais. O uso inconsequente de pesticidas e outros químicos na agricultura, contaminação de rios e até mesmo o acidente nuclear em Chernobyl foram, dentre muitos outros, determinantes para uma incontestável necessidade de mudança. Ao mesmo tempo que preocupações como a poluição emergia, proliferavam-se o número de automóveis e resíduos de descartáveis nas ruas, impulsionados pelo padrão de vida dominante, o “American Way of Life”. Esses elementos, combinados, trouxeram uma efervescência crítica aos padrões estabelecidos no Golden Age da Era do Automóvel e Produção em Massa.

Diversas agencias intragovernamentais foram instituídas buscando aprofundar o conhecimento sobre impactos ambientais, tais como, mais notadamente, o World Meteorological Organization (WMO), criado em 1951, o United Nations Environment Programme (UNEP), criado em 1972, a International Energy Agency (IEA), fundada em 1974, e o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), criado em 1988. Essas agências foram e são fundamentais para a geração de informações que guiam ações de governos em relação as questões ambientais que alicerçam a agenda verde, tal como, o relatório “Nosso futuro comum” (1987), onde a Comissão de Brundtland (UNEP) apela para a conscientização do impacto do crescimento econômico na degradação de solos, água, atmosfera e florestas. Em relação às discussões no campo econômico, o debate retorna as ideias clássicas a partir dos anos de 1970, incorporando os impactos antropogênicos ambientais no crescimento econômico, como o livro “Limits to Growth” (1972). Mesmo a vertente mais ortodoxa, também parecia compartilhar a mesma percepção, como Tybout (1972), que propõe uma alternativa para precificar a poluição e outras externalidades negativas, conforme teorizadas por Coase (1960).

É importante ressaltar que embora o Crescimento Verde esteja diretamente relacionado com as discussões relativas ao uso de recursos naturais, em termos práticos, está mais limitado aos desafios impostos pelo aquecimento global. A escassez de recursos, geração de resíduos e outros aspectos

ambientais legitimaram as preocupações tocantes à agenda verde em um primeiro momento, mas são os desafios do aquecimento global que ocupam a principal parcela dessa agenda a partir dos anos 1990.

Diferentemente da discussão de escassez, as questões relativas ao aquecimento global são mais recentes nas pautas ambientalistas, mesmo que no início do século XX, Joseph Fourier já questionasse os determinantes da temperatura média do planeta. Fourier observou que se a radiação solar não retornasse ao espaço através da radiação emitida pela superfície da Terra, o planeta se aqueceria indefinidamente. Porém, ao calcular a radiação emitida de volta pela superfície terrestre, Fourier se deparou com uma temperatura muito abaixo daquela do planeta, concluindo que a atmosfera terrestre tem um papel fundamental na manutenção da temperatura. De fato, o controle a temperatura terrestre pela atmosfera já havia sido investigado por John Tyndall, no século XIX quando o consenso científico sugeria que todos os gases atmosféricos eram transparentes à radiação infravermelha. Tyndall, em 1859 realiza uma série de experimentos para confirmar tal postulação, encontrando que, de fato, os principais gases que constituem a atmosfera (tais como oxigênio e nitrogênio) eram transparente, porém o CO₂ era opaco aos raios de calor (WEART, 2008).

A primeira grande constatação de interferência humana na atmosfera foi feita pelo engenheiro Stewart Callendar em 1938, a partir de seu esforço em compilar o aumento da temperatura e sugerir que esse aumento havia sido causado pelas atividades industriais ao emitirem toneladas de CO₂. Porém, a previsão de um aumento de 1°C até o fim do século XX e o baixo nível de instrumentação que permitisse a confirmação e uma análise mais robusta levaram a um ceticismo e desinteresse de seus resultados. Posteriormente, já nos anos 1950, novas medições corroboravam com os achados de Callendar. Novas tecnologias de medição e novas ferramentas como a datação pelo carbono 14, permitiram o avanço das pesquisas, essas de interesse ligado a atividades militares. Ademais, outro passo adiante para o tema do aquecimento global foi feito ao Revelle refutar a ideia de que o excesso de CO₂ seria absorvido pelos oceanos, provando que, na verdade, o mecanismo químico de estabilização da acidez da água inibiria o processo acreditado até então. Dessa forma, Revelle demonstra que a adição de CO₂ na atmosfera poderia provocar um aquecimento no globo. A partir dessa somatória de contribuições, o problema passa a ganhar mais atenção e uma dimensão global.

Nos anos 1970 as discussões saem da comunidade científica e chegam a entidades de governo, a despeito da grande discordância entre os acadêmicos em relação ao tema. Os avanços na computação e

informática foram cruciais para os estudos na área, possibilitando modelagens que levaram, nos anos de 1980, a dominância da ideia de que o globo está se aquecendo. Outras questões como a destruição da camada de ozônio também ganharam atenção, levando governos a responderem com a assinatura de protocolos como o de Montreal em 1987. Em 1988 foi realizada a conferência de mudanças atmosféricas em Toronto e em seu relatório final, pela primeira vez, foi colocado a necessidade de governos adotarem fortes medidas para redução de gases de efeito estufa, estimando-se uma redução em 20% dos gases em relação a 1988. Apesar da ainda baixa popularidade do tema, as ondas de calor e secas do mesmo ano chamaram a atenção da mídia, fazendo com que até 1989 79% dos estadunidenses já tivessem ouvido sobre o aquecimento global (WEART, 2008). Apesar de uma leve queda na temperatura no início dos anos 1990, levando a uma dificuldade em manter uma argumentação consistente sobre o aquecimento global, a “Earth Summit” em 1992 no Rio de Janeiro apontou que governos ainda estavam dispostos a negociarem reduções nas emissões de gases de efeito estufa. Em 1995 o IPCC produziu um relatório preciso e bem fundamentado indicando a relação do aquecimento global e atividades antropogênicas, além de estabelecer um provável aumento de temperatura entre 1,5 °C e 4,5 °C. Outras conferências foram realizadas e novos relatórios davam maior embasamento ao tema. Por exemplo, em 1997 foi realizada a conferência que deu origem ao Protocolo de Kyoto, onde foi proposto uma redução dos níveis de emissão para os do início da década de 1990.

Fato é, que mesmo com a ascensão do tema, houve pouco esforço político dedicado a ações climáticas até o fim dos anos 2010. Desastres ambientais ao longo da década levaram a imprensa a reforçar a ideia do aquecimento global como uma ameaça a humanidade, aumentando o engajamento social acerca do tema. A conscientização foi acompanhada por uma maior mobilização social pressionando governos a adotarem medidas de mitigação aos efeitos climáticos. É somente a partir da crise de 2008 que as discussões do aquecimento global ganham uma perspectiva estratégica, tal qual a percebida pelos teóricos do Crescimento Verde.

Para a conceituação econômica, o argumento central sobre o Crescimento Verde é de se *investir um conjunto de tecnologias capazes provocar mudanças econômicas suficientemente fortes para sanar os problemas relativos aos excessos do capital financeiro e a baixa produção agregada global explicitados desde a crise financeira de 2008* (MAZZUCATO, 2015; PEREZ, 2019). O Crescimento Verde conduziria a economia para o Golden Age do atual paradigma tecno-econômico referente a Era da Informação e das Telecomunicações (PEREZ, 2019). Enquanto as tecnologias iniciais da revolução da

informação e comunicação (ex. microprocessadores, internet e computadores) provocaram mudanças em todos os setores econômicos no período de instauração do paradigma, o potencial de transformação de novas inovações (internet das coisas, nanotecnologia, smart-grids) não apresentam a mesma natureza auto propulsora. Isto porque as possibilidades tecnológicas oriundas desse potencial são desiguais e muitas vezes desconexas, podendo ser moldadas de acordo com uma infinidade de aplicações. Essa dispersão dos esforços tecnológicos acarreta a ausência de um nicho claro para o qual escoe o capital financeiro circulante na economia global e congregate os efeitos transbordados e desperdiçados referentes às diversas novas tecnologias derivadas diretamente do presente paradigma.

Faz-se necessário um direcionamento que aponte uma trajetória comum a essas possibilidades, para que se obtenha efeitos de sinergia necessários para a recuperação da dinâmica tecno-econômica (PEREZ, 2016). O Crescimento Verde é uma possível direção para convergir essas trajetórias tecnológicas, e por isso, uma alternativa para o Golden Age. O que se ressalta é a atual oportunidade criada acerca de tecnologias ambientais para o desenvolvimento econômico através de um impulso tecnológico (MAZZUCATO, 2015; MUNDACA; MARKANDYA, 2016). Essa oportunidade é oriunda tanto do desenvolvimento de tecnologias ambientais e acumulação de conhecimento sobre o impacto antropogênico ambiental, do caráter imperativo do aquecimento global e das oportunidades desdobradas através das tecnologias de informação e comunicação.

Existe então uma estreita relação de complementariedade entre o conjunto de tecnologias que fundamentam o atual paradigma tecno-econômico e o direcionamento para tecnologias “verdes”. Ambos se interseccionam no tocante a desmaterialização da economia, ou economia leve¹⁶ (QUAH, 2019). A desmaterialização da economia é a crescente expressão de bens e serviços em forma digital, fazendo com que os mesmos adquiram propriedades econômicas tais como: infinitamente expansivos, irrestritos geograficamente e com custo marginal zero após sua implementação (QUAH, 2019). Tecnologias de informação e comunicação ostentam a desejada lógica da “redução do consumo de papel”, uma vez que paulatinamente alteram os padrões de consumo para uma menor intensidade de demanda por recursos naturais, favorecendo-se de uma crescente digitalização, compartilhamento (ou formas de aluguel) e gestão de resíduos. Os estilos de vida de jovens mais ricos e instruídos¹⁷ já refletem uma preferência por

¹⁶ Traduzido de weightless economy (QUAH, 2019)

¹⁷ São os principais iniciadores dos movimentos de definição de novos estilos de vida e comportamento no caso de revoluções tecnológicas. São conhecidos pelo comportamento “líder”.

alimentos frescos orgânicos, de origem local, em vez de alimentos altamente processados; para materiais naturais e design sustentável; para uso de bicicleta e compartilhamento de carros e reciclagem (PEREZ, 2016). Os primeiros indícios da adoção de um novo estilo de vida, compatível e circunscrito na ideologia do Crescimento Verde, já começa a ser promovido, especialmente em países desenvolvidos. Diferentemente de outros momentos em que se chamou atenção para a utilização de recursos naturais, a possibilidade de coleta e compartilhamento de dados é capaz de garantir processos sofisticados de produção diretamente responsivos à demanda e à cadeia de suprimentos, reduzindo o uso de energia e materiais (PEREZ, 2019). É possível gerir recursos naturais de forma mais eficiente através de sistemas de controle desenvolvidos para o monitoramento, extração, irrigação desses recursos (PEREZ, 2016). Assim, as tecnologias de informação e comunicação tem um papel fundamental na viabilização do direcionamento do Crescimento Verde.

O aquecimento global se configura em um possível ponto de partida para se pensar o desenvolvimento econômico de forma sustentável. É o seu caráter urgente, óbvio, inadiável que o prontifica como uma mudança legítima, com um apelo social oriundo de um contexto histórico extremamente oportuno, composto pela disponibilidade de tecnologias capazes de concretizar tal agenda, uma população que aceita e se projeta em padrões de consumo condizentes e um capital financeiro que aguarda sinalizações a respeito de possíveis investimentos previsíveis e certos. Contudo, é necessário explorar as possibilidades colocadas por essa nova lógica para além do aquecimento global, para que as oportunidades de se alcançar mudanças socioeconômicas importantes sejam atreladas a uma nova normalidade.

Políticas relacionadas ao Crescimento Verde buscam aumentar a renda e o emprego a partir da redução da poluição e dos danos aos serviços ecossistêmicos e à biodiversidade e do aumento da eficiência de recursos e energia (FOUQUET, 2019). Apesar do atual foco principal em políticas nacionais de mitigação do aquecimento global, a redução de emissão de gases do efeito estufa é necessariamente um compromisso global e inclusivo uma vez que os efeitos são percebidos por todos independentemente da nação que emite os gases. Por isso não deve apenas impulsionar o direcionamento nos países que lideram o desenvolvimento de tecnologias verdes, como no caso de outras tecnologias que buscam um regime de apropriabilidade estreito, mas sim garantir a maior amplitude de acesso ao benefício da tecnologia. Esforços somente pelo lado da oferta de novas tecnologias verdes não são suficientes para viabilizar a sinergia necessária para a recuperação econômica, exigindo, portanto, políticas públicas que

visem uma mudança intensa na sociedade, incluindo alterações nos padrões de consumo, criação de uma economia da “manutenção” e a formulação de um aparato regulatório que não só garanta clareza e benefícios do investimento em tecnologias verdes, mas que também consiga inibir o avanço de práticas do paradigma extinto, como o consumo em massa.

Por fim, é importante ressaltar que o estilo de vida “American Way of Life” reforçou um padrão de consumo em massa que resultou na superação das crises econômicas da década de 1930, mas também em um constante descarte de insumos e produtos e excesso do uso de energia. O Crescimento Verde, então, apresenta o desafio de propor um novo estilo de vida que supere o insustentável “American Way of Life” e seus consequentes problemas ambientais, ao mesmo tempo que busca uma convergência de trajetórias para o direcionamento das tecnologias relacionadas a revolução tecnológica da informação e comunicação (MAZZUCATO; PEREZ, 2015).

2.4. Transições Energéticas

O Crescimento Verde, conforme conceituado, é um arcabouço teórico para elaboração de políticas públicas para transições energéticas. Dentre diversos temas, questões relativas à geração, armazenamento e uso de energia alicerçam a mitigação de problemas centrais que compõe a agenda verde, mais especificamente no que tange aos prejuízos ambientais causados pelo aquecimento global e poluição atmosférica. O setor de energia é responsável por dois terços das emissões globais de gases de efeito estufa e quase 90% das emissões de CO₂, sendo impossível conciliar um crescimento econômico verde sem propor estratégias para mudanças na composição dos combustíveis que alimentam os atuais sistemas de energia¹⁸ (ABERGE *et al.*, 2019). Dessa forma, é compreensível que no setor de energia se situe uma rica e emergente manifestação de mudanças que se orientam através de uma lógica verde.

Energias renováveis derivam de fontes naturais que podem se regenerar dentro de um período de poucos anos. Apesar da ênfase na característica esgotável das fontes de combustíveis fósseis, em contraste com as fontes renováveis (principalmente madeira e energia animal) e as fontes inesgotáveis (radiação solar, vento, maré e energia hidrelétrica) de energia, mais recentemente, o conceito de energia renovável tem uma relação estrita com as mudanças climáticas, uma vez que desempenha um papel fundamental na redução das emissões de CO₂ (HARJANNE; KORHONEN, 2019).

2.4.1. *Sistemas de Energia e Transições Energéticas: definições*

Sistemas de energia compreendem o fluxo de fontes primárias de energia até o seu uso em consumo final de energia. Há uma imensa variedade desses fluxos, uma vez que são as combinações tecnicamente possíveis e existentes entre não apenas fontes e usos, mas também entre métodos de conversão de energia. Sendo assim, para a presente tese, torna-se relevante decompor os sistemas de energia em quatro grandes componentes fundamentais: i) as fontes primárias de energia, ii) suas conversões e iii) os serviços de energia e iv) uso final. A Figura 4 mostra quatro os componentes de sistemas de energia.

¹⁸ A conceituação dos sistemas de energia define o grau com que o Crescimento Verde e alternativas energéticas se relacionam. Uma conceituação estreita pode se delimitar apenas a aspectos do suprimento de energia, enquanto uma ampla pode incluir conversões de energia no interior organismos vivos. Os dois extremos evidenciam diferentes funcionalidades da conceituação.

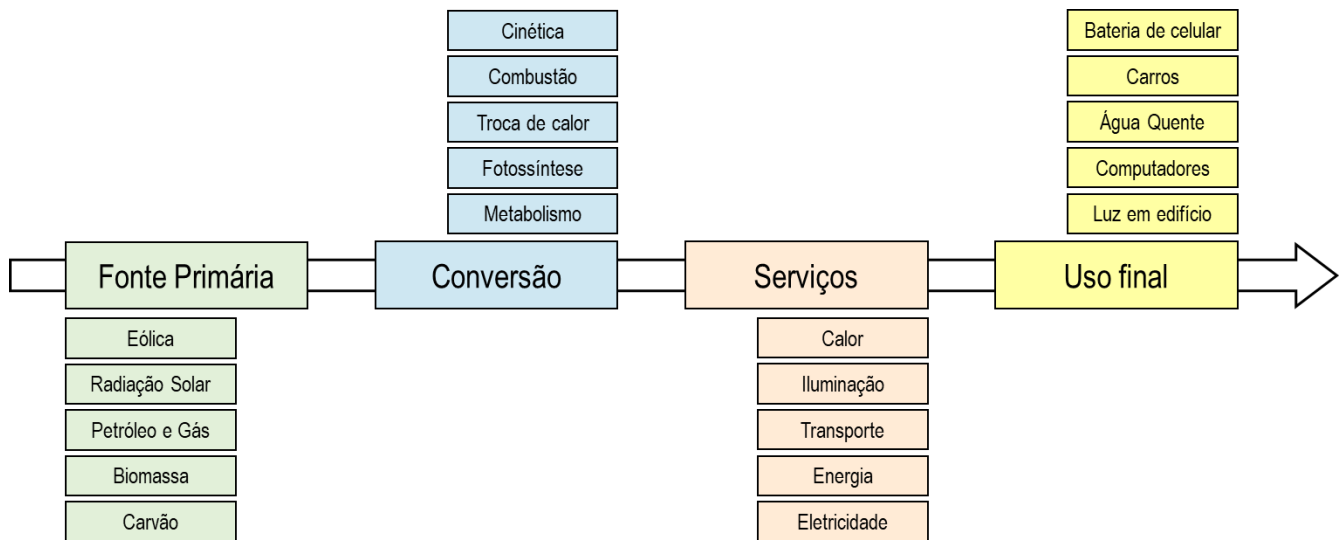


Figura 4 Sistemas de Energia e exemplificações – Elaboração própria

Fontes primárias de energia, tais como carvão, biomassa, petróleo, eólica e radiação solar são comumente agrupadas conforme sua velocidade de reposição - renováveis ou não renováveis. Dentre as fontes de energia não renováveis, as principais são os combustíveis fósseis, mais especificamente carvão e hidrocarbonetos. Esses são caracterizados por uma composição rica em carbono, e comumente apresentando também enxofre e outros elementos como nitrogênio. Outra fonte não-renovável (menos explorada na presente tese) é a energia nuclear, liberada a partir da fissão de elementos naturais pesados, como o urânio.

As energias renováveis incluem energia térmica da terra (geotérmica), a radiação solar (energia radiante ou eletromagnética) e todas as suas transformações na biosfera, que dão origem às mais diversas fontes naturais. Estas incluem a biomassa, que é o processo de conversão fotossintética da radiação solar em energia química dos tecidos vegetais; a eólica, resultante de gradientes de pressão criados pelo diferencial de aquecimento do solo; e a movimentação d'água, resultado da evaporação e precipitação ou por ondas e correntes oceânicas provocadas pela radiação (SMIL, 2010).

Conforme Figura 4, a conversão de energia compreende tanto os processos relativos a transformação da energia quanto os tipos de energia envolvidas no processo. As conversões são os processos nos quais a energia disponível através da fonte natural se converte em um tipo de energia utilizável como os serviços de energia, podendo ser compostas por processos intermediários. Conversões estão em constante operação em todas as atividades bióticas e não-bióticas da Terra, incluindo, por

exemplo, processos de fotossíntese, transformações do solo através de ciclos de chuva e vento ou atividade animal, e os diversos processos antropogênicos. Os processos de conversão de energia estão diretamente relacionados com a origem da fonte de energia e a energia resultante do processo, conforme sistematizado no Quadro 3.

Quadro 3 Combinações de conversões de energia

De Para	Eletromagnética	Química	Térmica	Cinética	Elétrica
Eletro- magnética	-	Luminescência química	Radiação Térmica	Diferencial de carga	Radiação eletromagnética
Química	Fotossíntese	Processamento químico	Ebulição	Dissociação por radiólise	Eletrólise
Térmica	Absorção Solar	Combustão	Troca de calor	Fricção	Aquecimento por resistência
Cinética	Radiômetros	Metabolismo	Expansão térmica / combustão interna	Engrenagens	Motores elétricos
Elétrica	Células Solares	Baterias	Termoeletricidade	Geradores elétricos	-

Fonte: adaptado de Smil (2017). Excluída energia nuclear

Dentre os processos de conversão de energia, a combustão é o principal processo antropogênico desde estágios iniciais da evolução humana. Combustíveis primários são estoques de energia química disponíveis nas camadas mais externas da Terra que, quando submetidos a um processo de combustão, podem fornecer calor ou luz (eletromagnetismo ou radiação). Esses combustíveis são colhidos, como madeira, resíduos vegetais, ou extraídos, como os combustíveis fósseis, e rapidamente oxidados no processo de combustão. Por se tratar de um processo térmico, o aumento da entropia do sistema acarreta em perdas significativas de energia útil disponível conforme as características inerentes aos processos termodinâmicos (SMIL, 2010). Consequentemente, um sistema de energia composto por processos dessa natureza apresenta uma eficiência limitada. Combustíveis primários podem ser transformados em fontes secundárias de energia, nas quais as principais são os refinados do petróleo amplamente utilizados nos

setores industrial e de transporte. Combustíveis, quando associados a um motor, são capazes de converter a energia térmica liberada em energia cinética, em processos de expansão térmica ou combustão interna.

Os processos de conversão que envolvem energia elétrica ganharam crescente importância nos sistemas de energia. A descoberta dos fenômenos eletromagnéticos e eletroquímicos foi fundamental para a melhoria da eficiência dos sistemas de energia bem como a ampliação de usos da energia gerada. Mais notadamente, o eletromagnetismo é o princípio prevalecente para geração de eletricidade, seja para eletricidade proveniente diretamente de fontes renováveis, como no caso da hidroeletricidade, ou obtida através da combustão de combustíveis fósseis, como em termoelétricas (principal rota de produção mundialmente). Especialmente após o sucesso da primeira planta comercial de geração de eletricidade, *Pearl Street Station* à base de carvão, muitos sistemas de eletricidade foram projetados em combinação com sistemas de combustão (TERMAN, 1976).

Os serviços de energia, representados na terceira coluna da Figura 4, podem ser descritos como as demandas elementares humanas por energia (HAAS *et al.*, 2008). Por estarem diretamente associados às necessidades humanas básicas (por exemplo, culinária, suprimento de alimentos, defesa, construção), a diversidade desses serviços permaneceu estável e homogênea ao longo da história da humanidade¹⁹, embora historicamente o consumo de energia propriamente dito tenha aumentado consideravelmente (FOUQUET, 2010; SMIL, 2004). O aumento da demanda de energia está diretamente relacionado com a melhoria da qualidade de vida (SMIL, 2004), estimulado pela criação e expansão de consumíveis que atendem às necessidades básicas e latentes.

O uso final desses serviços, representado pela última etapa da Figura 4 é onde se percebe as principais modificações na composição da demanda pelos serviços. É através dessa etapa que o consumidor interage com a cadeia de suprimento de energia, sendo as demais pouco perceptíveis à sociedade em termos práticos. De fato, a demanda por fontes primárias é pouco experimentada pelos consumidores, especialmente quando seus serviços de energia já estejam suprindo o uso final de bens intensivos em energia. Isto equivale dizer que um consumidor que usufrui de um sistema de energia é, na verdade, pouco sensível às formas de conversão e fontes primárias, desde que seu consumo final esteja assegurado. Mudanças na composição dos sistemas de energia foram impulsionada pelo preço e / ou

¹⁹ Por exemplo, a demanda por transporte, inicialmente suprida por energia de química somática, no caso dos nômades primitivos e do uso animal, e posteriormente por outras fontes, como carvão, petróleo e biocombustíveis. A demanda elementar pelo transporte permaneceu a mesma embora outras etapas do sistema tenham se modificado.

qualidade do suprimento de serviços de energia (FOUQUET, 2010), relacionados com, por exemplo, a densidade de energia (J/kg) da fonte primária, os custos de instalação e resíduos produzidos durante o processo de conversão de energia.

Existem vários recursos métricos para caracterizar sistemas de energia, sendo duas notadamente importantes para os argumentos da presente tese sobre transições energéticas. Um deles é a densidade de energia, definida como a **quantidade de energia**, em joule (J) por unidade de massa (grama, quilograma etc.) contida em um recurso (ex. alimentos e combustíveis). A densidade de energia também pode ser dada em termos de volume, tal como joule por metro cúbico (J/m³). Já a densidade de potência²⁰ é a taxa na qual as energias são **produzidas ou consumidas** por unidade de espaço (área ou volume). Essa medida é importante para o cálculo de sistemas de energia de uma cidade²¹ por exemplo, ou para dimensionar a capacidade de se transferir energia, como no caso de geradores elétricos.

A introdução mais expressiva de fontes primárias mais renováveis nos sistemas de energia é fundamental para consolidação do Crescimento Verde, uma vez que a intensidade de carbono presente nas fontes de energia confronta o principal problema que compõem a agenda verde: o aquecimento global. Alterações das fontes naturais de energia não são exclusivas ao contexto atual. Pelo contrário, desde a revolução industrial, a humanidade passou por diferentes transições energéticas, tais como mudanças no suprimento global, regional ou setorial de energia. Uma transição energética é caracterizada por um aumento mais que proporcional no consumo de uma fonte primária em relação a outras (SOVACOOOL, 2016). As transições passadas foram notáveis pelo aumento do consumo em termos absolutos da fonte pré-existente enquanto a nova superava o consumo da prévia em termos relativos através da elevação do consumo total de energia conforme observado na Figura 5.

²⁰ Por exemplo, para acender um fogo, usa-se gravetos pois a alta relação área-volume da superfície implica na queima rápida do combustível (alta densidade de potência). Uma vez aceso, utiliza-se toras de madeira devido à sua alta densidade energética.

²¹ Por exemplo, quando o tamanho das cidades dependia de lenha e carvão vegetal, existia uma limitação da densidade de potência inerentemente baixa taxa de crescimento de árvores em climas temperados, que é aproximadamente 2% da densidade de potência do consumo de energia para aquecimento urbano tradicional, cozimento e manufatura. Consequentemente, as cidades tiveram que recorrer a áreas próximas pelo menos 30 vezes o seu tamanho para suprimento de combustível (SMIL, 2017)

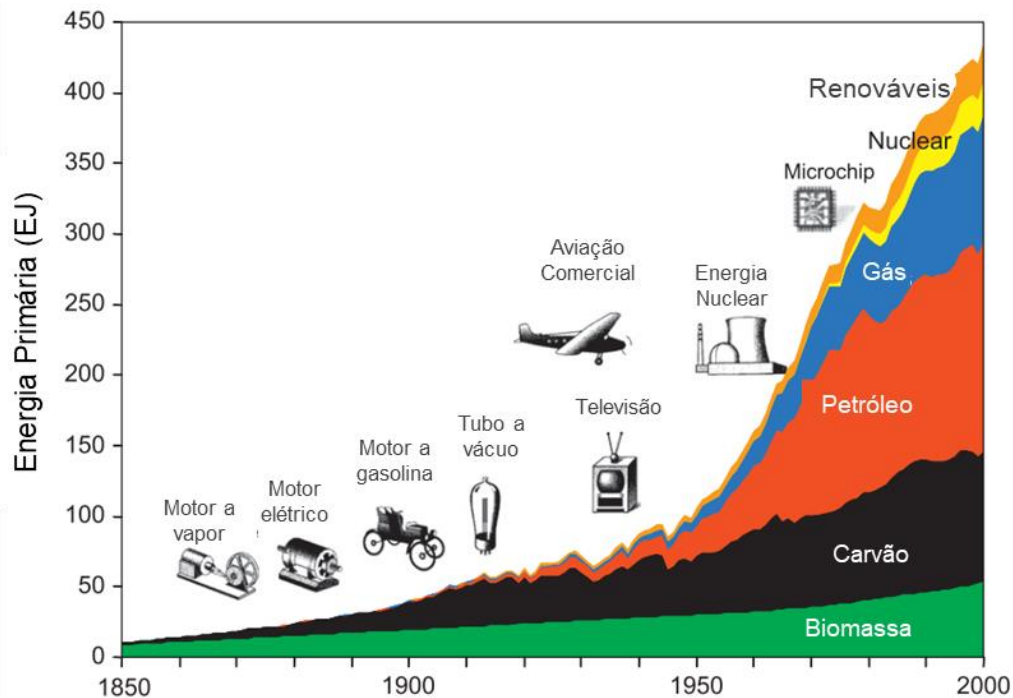


Figura 5 Consumo Global de Energia Primária Fonte: Haas et al. (2008)

O crescimento da nova fonte estava frequentemente associado à criação de novos nichos tecnológicos não apenas intensivos em energia, mas também que exigiam propriedades distintas do suprimento de energia (FOUQUET, 2016; YORK; BELL, 2019). Conforme observado na Figura 5, isso foi o caso, por exemplo, da criação dos motores a vapor, que impulsionaram o crescimento e uso do carvão e o caso do veículo a combustão, impulsionando o uso de derivados do petróleo. A nova fonte primária complementou a crescente demanda de energia em um novo nicho orientado por um impulso tecnológico (PEREZ, 2009), não inibindo o crescimento do consumo de outras fontes (SOVACOO, 2016). As novas fontes expandiram na medida em que proporcionavam uma vantagem clara (por exemplo, mais limpa, mais fácil, mais flexível ou eficiente) em aplicações específicas (FOUQUET, 2010). A adequação entre a fonte de energia iminente e uma aplicação tecnológica específica permitiu que o desenvolvimento dos novos sistemas de geração de energia estivesse livre de concorrências, onde os subsistemas complementares necessários poderiam amadurecer e depois se inserir em outras aplicações. Isso fez com que, nas transições passadas, as empresas precursoras do setor de energia tivessem menor influência na criação de barreiras de mercado, uma vez que elas próprias não poderiam suprir inteiramente a nova necessidade específica.

É importante ressaltar que as propriedades energéticas das fontes naturais já eram conhecidas muito antes da sua exploração nas transições energéticas. Por isso, é possível dizer que as transições foram mais impulsionadas por melhorias ou descobertas nos processos de conversão de energia ou no uso final do que na fonte primária propriamente dita. Essas melhorias viabilizavam ou tornavam novas fontes primárias competitivas em aplicações específicas, ao mesmo tempo que reforçavam ou redesenhavam os padrões existentes da cadeia de suprimento de energia. Dentre os padrões reforçados, o mais notável é a combustão como principal processo de conversão de energia utilizando combustíveis fósseis, fazendo com que os diferentes combustíveis primários iminentes se beneficiassem de parte uma estrutura tangível e intangível preexistente construída pela fonte de energia precursora. Obviamente, cada fonte necessita de uma infraestrutura específica, mas existem externalidades (efeitos) positivas de se utilizar processos de conversão similares, como, por exemplo, uma maior facilidade de acessar recursos humanos capacitados ou usar estruturas semelhantes em usinas termelétricas. Assim, os tipos de processos de conversão de energia se alteravam pouco ao longo das transições (conforme esquematizado na Figura 6), fortemente impulsionados pelo uso direto da combustão e em seguida sua associação com a geração de eletricidade. Enquanto isso, as mudanças nas fontes de energia primária (de lenha ou madeira para gás natural) foram em direção a uma maior densidade energética (J/kg) do combustível queimado, enfatizando a importância de fontes de energia baratas, de alta qualidade e intensivas em carbono (FOXON; STEINBERGER, 2011; PEARSON; FOXON, 2012).

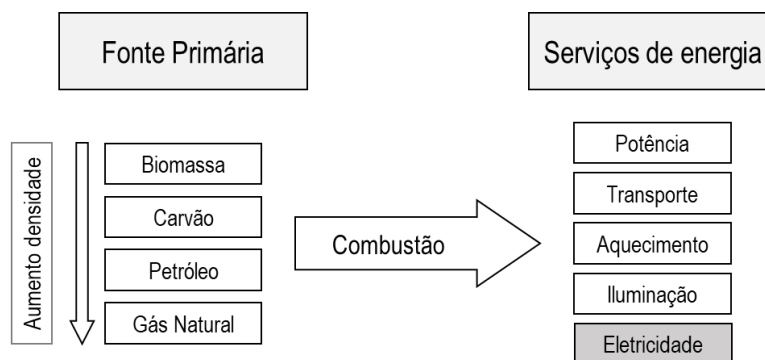


Figura 6 Relação entre as fontes primárias e serviços de energia - elaboração própria

Os vetores de energia (como combustíveis fósseis e eletricidade) desempenham um papel importante no equilíbrio entre a oferta e demanda de energia dado que a demanda de energia é mais distribuída do que as fontes de primárias. Os sistemas de energia baseados em combustão dispõem de

dois vetores portadores de energia: os próprios combustíveis primários e a eletricidade, ambos com diferentes características em relação ao seu transporte e armazenamento. Combustíveis fósseis apresentam alta densidade energética e, quando transportados, já armazenam sua própria energia. A eletricidade, por sua vez, apesar de sua rápida transmissão não pode ser armazenada, a menos que seja convertida em uma fonte de energia diferente (por exemplo, química em baterias).

Os sistemas de energia visam otimizar essas duas propriedades para evitar perdas de energia ao longo da cadeia de suprimento. A transportabilidade de unidades de energia através de combustíveis fósseis foi crucial para o desenvolvimento dos sistemas atuais, já que garantiram o fornecimento de energia primária em regiões menos beneficiadas por recursos naturais, como muitos países industrializados. A criação de estruturas interligando oferta e demanda construíram trajetórias que, ao mesmo tempo que viabilizaram a aplicabilidade da energia em seu uso final, criaram uma dependência em relação ao padrão de consumo da energia. Sistemas de energia baseados em combustíveis intensivos em carbono de alta qualidade (FOXON; STEINBERGER, 2011) proporcionaram às indústrias e consumidores finais um fornecimento estável de energia e ajustável às suas demandas. Essa estabilidade e confiabilidade viabilizou o desenvolvimento da indústria de equipamentos elétricos e eletrônicos e outras tecnologias de serviços de consumo que, uma vez disponíveis, realimentam e aprofundam o padrão de demanda de energia. Transitar para sistemas de energia que abdicam de fontes intensivas em carbono tem implicações para o grau de segurança dos sistemas, precisando de uma intensa conectividade entre diversas fontes renováveis para que seja mantido o padrão de fornecimento de energia.

2.4.2. Transição Energética e a Agenda Verde

Estudos recentes, referentes às mudanças climáticas, impõem características singulares para uma nova transição energética, enfatizando a necessidade de uma introdução efetiva de fontes alternativas, preferencialmente renováveis, nos sistemas de energia, em relação aos combustíveis fósseis. Os critérios de escolha de investimento e especialmente direcionamento tecnológico priorizam soluções para redução de emissão de CO₂ que não implicam em, por exemplo, menor geração de resíduos em estrito senso. Essa transição se difere das anteriores, particularmente, porque refere-se ao aumento da demanda mundial por menos poluição e não apenas a um aumento no consumo de energia (FOUQUET, 2016). Além disso, diferentemente das demais transições, não há atualmente uma aplicação específica em que fontes primárias e renováveis de energia apresentem uma vantagem clara e que possam amadurecer. Assim, os

dois principais pilares das transições energéticas passadas, o aumento no consumo de energia e a existência de uma aplicação específica que justifique o crescimento desse consumo, não são protagonistas, requerendo um conjunto de políticas dedicadas para a atual transição. Por isso, indubitavelmente, empresas incumbentes, governos, regulações e acordos desempenham um papel mais decisivo na atual transição energética (YORK; BELL, 2019).

O principal objetivo da transição para as energias renováveis é substituir os combustíveis fósseis, uma vez que apenas complementar o crescimento da demanda de energia não seria o suficiente para mitigar os efeitos da mudança climática (GAMBHIR *et al.*, 2019; ZAPPA; JUNGINGER; VAN DEN BROEK, 2019). No entanto, existem poucas evidências de que esse objetivo será alcançado tendo em vista que as transições passadas não contaram com o desuso das fontes precursoras. Ademais, as transições passadas foram orientadas por um combustível primário (FOUQUET; PEARSON, 2012), fisicamente acessível, apesar de sua difícil extração e limitação geográfica. Esse combustível apresentava duas características fundamentais para o desenvolvimento dos sistemas de energia: i) alta densidade energética (energia química armazenada em forma de um recurso natural), e ii) a possibilidade de converter essa energia em distintos locais do globo por meio da combustão conforme a demanda. Essas duas propriedades garantiram a existência de um sistema de energia global interligado embora houvesse diferenças significativas na disponibilidade de fontes de energia.

Diferentemente, a transição para energia renovável depende de equipamentos elétricos²² que possibilitam a conversão de fontes de energias renováveis em eletricidade. Fontes renováveis como solar, eólica e hídrica também apresentam condicionantes geográficos, no entanto são mais homoganeamente distribuídos pelo globo. Uma parte significativa das fontes renováveis são oriundas de fluxos da biosfera e não de recursos materializados propriamente ditos, portanto mais difíceis ou impossíveis de se transportar. A transição renovável também se destaca pela multiplicidade de fontes primárias de energia a serem incorporadas na cadeia de suprimento de energia, em contraste com as transições passadas de fonte única. Uma única fonte renovável não apresenta densidade de potência suficiente para suprir as demandas de energia das sociedades atuais, necessitando de uma transição com múltiplas de fontes renováveis. Ademais, fluxos eólicos, hídricos e níveis de irradiação solar não seguem os padrões de

²² Exemplos de equipamentos elétricos são turbinas eólicas, células fotovoltaicas, pilhas a combustível. Esses apresentam uma série de componentes elétricos tais como inversores, transistores, capacitores.

demanda pelo consumo de eletricidade. Além de muitas dessas fontes apresentarem forte intermitência, como por exemplo a ausência de irradiação solar em horas noturnas ou durante a passagem de nuvens, os sistemas de energia passam a operar com excessos de geração de eletricidade, como no caso das ventanias em domingos, quando boa parte da atividade industrial está paralisada. Esses descompassos provocados pela natureza intermitente e autônoma das fontes renováveis como solar e eólica resultaram em fortes incentivos ao desenvolvimento de formas de armazenamento do excesso de eletricidade gerada em outros períodos.

Cada fonte primária, para sua conversão em eletricidade, requer o desenvolvimento de um equipamento elétrico exclusivo, com suas especificidades, contrastando com as transições anteriores de combustível único em que sistemas de combustão semelhantes foram aplicados para a maioria dos combustíveis fósseis usados. Mesmo para uma mesma fonte renovável, embora os componentes tecnológicos centrais de dispositivos elétricos sejam similares, os arranjos de seus componentes variam consideravelmente de acordo com as condições locais de conversão da energia (ex. diferentes arranjos de turbinas eólicas *in shore* e *off shore*). A alta diversidade dificulta economias de escala, aprendizados e a difusão de dispositivos padronizados moduláveis, especialmente em tecnologias com baixo grau de maturidade. Além disso, os desenvolvedores enfrentam desafios na implementação de suas tecnologias, uma vez que diferentes condições geográficas podem exigir componentes diferentes fora de seus negócios principais. Por fim, cada fonte resulta em distintos processos de conversão de energia, necessitando de uma infraestrutura única o que aumenta a complexidade desses sistemas. Como resultado, a implementação de dispositivos para geração de energia depende de esforços políticos locais, pautados na compreensão da disponibilidade de suas fontes de energia e na mobilização de atores para superar possíveis desafios locais (CARVALHO, 2019).

Outra especificidade da transição para as renováveis é a dependência da eletricidade, conforme a Figura 7. As fontes renováveis variam em termos do tipo de energia a ser convertida e o processo de conversão, porém o principal potencial da maioria dessas fontes está na geração de eletricidade através dos equipamentos elétricos. Vale lembrar que outras possibilidades de conversão de energia já estavam disponíveis antes da transição energética para o carvão, como os antigos moinhos de vento e água, biomassa e energia da água. Essas possibilidades de conversão foram substituídas ou menos expandidas durante os últimos séculos devido a sua baixa densidade de energia gerada, não conseguindo atender o

aumento da demanda do consumo de energia nem as especificidades dos padrões estabelecidos nos bens consumíveis intensivos em energia.

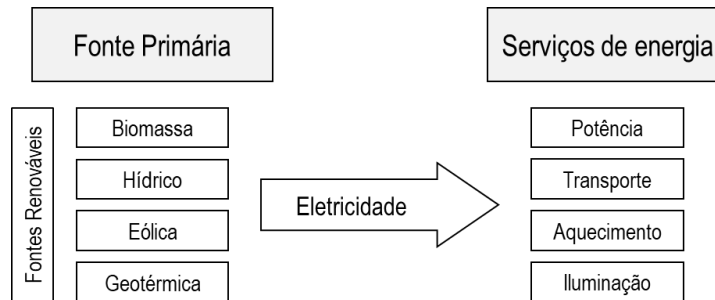


Figura 7 Relação entre as fontes renováveis e serviços de energia - elaboração própria

Conforme ilustrado na Figura 7, a eletricidade é essencial para conectar a energia gerada aos serviços de energia no contexto da transição para fontes renováveis. A eletrificação dos sistemas de energia viabilizou a transmissão da energia renovável gerada em localizações geográficas específicas até sua demanda distribuída por redes de transmissão elétrica. A eletricidade também se beneficia de uma infraestrutura física e tácita já conhecida e desenvolvida, facilitando a conexão entre o suprimento e demanda de energia. Entretanto, as fontes renováveis são mais sensíveis aos gargalos ainda remanescentes referentes ao armazenamento da eletricidade do que os combustíveis fósseis, uma vez que essas fontes não apresentam outro vetor energético.

A forte relação entre a transição para fontes renováveis e a eletricidade permite perceber a transição energética como uma “transição elétrica” já que cada vez mais, as demandas por serviços de energia passam por um caminho incluindo a eletricidade e seus processos de conversão (BATINGE; MUSANGO; BRENT, 2019). Fontes renováveis foram responsáveis por quase 45% do crescimento da geração de eletricidade no mundo, apesar de ainda não haver indícios de substituição dos combustíveis fósseis, responsáveis por 64% do suprimento de eletricidade (IEA, 2018). Embora o uso de fontes renováveis para produção de eletricidade esteja crescendo, alguns serviços de energia ainda dependem de sistemas de combustão (GIELEN *et al.*, 2019). Dois deles chamam mais a atenção. Indústrias intensivas de energia térmica, como a produção de materiais virgens (aço, minerais e produtos químicos básicos) (LECHTENBÖHMER *et al.*, 2016), geralmente exigem o uso de processos de alta temperatura fornecidos diretamente a partir da combustão. Da mesma forma, algumas tecnologias de transporte (por exemplo, carros, aeronaves e caminhões) também dependem da combustão para gerar energia mecânica

e elétrica. A maioria das tecnologias de energia renovável não tem o potencial de substituir os combustíveis fósseis nesse serviço, uma vez que muitas dessas fontes não contam com um vetor portador de energia. Possíveis alternativas renováveis são biocombustíveis, baterias e o hidrogênio, cada uma com princípios funcionais muito diferentes, com pouco ou nenhum conhecimento comum, dificultando a criação de uma base de conhecimento para a expansão dessas tecnologias.

Os padrões de demanda de energia também expõem dificuldades encontradas para que transição para sistemas de energias mais eletrificados utilizem fontes renováveis. Consumidores, ao demandarem os serviços de energia, não experimentam diferenças entre consumir energia renovável e não renovável (HULSHOF; JEPMA; MULDER, 2019). Construir a conexão entre o consumo de eletricidade e a fonte de energia é essencial para mudar as preferências de consumo em direção a sistemas menos poluentes e, conseqüentemente, a tecnologias energéticas de baixo carbono (FOUQUET, 2012). Assim, existe uma assimetria de informação já que a entidade que oferta energia detém informações sobre o serviço ofertado que o consumidor não é informado. Com o objetivo de reduzir esta assimetria e aumentar a transparência no setor de energia, criou-se em muitos países o sistema de certificação verde, no qual as empresas devem informar qual a origem da energia consumida (HULSHOF; JEPMA; MULDER, 2019; MULDER; ZOMER, 2016; SCHAFFER; BERNAUER, 2014).

Substituir combustíveis fósseis sem um nicho que fontes renováveis apresentem clara superioridade que justifique seu desenvolvimento, implica que condições já preenchidas por soluções anteriores tais como operação, preço e estrutura de mercado devam ser minimamente mantidas. Ou seja, sem um nicho livre de concorrência, as tecnologias iminentes devem responder de maneira semelhante a essas condições, a fim de serem uma alternativa aceitável. Em transições anteriores, os altos investimentos iniciais, tais como os relativos a instalação de infraestrutura, eram compensados pelo impulso tecnológico fora do setor de energia, como nos casos das ferrovias e o carvão, e automotivo e petróleo. Por exemplo, na instalação da rede elétrica em Nova Iorque o custo do investimento no setor de energia foi arcado pelo nicho tecnológico em desenvolvimento, no caso, por Edison para instalação da rede de iluminação da cidade. Para as energias renováveis, restrições que normalmente afetariam as fases de implementação e difusão influenciam desde o início do desenvolvimento tecnológico, uma vez que determinadas condições do mercado e funcionamento da tecnologia já estão dadas. Ademais, como há um nicho de livre concorrência, existe uma forte predominância de empresas que controlam preços, fornecimento de energia e, em alguns casos, até incorporam energia renovável em seu mix de energia

(MCMEEKIN; GEELS; HODSON, 2019). Os obstáculos descritos para sistemas de energia baseados em fontes renováveis apontam as dificuldades de uma transição orientada pelo mercado, sem políticas que promovam condições que propiciem o seu desenvolvimento. Dessa forma, justifica-se a elaboração de uma agenda político-econômica para criar os incentivos necessários em direção a uma sociedade menos intensiva em fontes fósseis.

As propostas iniciais da agenda verde percebiam as questões de danos ambientais como falhas de mercado. Para a economia neoclássica, problemas como poluição e exaustão de recursos naturais são externalidades (efeitos) negativas, ocasionados por uma má definição de propriedades. “Bens públicos” se configuram em bens e serviços, como ar, águas de rios e espaços geográficos, usufruídos por todos sem que haja entidades que detém suas posses e que estejam dispostas a garantir seu pleno funcionamento e manutenção. Nesse sentido, a ausência ou “má definição” de propriedade acarreta um custo não contabilizado por consumir um bem público. Por exemplo, as emissões geradas por um veículo movido a diesel não contabilizam um custo de poluir para os usuários ou fabricantes, ao mesmo tempo que geram uma externalidade negativa (a poluição do ar) que é compartilhada por toda a sociedade. As preferências individuais em relação ao nível de pureza do ar variam. Empresas do setor automotivo podem preferir um nível de poluição maior a indivíduos com dificuldade respiratória. Por isso, nessas situações de exceção, seria necessário que o estado ativamente regulasse o nível de poluição do ar. Dentre as medidas adotadas pela agenda neoclássica estariam as quotas de carbono, quebra dos monopólios do setor de energia e certificação verde.

A abordagem neoclássica não se mostrou capaz de alcançar as mudanças necessárias para superar os problemas constituintes da agenda verde. Parcialmente porque essas propostas partem do princípio de que o mercado é mais efetivo para coordenar e controlar as atividades econômicas em comparação com o estado, portanto a livre concorrência é a principal forma de se obter o melhor funcionamento da economia. A participação do estado deve ser mínima, intervindo apenas em regulações nos contextos de falha de mercado. Entretanto, a percepção dos problemas da mudança climática provocados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis como uma falha de mercado não foi suficiente para direcionar a economia para formas mais ecologicamente amigáveis de produção.

O arcabouço neo-schumpeteriano se apresenta como uma alternativa à proposta neoclássica, rejeitando a ideia de falhas de mercado, já que não se aceita a ideia de que o mercado é o *locus* de

equilíbrio entre oferta e demanda através da concorrência e preços. Assume-se, ao contrário, que o estado é fundamental na economia, não apenas desempenhando um papel marginal na regulação de falhas de mercado, mas como de fato um promotor de atividade econômica, geração de emprego, e atividade empreendedora (MAZZUCATO, 2011). Como já apresentado, o Crescimento Verde é uma agenda política que não apenas visa a correção de falha de mercado ou um problemas de assimetria de informação, mas uma proposta ampla, sugerindo direcionamento econômico que converge diferentes trajetórias tecnológicas capaz de atrelar os capitais produtivo e financeiro (MAZZUCATO; PEREZ, 2015).

Outro ponto de contraste da proposta neoclássica é que, na abordagem evolucionária, não é possível alcançar os objetivos da agenda verde sem que haja um forte desenvolvimento de novas tecnologias. Esse, por sua vez, requer coordenação de investimentos de longo prazo que arquem com os custos da maturação tecnológica. Assim, mais do que internalizar e taxar os custos de poluir, é necessário também perceber a agenda verde sob uma perspectiva de políticas para inovação que incluam novas regulações e mudanças consideráveis nas regras do jogo (HEINE *et al.*, 2018; KIVIMAA; KERN, 2016; SEMIENIUK; MAZZUCATO, 2019). Incentivos em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias verdes se mostraram uma estratégia efetiva para o crescimento da participação das fontes renováveis em economias locais (DECHEZLEPRÊTRE; MARTIN; BASSI, 2019). Isto exige uma participação ativa de governos, esses os arcando com custos de projetos de alto risco, criação de oportunidades, investimento em empresas privadas e centros de pesquisa (PEREZ, 2013). A forma específica como governo, universidades e empresas, interagem para fomentar inovações em cada país (FREEMAN, 1995; LUNDVALL, 1992; NELSON, 1959), aliados às suas próprias condições geográficas, climáticas e dos sistemas de energia produz circunstâncias distintas exigindo um esforço local para o desenvolvimento das trajetórias das tecnologias renováveis. Dessa forma, a agenda verde, no que tange os sistemas de energia, apresenta tanto uma dimensão global, já que países devem compactuar para que os efeitos da mudança climática sejam mitigados, quanto uma dimensão local, que depende de características e orientações condizentes com as possibilidades de geração de energia de cada país.

2.5. Tecnologias do Hidrogênio e Pilhas a Combustível

Tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível são um conjunto de dispositivos, componentes e processos que viabilizam a obtenção e o uso do hidrogênio para fins energéticos²³. Trata-se de um grupo de tecnologias complementares e muito heterogêneas entre si, que inclui um universo tecnológico relacionado com a produção, transporte, distribuição, armazenagem e uso do hidrogênio.

Anualmente, consome-se cerca 115 Mt de hidrogênio (IEA, 2019a), destinadas, majoritariamente, ao hidrocraqueamento e dessulfurização do petróleo e à produção de amônia e fertilizantes agrícolas. Outros usos convencionais do hidrogênio são para a produção de metais e de metanol, para o resfriamento de geradores em usinas elétrica, e para o processamento de alimentos e eletrônicos (IEA, 2017). Os combustíveis fósseis são a principal fonte primária usada para a produção de hidrogênio, contabilizando cerca de 90% da sua produção total. Desses, 48% derivam do gás natural, 30% de óleos pesados e nafta e 18% do carvão (GANDÍA; ARZAMENDI; DIÉGUEZ, 2013).

Apesar do hidrogênio já ser amplamente comercializado, suas principais aplicações não estão diretamente vinculadas a finalidades energéticas. Mesmo havendo oportunidades de se explorar economias de escala e escopo advindas de uma base tecnológica comum a cadeia produtiva existente, o uso do hidrogênio para fins energéticos depende da expansão de uma onerosa infraestrutura para sua produção, distribuição e uso final (EKINS; HUGHES, 2010). Essa infraestrutura inclui, por exemplo, uma frota de transportes movidos a hidrogênio, a criação de gasodutos dedicados a passagem de hidrogênio e instalação de plantas para produção de hidrogênio, de sistemas de armazenagem de hidrogênio, de estações de abastecimento para veículos movidos a hidrogênio e de pilhas a combustível para geração estacionária de energia elétrica.

A implementação de um conjunto de tecnologias viabilizadoras do hidrogênio energético vem sendo cada vez mais conjecturada no contexto da transição energética renovável devido e a flexibilidade de aplicações e rotas de produção de hidrogênio, despertando um especial interesse em setores de difícil descarbonização. Ademais, o hidrogênio se destaca por ser um combustível potencialmente livre de emissões de CO₂, facilitando uma transição gradual para alternativas energéticas mais limpas.

²³ Fins energéticos compreendem os serviços de energia salientados na seção 2.4.1

Ao mesmo tempo, a escolha do uso hidrogênio energético não é direta ou trivial, já que produzir hidrogênio é, em si, um processo intensivo energia, sendo frequentemente preferível atender diretamente as demandas por serviços de energia (EKINS; HUGHES, 2009; GANDÍA; ARZAMENDI; DIÉGUEZ, 2013). Ou seja, ao incorporar o hidrogênio em diferentes etapas dos sistemas de energia, adiciona-se o seu custo de produção e distribuição e subtrai-se uma parcela da energia total disponível consumida na cadeia do hidrogênio. A preferência por aplicações onde o hidrogênio apresenta um maior valor agregado ou usos industriais é resultado do dilema do uso hidrogênio para fins energéticos. A Figura 8 ilustra algumas das possibilidades da incorporação do hidrogênio nos sistemas de energia, que serão abordadas na presente seção.

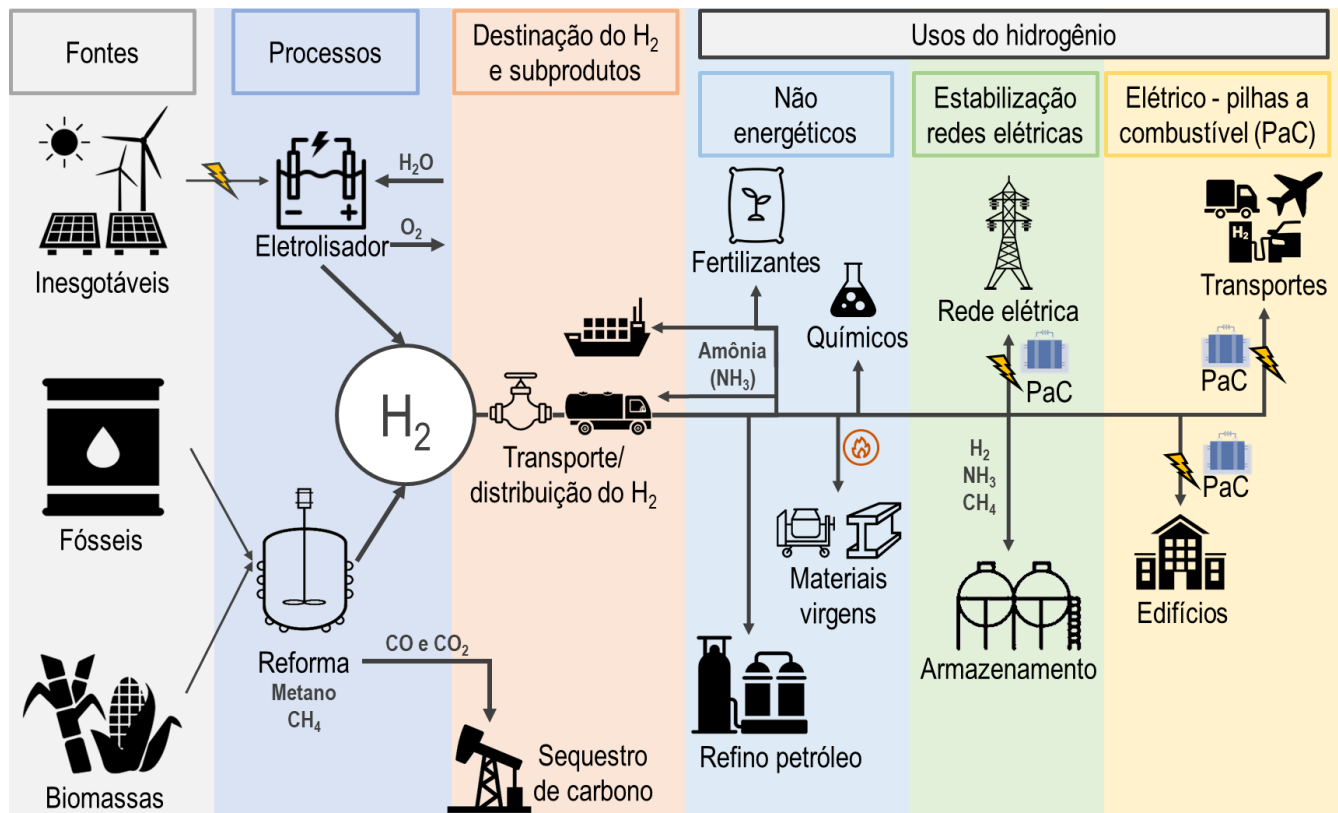


Figura 8 Esquema ilustrativo da produção aos usos do hidrogênio – elaboração própria

O hidrogênio²⁴ é o elemento químico mais abundante no universo, e, em seu estado molecular (H_2), apresenta-se como um gás inflamável com importantes propriedades para geração de energia.

²⁴ A presente tese irá utilizar o termo “hidrogênio” como um sinônimo para H_2

Comparado a maioria dos outros combustíveis, o hidrogênio apresenta um maior poder calorífico²⁵. Em termos de densidade energética, é importante enfatizar que, apesar de uma alta quantidade de energia por massa (MJ/kg), o hidrogênio apresenta uma densidade por volume (MJ/L) inferior a outros combustíveis, influenciando suas condições armazenamento (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020). Apesar da abundância do elemento o hidrogênio raramente se encontra disponível na natureza em seu estado elementar, pois reage facilmente com outros elementos. Existem diversos estudos que já detectaram a existência de reservas naturais de hidrogênio, essas ainda em processo de descobrimento (MIRANDA, 2019; ZGONNIK, 2020). Para explorar ao máximo seu uso energético, o hidrogênio precisa ser produzido, armazenado e transportado de forma a conservar suas propriedades até o seu uso final.

Os processos de obtenção do hidrogênio levam em consideração a sua matéria-prima (ex. hidrocarbonetos, água e biomassas), o tipo de energia necessária para sua obtenção (ex. térmica, elétrica, bioquímica) e os catalisadores envolvidos no processo (ex. níquel e perovskitas) (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020). A produção de hidrogênio pode ser categorizada em termos de suas emissões de CO₂. Quando a fonte primária é renovável, seja ela inesgotável como solar e eólica ou de biomassas de manejo ou rejeito, o hidrogênio é produzido sem acrescentar emissões de CO₂ à atmosfera, por isso são processos neutros em carbono²⁶. Já quando obtido através de combustíveis fósseis, o CO₂ emitido durante o processo é contabilizado na produção o hidrogênio. Destaca-se que o carbono emitido das fontes tanto de biomassa quanto de hidrocarbonetos pode ser capturado, em seguida armazenado no subsolo ou utilizado em outras atividades, como na injeção em poços para aproveitamento de petróleo de difícil extração (MOREIRA DOS SANTOS *et al.*, 2021). A captura de carbono (CC) emitido durante processos envolvendo biomassas representam uma redução do CO₂ total contido na atmosfera, ou seja, nesses casos a produção de hidrogênio sequestra o carbono atmosférico. No caso da captura na produção de hidrogênio através de hidrocarbonetos, os processos se tornam de baixa emissão.

A Figura 9 esquematiza diversos processos de produção de hidrogênio de acordo com suas fontes primárias. Os processos a partir de combustíveis fósseis são de duas naturezas distintas, a pirólise e os termoquímicos denominados reformas (reforma a vapor, oxidação parcial ou reforma auto térmica),

²⁵ O valor do poder calorífico inferior do H₂ é de 120 MJ/kg, comprado ao, por exemplo, da gasolina de 44 MJ/kg a 25°C (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020)

²⁶ O CO₂ emitido a partir dos processos de biomassa de rejeito e manejo já estava na atmosfera e foi capturado durante o processo de fotossíntese.

sendo os últimos os processos predominantes. As reformas alteram a composição molecular dos hidrocarbonetos reduzindo a proporção de carbono por hidrogênio. A reforma a vapor do metano é o processo mais desenvolvido e usado em larga escala para a produção de hidrogênio, atingindo uma eficiência de 74%-85%. Já a oxidação parcial é mais adequada para combustíveis com cadeia longa de carbono, como os resíduos de óleo ou carvão. Porém as temperaturas próximas aos 950°C com catalisadores e 1150-1315°C sem catalisadores exigem um altos investimentos (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

Diferentemente dos processos de reforma, na pirólise a única fonte de hidrogênio é o próprio hidrocarboneto, que é aquecido até sua decomposição térmica – hidrocarbonetos leves 50-200°C, e pesados 350°C. O processo não necessita de materiais específicos para o sequestro de carbono, fazendo da pirólise do gás natural uma alternativa mais ambientalmente amigável quando comparada a reforma do metano. O desafio está em manter o hidrogênio separado do restante da mistura, uma vez que as membranas utilizadas para esta função são sensíveis a temperaturas altas e necessitam de frequente descarbonização (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

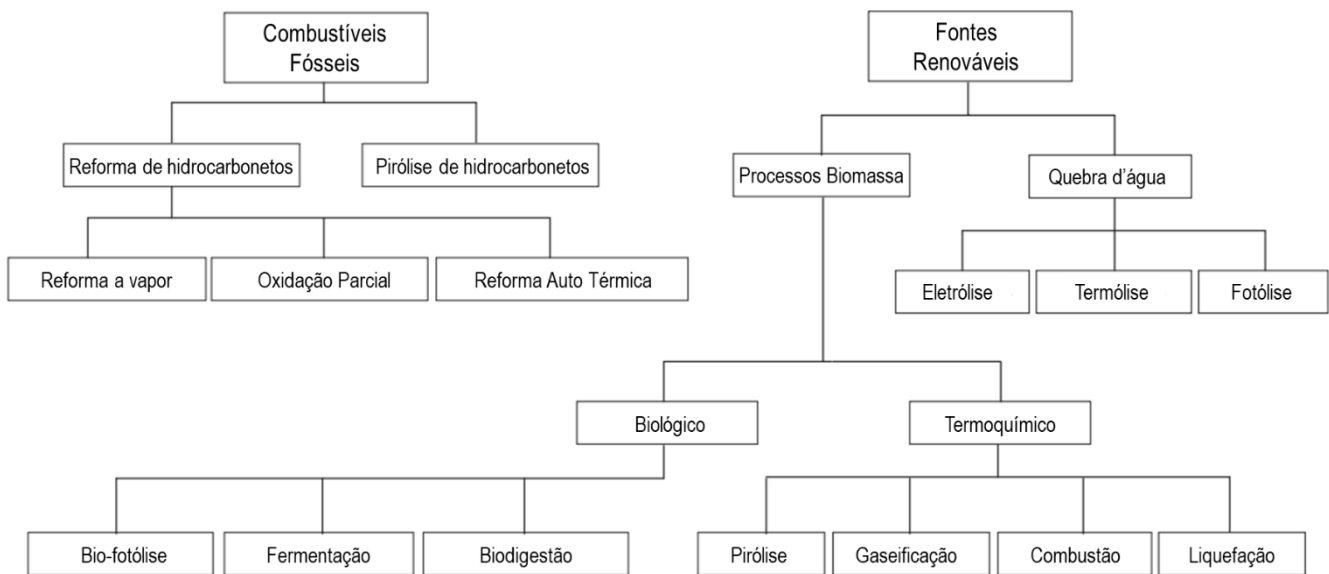


Figura 9 Processos de produção de hidrogênio. Adaptado de Nikoladis e Poullikkas (2017)

No contexto de mitigação de efeitos de mudanças climáticas, a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis é o principal alvo das ações políticas e regulatórias, sendo a água, a biomassa e a utilização de organismos suas principais matérias-primas. Os processos biológicos, tais como a

biofotólise e diferentes tipos de fermentação, são aqueles que utilizam bactérias ou algas para a produção de hidrogênio. A principal vantagem desses processos é o seu baixo custo, porém ainda precisam de melhorias nas taxas de rendimento de hidrogênio (ABDALLA *et al.*, 2018; NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

Outro processo biológico de baixo custo é a biodigestão, que consiste na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos²⁷ resultando na produção de um gás (biogás) rico em biometano (CH₄). A conversão do biogás em hidrogênio é realizada a partir de processos de reforma similares aos usados para o gás natural. O controle de impurezas, como o sulfeto de hidrogênio (SH₂), ainda apresenta desafios em termos de custo e durabilidade das membranas catalíticas usadas no processo de reforma (BAEYENS *et al.*, 2020; TAN *et al.*, 2020).

O uso de resíduos para o processo de produção de hidrogênio traz a vantagem de se utilizar uma matéria-prima abundante e de baixo custo, ampliando a cadeia de valor desses materiais. Porém, por apresentarem composição variada, há uma grande diversidade de impurezas que dificulta a produção de um hidrogênio puro. Os principais processos de natureza termoquímica são a pirólise e a gaseificação, esse último com eficiência superior ao de pirólise. A gaseificação de biomassa consiste em aquecer a matéria-prima até seu estado gasoso para que, em seguida, esse gás seja submetido a uma reforma, como a reforma a vapor. Diferentemente dos hidrocarbonetos, a gaseificação de compostos como a biomassa resulta na formação indesejada de alcatrão, que deve ser controlada para evitar danificação das membranas catalíticas para a produção de hidrogênio. Estudos recentes apontam o uso do etanol para produção de hidrogênio (GHASEMZADEH; JALILNEJAD; TILEBON, 2018), uma vez que este apresenta características tais como um bom conteúdo de hidrogênio, alta disponibilidade, não toxicidade, facilidade e segurança de armazenamento ou manuseio (HOU *et al.*, 2015). Para o caso brasileiro, o uso consistente do etanol para fins tanto de geração de energia quanto de transporte, favorece o uso dessa matéria-prima para a produção de hidrogênio (GHASEMZADEH; JALILNEJAD; TILEBON, 2018).

No que tange aos processos a partir da água, a eletrólise é o principal e consiste na dissociação molecular da água (H₂O) utilizando uma corrente elétrica em um eletrolisador para a produção de hidrogênio e oxigênio. Há três principais tipos de eletrolisadores, os alcalinos, os poliméricos e os de alta

²⁷ Exemplos são culturas, resíduos de culturas, madeira de florestas e resíduos florestais, grama, resíduos industriais e municipais, biogás animal, efluentes dentre outros.

temperatura, sendo os alcalinos os mais desenvolvidos (BOUDELLAL, 2018; DINCER; ACAR, 2015). O crescente destaque dado a essas tecnologias decorre da possibilidade de se utilizar eletricidade renovável oriunda de fontes intermitentes como eólica e solar. A eletrólise contribui para a integração de fontes renováveis nos sistemas de energia uma vez que permite a utilização do excedente de eletricidade para a produção de um vetor de energia com características de um combustível, o hidrogênio.

Outro processo de produção de hidrogênio através da água é a termólise, que consiste em dissociar molecular da água aquecendo a cerca de 2500°C, ou em ciclos termoquímicos de 550°C. Ciclos termoquímicos podem ser atingidos usando tecnologias de painéis solares concentrados, tornando o processo livre de emissões de carbono. A Tabela 1 resume as principais vantagens, desvantagens, eficiência, produção e custo de H₂ para os processos descritos.

Tabela 1 Características dos processos de produção de hidrogênio por matéria-prima

	Processo	Eficiência (%)	Vantagens	Desvantagens	Produção (tH ₂ /h)	Custo do H ₂ (\$/kg)
Hidrocarbonetos	Reforma a vapor (metano)	74-85	Tecnologia mais adiantada, infraestrutura existente	Dependência de combustíveis fósseis, subproduto de CO ₂	9,8-14,2 14,2 (CC*)	1,8-3,0 2,3 (CC)
	Oxidação parcial (Carvão)	60-75	Tecnologia consolidada, infraestrutura existente		10,6-32,1	0,8-1,3 0,9-1,7 (CC)
Biomassa	Pirolise	35-50	Neutra em CO ₂ , abundante e matéria-prima barata	Formação de alcatrão, impurezas da matéria-prima e variação no conteúdo de H ₂ (disponibilidade sazonal)	0,11-30,4	1,0-2,0
	Gasificação		Neutra em CO ₂ , abundante e matéria-prima barata		0,08-8,1	1,0-2,0
Água	Eletrólise	40-60	Sem emissão de CO ₂ usando fontes renováveis, facilita integração das renováveis, recurso abundante, tecnologia comprovada	Baixa eficiência geral, altos custos de capital	Eólica 0,04 Solar 0,06-14,8	Eólica 5,6-7,5 Solar 6,1-9,0
	Termólise	20-45	Sem emissão de CO ₂ usando fontes renováveis, matéria-prima abundante		Toxicidade de elementos, problemas corrosivos, altos custos de capital	

*CC: contabilizando a captura de carbono

Fonte: adaptado de Bayens et. al (2020) e Nikoladis, Poullikkas (2017)

Pela Tabela 1 é possível perceber que os processos de produção de hidrogênio através de hidrocarbonetos são os preferíveis em termos de custo por quilo de hidrogênio. Entretanto, tanto por dependerem de combustíveis fósseis quanto por emitirem CO₂, esses processos tem recebido

gradativamente menos financiamentos de governos no contexto do aquecimento global. A utilização da biomassa de rejeito também se destaca pelo seu baixo custo de produção, embora seus processos sejam menos praticados que as reformas dos hidrocarbonetos²⁸. Além da abundância de matéria-prima barata que contribui para o baixo custo de produção de hidrogênio, os processos de biomassa apresentam uma produção de H₂/h comparáveis aos dos hidrocarbonetos. Por fim, os processos que utilizam a água como matéria-prima apresentam grandes vantagens quando associados ao excedente de eletricidade das fontes renováveis. Porém, a baixa eficiência dos atuais eletrolisadores e os altos custos de capital envolvidos são os obstáculos à competitividade da tecnologia e a escala de produção de hidrogênio. Outro desafio está em melhorar a eficiência de turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos para reduzir os custos da própria eletricidade usada na produção do hidrogênio.

Os processos de produção de hidrogênio apresentam características que os tornam mais ou menos preferíveis por diferentes setores industriais. Por exemplo, os processos de produção de hidrogênio utilizando hidrocarbonetos tem sido uma alternativa buscada por indústrias do petróleo e gás e de carvão para reduzirem seus riscos no cenário de intensificação de regulamentações para emissões de carbono. Esses processos também apresentam perspectivas favoráveis em localidades com abundância de recursos fósseis, como no caso da Rússia, Canadá e países do Oriente Médio (HYDROGEN COUNCIL, 2020). Diferentemente, outro impulso para o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio voltadas para processos de eletrólise está diretamente relacionado com o setor elétrico, que expande suas instalações de fontes renováveis, tais como eólica e solar. Empresas desse setor visam a eletrólise para superar os obstáculos da intermitência e do balanceamento de oferta e demanda das redes elétricas. O armazenamento de energia permite transferir o excesso de eletricidade em um período para outro em que haja baixa geração, melhorando a eficiência total dos sistemas de energia operando com fontes intermitentes de energia (CASTAGNETO GISSEY *et al.*, 2019).

Existem quatro principais alternativas tecnológicas para o armazenamento da eletricidade, sendo sempre necessário converter a eletricidade em outra forma de energia a ser utilizada em um período posterior. A primeira alternativa é a central hidrelétrica reversível (CHR)²⁹, caracterizada pela conversão da eletricidade em energia potencial através do bombeamento da água para um reservatório em

²⁸ É importante lembrar que a produção de hidrogênio cativo nas refinarias a partir reforma do gás natural é amplamente utilizada para o refino do petróleo.

²⁹ Traduzido de Pumped hydro storage

determinada altitude. A segunda se refere as tecnologias de compressão de ar, sendo a eletricidade utilizada para comprimir o ar que é armazenado em cavidades naturais. Posteriormente, utiliza-se o ar comprimido para rotar turbinas e gerar eletricidade. A terceira forma de armazenamento é através de baterias pela conversão da eletricidade em energia química. A quarta é a utilização da eletricidade para a produção do hidrogênio, preferencialmente através da eletrólise (NELSON, LAURA *et al.*, 2020).

Além das diferenças entre os aspectos funcionais, as quatro alternativas para armazenamento também se diferem em termos da capacidade de armazenamento e do tempo para descarga, conforme mostrado na

Figura 10.

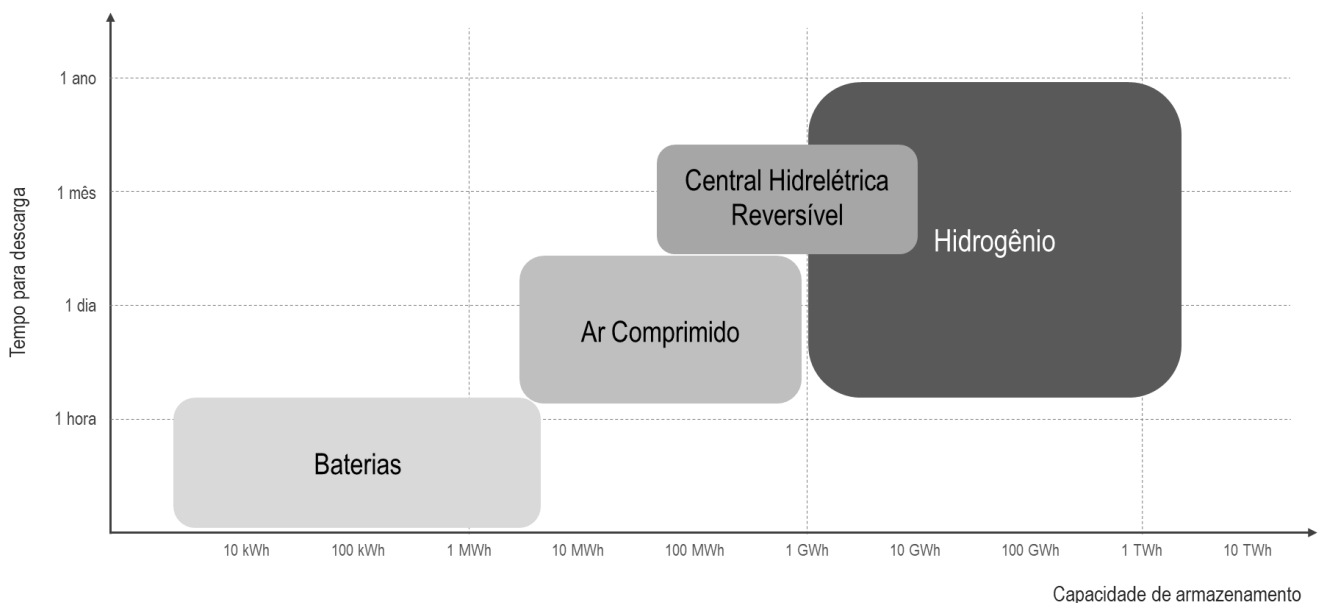


Figura 10 Alternativas para armazenamento de energia. Adaptado de Boudellal (2018) e Nelson *et. al.* (2020)

Pela

Figura 10 é possível perceber que o de tempo de descarga e capacidade de armazenamento de cada tecnologia são importantes diferenciações para suas possíveis aplicações. No que diz respeito ao armazenamento de larga escala, o ar comprimido, a CHR e o hidrogênio são as principais alternativas, sendo baterias mais apropriadas para escalas menores que 10MWh. Além disto, em termos de capacidade de armazenamento, as tecnologias de bateria e CHR apresentam um limite máximo correspondente a

capacidade instalada, ou seja, uma vez atingido a carga máxima, precisa-se expandir as instalações para aumentar o armazenamento, sendo essa expansão de alto custo (BOUDELLAL, 2018).

As quatro alternativas de armazenamento apresentam-se em estágio de maturidade tecnológico distintos. As CHR, ao mesmo tempo que são as alternativas mais maduras, usadas desde 1920, quando associadas à geração de energia eólica, encontram-se ainda em estágio de demonstração; ou até mesmo em estágio de pesquisa e desenvolvimento como no caso do uso de minas de carvão abandonadas como reservatório inferior e lago de superfície (BOUDELLAL, 2018). Alternativas de armazenamento utilizando ar comprimido e baterias (diversos tipos) também se encontram em estágio de maturidade comercial. A Figura 11 apresenta alternativas de armazenamento de energia e seus respectivos graus de maturidade.

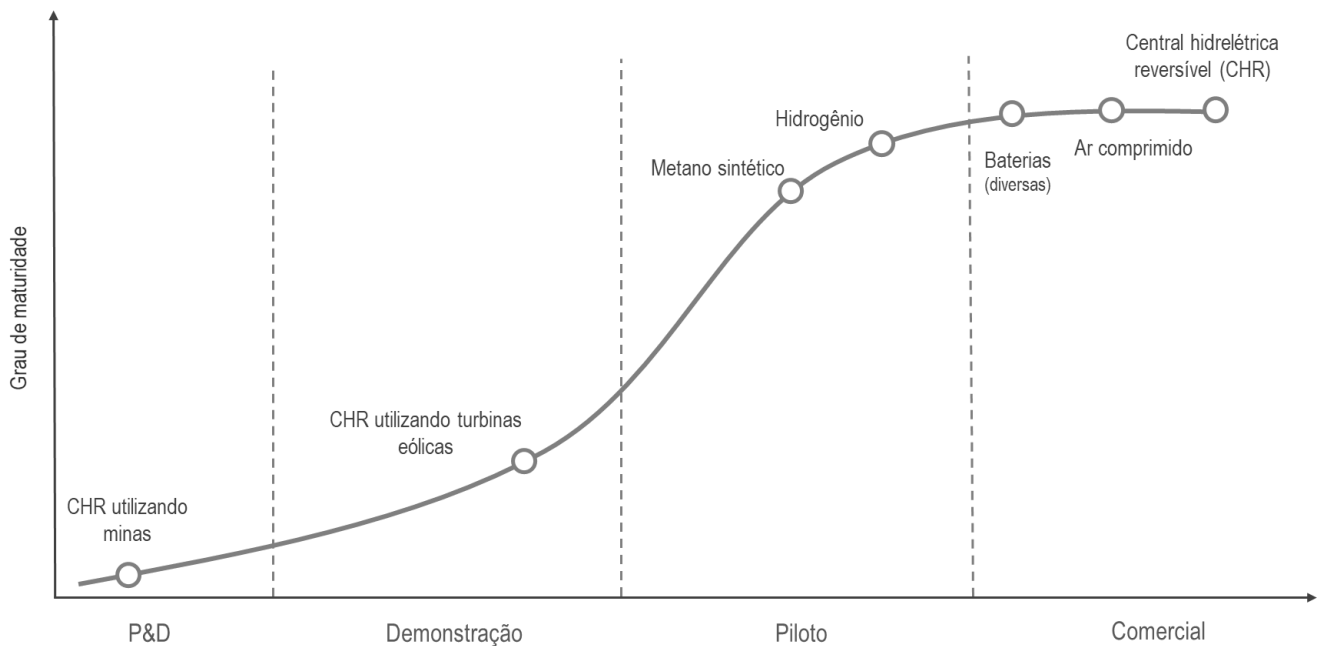


Figura 11 Maturidade tecnológica de alternativas para armazenamento de energia. Fonte: Boudellal (2018)

O hidrogênio, assim como o metano sintético, é uma alternativa para o armazenamento que ainda não atingiu o estágio comercial. Em ambos os casos, as alternativas utilizam o excedente de eletricidade para a obtenção de um gás, seja o metano ou o hidrogênio. Esse tipo de processo de armazenamento é denominado “*Power-to-gas*” e tem ganhado um importante foco no contexto da geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Uma vantagem desse tipo de processo é a viabilização de um outro vetor de energia, como o hidrogênio, com propriedades distintas da eletricidade em termos de armazenamento

e mais semelhantes ao de uma estrutura de armazenamento de gás. A Figura 12 exemplifica um funcionamento do processo “Power-to-gas”.

A baixa densidade do hidrogênio é o principal gargalo para sua armazenagem em tanques ou containers, uma vez 1 kg de hidrogênio ocupa um volume de 11 m³ nas CNTP. Assim, para seu uso efetivo ele precisa ser pressurizado, em estado gasoso, liquefeito ou adsorvido em materiais sólidos. A principal forma de se armazenar e transportar o hidrogênio é em cilindros no seu estado gasoso (ABDALLA *et al.*, 2018), uma vez que a temperatura de ebulição do hidrogênio é muito baixa (-252,87°C), dificultando a sua obtenção em estado liquefeito. Entretanto, para a aplicações em automóveis, os tanques de combustível a hidrogênio utilizam uma alta pressurização e o hidrogênio se encontra em estado liquefeito.

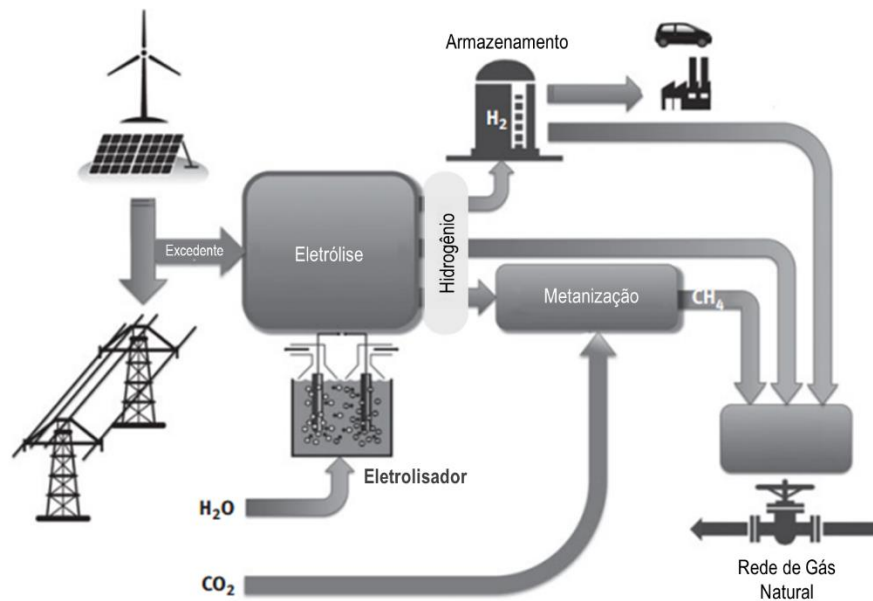


Figura 12 Esquema ilustrativo do funcionamento do "Power-to-gas". Fonte: Boudellal (2018)

É importante ressaltar que, por se tratar de um gás inflamável, a produção, armazenagem e uso do hidrogênio apresenta um aspecto normativo específico, como outros combustíveis. Normas e padrões buscam definir e homogeneizar as características mínimas necessárias para o uso final seguro do hidrogênio, tal como o grau de pureza e estado físico. Alguns contaminantes limitados de acordo com a aplicação são, dentre outros, os compostos de enxofre, a água, o oxigênio, o monóxido e dióxido de carbono, o nitrogênio, o argônio, o hélio, a amônia, o ácido fórmico e os formaldeídos (ISO14687-3,

2014). Por exemplo, para o uso em combustão interna no setor de transporte, o hidrogênio deve estar preferencialmente em estado gasoso e apresentar uma pureza equivalente a 98,00%. Já para aplicações de transporte envolvendo pilhas a combustível, o hidrogênio, também gasoso, deve apresentar um grau de pureza de 99,97%. Por outro lado, para aplicações estacionárias requer-se uma pureza de 50,00% (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020).

O uso do hidrogênio para fins energéticos pode ser feito a partir de sua combustão. A combustão do hidrogênio puro é especialmente interessante considerando sua adição em misturas de combustíveis fósseis, sendo uma forma de redução de emissões de CO₂ no curto-médio prazo (SINIGAGLIA *et al.*, 2017). Alternativamente, as pilhas a combustível são dispositivos (ou equipamentos) elétricos que convertem continuamente a energia proveniente do movimento de elétrons liberados durante uma reação eletroquímica de um combustível (como o hidrogênio) em eletricidade. Elas podem ser fabricadas usando diferentes materiais e tecnologias, que as classificam em diferentes tipos, com densidade de potência, temperatura operacional e eficiência distintas (KIRUBAKARAN; JAIN; NEMA, 2009), conforme Tabela 2.

Os efeitos de sinergia provenientes da combinação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível são obtidos devido ao fato das pilhas a combustível serem a forma mais eficiente de se converter a energia química do hidrogênio em eletricidade. É importante ressaltar que as diferentes combinações entre matéria-prima e processo de produção de hidrogênio apresentam diferentes impurezas que precisam ser tratadas de acordo com o tipo de pilha a combustível, uma vez que essas são sensíveis a diferentes impurezas. De uma forma geral, níveis mais altos de pureza do hidrogênio requerem processos dispendiosos para sua produção, sendo a dificuldade de purificação cada vez maior quanto mais próximo aos 100%. Conforme indicado na Tabela 2, a escolha do tipo de pilha possui implicações para a produção e purificação do hidrogênio, influenciando, portanto, as condições de contorno para o restante da cadeia.

Tabela 2 Tipos de pilha a combustível e suas características

Tipo	Membrana Polimérica (PEM)	Alcalina (AFC)	Ácido Fosfórico (PAFC)	Carbonato Fundido (MCFC)	Óxido Sólido (SOFC)
Eletrólito	Ácido perfluorossulfônico	Hidróxido de potássio aquoso em uma matriz porosa ou membrana de polímero alcalino	Hidróxido de potássio aquoso em uma matriz porosa ou uma membrana polimérica	Carbonatos de lítio, sódio e / ou potássio fundidos, em matriz porosa	Zircônia estabilizada com ítria
T	<120°C	<100°C	150-200°C	600-700°C	500-1000°C
Potência	<1kW-100kW	1-100kW	5-400kW	300kW -3MW	1kW-2MW
Eficiência	60% H ₂ ou 40% reforma	60%	40%	50%	60%
Aplicações	Backup, energia portátil, geração distribuída, transporte	Militar, espacial, backup e transporte	Geração distribuída	Utilidade elétrica e geração distribuída	Unidade auxiliar de potência, utilidade elétrica e geração distribuída
Vantagens	Redução da corrosão e gerenciamento de eletrólitos, baixa temperatura, inicialização rápida	Materiais mais estáveis, componentes de menor custo, baixa temperatura, inicialização rápida	Também fornece calor, aumento da tolerância às impurezas do combustível	Alta eficiência, flexibilidade de combustível, fornece calor	Alta eficiência, flexibilidade de combustível, eletrólito sólido, fornece calor
Desafios	Catalisadores caros, sensíveis às impurezas do combustível	Sensível ao CO ₂ , gerenciamento de eletrólitos (aquoso), condutividade de eletrólitos (polímero)	Catalisadores caros, longo demora na inicialização, sensibilidade ao enxofre	Corrosão e quebra de componentes, demora na inicialização, baixa densidade de energia	Corrosão e decomposição dos componentes, demora na inicialização, número limitado de paradas

Fonte: DOE (2016)

A pilha a combustível é o principal componente de um sistema de pilhas a combustível, que compreende outros componentes que permitem a sua operação. Uma unidade de pilha a combustível, denominada na presente tese por célula, é composta por três partes: um ânodo, um cátodo e um eletrólito. Várias dessas células são empilhadas para formar as pilhas - um dispositivo eletroquímico de potência modular. Em seguida, essa pilha é integrada a outros componentes completando o sistema necessário para sua operacionalização. Esses componentes são, por exemplo, bombas, trocadores de calor,

conversores e reformadores, e variam de acordo com as especificações do tipo de pilha, das suas aplicações e do combustível utilizado (BEHLING, 2013). Figura 13 ilustra um esquema de um sistema hipotético contendo uma pilha a combustível.

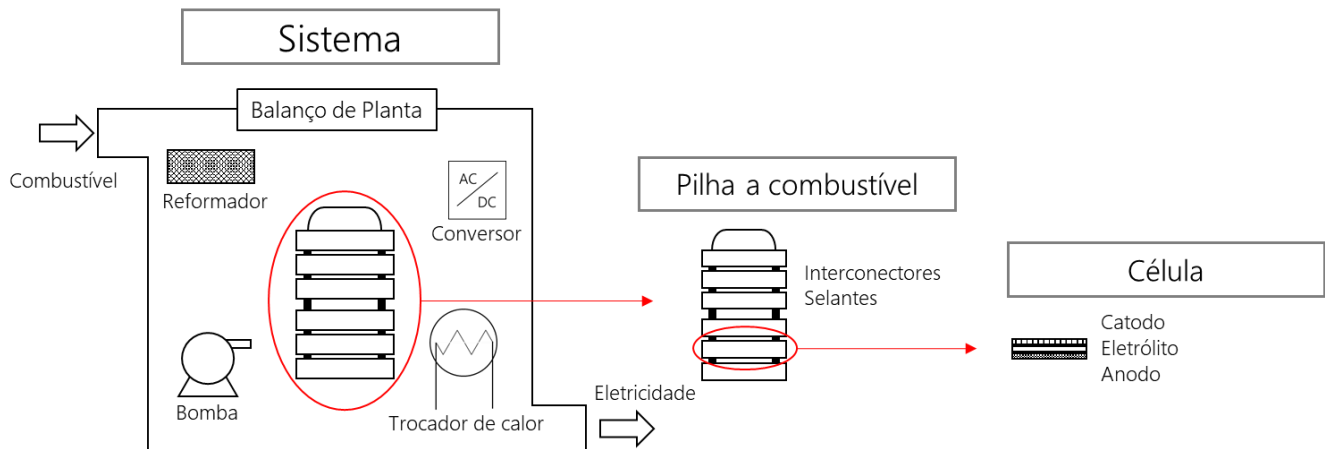


Figura 13 Exemplificação de um sistema de pilha a combustível hipotético. Elaboração própria

O design final do sistema constitui-se da arquitetura final contendo todos os componentes integrados. Esses componentes podem ser hierarquizados de acordo com a priorização da sua importância para o funcionamento do sistema, onde os componentes mais centrais ocupam níveis mais altos de hierarquia e os periféricos os níveis mais baixos. Para o design, componentes centrais são definidos de forma prioritária, e em seguida os demais componentes periféricos. Figura 14 apresenta a hierarquia de componentes para o caso de um sistema composto por pilha a combustível.

Conforme mostrado na Figura 14, a escolha do tipo de pilha a combustível depende tanto do combustível disponível quanto da sua aplicação. Refere-se como variações do combustível diferentes níveis de pureza e os contaminantes do hidrogênio. Uma vez definido o tipo de pilha, é possível determinar outros componentes do subsistema, iniciando pelos componentes específicos da célula e empilhamento, e em seguida os componentes do balanço de planta. Mudanças na aplicação e no combustível afetam a escolha da maior parte dos componentes, incluindo a própria pilha a combustível. Os componentes dos sistemas de pilha a combustível são heterogêneos, o que aumenta a complexidade

técnica para o seu design e exige uma ampla base de conhecimento, desde eletroquímica a engenharias mecânica e elétrica, ciências de materiais e conhecimento de microeletrônica.

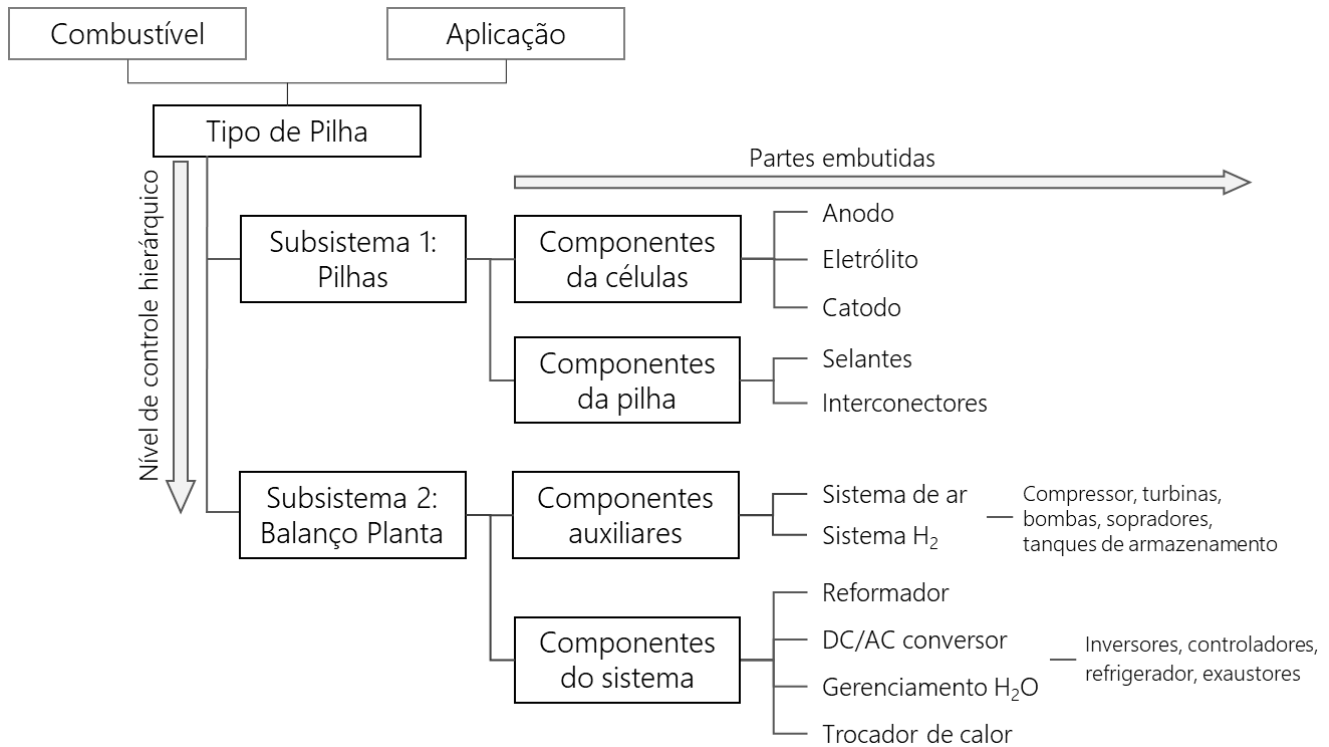


Figura 14 Hierarquia de componentes de um sistema composto por pilha a combustível. Elaboração própria

A grande variedade de designs possíveis para os sistemas de pilha a combustível ao mesmo tempo que garante aplicações em nichos distintos, incluindo aplicações estacionárias e de transporte, adiciona complexidade e dispersa esforços para o desenvolvimento da tecnologia. Nesse sentido, a alta variedade de design está na contramão da redução das possibilidades tecnológicas necessária para a difusão das tecnologias. Ademais, pilhas a combustível e o hidrogênio são como bens complementares, caracterizados por serem utilizadas simultaneamente e com uma proporção relativa fixa³⁰. A complementariedade restringe o interesse no desenvolvimento isolado desses dois bens, dificultando o estabelecimento de uma hierarquia de design entre pilhas a combustível e hidrogênio. É o

³⁰Por exemplo, para uma demanda específica de eletricidade utilizando essas tecnologias, vai haver uma relação otimizável entre as quantidades de pilhas a combustível (e suas diferentes capacidades de geração) e de hidrogênio.

desenvolvimento combinado de ambos, hidrogênio e pilhas a combustível, que torna essas tecnologias competitivas em relação a alternativas concorrentes em diferentes aplicações.

A dimensão do universo tecnológico que embarca o uso energético do hidrogênio torna complexa a compreensão da sua viabilidade econômica em setores e nichos específicos. Como a rentabilização do uso energético do hidrogênio está atrelada a uma alta escala de produção (HYDROGEN COUNCIL, 2020; IEA, 2019a; WORLD ENERGY COUNCIL, 2019), a multiplicidade de atores impulsionando a implementação de tecnologias e infraestrutura beneficia o desenvolvimento das tecnologias como um todo por apresentar sinergias entre os setores interessados. Contudo, para cada segmento, o hidrogênio apresenta condições de competição muito distintas, não apenas pelo fato de concorrer com soluções tecnológicas específicas de cada aplicação, mas também por cada segmento apresentar diferentes condições e preços de mercado. Nesse sentido, a Figura 15 prospecta a competitividade das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em aplicações em diferentes segmentos comparando-as a outras tecnologias concorrentes de baixo carbono.

Pela Figura 15 é possível identificar que para as aplicações existentes, o hidrogênio já é competitivo, com exceção do seu uso para produção de aço. Até 2030 aplicações no segmento de transporte envolvendo longa distância ou carga pesada serão competitivas. Nesse setor, os carros urbanos compactos não estão previstos de serem competitivos até 2050, devido ao avanço de outras tecnologias como carros movidos a baterias. Para o segmento de aquecimento e eletricidade para edifícios, espera-se que todas as novas aplicações sejam competitivas em até meados de 2035, e para o caso da indústria, as aplicações de geração de backup e turbinas de ciclo simples são as mais promissoras no curto e médio prazo 2050 (HYDROGEN COUNCIL, 2020).

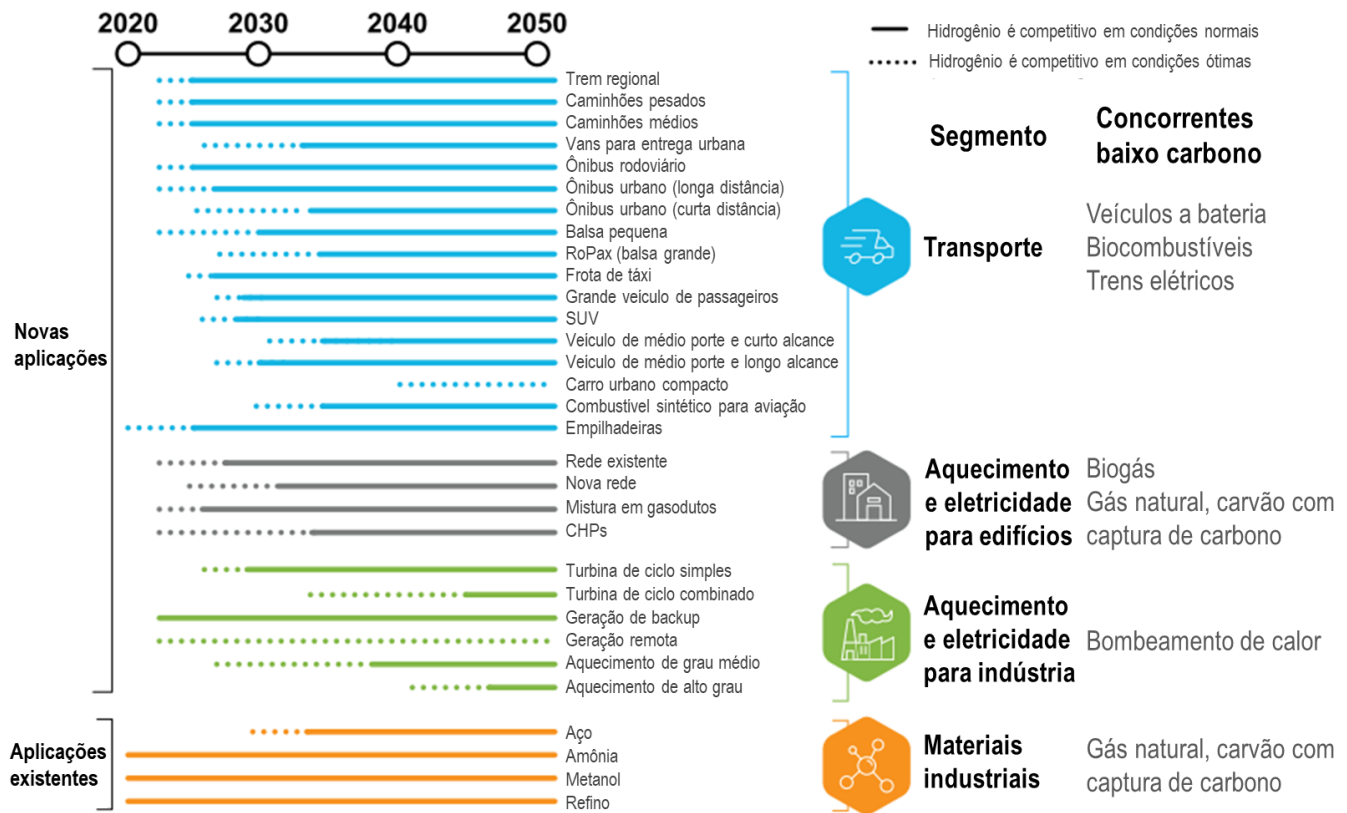


Figura 15 Competitividade de custos de aplicações de hidrogênio. Traduzido de Hydrogen Council (2020)

É importante ponderar que a competitividade das tecnologias do hidrogênio em suas variadas aplicações está relacionada com condições locais que podem favorecê-las ou não. Por exemplo, condições para produção de hidrogênio eletrolítico (utilizando eletrólise) tende a apresentar um menor custo em regiões abundantes em sol e/ou vento. Da mesma forma, a competitividade do uso do hidrogênio e pilhas a combustível para aplicações em trens regionais é mais favorecida em regiões onde já existe uma infraestrutura ferroviária. Assim, cabe a cada região estabelecer suas próprias estratégias de desenvolvimento e implementação de tecnologias de abertura de mercado que condizem com as características de suas matrizes energéticas e da sua demanda e oferta de serviços de energia.

Por fim, vale a pena ressaltar que as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível ainda estão em estágios iniciais de implementação e comercialização, mas espera-se uma rápida ascensão do desenvolvimento da estrutura necessária para viabilizar o uso do hidrogênio até 2040 (HYDROGEN COUNCIL, 2021). A Tabela 3 apresenta informações sobre as unidades de veículos e estações de

abastecimento e capacidade em geração estacionária nos países membros da International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE). É possível observar que países como Estados Unidos, Coreia do Sul, Japão, China, Alemanha e França são os mais adiantados na implementação das tecnologias.

Tabela 3 Avanço das tecnologias do hidrogênio nos países membros da IPHE

	Veículos (unid.)		Estações de abastecimento (unid.)	Geração Estacionária
	Carros	Ônibus		
Canadá	>70		9	-
Noruega	154	5	6	-
Holanda	280		5	1MW
Alemanha	951	79	90	>800 unidades backup
Estados Unidos	9000		60	500MW
Reino Unido	156	20	18	-
Suíça	93		4	-
China	6178		43	50 unidades backup
Costa Rica	4	1	1	
França	375	21	41	
Itália	20	10	3	100 PaC
Áustria	41		5	
Chile				500 KW eletrolisadores
Brasil	-	4	-	
Índia	15	10	2	
África do Sul	3		1	313 PaC
Japão	3757		130	
Coreia do Sul	8911	15	47	534MW
Austrália	20		2	
TOTAIS	1GW instalados usando Pilha a combustível (PaC)			
	>30000 Veículos			
	>470 Estações de abastecimento			

Fonte: IPHE (2021)

3. METODOLOGIA

3.1. Situando o estudo

O presente trabalho tem como objetivo compreender *como a dinâmica dos paradigmas tecno-econômicos influenciou o design de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível*. Mais especificamente o trabalho explora essa dinâmica prioritariamente através do atual paradigma tecno-econômico da Era da Informação e Comunicação. O design dominante de uma tecnologia é o resultado de um processo intencional no qual os agentes que dele participam ajustam as características de uma tecnologia para adequar-se a solução de um problema. O presente trabalho assume que a convergência para um ou poucos designs é fundamental para se atingir maturidade tecnológica (ABERNATHY; UTTERBACK, 1978; CLARK, 1985; SUAREZ, 2004). Esse processo de ajuste faz parte do desenvolvimento de tecnologias. É importante ressaltar que o nível de análise do design de tecnologias é menos amplo que o do desenvolvimento, uma vez que o design tecnológico contempla majoritariamente os aspectos técnico-funcionais dos artefatos, enquanto o estudo do desenvolvimento de tecnologias engloba também suas dimensões sociais, econômicas, políticas ou outras não técnicas.

A estratégia metodológica adotada no presente trabalho foi o estudo de caso através de uma pesquisa qualitativa. O estudo de caso é apropriado para fornecer descrição e análise aprofundadas sobre um caso (CRESWELL, 2007) e para responder a questões do tipo “como” e “por que” focalizando acontecimentos contemporâneos nos quais não se exige um controle sobre os eventos (como no caso de experimentos) (YIN, 2001). As principais fontes de evidências primárias foram entrevistas semiestruturadas, virtuais e presenciais, com diferentes agentes que atuam no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio ou de pilhas a combustível em uma escala global. Foram também consideradas, ainda que em menor escala, outras fontes primárias, como observação em campo durante visitas e congressos, e fontes secundárias, como artigos acadêmicos, informações disponíveis em veículos noticiários e páginas na internet disponibilizadas por organizações estudadas. Os dados foram tratados utilizando o método de análise de conteúdo (BARDIN, 2011) e reportados através de narrativas e outras sistematizações como quadros.

Conforme apresentado no referencial teórico, há várias pesquisas abordando formas de interação entre o desenvolvimento de tecnologias e os paradigmas tecno-econômicos. Essas pesquisas são majoritariamente análises de natureza econômica que recorrem a uma estratégia de pesquisa histórica

sustentada por dados quantitativos econômicos (ex. variações no PIB, taxa de investimento e salário e mudanças tecnológicas mensuradas a partir de análise de patentes e artigos.). São, portanto, em sua maioria, estudos *ex post* em que a resultante é o ponto de partida da investigação. A resultante deriva de um conjunto de acontecimentos que caracterizam um resultado que depende tanto da sua ocorrência quanto da racionalidade aplicada a sua explicação. Por exemplo, a revolução industrial britânica dos séculos XVIII e XIX só se formaliza como uma resultante após uma intencionalidade em concatenar fragmentos históricos e econômicos que a caracteriza como tal. Questiona-se nessas pesquisas quais elementos suscitaram essa resultante e como se construiu a relação desses elementos. Busca-se um grau de abstração que garanta a generalização e equiparação com fenômenos similares em tempos e espaços distintos e, para isso, requer-se algum grau de objetividade. Os resultados dessas pesquisas são sistematizáveis já que o grau de abstração permite observar uma recorrência lógica, muitas vezes formalizada em um modelo teórico, em outras investigações. Por exemplo, uma vez sistematizadas diversas revoluções tecno-econômicas anteriores, emerge um modelo abstrato a partir de uma lógica comum, tornando possível replicar o mesmo modelo. A aplicação dessa metodologia para pesquisas de eventos contemporâneos é limitada uma vez que a resultante é desconhecida e as relações causais do modelo não podem ser antecipadas, porque ainda estão em andamento.

O que se propõem metodologicamente neste trabalho é diferente permitindo novas explanações acerca do tema aqui explorado. O presente trabalho é uma pesquisa qualitativa na qual utiliza-se o estudo de caso como estratégia de pesquisa, sendo as análises no nível das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, entendidas como um único grupo de tecnologias complementares. Diferentemente de outros trabalhos encontrados na literatura, não se recorre a uma estratégia de pesquisa histórica, apesar de se beneficiar de dados secundários de estudos que utilizaram essa metodologia. Não se trata de uma investigação *a posteriori*, onde o foco da pesquisa é construir uma causalidade econômica entre os acontecimentos, mas sim de uma investigação baseada na percepção dos agentes que participam contemporaneamente desse desenvolvimento no qual todos desconhecem os futuros desdobramentos das suas atividades para a efetiva implementação em larga escala dessas tecnologias. Ademais, a presente pesquisa não parte predominantemente de uma racionalidade economicamente fundamentada, mas sim de atividades de design relacionadas às tecnologias estudadas, para daí derivar implicações econômicas.

Alternativamente, a presente pesquisa se insere em outro paradigma metodológico (CRESWELL, 2007). Trata-se de uma investigação indutiva na qual se busca encontrar padrões entre as percepções dos

participantes para assim elevar o grau de abstração e generalização. Adota-se uma postura subjetivista e interpretativista na qual se descarta a possibilidade de um resultado único, mas se aceita a de um resultado fundamentado em feixes temporais de perspectivas encontradas a partir das entidades participantes do desenvolvimento e interpretação da pesquisadora.

A pesquisa foi conduzida a partir de duas lentes teóricas. A primeira é a de paradigmas tecno-econômicos na qual Perez (2002) delimita os intervalos temporais da instauração, inflexão e maturidade das revoluções tecnológicas. Segundo Perez (2002), o atual paradigma tecno-econômico tem o seu “big-bang” em 1971 com a invenção do microprocessador da Intel em Santa Barbara e a partir dessa data o paradigma passa a se instalar. O paradigma tecno-econômico começa a atingir seu ponto de inflexão a partir dos anos 2000, mais fortemente em 2008, com sucessivas crises econômicas conforme mostrado na Figura 2. Espera-se que a partir desse período o paradigma entre em seu estágio de desenvolvimento, o qual será marcado por uma prevalência de políticas conduzidas por uma lógica “verde” (AHMAD; NEUWEG; STERN, 2019; PEREZ, 2013, 2019; SEMIENIUK; MAZZUCATO, 2019). Dessa análise emerge a primeira suposição da pesquisa que investiga alterações nas trajetórias tecnológicas nos últimos decênios do século XX e a partir de meados dos anos 2000.

A segunda lente teórica é a de design dominantes, que fornece o instrumental analítico dos dados. Os participantes da pesquisa foram considerados agentes envolvidos no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível que realizam atividades de problema-solução cujo objetivo é promover o ajuste entre um portfólio de tecnologias disponíveis e o problema que essas solucionam. Assim, os dados obtidos através das entrevistas foram organizados sob a perspectiva de que os agentes (entrevistados) traziam consigo a sua percepção sobre o problema e a solução. É importante observar que nem sempre as percepções apresentadas remetiam a aspectos técnicos *a priori*, como nos casos dos agentes formadores de política pública. Contudo, os resultados foram organizados de maneira a focar nos desdobramentos e implicações para o design das tecnologias.

A partir das duas lentes teóricas apresentadas construiu-se um modelo teórico que sintetiza a estratégia da presente pesquisa, conforme apresentado na Figura 16. O trabalho investiga como a dinâmica dos paradigmas tecno-econômicos influencia o design das tecnologias estudadas propondo duas suposições. A primeira é que os paradigmas tecno-econômicos influenciam o acervo de opções tecnológicas consideradas como possíveis soluções para as atividades de design (lado direito). A segunda

suposição é de que eles influenciam o contexto no qual os agentes constroem o problema a ser considerado na atividade (lado esquerdo).

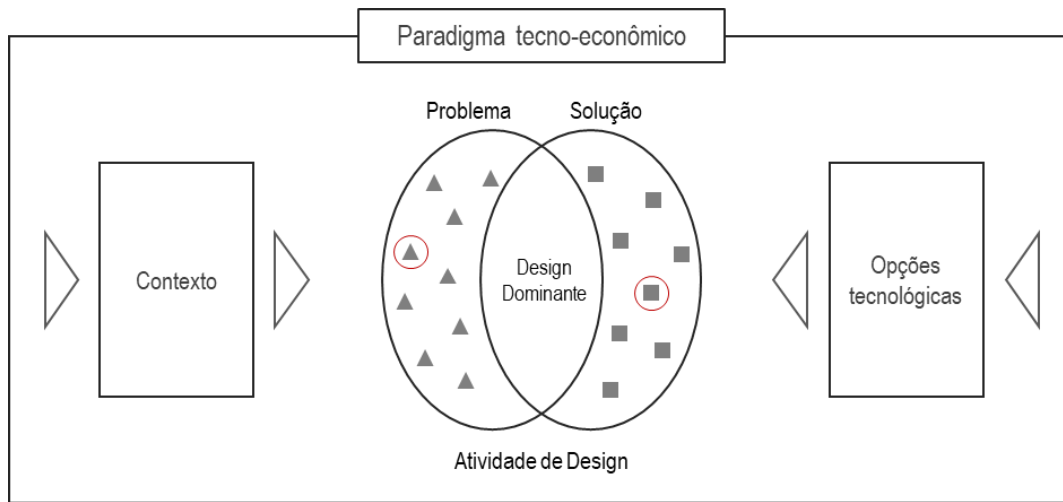


Figura 16 Modelo teórico implícito na pesquisa. Elaboração própria

As lentes teóricas apresentadas não estão conectadas na literatura. Isto é parcialmente justificado pelas divergências metodológicas e pelos seus diferentes níveis de agregação dos dois campos de pesquisa que provocam distinções importantes nas escolhas dos objetos de estudo de cada teoria. A delimitação metodológica deste presente trabalho buscou equacionar essas questões escolhendo um objeto de estudo que atendesse a três requisitos: i) partir de um nível micro de análise, como no caso de uma tecnologia; ii) apresentar uma longa trajetória de desenvolvimento que perpassasse mais de um paradigma tecno-econômico e iii) não ter um design dominante estabelecido dentre as opções tecnológicas. Essas três características garantem que, embora o estudo parta de um nível de análise micro, a longa trajetória tecnológica permite uma percepção histórica da influência dos paradigmas tecno-econômicos no design dessas tecnologias e, a falta de um design dominante elimina implicações da existência de uma resultante para a análise, levando os participantes a terem uma percepção das suas atividades de problema-solução independente do design dominante.

A partir desse objetivo são colocadas as seguintes questões de pesquisa: os participantes perceberam alguma mudança na trajetória tecnológica dada a evolução do estágio do atual paradigma tecno-econômico? Como? Como outras tecnologias influenciam o design das tecnologias de hidrogênio e pilhas a combustível? A força do paradigma é a mesma em diferentes países? Isto afeta o design

tecnológico? Como a difusão do paradigma afeta o design tecnológico ao longo do tempo e espaço no caso das tecnologias estudadas?

3.2. O contexto do caso estudado

O caso estudado nesta pesquisa é o design das tecnologias do hidrogênio e de pilhas a ao longo do paradigma tecno-econômico da Informação e Comunicação iniciado nos anos 1970.

Embora o desenvolvimento dessas tecnologias seja anterior ao período em análise, busca-se aqui compreender como o atual paradigma influencia esse desenvolvimento a partir de alterações nas atividades de design. É importante ressaltar que isto não implica em reduzir a importância do desenvolvimento das tecnologias em outros períodos. Pelo contrário, o presente trabalho assume que o desenvolvimento de tecnologias é também intrínseco às suas trajetórias.

Em termos históricos, poder-se-ia escolher como o início do desenvolvimento das tecnologias em estudo o ano de 1766, quando Henry Cavendish descobriu o hidrogênio ao perceber que as bolhas formadas a partir da reação do ferro com o ácido sulfúrico era um gás diferente de outros com uma propriedade singular– ao ser queimado formava água. Contudo, foi somente após a descoberta do fenômeno eletroquímico das pilhas a combustível por Willian Grove em 1839 que se atribui ao hidrogênio o uso para fins de geração de eletricidade. Sendo assim, prefere-se datar o início do desenvolvimento tecnológico a partir desse marco para a presente pesquisa.

A longa trajetória desde o século XIX é acompanhada por mudanças nas atividades de design ao longo do tempo uma vez que se alterou tanto os problemas (muitas vezes solucionados) quanto o conjunto de tecnologias para solucioná-los. Por exemplo, quando o fenômeno da pilha a combustível foi descoberto ainda não havia o uso da eletricidade em larga escala. A pilha, bem como outras tecnologias (ex. geradores elétricos), iniciava a possibilidade de se solucionar o problema da iluminação em centros urbanos emergentes e em regiões portuárias, antes iluminados usando gás ou a lâmpada de arco, ambos com alta manutenção. A partir desse contexto foram realizadas atividades de design em que se buscou o ajuste entre as tecnologias disponíveis e os problemas daquele período. Analogamente, durante a corrida espacial no fim dos anos 1950, a pilha a combustível se tornou uma solução para o problema de confiabilidade, segurança e abundância de energia para as missões do homem na lua. As diferenças entre o problema e suas possíveis soluções direcionaram as atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio a diferentes escolhas tecnológicas ao longo da trajetória.

Adentrando as especificidades do caso, faz-se relevante algumas colocações gerais relativas ao contexto histórico do período em análise. Os anos de 1970 foram marcados por duas crises causadas pelo embargo petrolífero dos países árabes. A temática da segurança energética passou a ser priorizada por governos, levando a aceleração do desenvolvimento de alternativas para geração de energia, em especial da nuclear (ALBINO *et al.*, 2014). Com menos sucesso, tecnologias para o setor de transporte também ganharam atenção à medida em que o embargo esvaziava estradas e impunha severas limitações para o uso de carros particulares. Europa, EUA e Japão embarcaram no desenvolvimento de carros elétricos com uma vasta variedade de alternativas tecnológicas na qual os carros a bateria eram a mais promissora. Apesar da escassez temporária de combustível não ter sido suficiente para provocar uma mudança definitiva nos motores automotivos (HØYER, 2008), iniciou-se um processo de desenvolvimento tecnológico voltados para veículos elétricos. Além disso, cabe destacar que as crises do petróleo foram determinantes para a trajetória do motor a etanol no Brasil.

Após o acidente de Chernobyl em 1986, muitos governos, pressionados por um grande movimento social, repensaram a estratégia do uso de energia nuclear. Crescia também o argumento ambiental de que o intenso uso dos recursos naturais, como petróleo e carvão, iria comprometer a disponibilidade desses recursos para as gerações futuras uma vez que esses não regeneravam com a mesma velocidade. Conflitos geopolíticos no Oriente Médio, como a Guerra do Iraque e ataques terroristas, também ampliaram as preocupações em relação à segurança energética. Foi nesse contexto que no início dos anos 1990 o programa *Californian Zero Emission Vehicle (ZEV)* e o *Energy Act* promoveram um marco decisivo para o desenvolvimento de veículos elétricos, incluindo os carros movidos a pilha a combustível.

Até o início dos anos 2000, avanços no desenvolvimento e demonstrações bem-sucedidas de pilhas a combustível levaram a um grande otimismo e interesse em relação à tecnologia em diferentes nichos. Porém, as grandes expectativas de uma rápida penetração no mercado não se concretizaram. Pouco depois, ainda antes do fim da primeira década do milênio, sucessivos gargalos tecnológicos e frustrações comerciais interromperam os investimentos e as atividades de pesquisa e desenvolvimento em grandes corporações (BEHLING, 2013). A crise econômica de 2008 levou a uma interrupção ainda maior dessas atividades, uma vez que diversos governos e empresas sofreram uma desaceleração do crescimento.

Em março de 2011 o desastre na planta nuclear Fukushima Daiichi intensificou pressões para governos abandonarem a trajetória em plantas nucleares e reforçarem medidas de segurança nas existentes. O governo japonês optou por uma política anti-nuclear no país e em agosto do mesmo ano anunciou maiores esforços para alternativas energéticas. O acidente também influenciou o planejamento de transição energética alemã, que descartou por completo do plano “*Energiewende*”³¹ as possibilidades da utilização de plantas nucleares na matriz energética. O *Energiewende* foi também um marco no caso estudado. Em 2010 a Alemanha lançou um plano pioneiro de uma transição energética para fontes renováveis. Com expressivo apoio do governo alemão, tecnologias solares e eólica receberam o incentivo necessário para atingirem escala e se tornarem tecnologias competitivas. A entrada e dominância da China na corrida tecnológica por painéis solares foi um marco importante tanto para a redução de custos da tecnologia quanto para o posicionamento estratégico chinês no setor de renováveis. De forma semelhante aos painéis solares, a China se tornou o principal país produtor de carros movidos a bateria devido a uma forte política do governo para o avanço dessas tecnologias.

A falência de diversas empresas alemãs no setor de energia renovável forneceu fortes indicativos de que a *Energiewende* apresentava problemas críticos. Um deles era a dificuldade de gerir a oferta e demanda da eletricidade devido a intermitência das novas fontes na matriz pouco interligada, evidenciando a dependência do carvão para complementar picos de demanda. Outro problema crítico é que o plano focou no setor de geração de eletricidade e apresentou poucas medidas endereçadas a redução de emissões no setor de transporte. Tecnologias de armazenamento de energia que permitissem o uso excedente do setor elétrico para outros setores como o de aquecimento e transporte começaram a ganhar destaque. O hidrogênio apresenta uma clara vantagem por ser o único vetor energético que pode ser obtido através de fontes renováveis e que garante tanto o equilíbrio entre oferta e demanda de energia do setor elétrico quanto a redução das emissões de CO₂ no setor de transporte.

Dois outros marcos compõem o caso. O primeiro é o acordo de Paris assinado em 2015 por representantes de 195 países no qual os governos se comprometeram a reduzirem as emissões de gases de efeito estufa para manter o aquecimento global em menos de 2,0°C. A partir do acordo, diversos países iniciaram ou intensificaram uma agenda verde voltada para o setor de energia. Por fim, o Grande Lockdown causado por uma crise de saúde em 2020, levou a uma queda desproporcional nos

³¹ *Energiewend* significa a transição energética, em português

investimentos em petróleo em comparação com o setor de energia elétrica onde as energias renováveis já apresentavam um crescimento (IEA, 2020b, 2021). Aliado a isto, governos, que já lançaram planos de recuperação econômica baseados em políticas de incentivo a tecnologias ambientais, foram ainda mais incisivos nesse direcionamento (EUROPEAN COMMISSION, 2019; WHITE HOUSE, 2021; YANG, 2018).

Dentre as tecnologias que compõem o caso, três foram evidenciadas com maior recorrência pelos participantes da pesquisa: pilhas a combustível (principalmente de membrana polimérica e óxido sólido), os processos de reforma (principalmente metano e combustíveis fósseis) e eletrolisadores (alcalinos, poliméricos e óxido sólido). A cada uma das três há um subconjunto de outras tecnologias que as compõe ou complementam. As pilhas a combustível são tecnologias relacionadas a geração de eletricidade e reformadores e eletrolisadores a processos de obtenção do hidrogênio.

3.3. Seleção da amostra e procedimentos de coleta de dados

Na seleção da amostra, buscou-se participantes que estivessem inseridos no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em três ambientes distintos: i) universidades e centros de pesquisas; ii) empresas e indústrias diretamente ou indiretamente relacionadas ao hidrogênio ou pilhas a combustível; e iii) órgãos públicos ou privados responsáveis por atuar na formação de políticas públicas. A amostra foi composta por pesquisadores, gestores e diretores, agentes e consultores de governos. Priorizou-se participantes com cargos de maior responsabilidade e/ou que tivessem uma longa trajetória na área de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível.

A seleção da amostra ocorreu em 2 momentos distintos. A primeira foi feita durante e pouco após uma das principais conferências internacionais no campo de tecnologias de hidrogênio e pilhas a combustível a World Hydrogen Energy Conference (WHEC), realizada no Rio de Janeiro nos dias 17 a 22 de junho de 2018 em sua 22 edição. Estiveram presentes 784 participantes de 51 países, sendo o grupo alvo da conferência constituído por empresários e comunidade científica desenvolvedores das tecnologias em estudo, representantes do governo e de agências financiadoras e reguladoras. A segunda amostra foi selecionada durante o primeiro congresso da Associação Brasileira do Hidrogênio nos dias 7 e 8 de novembro de 2019, no Rio de Janeiro. O congresso contou com a participação de aproximadamente 60 participantes que desenvolvem essas tecnologias no Brasil. Por ser um evento de

menor dimensão, os participantes foram diretamente contatados e informados durante o congresso sobre a pesquisa e lhes foi solicitado um e-mail ou telefone para contato para uma possível futura entrevista.

A seleção da amostra durante a WHEC foi feita através de um questionário elaborado pela autora da presente tese cujo objetivo foi identificar e categorizar os participantes da conferência a fim de se obter um grupo amostral para futuras entrevistas. Na ocasião, foi acordado com comissão internacional organizadora do evento para que o questionário fosse anexado juntamente com o aplicativo acessado pelos participantes da conferência. No aplicativo constavam informações essenciais para os participantes, tais como horário e local das palestras bem como temas, autores e títulos dos trabalhos apresentados. Portanto, tal aplicativo era de acesso direto e frequente, viabilizando o acesso do questionário entre os participantes da conferência. O questionário apresentou uma estrutura geral para a identificação e categorização dos participantes conforme apresentado na Figura 17.

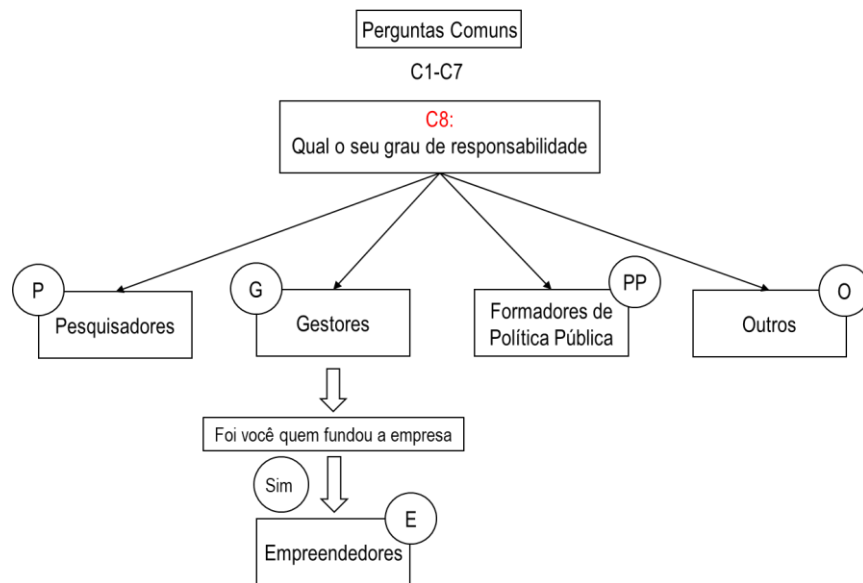


Figura 17 Estrutura geral para categorização dos participantes da pesquisa

Todos os participantes da pesquisa responderam à oito perguntas comuns iniciais (C1-C8). Essas perguntas buscaram identificar os participantes pelos seus nome e afiliação; faixa etária; país que exerce a profissão; tempo de atuação na área de tecnologias de hidrogênio; qualificação (graduação e pós-graduação).

A pergunta (C8) que categorizou os participantes foi: “Por favor, selecione o seu tipo de responsabilidade”³². O termo “tipo de responsabilidade” foi o mesmo usado para o formulário de inscrição na própria conferência, e as opções fornecidas também seguiram o mesmo padrão. Os participantes puderam escolher apenas uma opção dentre as seguintes: fundador da empresa; proprietário da empresa; diretor da companhia; CEO da empresa; membro do conselho de administração; chefe de departamento / grupo; outras atividades de gerenciamento; chefe da instituição / departamento / grupo de pesquisa; professor; pesquisador de pós-doutorado; membro do governo; membro de departamento do governo; investidor; doutorando; assistente e estagiário. **Foram estabelecidas quatro a partir da pergunta C8: formadores de política pública, gestores, pesquisadores e outros.**

É importante ressaltar que os participantes da pesquisa tiveram a opção de disponibilizar seu nome e e-mail no início e ao final do questionário para futuros contatos. A categoria outros foi descartada do processo de seleção. As perguntas C1 à C8 apresentaram prioridades diferentes para a seleção de candidatos, conforme mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 Prioridade das perguntas para seleção de participantes

		Prioridade		
		Alta	Média	Baixa
C1	Nome e Afiliação			
C2	Faixa etária			
C3	País que exerce atividades relacionadas à tecnologia			
C4	Tipo de tecnologia			
C5	Tempo de atuação			
C6-C7	Qualificação (graduação e pós)			
C8	Nível de responsabilidade			

Fonte: elaboração própria

Conforme o Quadro 4 as perguntas de maior prioridade foram as C1 e C8. Participantes com maior grau de responsabilidade dentro de empresas, universidades e governos, bem como a sua afiliação foram o principal critério de seleção dos entrevistados. A pergunta C5 teve prioridade média, selecionando preferencialmente participantes com maior tempo de atuação na área. É importante ressaltar que a pergunta C5 funcionou como mecanismo de seleção somente quando participantes estavam dentro

³² Traduzido de: “Please select your type of responsibility”

de uma mesma instituição e com o mesmo tipo de responsabilidade. As perguntas de baixa prioridade (C2, C3, C4, C6-7) não foram usadas para selecionar os participantes, mas para verificar a diversidade da amostra de entrevistados. Assim, buscou-se, quando possível, diversificar as faixas etárias, os países, as qualificações e os tipos de tecnologias.

Uma vez categorizados, os participantes responderam a perguntas subsequentes de acordo com a sua categoria. As demais perguntas buscaram obter dados sobre as atividades dos participantes em relação às tecnologias estudadas através de cinco eixos centrais: i) motivação para o desenvolvimento da tecnologia na organização (ex. empresa, centro de pesquisa, departamento do governo); ii) tipos de financiamento utilizados; iii) obstáculos ao desenvolvimento das tecnologias; iv) formas de colaboração; e v) características pessoais do envolvimento com a tecnologia. Foram elaboradas perguntas e alternativas de respostas específicas para cada categoria e estão traduzidas e enunciadas no anexo 1.

Ao fim das duas etapas de seleção da amostra, foram selecionados 35 participantes para compor a amostra, conforme a Quadro 5.

Quadro 5 Composição da amostra

Classificação	País	Organização
Formador de política pública: <ul style="list-style-type: none"> • Membros de departamentos de governo • Consultores • Associações de Hidrogênio 	Reino Unido	UCL
	Bélgica	FCHJU
	EUA	California Business Council
	Chile	H2 Chile
	Alemanha	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband
	Alemanha	NOW – 2 entrevistados
	Bélgica	European Hydrogen Association
	EUA	DOE
	Alemanha	Clean Energy Bonn
	Brasil	MCTI
Gestores: <ul style="list-style-type: none"> • Diretores executivos • Gestores de projeto • Gestores de produto 	Japão	Honda
	Áustria	AVL
	Áustria	AVL
	EUA	ExxonMobil
	Dinamarca	Danish Power Systems
	Chile	Engie
	Argentina	Hinicio
	Canadá	Green Light Innovation
	Canadá	Ballard Power Systems
	Paraguai	Itaipu
	Brasil	Furnas
Brasil	Inmetro	
Pesquisador: <ul style="list-style-type: none"> • Pesquisadores em universidades • Pesquisadores em centros de pesquisa 	Itália	Politécnica de Milão
	Espanha	Centro Nacional del Hidrógeno
	Nova Zelândia	Unitec Institute of Technology
	México	Universidad Nacional Autónoma de México
	França	ADEME e Universite de Lorraine
	Alemanha	Forschungszentrum Jülich
	Itália	Politecnico di Torino
	Dinamarca	Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
	Índia	Indian Institute of Technology, Delhi
	Brasil	Universidade Federal do Paraná
	Brasil	Unesp
	Reino Unido	University College London (UCL)

Fonte: elaboração própria

A coleta de dados primários ocorreu paralelamente através de entrevistas semiestruturadas e da observação. As entrevistas foram realizadas, na maior parte dos casos, em inglês, entre 1 a 2 meses após a respectiva conferência onde se realizou a seleção da amostra, realizadas através de videochamadas. As entrevistas tiveram duração entre 15 e 120 minutos (média 40 minutos), de acordo com a disponibilidade do entrevistado e de como o mesmo optou por responder às questões colocadas.

As entrevistas apresentaram perguntas norteadoras (anexo 2), mas não foram estruturadas. Apesar da abrangência de temas comuns, cada entrevistado apresentou um roteiro de entrevista único formulado a partir de informações obtidas através do questionário e/ou disponíveis em mídias virtuais. As entrevistas foram gravadas para futuras análises. Foram também realizadas anotações durante as entrevistas que foram usadas como documentação.

O principal ambiente de coleta de dados a partir da observação foi o Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível (LaMPaC) localizado no Departamento de Química da Universidade Federal de Minas Gerais. O LaMPaC foi criado em 2005 através de uma parceria UFMG-CEMIG em um programa de P&D regulado pela Aneel visando o desenvolvimento e caracterização físico-química de materiais, inicialmente focados em materiais cerâmicos para pilhas a combustível de óxido sólido. Outra fonte importante de coleta de dados através da observação foram conferências e seminários sobre tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. As conferências e seminários estão mostrados no Quadro 6.

Quadro 6 Conferências e webinares atendidos

Conferência / Webinar	Organizadores	Data
World Hydrogen Energy Conference	International Association for Hydrogen Energy	17 a 22 /06/18
1º Congresso Brasileiro do Hidrogênio	Associação Brasileira do Hidrogênio	07 e 08/11/19
IPHE - Global Hydrogen Forum 2020	IPHE	18/06/20
H ₂ -powered aviation: Preparing for Take-off	Clean Sky e Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertakings	22/06/20
Chile - The Hidden Champion is awakening	Mission Hydrogen	02/09/20
Air, Land, and Earth: Multi-Sectoral Decarbonization	Strategen	17/09/20
1º Congresso Brasil-Alemanha de H ₂ Verde	AHK e GIZ	05 e 06/10/20
Chile 2020 Green Hydrogen Summit	Ministerio de Energia Chile, Corfo, GIZ, Coperación Alemana	03 e 04/11/20
Transformação Energética: H ₂ Verde	BW Expo Summit Digital 2020	09/11/20

Fonte: elaboração própria

Foram realizadas visitas técnicas, onde se observou tanto os participantes em seus ambientes de trabalho quanto aspectos físicos do espaço, equipamentos e tecnologia. Duas visitas foram feitas a participantes que já haviam sido entrevistados anteriormente o que possibilitou um maior aprofundamento sobre assuntos previamente levantados. A instituição visitada, país e data estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 Visitas realizadas

Instituição	País	Data
Electrochemical Innovation Lab - UCL Laboratório que desenvolve pesquisa na área de eletroquímica e engenharia focando no desenvolvimento de pilhas a combustível e baterias.	Reino Unido	28 / 03 / 2019
Danish Power Systems Empresa fundada no início dos anos 1990 para a fabricação de membranas poliméricas utilizadas em células do tipo PEM de alta temperatura.	Dinamarca	09 / 06 / 2019
Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) Organização voltada para a comunidade europeia responsável pela coordenação, investimento e acompanhamento de projetos de multinacionais, empresas de pequeno e médio porte e centros de pesquisa.	Bélgica	22 / 08 / 2019
Nationale Organisation Wasserstoff (NOW) Organização voltada para a comunidade alemã, responsável pela coordenação, investimento e acompanhamento de projetos de multinacionais, empresas de pequeno e médio porte e centros de pesquisa.	Alemanha	23 / 08 / 2019
Nel Hydrogen Empresa Norueguesa com subsidiária na Dinamarca que fabrica de unidades de abastecimento para veículos a hidrogênio. A produção das unidades é na Dinamarca, com uma planta capaz de produzir 300 unidades ano.	Dinamarca	13 / 09 / 2019

Fonte: elaboração própria

Durante as conferências e webinars, governos, empresas e comunidade acadêmica comunicaram seus objetivos, diretrizes, necessidades em relação à promoção dessas tecnologias. Assim puderam ser coletados dados de avanços científicos, orientações de governos e desenvolvimento e comercialização de produtos por empresas. As informações disponibilizadas através de palestras plenárias, mesas redondas, apresentações de trabalhos, slides, folders e pôsteres foram coletadas por meio de áudio gravações, fotos e anotações. Conversas informais durante a conferência com participantes também foram coletadas através de anotações.

É importante ressaltar outras fontes de coleta de dados secundários, destacando as seguintes:

- a) Boletim de notícias de tecnologias de hidrogênio
 - Fuel Cells Bulletin (ISSN 1464-2859) - O Fuel Cells Bulletin é uma fonte de notícias técnicas e de negócios voltadas para o setor de pilhas a combustível, publicada mensalmente pela Elsevier.
 - Fuel cells Works - <https://fuelcellsworks.com/> - Fuel Cell Works é uma fonte de notícias sobre tecnologias de hidrogênio, que acompanha os principais desenvolvimentos acadêmicos, governamentais e industriais.
- b) Patentes³³
 - Busca efetuada para setores e tecnologias específicas, tais como o setor de aviação e tecnologias de pilha a combustível de óxido sólido. As buscas foram feitas usando o Espacenet, plataforma de dados do escritório de patentes Europeu, que apresenta uma interface com diversos outros escritórios internacionais de patentes, facilitando a busca em uma única plataforma.
- c) Artigos acadêmicos
 - Artigos acadêmicos foram necessários para coletar dados técnicos e históricos a respeito do desenvolvimento da tecnologia.

3.4. Tratamento dos dados

Os dados obtidos através das entrevistas foram tratados utilizando o método de análise de conteúdo descrito por Bardin (2011). O método consiste em um conjunto de técnicas de análise das comunicações baseado em procedimentos sistemáticos e objetivos da descrição do conteúdo das mensagens que permite a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção dessas mensagens (BARDIN, 2011). O código linguístico da presente pesquisa foi majoritariamente oral, advindo das falas dos participantes entrevistados, inteiramente transcritos. Documentações disponibilizada pelos participantes e outras fontes complementaram as falas.

O método se inicia através de uma descrição analítica dos dados objetivando uma análise categorial do texto. São estabelecidas unidades de codificação (ex. palavra, tema, frase, parágrafo) e

³³ Pondera-se que as análises de patente foram essenciais para a elaboração do arcabouço teórico da presente pesquisa, especialmente no que diz respeito a teoria de design dominante.

unidade de contexto (quando existe ambiguidade no sentido dos elementos referenciados) nas quais, concomitantemente a leitura sistemática, deles se extrai as categorias. Essa etapa consiste da codificação e categorização dos dados. Na codificação, os dados brutos são transformados em uma representação do conteúdo de acordo com as características da mensagem. Na presente pesquisa as unidades de codificação foram frases temáticas e em alguns casos palavras, ambas unidades analisadas isoladamente e em seguida dentro da unidade de contexto, como por exemplo um parágrafo. Às unidades de registro foram atribuídos códigos: uma ou poucas palavras que resumem de forma muito sucinta a ideia central daquela mensagem. A partir desse procedimento taxonômico são criadas categorias que permitem a classificação dos elementos de significação constitutivos da mensagem (BARDIN, 2011). A classificação da presente pesquisa seguiu um critério semântico, do qual se obteve categorias temáticas.

O tipo de análise de conteúdo escolhido para a presente pesquisa foi a análise temática indutiva. Dessa forma as categorias foram estabelecidas com base nas mensagens codificadas, ou seja, não se estabeleceu categorias *a priori* a partir do referencial teórico, como seria caso a pesquisa utilizasse um método dedutivo, mas ao contrário, as categorias foram inferidas a partir da análise do material estudado. As categorias foram estabelecidas de acordo com o escopo da pesquisa, buscando relacionar os códigos e as lentes teóricas utilizadas.

A categorização resulta em uma descrição dos dados. Se o tratamento dos dados finalizasse nesta etapa, a pesquisa seria apenas descritiva, sem qualquer tipo de análise. O próximo passo, a inferência, é o processo intermediário entre a descrição e a interpretação dos dados. São levantados questionamentos sobre as causas (o que levou determinado enunciado?) ou possíveis efeitos das mensagens (quais as consequências que determinado enunciado vai provavelmente provocar?) (BARDIN, 2011). Procura-se entender as intenções por trás das falas, os pressupostos assumidos pelos participantes e/ou pôr em evidência suas avaliações. As hipóteses e lentes teóricas orientam os questionamentos a serem feitos durante a inferência para que o processo consiga alcançar os objetivos da pesquisa. As categorias de análise que emergiram através do processo descrito acima estão apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 Categorias de análise

Categoria inferida	Conceito norteador
Transição energética	Mudança na composição da matriz energética mundial para substituição (completa ou parcial) de fontes intensivas em carbono por renováveis
Emissão de CO₂	CO ₂ emitido a partir do setor de energia elétrica, transporte, indústria e aquecimento
Inovação e emprego	Oportunidade de geração de empregos a partir da implementação das tecnologias
Questões ambientais	Problemas ambientais relacionados ao uso de recursos naturais
Captura de carbono	Alternativa para redução de CO ₂ na geração de energia a partir de fontes fósseis
Pilhas a combustível	Alternativa para geração de eletricidade
Eletrolisadores	Alternativa para produção de hidrogênio verde
Reforma	Alternativa para produção de hidrogênio a baixo custo
Baterias	Alternativa para armazenamento de eletricidade e uso no setor de transporte
Renováveis	Alternativa para a geração limpa de eletricidade
Barreiras à entrada no mercado	Barreiras relativas à escala, aos custos iniciais e aos oligopólios nos setores de transporte, óleo e gás e eletricidade
Complexidade tecnológica	Compatibilidade das tecnologias nos sistemas de energia
Baixa observabilidade	Pouca compreensão da sociedade em relação às tecnologias
Aprisionamento tecnológico	Desafios devido mudanças no atual sistema tecno-produtivo
Pouca priorização política	Dificuldades das tecnologias em serem priorizadas nas agendas de governo
Regulação	Soluções construídas a partir de regulações e relações exteriores
Acoplamento setorial	Soluções tecnológicas pensadas a partir da combinação de setores
Instrução / doutrinação	Esforço para instruir políticos, empresas e sociedade sobre as tecnologias
Empresas entrantes	Empresas entrantes promovem o desenvolvimento tecnológico
Startups / pesquisa	Empresas ou pesquisa diretamente e prioritariamente relacionadas às tecnologias
Empresas incumbentes	Apoio dado por empresas já estabelecidas para o avanço das tecnologias
Organizações multilaterais	Influência de organizações multilaterais no desenvolvimento das tecnologias
Empresas multinacionais	Empresas atuando a nível global no desenvolvimento e implementação tecnológica
Governo	Influência de ações dos governos para o desenvolvimento das tecnologias
China	Relevância do país em modificar a trajetória das tecnologias
Países periféricos	Papel de países periféricos no desenvolvimento das tecnologias

Fonte: elaboração própria

As categorias inferidas foram reagrupadas, como mostrado na Figura 18, em seis grandes categorias teóricas: i) questões legitimadoras da expansão tecnológica, ii) tecnologias interseccionadas ou concorrentes, iii) obstáculos à implementação tecnológica, iv) meios para a convergência de designs dominantes, v) articuladores do desenvolvimento e implementação das tecnologias e vi) regiões de viabilidade econômica das tecnologias. O objetivo desse agrupamento foi construir a relação entre a análise dos dados e o modelo teórico representado na Figura 16.



Figura 18 Agrupamento categorias inferidas em categorias teóricas. Fonte – elaboração própria

Por fim, o Quadro 9 identifica cada entrevistado de acordo com as categorias teóricas.

Quadro 9 Enquadramento dos entrevistados segundo categoria teórica

Categorias		Entrevistados (E)
Transição energética	Questões legitimadoras da expansão tecnológica	E1, E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E14, E18, E19, E21, E22, E23, E24, E25, E27, E28, E32, E33, E34, E35
Emissão de CO ₂		
Inovação e emprego		
Questões ambientais		
Captura de carbono		
Pilhas a combustível	Tecnologias interseccionadas ou concorrentes	E1, E3, E4, E5, E7, E11, E12, E13, E14, E15, E18, E19, E20, E21, E22, E23, E27, E28, E29, E31, E33, E34, E35
Eletrolisadores		
Reforma		
Baterias		
Renováveis		
Barreiras à entrada no mercado	Obstáculos à implementação tecnológica	E1, E2, E3, E4, E5, E7, E8, E9, E11, E26, E14, E16, E19, E20, E22, E23, E24, E27, E28, E30, E31, E32, E33, E34, E35
Complexidade tecnológica		
Baixa observabilidade		
Aprisionamento tecnológico		
Pouca priorização política		
Regulação	Meios para a convergência de designs dominantes	E1, E3, E4, E5, E8, E10, E11, E15, E16, E22, E25, E27, E28, E33, E34, E35
Acoplamento setorial		
Instrução / doutrinação tecnológica		
Empresas entrantes	Articuladores do desenvolvimento e implementação das tecnologias	E2, E3, E4, E5, E6, E8, E9, E10, E11, E12, E13, E15, E19, E20, E22, E23, E24, E25, E26, E27, E29, E28, E30, E31, E32, E33, E34, E35
Startups / pesquisa		
Empresas incumbentes		
Empresas multinacionais		
Organizações multilaterais		
Governo		
China	Regiões de viabilidade econômica das tecnologias	E2, E3, E5, E7, E9, E19, E22, E26, E28, E29, E30, E31, E32, E33
Países periféricos		

Fonte: elaboração própria

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A presente seção tem como objetivo apresentar e analisar os principais resultados obtidos através do método descrito neste trabalho. Para efeito didático, a presente seção é subdividida em quatro partes.

4.1. Influência dos paradigmas tecno-econômicos nas atividades de design

O primeiro resultado da pesquisa se refere a mudanças nas atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio. Argumenta-se nesta seção de resultados que essa mudança apresenta uma estreita relação com a transição entre o paradigma tecno-econômico da 4ª Revolução Industrial, referente a Era do Automóvel e Produção em Massa, para a 5ª Revolução Industrial, referente a Era da Informação e Telecomunicações.

Através das entrevistas e de documentos publicados por agências de coordenação e/ou financiamento dessas atividades, foram identificados dois períodos distintos – um entre 2000 e 2009 e outro entre 2010 e 2020 - caracterizados por diferentes direcionamentos do desenvolvimento tecnológico. Em cada período, foram desenvolvidas tecnologias visando solucionar problemas que emergiram a partir da lógica predominante colocada pelo paradigma tecno-econômico vigente à época, sendo tanto os problemas quanto o conjunto de soluções tecnológicas diferentes nos dois períodos (DOSI, 1982).

As atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio no primeiro período, 2000 a 2009, estavam relacionadas com o paradigma tecno-econômico da 4ª Revolução Industrial, a Era do Automóvel e Produção em Massa, instalado no início do século XIX. O primeiro período foi marcado por um grande entusiasmo tecnológico, em que as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível eram tidas como uma alternativa para reduzir a dependência do petróleo no setor de transporte (BEHLING, 2013). Desde as crises nos anos 1970, o preço do petróleo havia sofrido fortes oscilações, seguido por uma tendência de aumento a partir do fim dos anos 1990 que acirrou preocupações acerca da segurança energética em países não detentores de reservas de petróleo. Assim, as atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio estavam inseridas em um contexto de segurança energética, majoritariamente relacionadas com setor de transporte cujas principais empresas apresentavam pelo

menos um veículo movido a hidrogênio³⁴. O relatório do Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos evidencia esse contexto das atividades de design:

"A simple chemical reaction between hydrogen and oxygen generates energy, which can be used to power a car producing only water, **not exhaust fumes**. With a new national commitment, our scientists and engineers will overcome obstacles to taking these cars from laboratory to showroom so that the **first car driven by a child born today** could be powered by hydrogen, and **pollution-free**. [...]

Join me in this important innovation to make **our** air significantly cleaner, and **our** country much less **dependent on foreign sources** of energy." George W. Bush 2003 (DOE, 2003)

As falas do presidente George W. Bush exemplificam o entusiasmo tecnológico do período, quando se acreditava em um rápido desenvolvimento das tecnologias. Os automóveis, principal tecnologia da 4ª Revolução Industrial, provocaram os dois problemas relatados: a poluição local do ar, principalmente dos grandes centros, e a dependência de fonte estrangeira de energia, o petróleo. Os diferentes programas de governo que foram criados no período para fomentar o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em diversos países líderes em tais tecnologias, como Japão, EUA, Alemanha, França, Canadá e Reino Unido, foram delineados a partir da lógica predominante no paradigma tecno-econômico da 4ª Revolução Industrial, buscando soluções para conservar o *modus operandi* posto.

Por exemplo, o principal programa estadunidense para o fomento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no período, o FreedomCar iniciado em 2002, focava no setor de transporte e seus problemas (DOE, 2002). Similarmente, em 2002, a Alemanha estabeleceu o Clean Energy Partnership - um consórcio de 13 empresas³⁵ objetivando promover combustíveis limpos para o setor de mobilidade e que reduzissem a dependência do país em relação as importações de petróleo sendo o hidrogênio o combustível preferível pelo setor (CLEAN ENERGY PARTNERSHIP, 2008). Mesmo os programas de pesquisa e desenvolvimento que exploravam também aplicações não-automotivas das tecnologias em análise, o setor de transporte apresentava uma maior ênfase, como no caso do European & Hydrogen Fuel Cell Platform iniciado em 2004 pela União Europeia (BARRETT, 2005; EUROPEAN HYDROGEN & FUEL CELL TECHNOLOGY PLATFORM, 2005) e diversos programas iniciados pelo governo japonês nos anos 2000 (BEHLING, 2013; FERNANDES *et al.*, 2020; MAEDA, 2003a, b)

³⁴ Exemplos são: Daimler Chrysler 10 F-Cell, BMW 7-series a pilha a combustível, Ford Focus FCEV Hybrid, GM/Opel HydroGen3 and Volkswagen Touran HyMotion, Toyota FCHV-4 SUV circa, Honda FCX.

³⁵ Berliner Verkehrsbetriebe BVG, BMW, Daimler, Ford, GM/Opel, Hamburger Hochbahn, Grupo Linde, Royal Dutch Shell, Statoil, Total, Toyota, Vattenfall Europe, and Grupo Volkswagen

No primeiro período, três principais indústrias estavam diretamente relacionadas com o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível – a automotiva, a de gases industriais e a do óleo e gás, todas visando solucionar problemas ligados às novas formas de mobilidade introduzidas na 4ª Revolução Tecnológica. As empresas automotivas desenvolviam as tecnologias que melhor caracterizaram as atividades de design do período - as pilhas a combustível, essa uma alternativa aos motores a combustão dos automóveis. Em termos de hierarquia de design (CLARK, 1985), as pilhas a combustível foram, no primeiro período, as tecnologias centrais (*core technologies*), priorizadas em relação às tecnologias do hidrogênio e outros componentes necessários para sua operacionalização, considerados periféricos. Apesar de complementares, a escolha tecnológica era feita a partir do design das pilhas, que determinavam as condições necessárias para as demais tecnologias, como por exemplo as escolhas dos combustíveis (ex.: pureza do hidrogênio, condições de armazenamento). Os designs eram frequentemente direcionados por empresas do setor automotivo, que definiam os padrões dos sistemas de armazenamento de combustíveis e tipos de pilha a combustível a serem usados em seus veículos, delimitando as condições de contorno a serem seguidas pela infraestrutura de abastecimento.

“I remember very well discussions with Japanese OEMs³⁶ when it came to what is the right **storage technology**, and these things. This whole dynamic led to an agreement among the automotive industry, globally, to go for **gases 700 bar storage technology on board** of the vehicle, to finally have a **clear road map for the infrastructure side**. Until that point it was like: well, do you want to refuel natural gas, or methanol, or liquid hydrogen, of 350, or 700 bars. What is that you want to do? So **collectively the automotive industry**, 10 years ago, said it is 700 bars where we put all our guns on. And please, **infrastructure, this is the boundary condition**”. (E4)

O relato do E4 diz respeito a uma decisão tecnológica feita pelas OEMs em relação ao combustível a ser usado em veículos movidos a pilha a combustível. Conforme colocado na seção 2.5, existem diferentes possíveis combinações entre combustíveis e pilhas a combustível que operacionalizam a conversão da energia química do combustível em energia elétrica; e as escolhas de um design tecnológico específico para uma das partes apresentam implicações diretas no design da outra tecnologia a ser combinada. No caso relatado pelo E4, a diversidade de possibilidades de combustíveis restringia a convergência de um design que favorecesse a exploração de economias de escala na produção (ABERNATHY; UTTERBACK, 1978). O acordo em um padrão para o armazenamento do combustível entre empresas da indústria automotiva reduzia os riscos de se investir em trajetórias tecnológicas

³⁶ Original Equipment Manufacturer

dispersas que fossem ser selecionadas posteriormente. Com isso, a indústria automotiva antecipava as condições a serem seguidas ao longo da cadeia, ao passo que favoreciam o seu design preferível.

As empresas de gases industriais e do óleo e gás eram as principais envolvidas nas atividades de design de tecnologias do hidrogênio. Diferentemente do que era preferível pelas OEMs, ou seja, o abastecimento direto com hidrogênio puro reduzindo a complexidade dos componentes internos nos automóveis, às empresas de gases industriais e do óleo e gás interessava a manutenção de suas infraestruturas de distribuição já instaladas. Dessa forma, essas empresas buscavam soluções que viabilizassem a reforma interna de seus combustíveis. No design preferível por essas empresas, um novo componente deveria ser adicionado aos veículos ou às estações de abastecimento: o reformador. Este componente seria responsável pela conversão *in situ* de combustíveis como gasolina, metanol, diesel ou etanol em hidrogênio, mantendo a sua estrutura de distribuição de combustíveis e gases sem alterações bruscas. Interessava também às empresas de gases industriais e do óleo e gás o desenvolvimento de tecnologias que permitissem a expansão dos processos de reforma já conhecidos por essas empresas (AUTENRIETH; KRUMBERGER, 1997; GOLDEN; WEIST, 2001; HO, 1998; MATZAKOS *et al.*, 2003). De uma forma geral, essas empresas investiam em trajetórias tecnológicas envolvendo a reforma de combustíveis fósseis para a obtenção de hidrogênio argumentando que essa estratégia permitiria uma penetração mais rápida das pilhas a combustível no mercado, devido à ausência de uma estrutura de distribuição do hidrogênio para estações de abastecimento.

Pode-se dizer que, durante o primeiro período, as três principais indústrias relacionadas com o desenvolvimento das tecnologias de pilha a combustível e tecnologias do hidrogênio, a automotiva, a de gases industriais e a do óleo e gás, apresentavam preferências distintas em relação a um design único que concatenasse as tecnologias. Com isso, as opções tecnológicas que favoreciam cada um dos setores de forma isolada não necessariamente implicavam em efeitos positivos para o desenvolvimento no outro setor. Interessavam-lhes padrões tecnológicos distintos e por isso seguiram trajetórias de desenvolvimento não-convergentes.

A despeito de diferentes preferências, alguns designs prevaleceram em relação a outros no decorrer do primeiro período na medida que mais agentes adotavam um mesmo determinado padrão tecnológico. O que levou as adoções desses padrões, ou seja, os mecanismos de seleção das tecnologias, variou consideravelmente. Por exemplo, um mecanismo de seleção foram os acordos entre os

desenvolvedores das tecnologias, como por exemplo, no caso do padrão do tanque de armazenamento do hidrogênio, como apontado no relato do E4 acima, em que a seleção partiu da preferência de um grupo de indústrias que se antecipou na criação do padrão. Outro mecanismo de seleção foram as próprias barreiras tecnológicas, já que algumas opções tecnológicas inicialmente atrativas não alcançaram os resultados técnicos e/ou econômicos desejados. Esse foi o caso, de por exemplo, as atividades de design de reformadores internos aos veículos, que se mostraram inviáveis técnica e economicamente, como colocado pelo E23:

“About 12 years ago [2006] we started the development of a small hydrogen generator, which would feed gasoline or diesel fuel on a car and provide hydrogen for the fuel cell. That was when there was **no hydrogen infrastructure** at all. So, it was a way of getting fuel cells into light duties, cars, and vehicles without having a hydrogen infrastructure. You actually **generate hydrogen on board** the car and then feed that into a fuel cell. I worked myself on that for about 7-8 years. That was great. We had 5 research units we did a lot of testing. Unfortunately, it turned out **not to be reasonable or economic**. Partly because it is a challenge to make high purity hydrogen all the time on a car where the conditions were always changing. You accelerate, you have hot weather, cold, startup... **The fuel cell wants very pure hydrogen** and that was just very hard to be accomplished. Also, you are **not really reducing CO₂ emission** that much, because you are starting with fossil fuel in the vehicle.” (E23)

É importante ressaltar que esses dois tipos de mecanismos de seleção estavam relacionados com a baixa maturidade das tecnologias, essas ainda em estado de comprovação. Ambos os exemplos mostram que as escolhas tecnológicas tomadas não foram resultado de feedbacks genuínos oriundos de uma constante interação dos artefatos com o ambiente externo às atividades de design como sugerido pela teoria de designs dominantes (GOEL; PIROLI, 1992; VISSER, 2009). Isto é parcialmente explicado pela falta de condições mínimas para a experimentação das tecnologias que, devido a sua natureza complexa, necessitam do desenvolvimento de outras estruturas complementares que excedem o âmbito das atividades de design.

Outro mecanismo de seleção foi superioridade tecnológica. Frequentemente, os designs tecnológicos eram escolhidos porque otimizavam aspectos técnicos como eficiência, durabilidade e compatibilidade com outros componentes, ou seja, o design era tecnicamente superior às outras alternativas na perspectiva dos agentes de uma atividade específica voltado para uma determinada aplicação. Este foi o caso da escolha das pilhas tipo PEM de baixa temperatura para uso veicular. Outras alternativas apresentavam outras vantagens, como no caso das PEM de alta temperatura, que proporcionaria o uso direto de combustíveis mais acessíveis que o hidrogênio (ex. metanol), mas a PEM de baixa temperatura se tornou o design dominante para as pilhas devido à suas vantagens técnicas para

compor os veículos. O E11 observa que essa escolha de design dos veículos dificultou a difusão da tecnologia, uma vez que não se considerou as dificuldades de distribuição do hidrogênio puro em estações de abastecimento:

“Honda, Hyundai, Toyota and so on, they have made hydrogen fuel cell vehicles based on low-temperature fuel cells, with an operating temperature of around 80°C, which means that they **require very pure hydrogen** for operation. That hydrogen would typically come from **electrolysis**. But, as you know, there are **no widespread electrolyzers producing hydrogen** and there are **no hydrogen refueling stations**. That is a problem because **you cannot fuel your car!** Who wants to drive a car that cannot be fueled?” (E11)

Ao adotarem pilhas do tipo PEM de baixa temperatura, indústrias do setor automotivo otimizavam os motores dos automóveis, mas ao mesmo tempo necessitavam do desenvolvimento de uma nova infraestrutura de abastecimento, uma vez que essa opção requer hidrogênio com alto grau de pureza para operação (BEHLING, 2013). Da mesma forma, ao focarem em produzir hidrogênio através da reforma de hidrocarbonetos, empresas do setor do óleo e gás escolhiam uma tecnologia que favorecia a exploração de seus conhecimentos em processos de reforma, mas dificultava ou encarecia o processo de obtenção de hidrogênio de alta pureza e com baixas concentrações de monóxido de carbono.

A adoção do padrão de pilhas a combustível tipo PEM de baixa temperatura usando hidrogênio puro gasoso pressurizado a 700 bar está relacionada com um último mecanismo de seleção - as regulações ambientais. Os padrões estabelecidos pela indústria automotiva foram influenciados pela regulação de veículos com emissão zero elaborada pelo governo do estado da Califórnia em 1990 (HEKKERT; HOED, 2004), que tinha o intuito de reduzir a poluição local do ar causada pelo crescimento do número de veículos de combustão interna no estado (COLLANTES; SPERLING, 2008). Essa regulação surtiu efeitos para o caso de veículos movidos a pilha a combustível, sendo hoje o principal mercado para indústrias do setor.

“The major reason why California is the biggest market of Toyota is probably because of the **zero-emission vehicle law regulation** of the **Californian government**. If you sell a certain amount of vehicles in California, the **OEM has to sell zero-emission vehicles** at the same time, at a certain percentage. Otherwise, you get a **huge fine**.” (E8)

A regulação da Califórnia levou diversas empresas automotivas a abandonarem atividades de design que envolvessem motores a pilha a combustível ou combustão do hidrogênio com qualquer tipo de emissão poluente como, por exemplo, aquelas envolvendo o uso de combustíveis diferentes do hidrogênio puro. Combustíveis como o metanol ou etanol, mesmo que de procedência renovável, foram descartados das possibilidades tecnológicas a serem exploradas por não serem de emissão zero. Nesse

sentido, as regulações foram um importante mecanismo de seleção tecnológica, uma vez que estabeleceram critérios para a escolha e descarte de alternativas em desacordo com as especificações colocadas. É importante ressaltar que a regulação da Califórnia foi uma forma de direcionamento tecnológico alinhada com uma problemática colocada pelo contexto da 4ª Revolução Tecnológica, a poluição do ar causada pelos automóveis em centros urbanos, atuando, portanto, como uma forma de transmitir as questões do paradigma para as atividades de design.

Os padrões estabelecidos ao longo do primeiro período moldaram a trajetória das tecnologias uma vez que foram estabelecidos a partir de uma sequência de escolhas preferíveis dadas as oportunidades técnicas percebidas (CLARK, 1985; NELSON, RICHARD R.; WINTER, 1982). Ao final do primeiro período, os designs tecnológicos que prevaleciam eram, acima de tudo, dependentes da trajetória tecnológica.

O fim do primeiro período foi marcado por uma série de fatores que inviabilizavam a continuidade das trajetórias tecnológicas nos moldes apresentados até então. De forma geral, a reforma de combustíveis e melhoria da eficiência em relação a combustão foram se tornando difíceis de se sustentar, parcialmente porque a indústria automotiva antecipou padrões para o combustível a partir do design dos automóveis, como o caso dos sistemas de armazenamento de hidrogênio e pilhas PEM, que requeriam hidrogênio com alto grau de pureza. Ao mesmo tempo, os carros movidos a pilha a combustível com hidrogênio precisavam de estações de abastecimento inexistentes salvo cidades na Califórnia e Japão, o que dificultou a experimentação e difusão da tecnologia (BEHLING, 2013). Além disso, o argumento da poluição do ar, antes uma questão inerente ao setor de transporte e voltada para locais específicos como grandes cidades, se expandia transversalmente a todos os setores intensivos em energia com a nova problemática emergente, o aquecimento global. Com isso, outros setores passaram a fazer parte dessa agenda política, dispersando o protagonismo que a indústria automotiva exercia no período anterior.

Outros sinais de alteração do contexto das atividades de design se mostraram na redução de importância relativa dada às questões de segurança energética relacionadas ao uso de combustíveis derivados do petróleo. O aumento das tensões geopolíticas no oriente médio e o crescimento da demanda por petróleo vinda de países emergentes como China e Índia ao longo dos anos 2000 foram compensados pelas descobertas de reservas de petróleo em países fora do oriente médio, como Venezuela Brasil Canadá e Estados Unidos. Ao fim dos anos 2000 o receio de escassez de petróleo não era tão presente e

as reservas de petróleo do restante do mundo já estavam próximas as dos países membro da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), conforme mostrado na Figura 19.

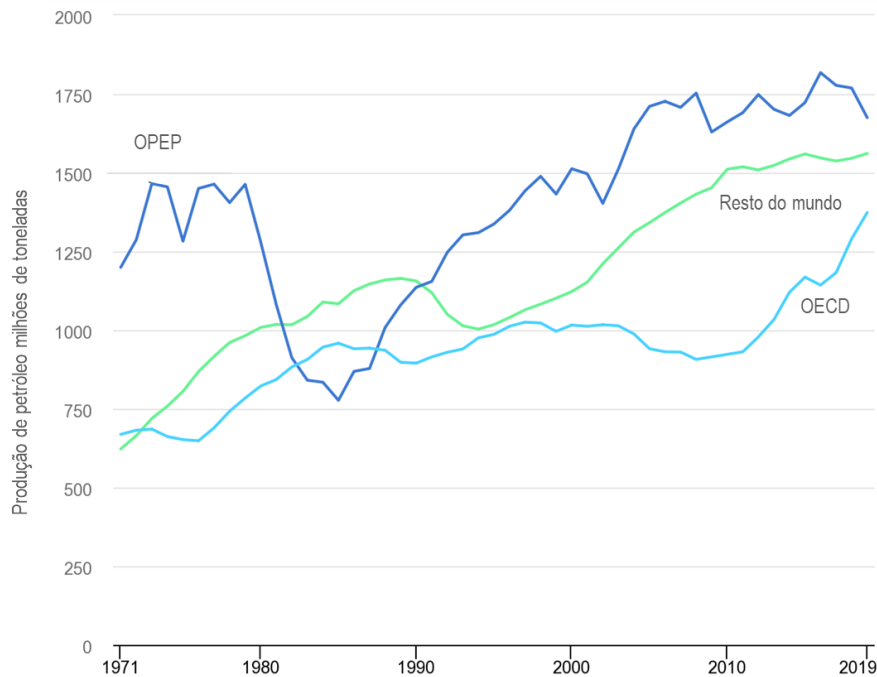


Figura 19 Produção de petróleo por região 1971-2019. Fonte :IEA (2019b)

Contudo, o fator mais decisivo para a interrupção das trajetórias tecnológicas iniciadas ocorreu em 2008, quando a crise econômica causada por excessos financeiros se aprofundou, afetando a capacidade de governos e empresas em manterem os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, incluindo pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio. Argumenta-se aqui que a crise de 2008 foi fundamental para romper, de forma definitiva, com a lógica da 4ª Revolução Tecnológica já fragilizada nas atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio, uma vez que a lógica predominante no primeiro período é rompida mesmo após retomada dos investimentos e atividades de desenvolvimento.

Por exemplo, a interrupção de investimentos no segundo período foi no caso estadunidense é ilustrativo mostrando a interrupção da trajetória iniciada localmente no período anterior. Uma vez concluídos os programas iniciados durante o governo Bush, os recursos destinados ao desenvolvimento dessas tecnologias foram em grande parte descontinuados, conforme o E1 coloca:

“In the U.S., the budget has gone down significantly since 2006 when President Bush announced the national hydrogen initiative [...] 1.5 billion in total I think over 5 years that was

going into hydrogen research with the goal of putting a vehicle by 2020. That goal has been achieved. So, today, a person can buy a fuel cell vehicle and fuel it with hydrogen, but they can only do that in California. Since 2011 the budget really dropped, after the initiative.” (E1)

A iniciativa que o E1 se refere é a FreedomCar, que foi descontinuada durante o governo do presidente Barack Obama (2009-2017), quando ocorreu um forte incentivo para promoção de tecnologias de maior maturidade, como veículos a bateria. A decisão foi influenciada pela preocupação em conter e otimizar os gastos dos governos causada pela crise econômica, levando a administração da época priorizar a alocação de recursos em atividades com resultado no curto médio prazo (DOE, 2012).

Crescia o ceticismo em relação a concretização das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível por parte dos governo e das indústria que enfrentava constantes barreiras tecnológicas ao desenvolvimento tecnológico (BEHLING, 2013). As redefinições do papel do petróleo, diferentes apostas tecnológicas e redução de financiamentos disponíveis contribuíram para o aumento das incertezas sobre os direcionamentos das tecnologias no fim do primeiro período. A baixa maturidade tecnológica desfavoreceu a escolha pela adoção dessas tecnologias em um momento inicial comparadas a, por exemplo, motores elétricos a bateria.

“**The perception of hydrogen decreased** in 2003, 2004 until 2007 or 2008 due to the fact, this is my personal interpretation, there were **over expectations**. Car companies had claimed that they would commercialize fuel cell vehicles in early 2004, and then it was postponed to 2007, and then postpone to you know, continually postpone to afterward. **That led to the perception that hydrogen is no longer the best solution**, and lithium-iron technologies on the **batteries** side became viable for the automotive application.”(E4)

Para diversos agentes desenvolvedores dessas tecnologias, sejam da indústria, da pesquisa ou governo, a somatória desses fatores culminou no abandono de suas atividades. Os investimentos feitos, que não surtiram os efeitos desejados para a implementação da tecnologia, ao fim do primeiro período pareciam um contrassenso. Os antigos problemas e as soluções identificadas haviam sido despropositados na medida que a 5ª Revolução Tecnológica se instalava e redefinia as diretrizes para se inovar. Ao fim dos anos 2000 e início dos 2010 as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível não representavam o interesse de nenhum dos quatro dos principais setores – automotivo, gases industriais, óleo e gás e elétrico - sendo majoritariamente desenvolvidas por startups e universidades e centros de pesquisa.

O segundo período, 2010-2020, se inicia com as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em crise, sem ainda um direcionamento para o justificar seu desenvolvimento. A retomada do

enquadramento das tecnologias de pilha a combustível e tecnologias do hidrogênio no novo paradigma tecno-econômico dependeu da continuidade dos esforços em pesquisa e desenvolvimento iniciados a partir da trajetória tecnológica do paradigma anterior. Destaca-se, por exemplo, os acordos de longo prazo entre governos e setores industriais principalmente no Japão e União Europeia, mais notadamente a Alemanha, estabelecidos na iminência da crise econômica de 2008 ou antes, mas que foram mantidos garantindo um escoamento de recursos ao desenvolvimento dessas tecnologias durante a crise. Esses acordos, consubstanciados em programas de pesquisa e desenvolvimento, apresentavam diretrizes para além dos problemas refletidos pelos conflitos do petróleo do paradigma anterior. No caso japonês, por exemplo, os programas de pesquisa e desenvolvimento para tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível priorizavam a questão da segurança energética, o que abrangia escassez de fontes de energia em geral, não apenas ao setor de transporte (HASHIMOTO, 2015). Já no caso da Alemanha e outros países da Europa, enfatizava-se não apenas a questão das emissões referente às emissões, mas incluíram também a questão do aquecimento global.

Observa-se que no primeiro período o contexto similar referente à geopolítica do petróleo e poluição do ar levou a decomposições distintas do problema percebido pelos agentes a frente do desenvolvimento das tecnologias, como no caso estadunidense, japonês, alemão e de outros países da Europa. Uma vez que as atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio eram estabelecidas a partir de diferentes agentes de indústrias, governos, universidades, o problema derivava também do seu conjunto de soluções propostas, essas intrínsecas às trajetórias anteriores. As diferentes percepções acerca do problema, por sua vez, influenciaram novamente a trajetória das tecnologias localmente, resultando em por exemplo programas de pesquisa desenvolvimento com objetivos específicos distintos. Isto corrobora com a literatura apresentada na seção 2.2 acima, que sugere que no caso de problemas mal-definidos, o conjunto de soluções possíveis influencia a própria definição do problema (HEAD, 2008; RITTEL; WEBBER, 1973a).

Enquanto tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível encontravam obstáculos técnicos e econômicos nos Estados Unidos, os países da União Europeia, embora severamente afetados pela crise, contaram com o apoio do Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCHJU) – um órgão criado em 2008 para coordenar projetos de pesquisa e desenvolvimento financiados por recursos da União Europeia (50%) e empresas interessadas (50%). Dessa forma, mesmo com limitações nos recursos a nível nacional, o FCHJU garantia a possibilidade de financiar a pesquisa e projetos de demonstração.

“There was a **period of crisis** at the **international** level. In Italy, the availability of grants and **funding** for this topic, not only for this topic but also for this topic, **was reduced drastically**. The same in the U.S., the amount of money available from the Department of Energy for fuel cell was reduced. I know this because I was working a lot with Siemens in Pittsburg, and they abandoned the high-temperature fuel cells. **Before 2007/08 we received a lot of money for fuel cell projects, after this period, the amount of money was drastically reduced**. But at the same time, in **Europe**, the situation was different, because in **2007 we started the Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking**. The first edition. It was in the 7th framework of the finance program. So from 2007-2014. This new technology platform collected together the EU and most of the industries and research centers and universities in the topic.” (E6)

O relato do E6 resume a importância do financiamento do FCHJU para a continuidade dos projetos em pilha a combustível e tecnologias do hidrogênio durante e após a crise econômica. O relato do E6 também aponta o papel do FCHJU em conectar universidades e centros de pesquisa às indústrias que atuam na temática.

O caso alemão contou com outra fonte de apoio ao desenvolvimento das tecnologias além das advindas da União Europeia pelo FCHJU – a do governo alemão o através do Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (NIP). A articulação do programa se iniciou em 2006 baseada na iniciativa Clean Energy Partnership de 2002, quando governo e indústrias do setor de transporte se uniram para reduzir a dependência do petróleo (CLEAN ENERGY PARTNERSHIP, 2008). Como o próprio termo “*clean*” enfatiza, já havia uma maior proeminência das questões ambientais no caso alemão que facilitou a continuidade dessas políticas no novo contexto colocado no segundo período. O orçamento total do NIP foi de €1,4 bilhões durante os anos de 2008 e 2016, sendo 50% arcado pelo governo alemão e o restante pelas indústrias interessadas (BONHOFF, 2010). A coordenação desse recurso foi feita pelo Nationale Organisation Wasserstoff (NOW), uma organização “neutra” criada para estruturar e coordenar o NIP e garantir a estabilidade para o amadurecimento tecnológico das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível.

“The German government **10 years ago** said: “if we all agree on a research and development and demonstration program for hydrogen and fuel cells, which goes over 10 years to start with, we have to make sure that we have a central go-to-point, a neutral go-to-point, a moderator, sometimes an arbiter, who is looking at the overall targets”. **NOW is not about individual industry targets or individual policy targets, it is really a platform, a network to combine all of these interests** with a very powerful instrument to organize and evaluate projects proposals that industry wants to receive findings for.” (E4)

Destaca-se também o papel da International Partnership for the Hydrogen and Fuel Cells Economy (IPHE) na transição entre os dois períodos em análise. Facilitada pelo Department of Transport dos Estados Unidos em 2003, a IPHE nasce com objetivo de fomentar a cooperação internacional em

pesquisa e desenvolvimento em pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio nos moldes do período anterior. Através de reuniões anuais, a IPHE auxiliou no realinhamento das estratégias e direcionamentos tecnológicos a partir do compartilhamento de informações entre os principais executivos dos governos dos países membros.

Na medida em que a União Europeia, Japão, Coreia e outros países investiam no desenvolvimento das tecnologias, mudava-se o contexto das atividades de design. Os novos problemas emergentes tinham, como no período anterior, uma estreita relação com o uso de combustíveis fósseis, mas menos relacionadas com questões relativas à exaustão do petróleo e sua poluição do ar, e mais com o aumento da taxa de CO₂ na atmosfera resultante da queima de recursos energéticos fósseis intensivos em carbono. Com isso, a poluição local do ar, especialmente de grandes centros, ganhou uma dimensão global. O problema das emissões de CO₂ é fundamentalmente diferente, o que levou a consideração de um outro grupo de soluções possíveis. Inclui-se como parte do problema outras fontes fósseis como o carvão e gás natural utilizado nas plantas termoeletricas e não apenas o petróleo vindo de fontes estrangeiras. A ênfase, antes no setor de transporte, passou a ser no setor elétrico, que começou a enfrentar crescentes restrições às suas emissões e incentivos financeiros de governos para transitarem para formas renováveis de geração de eletricidade.

Argumenta-se nesta tese que a problemática das emissões de CO₂, relacionada com o aquecimento global, ressoa com outras questões de natureza similar em outros setores. São essas, por exemplo, geração de resíduos derivados do plástico, desperdícios de alimentos, consumo excessivo de bens não-duráveis e obsolescência planejada de equipamentos. Em sua essência, essas preocupações estão relacionadas com a forma como os recursos finitos disponíveis na natureza são apropriados e gerenciados. Conforme explicado na seção 2.3.1, o que diferencia as questões ambientais a partir dos anos de 2010 é que as mesmas se tornaram uma fonte incessante para o desenvolvimento de novas tecnologias, especialmente para as da Informação e Comunicação. Sob esta lógica crescente e cada vez mais aceita, possibilita-se o direcionamento tecnológico necessário para o Golden Age da 5ª Revolução Tecnológica da Informação e Telecomunicações, a denominada Era Verde, como sugerido por Perez (PEREZ, 2016, 2019).

As atividades de design das pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio se ajustaram gradualmente a problemática das emissões de CO₂, complementando as alternativas tecnológicas

necessárias para a descarbonização. O alinhamento entre as atividades de design das tecnologias e o novo paradigma tecno-econômico não foi imediato porque dependeu de um avanço inicial da participação de fontes renováveis intermitentes nas matrizes energéticas, que originou uma dificuldade de gerir a oferta e demanda da eletricidade sem um vetor de energia. Assim, conforme as instalações de fontes renováveis de energia se expandiam, lideradas especialmente pela Alemanha com o Energiewende, evidenciam-se os desafios para consolidação de sistema de energia com baixa emissão de CO₂.

“There was an old view that we could produce all of our energy demand, **100% renewable within Germany. Now we know that this will never happen.** We import a lot of energy, fossil-based fuels, and gas. It is pretty clear today, that in a very long future we have to have an **import option for renewable energy.** It is clear that it is not easy to import these demands just by electricity, but you can import hydrogen or synthetic fuels, gas. So, we **need hydrogen** because we will never be able to be **100% clean renewable independently.** Our **energy demand is much higher than our potential to produce renewable electricity.** And that is the same for **Japan.** They will **never import direct current,** they have to have an **import option, like hydrogen or synthetic fuel** or gas or something. That is the reason for the hydrogen strategy, we will need **gaseous renewable energy carrier in the future for our energy system.**” (E28)

O E28 enfatiza a necessidade de uma opção de importação de energia renovável para compor uma matriz energética menos intensiva em CO₂, uma vez constatado que somente o potencial de geração de energia renovável da Alemanha não é o suficiente para suprir a demanda de energia do país. A partir do crescimento de fontes renováveis intermitentes nas matrizes energéticas emergiam novos problemas que embasavam as subseqüentes atividades de design referentes às pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio. Nesse novo contexto, o uso do hidrogênio e outros combustíveis sintéticos (ex. amônia e metano) como um vetor energético passam a solucionar problemas referentes a armazenagem de energia elétrica e descarbonização de setores industriais e transporte pesado.

O impulso para a retomada das atividades de design das pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio não foi dado pela indústria automotiva ou do óleo e gás que haviam acumulado uma trajetória de conhecimento no período anterior, mas sim pelo setor elétrico. Apesar de uma forte participação no desenvolvimento tecnológico durante o primeiro período, muitas empresas do setor de transporte, gases industriais e do óleo e gás encontraram dificuldades em alinhar suas atividades de design de tecnologias de hidrogênio e pilhas a combustível com as questões das emissões de CO₂ (WILBERFORCE *et al.*, 2019). Para o setor elétrico, por outro lado, essas tecnologias possibilitavam a expansão das renováveis bem como de suas operações a outros nichos como o do transporte.

“The mobility sector, at the end of 1990, had a huge activity from **Daimler.** They claimed: “Tomorrow everybody will have fuel cell cars”, but **that was, later, completely stopped.** After

that period, nobody had really focused on the mobility sector. And nobody believed in the mobility sector and the fuel cell sector. That suddenly changed in the **last 5-6 years because the driver was not the mobility sector, but the electricity sector**, with sector coupling.” (E27)

A principal função das tecnologias hidrogênio no paradigma da 5ª Revolução Tecnológica é viabilizar o uso de fontes renováveis de energia, principalmente em locais com baixa oferta dessas fontes e alta demanda por energia. O topo da hierarquia do design tecnológico passou a ser ocupado pelas tecnologias do hidrogênio, sendo as pilhas a combustíveis componentes facultativos do design almejado por diversos agentes, já que outros processos de conversão como a própria combustão do hidrogênio para uso térmico passaram a ser considerados em nichos específicos. Dentre as tecnologias do hidrogênio, os eletrolisadores, utilizados para obtenção do hidrogênio eletrolítico, são a principal solução tecnológica desenvolvida no contexto da descarbonização, uma vez que conectam a produção de hidrogênio às energias renováveis intermitentes instaladas. Gradualmente formadores de políticas públicas foram assimilando o potencial do hidrogênio verde no armazenamento de energia e com isso direcionando projetos de pesquisa e desenvolvimento para acelerar o desenvolvimento de eletrolisadores.

“We need to look at how we can quickly **decarbonize** our economy. We NEED [ênfático] to come on! Earth is heating up! That is why we are supporting technologies that are ready now and that is for us the electrolyzers. Nearly **70% of our money goes to electrolyzer** technologies, building MW scales. 10 years ago, back in 2010, let’s say, we were at only 150 KW electrolyzer technology. We move now to the MW scale, we had 1 MW, now we have, I just sign a project contract for a 20MW scale electrolyzer. We have really moved fast. At the same time, **we drastically reduced costs**. Before it was maybe €5.000 per KW, we are now at €200-300 per KW. So, we **boosted the capacity** to the megawatt-scale and **reduced the costs** drastically. Industries like **steel, cement, refinery**, start to become interested. 10 years ago, they were not interested at all, because it was too small. Now it is big and starts to become interesting. **But, to really decarbonize our whole economy we have to go to the GW scale electrolyzers.**” (E3)

Pelo relato, é possível perceber que o E3 justifica o desenvolvimento de eletrolisadores como fundamental para a descarbonização da economia, exemplificando o direcionamento da 5ª Revolução Tecnológica na construção de política pública. Além de não emitirem CO₂ durante a produção de hidrogênio, esses dispositivos operam convertendo em um gás, o H₂, o excedente de eletricidade. Esse gás, além de mais fácil de ser armazenado, apresenta outras aplicações nos sistemas de energia não limitadas à eletricidade. Isto permite, em tese, adequar os preços de oferta e demanda de eletricidade fornecida a partir de fontes intermitentes com maior facilidade. Observa-se também que os avanços em potência e redução de custos em alcançados após 2010 fizeram com que a tecnologia se tornasse atrativa para setores intensivos em energia térmica, esses sem ainda outras possibilidades de descarbonização. Entretanto, é preciso ponderar que tanto as tecnologias do hidrogênio quanto as da pilha a combustível

ainda necessitam de escala para serem competitivas com outras soluções alternativas (VAN RENSSSEN, 2020).

As dificuldades de descarbonização de setores ainda sem muitas alternativas (ex. transporte pesado e de longa distância, aquecimento, indústria de materiais virgem e fertilizantes) aumentaram o interesse no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio (IRENA, 2018). Uma vez obtido de fontes renováveis através de tecnologias como eletrolisadores ou processos de biomassa, o hidrogênio pode ser utilizado para geração de energia térmica ou elétrica em diversos setores sem qualquer emissão ou com emissão nula de CO₂. Nesse sentido, destacam-se os esforços para acoplar diferentes setores à geração de eletricidade renovável otimizando os processos de geração e conversão de energia.

“The driver is not only energy. It is **sector coupling**. It is **easy to fulfill the targets for the energy in the electricity sector, but nothing happens in the transport and heating sectors**. Now more people understand that primary energy content in the future will be renewable energies, renewable electricity from fluctuating resources like PV, wind. Now they understand, that, of course, you can store, but normally it makes more sense to use **renewable electricity as a molecule** which you can store very easily in the transport sector. That is more efficient than if only you **store** it and then **re-electrify** it, which is very expensive. They understood that this coupling is a huge opportunity to get a cheaper system overall. Power-to-X³⁷ is not storage. It is more and more the understanding that it is not really storage. From the perspective of **the electricity sector, it is that you have to store less**. If you want to produce and deliver renewable energy for all sectors, from the electricity side, you need more installed capacity, which means that by the low offer from wind and PV you have energy security for the electricity system. [...] Overall, **you want to produce electricity** and you can use it very **cheaply in the transport sector**. That only works if you bring both sectors together.” (E27)

O acoplamento de setores é a principal vantagem do hidrogênio comparada às alternativas concorrentes (ex. baterias e uso direto da biomassa) já que os diferentes usos de um mesmo vetor energético apresentam potenciais externalidades positivas advindas de, por exemplo, economias de escala e compartilhamento de infraestrutura aos diversos setores.

Ao contrário do primeiro período quando os designs tecnológicos preferíveis por diferentes setores não levavam a uma concatenação de tecnologias complementares, ao fim do segundo período, diferentes trajetórias tecnológicas convergiram para o uso do hidrogênio em sistemas de energia na medida em que novos problemas referentes a geração a partir de fontes renováveis eram evidenciados. O principal benefício da economia do hidrogênio passou a ser a redução de custos no longo prazo ao acoplar diferentes serviços de energia, tais como eletricidade, aquecimento e transporte (EMONTS *et al.*,

³⁷ O Power-to-X é o termo usado para designar a conversão da eletricidade em “X”, que pode ser um gás como o hidrogênio.

2019; GIELEN *et al.*, 2019; VAN RENSSSEN, 2020). Com isso, os investimentos para uma estrutura mínima necessária para o uso do hidrogênio energético passaram a interessar vários atores influenciados pelo contexto da mudança climática. É importante observar que o hidrogênio adiciona, a princípio, uma complexidade ao sistema de energia, que requer um esforço coordenado de diversos setores e um investimento alto para sua operacionalização. Porém, o que se argumenta é que no médio e longo prazo essa trajetória apresenta maiores benefícios, tendo em vista as necessidades de manter a segurança dos sistemas elétricos frente a redução de emissões de CO₂.

O Quadro 10 sumariza as diferenças nas atividades de design entre os dois períodos, 2000-2009 e 2010-2020, observadas pelos participantes.

Quadro 10 Diferenças nas atividades de design por período

	2000-2009	2010-2020
Contexto	Oscilações preço petróleo, crescentes preocupações ambientais com qualidade do ar	Aquecimento global, emissões de gases de efeito estufa por parte do setor elétrico e transporte
Problemas	Combustão de combustíveis derivados do petróleo – majoritariamente no setor de transporte	Suprimento de energia para diversos setores utilizando majoritariamente fontes renováveis intermitentes
Soluções	Pilhas a combustível e reformadores	Eletrolisadores, hidrogênio como vetor energético
Outras soluções	Carros elétricos a bateria	Baterias (transporte e estacionária), tecnologias nucleares e biocombustíveis (combustão)

Fonte: elaboração própria

O Quadro 10 caracteriza as diferentes atividades de design distintas observadas em dois períodos a partir de uma perspectiva generalizante das atividades de design específicas praticadas pelos agentes nelas envolvidos. Ressalta-se que outras importantes atividades de design ocorriam concomitante às descritas em ambos os períodos. O Quadro 10 apresenta uma ótica suficientemente distante que homogeneiza diferentes atividades de design específicas captando-as através de uma lógica ampla predominante, mas não exclusiva, que orienta e embasa as justificativas das escolhas feitas pelos agentes.

Essa lógica é um conjunto de regras e acordos conhecidos resultantes da combinação das aceitações sociais e do *corpus* propositivo que cada agente traz consigo nas suas atividades específicas. A lógica estabelece os critérios de decisão ao longo de atividades específicas na medida que reforça esforços consonantes e marginaliza os esforços tangentes ao desenvolvimento tecnológico, refletindo o *modus operandi* de um paradigma tecno-econômico. No caso em estudo, os dois períodos sintetizados no Quadro 10 estão submetidos a lógicas de dois paradigmas distintos, o da 4ª e 5ª Revolução Tecnológica, como ilustrado pela Figura 20.

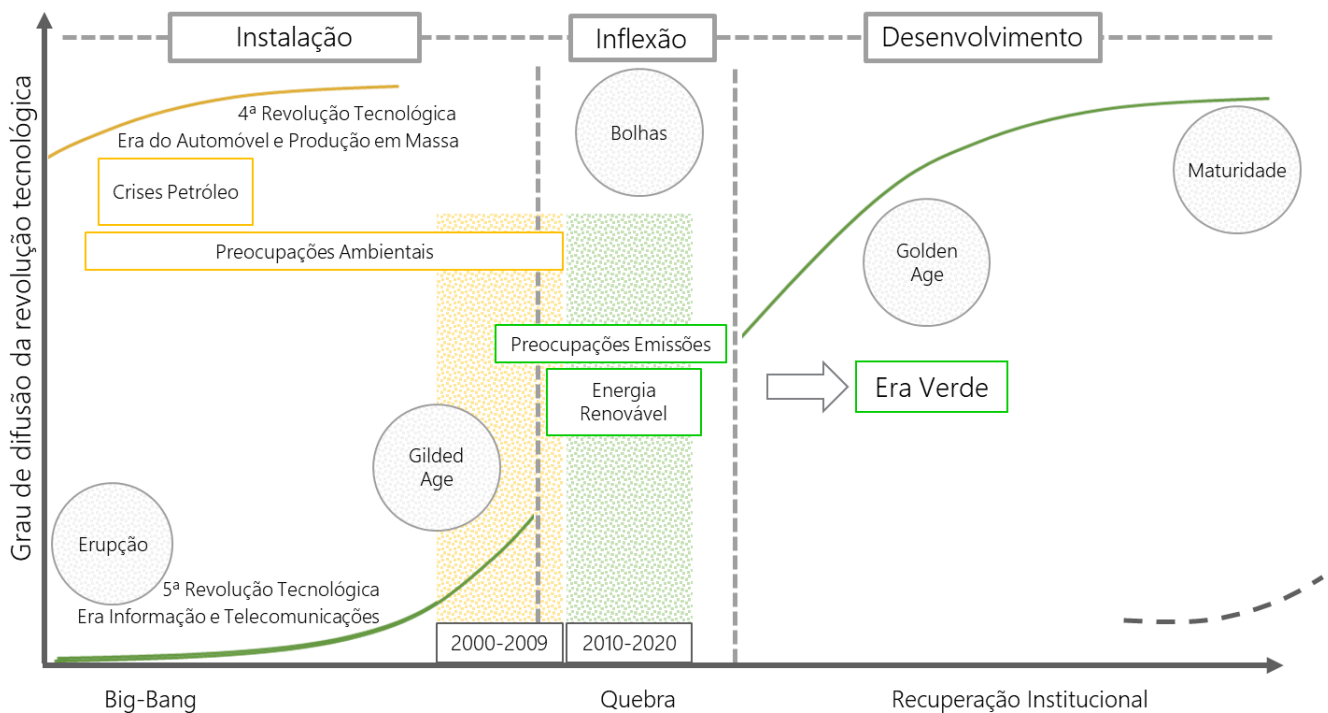


Figura 20 Cronologia do período analisado na instalação dos paradigmas tecno-econômicos. Elaboração própria a partir de Perez (2002)

O período analisado, 2000-2020, ocorre durante a instalação da 5ª Revolução Tecnológica da Era da Informação e Telecomunicações e o ponto de inflexão desse paradigma. As atividades de design observadas no primeiro período (2000-2009) representado em amarelo na Figura 20, iniciadas a partir do contexto da segurança energética causada pelas crises do petróleo e das crescentes preocupações ambientais sobre a poluição do ar, estão associadas aos problemas colocados pelo paradigma da 4ª Revolução Tecnológica. A estreita relação das atividades de design das tecnologias do hidrogênio e pilha a combustível com o setor automotivo e sua cadeia de suprimento, bem como as consequências

ambientais negativas causadas pela produção em massa estão no cerne da exaustão do *modus operandi* da 4ª Revolução Tecnológica, evidenciam o seu *locus* na lógica da Era do Automóvel e Produção em Massa.

A crise de 2008 foi o interrompe a trajetória tecnológica ainda pautada na 4ª Revolução Tecnológica, uma vez que os investimentos nessas tecnologias visando reforçar o paradigma se cessaram. É importante enfatizar que cada paradigma contou com uma fonte de energia emergente. Na medida em que as emissões de CO₂ dentro do contexto do aquecimento global canalizaram as preocupações ambientais em um problema único e bem definido, foram criadas as possibilidades para o surgimento do Golden Age do paradigma da 5ª Revolução Tecnológica já instalado - a Era Verde. Aos poucos, com a implementação de fontes renováveis de energia, as atividades de design das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no segundo período, 2010-2020 se alinharam às novas problemáticas colocadas pelo paradigma tecno-econômico da 5ª Revolução Tecnológica. A lógica por trás do desenvolvimento tecnológico é distinta daquela do paradigma anterior. A produção em massa, tanto pela poluição quanto pelo desperdício, começa a ser substituída por uma produção precisa e sensível a demanda responsiva proporcionada pelas novas Tecnologias da Informação e Comunicação. O lucro antes alcançado pelos altos e constantes volumes de produção, passa a ser atingido através da otimização da produção (PEREZ, 2019; QUAH, 2019). Os dados obtidos pelo constante monitoramento da produção e demanda garantem uma nova forma de organizar os processos produtivos baseados na intensidade e gestão da informação, nas estruturas de redes que interconectam diferentes nichos específicos e adaptabilidade da oferta e demanda. Essas passam a ser as principais formas de solucionar os problemas das atividades de design de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, evidenciando a influência dos paradigmas tecno-econômicos nas atividades de design das tecnologias em análise.

4.2. Atividades de design: a disputa pela dominância tecnológica

O que se observou através dos resultados até então foi uma mudança no alinhamento das atividades de design nos dois períodos investigados em um nível de análise abstrato, que não pormenoriza as especificidades das atividades de design específicas voltadas para o desenvolvimento das tecnologias. A presente seção tem como objetivo apresentar as principais atividades de design ainda em desenvolvimento identificadas ao longo da pesquisa sob um nível mais específico de análise, onde se encontra uma maior variedade entre a percepção do problema e da solução. Observa-se que a redução da variedade das soluções tecnológicas é necessária para que um design dominante se consolide, permitindo que as tecnologias possam atingir maior maturidade.

Através das entrevistas e análises de dados secundários, foram percebidas três atividades de design predominantes e diferentes. Essas podem ser entendidas como as principais trajetórias tecnológicas reforçadas por políticas públicas ou por investimentos de grande porte de multinacionais. É importante enfatizar que o próprio número elevado de tecnologias agrupadas em tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível já seria por si um importante grau de variação das atividades. Entretanto, as diferenças nas atividades de design analisadas na presente seção não decorrem dos diferentes tipos de tecnologias *per se*, mas das formas como os agentes priorizam e decompõem o mesmo conjunto de problemas de forma não-sistemática para construção de suas soluções. Assim, as atividades compreendem um conjunto de tecnologias que se complementam para solucionar um problema colocado.

A **primeira atividade de design** é a que apresenta a relação mais forte com os problemas do aquecimento global. Ela está relacionada com o desenvolvimento de tecnologias para produção de hidrogênio verde associada a geração de energia elétrica renovável, mais notadamente através do uso de eletrolisadores. A atividade está alinhada com a proposta da emissão zero de carbono em diversos setores, principalmente o de geração de eletricidade e transporte. A essa atividade interessa somente o hidrogênio verde ou o neutro em CO₂ como no caso do uso de biomassa, sendo o último um esforço menor.

Os principais atores dessa atividade são empresas do setor elétrico que almejam expandir o mercado fornecendo um combustível a ser utilizado no setor de mobilidade. Essas contam com um amplo apoio dos formadores de política pública, interessados em atingir as metas de redução de CO₂ e preocupados em promover soluções para o setor de transporte, especialmente o de carga pesada e longa distância.

Os principais mecanismos utilizados para a implementação das soluções das atividades de design são regulações restritivas às emissões de CO₂ e o uso de mídias para o engajamento social em questões climáticas para obter respaldo político.

Essa atividade de design encontra maior força na União Europeia e em outros países europeus, como o Reino Unido e Noruega. É possível afirmar que há um forte interesse em expandir a liderança tecnológica do continente europeu a partir dessas tecnologias. Ademais, a predominância da atividade no continente está relacionada com políticas de implementação de fontes renováveis e intermitentes de energia e seus sucessivos problemas de gestão das redes elétricas, como foi o caso da Alemanha. Exemplos de estratégias de governos para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível podem ser observados na Alemanha e na União Europeia (BMW, 2020; EUROPEAN COMMISSION, 2020).

A segunda atividade de design está relacionada com o aprimoramento de tecnologias de pilhas a combustível e é influenciada por uma disputa tecnológica com as baterias, especialmente no setor de transporte. A atividade busca implementar a tecnologia em nichos específicos do transporte, tais como carga pesada e longa distância de veículos terrestres, transporte marítimo e aéreo. Nesses nichos, diferentemente do de automóveis de curta distância, pilhas a combustível apresentam maiores vantagens devido a sua maior autonomia, rapidez de abastecimento e maior escalabilidade. Em nichos em que os transportes apresentam uma rota fixa, como ônibus, embarcações, aviões, e trens os problemas referentes a distribuição do hidrogênio são minimizados, uma vez que basta criar uma estação de abastecimento ao longo de seus percursos.

Os principais atores dessa atividade são as indústrias automotiva, principalmente voltadas para o transporte pesado, e indústria de componentes. À essa atividade de design não importa a fonte e os processos de produção hidrogênio, desde que o mesmo atenda às condições necessárias de pureza para o funcionamento das pilhas a combustível. Assim, essas empresas não são responsabilizadas pelas emissões de CO₂ ao longo da cadeia de produção de hidrogênio. O interesse é reduzir os custos finais para os consumidores de automóveis, caminhões, ônibus para que a tecnologia seja implementada mais rapidamente. Por isso, apoiam a criação de uma infraestrutura para estações de abastecimento de hidrogênio e formas de reduzir o preço do hidrogênio para o consumidor final.

Os mecanismos utilizados para a implementação dessa atividade são subsídios de governos para consumidores finais de veículos a pilha a combustível e regulações de emissão de CO₂ no setor de transporte, como, por exemplo, as já existentes em algumas cidades.

As principais localidades em que essa atividade se destaca são Japão, Coreia do Sul e Califórnia. Os três locais contam com fortes políticas de subsídio aos veículos elétricos movidos a pilha a combustível, estratégias de implementação de estações de abastecimento e uma forte atividade de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Exemplos de estratégias de governos para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível voltadas para esse tipo de atividade de design podem ser observados na Coreia e no Japão (GOVERNMENT OF KOREA, 2018; HASHIMOTO, 2020).

A terceira atividade de design se refere a produção e distribuição de hidrogênio a baixo custo. Trata-se, em grande parte, de esforços para o desenvolvimento de uma infraestrutura para distribuição do hidrogênio. Muitas vezes essa atividade é colocada como uma opção em que “todos podem ganhar” (*win-win situation*).

A atividade apresenta dois grupos de atores. O primeiro são empresas de base tecnológica que desenvolvem tecnologias para as estações de abastecimento de hidrogênio, tais como bocal de reabastecimento, compressores e válvulas e mangueiras de alta pressão. E o segundo são empresas dos setores do óleo e gás e gases industriais. Em ambos os casos, o principal tipo de hidrogênio produzido é cinza, apesar de mostrarem um interesse na produção do hidrogênio verde ou azul. O mais importante para essa atividade é que o hidrogênio “faça sentido economicamente”, ou seja, apresente um preço competitivo.

O principal mecanismo de implementação dessas atividades é a promoção da demanda por hidrogênio em setores não estritamente relacionados com a produção de energia, mas intensivos no uso de energia, como por exemplo fertilizantes, cimento, aço e cerâmicas. Há o apoio de governos para a criação de demanda, como no caso de subsídio a carros pessoais e a frotas de taxis e compra de ônibus e trens. Outro mecanismo, esse mais voltado para as *start-ups*, é o apoio de governos para a construção das estações de abastecimento. Os Estados Unidos apresentam políticas de governo voltadas para a terceira atividade de design (FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION, 2020).

As três atividades de design apresentadas compreendem os principais esforços para o desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio e pilhas a combustível. De uma forma geral, sem

considerar os inúmeros componentes periféricos dos sistemas envolvidos em cada artefato tecnológico, o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível perpassou quatro principais setores: o do óleo e gás, o de gases industriais, o elétrico e o automotivo.

Conforme colocado na seção 4.1 acima, durante o primeiro período, o problema principal a ser solucionado nas atividades de design emergia do setor de transporte e seus combustíveis, influenciados pelas questões acerca do petróleo. A mudança do paradigma tecno-econômico, seguida de crescentes regulações e pressões político-sociais, incentivou esses setores a buscarem alternativas menos intensivas em emissões de CO₂ para seus processos e produtos, sob um risco de perda de competitividade e espaço de mercado. A inserção das atividades de design na lógica da 5ª Revolução Tecnológica, especialmente no contexto da agenda verde, realocou o problema para os sistemas de energia de uma forma mais ampla, afetando mais diretamente, a participação do setor elétrico no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível.

O contexto do aquecimento global aumentou o interesse do setor elétrico na substituição da geração termoelétrica por elétrico-renováveis utilizando suas capacidades expandidas de energia eólica e solar. Nessa perspectiva, abriu-se a oportunidade para um arranjo entre o setor elétrico e o automotivo que favoreceu, principalmente no início do segundo período (2010-2020), o desenvolvimento de carros a bateria, esses em um estágio de maturidade tecnológica mais avançado que os carros elétricos movidos a hidrogênio (IEA, 2020c). Os carros a baterias romperam com os oligopólios tradicionais tanto do setor automotivo, que não se engajou inicialmente nessa trajetória tecnológica, quanto do setor do óleo e gás, que perde o mercado de veículos de pequeno porte e curtas distâncias (FREDRIKSSON; ROTH; TAGLIAPIETRA, 2018). Assim, os setores elétrico e do óleo e gás passaram a competir pelo mercado de automóveis onde prevalecia o uso de tecnologias de bateria em veículos híbridos elétricos ou tipo *plug-in*.

A participação do setor elétrico no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível não foi imediata, nem idealizada para o cenário de suprimento de hidrogênio para o uso em veículos, onde o setor se concentrou em tecnologias de bateria. Pelo contrário, como relatado pelo E3 e outros entrevistados, a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis foi amplamente explorada pelos setores elétrico e o automotivo-elétrico em expansão como uma forma de excluir as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível das possíveis soluções a redução de emissão de CO₂.

“What I see is that batteries went fast because they had big interest from **major electricity companies, Iberdrola, Engie and all others that produce electricity**. If they can include cars, trucks or whatever with batteries, they can sell a lot of electricity. So they put a bunch of lobbyists behind that, not only to **lobby** and teach ministers and all the people about the benefits of batteries, but also to say **how bad fuel cells and hydrogen are**, just to promote their own technology [...] One of the biggest obstacle is basically the **neutrality in the lobbying interest**. To decarbonize we need all technologies, we need batteries, biofuels, fuel cells, hydrogen... we need everything! Otherwise, we will never reach the Paris Climate Agreement. Unfortunately, the hydrogen sector is an emerging sector, with many new companies, **startups that don't have a big lobbying capacity**. Now it is starting to become **better** because the **big companies are now coming in**, but before they **didn't have a big voice**.” (E3)

A aproximação entre o setor elétrico e o automotivo-elétrico, este último composto majoritariamente por *startups* chinesas (MECKLING; NAHM, 2019; ZHILI; BOQIANG; CHUNXU, 2019), suscitou, novamente, o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível nos setores do óleo e gás e automotivo tradicional. Além disso, outros indícios, tal como o Acordo de Paris, fortaleciam a necessidade do setor do óleo e gás de investirem em novas tecnologias que reduzissem suas emissões de CO₂. Dessa forma, ao mesmo tempo que o contexto do aquecimento global levava a uma certa obsolescência do uso de combustíveis fósseis para produção de hidrogênio, as crescentes restrições a veículos a combustão fizeram com que o hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis se despontasse como uma possível alternativa para as empresas do óleo e gás assegurarem suas participações no setor automotivo com os veículos movidos a pilha a combustível (VAN DE GRAAF *et al.*, 2020).

A partir meados dos anos 2010, com as dificuldades no gerenciamento dos sistemas de energia baseados em fontes renováveis intermitentes (EMONTS *et al.*, 2019) o uso do hidrogênio no setor elétrico passou a ser conjecturado como uma forma de armazenar a energia excedente gerada em períodos de baixa demanda (IEA, 2017; IRENA, 2019, 2020). Como colocado pelo E2, os operadores de gás natural e eletricidade, ambos voltados para a geração de eletricidade, passaram a dominar o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio:

“Still Air Liquide, Shell, Michelin, the companies that **look for the piece of the cake** in hydrogen distribution and maybe hydrogen production, but this is not clear to me if that will be industrial gas companies. **Electricity network operators, gas network operators will be the new players** that could **dominate the scene** of hydrogen production and distribution more than industrial gas and oil companies.” (E2)

O setor elétrico precisou fomentar uma base de conhecimento distinta (HIESL; AJANOVIC; HAAS, 2020) para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível daquela das atividades de design realizadas no primeiro período pelos demais setores que visam, prioritariamente, o

uso do hidrogênio em veículos elétricos. As tecnologias para eletrólise e armazenamento de hidrogênio se tornaram o centro desse desenvolvimento.

É importante notar que a transição para fontes renováveis em si já havia levado as empresas do a explorarem produtos e processos fora de suas bases tecnológicas produtivas para se adequarem ao problema das emissões de CO₂. Empresas já consolidadas, denominadas incumbentes, tais como as dos setores automotivo, elétrico e do óleo e gás, estão estruturadas sobre uma base tecnológica que as garantem vantagens competitivas e criam barreiras à entrada de novas empresas e tecnologias concorrentes em seus mercados. Essas vantagens são constituídas de ativos físicos, tais como sua capacidade produtiva instalada com equipamentos que minimizam o custo por unidade produzida, e ativos intangíveis como o conhecimento acumulado através da aprendizagem de, por exemplo, experiências e repetições ao longo do tempo (BARNEY, 1991; PENROSE, 1959). Por isso, empresas incumbentes preferem e conseguem manter os seus padrões tecnológicos já existentes mesmo que esses sejam ambientalmente menos interessantes do que os propostos por empresas concorrentes que tentam se inserir no mercado com novas tecnologias.

A transição para sistemas de energia renováveis requer, necessariamente, alterações na base tecnológica produtiva que reduzem as vantagens competitivas das empresas incumbentes. Ao mesmo tempo em que monitoram e investem em avanços tecnológicos, paradoxalmente, empresas incumbentes dificultam a entrada de novas tecnologias por estarem aprisionadas (*lock-in*) às suas bases tecnológicas que as garantem seus posicionamentos de mercado (AJANOVIC; HAAS, 2021; GOSENS, 2020; MATHEWS, 2013). Assim, enquanto houver espaço para a manutenção de suas atividades, essas empresas dificultarão a entrada de novas tecnologias, como no caso do setor automotivo, em que empresas incumbentes desaceleraram esforços para implementação de veículos elétricos.

“It is often that automotive companies are used to these business models that if you have the knowledge, **you don’t want to change** the area because then your knowledge is not **worth it anymore**. They have this old-minded setup and **don’t want to change**, and they also **never had to change**. The same for electric companies. They were in a **monopoly** world, and now they have to get used to these life cycles where you have other industries. For example, in Germany, a university startup built a battery electric vehicle fleet for the Post from scratch. If you think that no OEM could do that, but a university startup, then you think: “ok, there is something wrong”. They [*OEM*] all waited. For a car manufacturing that must be very concerning. It is so easy that **even the post service can build battery electric cars**.” (E20)

O relato do E20 evidencia que os entraves à mudança tecnológica não estão necessariamente relacionados com dificuldades técnicas, mas sim com o possível risco associado à mudança na base de

conhecimento. Os veículos elétricos ameaçavam diretamente o posicionamento de mercado das empresas incumbentes do setor automotivo por apresentarem uma maior facilidade na montagem desse tipo de automóvel. Por isso essas empresas tardaram a entrada nesta trajetória tecnológica. Ao exemplificar que o correio alemão, mesmo sem uma base de conhecimento em mecânica, conseguiu montar um carro elétrico, o E20 sugere que a nova base tecnológica implica em a redução da barreira de entrada nesse mercado e perda de vantagem competitiva para setor automotivo tradicional. A perda de competitividade da indústria automotiva alemã em relação aos veículos elétricos também já foi observado por outros autores como Choi (2017).

As estruturas organizacionais das empresas incumbentes as enrijecem dificultando suas adaptações a novas bases produtivas (MINTZBERG, 1989). Compõem essas estruturas, por exemplo, os contratos de longo prazo que minimizam seus custos de produção e transação, um ativo de mão-de obra qualificada para execução de atividades circunscritas ao seu nicho principal e investimentos em capital de baixa liquidez como maquinário. Alterações nas bases tecnológicas não ocorrem com a mesma flexibilidade como em empresas nascentes de base tecnológica e de menor porte, denominadas *startups*, sendo essas fundamentais para a dinâmica da inovação.

There is a market developing but **big companies are too inflexible** to get to that market. Like VW [Volkswagen] didn't do anything about electric vehicles in the first place [...] Let's say they have 20 thousand engineers developing combustion engine cars. If they would have their whole portfolio only for battery and fuel cell vehicles they will need, let's say 12 thousand engineers because the technology is easier compared to combustion engines. So, they would not only have **8 thousand people too much, but also 20 thousand engineers that can't do what they need** to because they develop combustion engines. **They are stuck in their own portfolio.** They have a **structure**. They have **workers, in Germany you cannot just fire people**, especially for VW, they can't get rid of them. They have to pay them. That is a **difference from startup**, which can be very flexible. A shift like that will take decades in VW. **And that is why they try to slow it down.** [...]

Germany doesn't have a culture for startups, as in the U.S. In Germany, to get the funding you have to **prove that you have been competitive for the last 3-5 years**. Start-ups can't prove that and that is why we can't fund them. We have a lot of money, **but we can't give it to start-ups**. That is a general problem for startups in Germany. The pressure for a startup is very high and they see the potential, whereas big companies don't see this. **There is a market developing but big companies are too inflexible to get to that market.** Like **VW didn't do anything about electric vehicles in the first place.**" (Entrevistado não revelado)

Os recursos humanos que garantem vantagens competitivas importantes às empresas (PENROSE, 1959; PRAHALAD; HAMEL, 1990; SANDBERG, 2000) do setor automotivo também as aprisionaram em suas bases tecnológicas produtivas, dificultando a exploração do emergente mercado de carros elétricos. No exemplo relatado acima, a alteração da base tecnológica na Volkswagen levaria não apenas

a um excesso de mão-de-obra que, devido a regulação trabalhista alemã, não poderia ser demitida, mas também a muitos funcionários sem as qualificações necessárias para produção de carros elétricos. O ponto central do aprisionamento tecnológico é a falta de investimentos suficientes e precoces em alternativas tecnológicas que permitisse uma qualificação gradual da mão-de-obra, garantindo um melhor posicionamento estratégico das empresas incumbentes (CHOI, 2017). Alternativamente, com ressaltado pelo entrevistado acima, a estratégia adotada foi de dificultar o progresso dos carros elétricos. Ao mesmo tempo, a falta de “cultura empreendedora” alemã relatada pelo entrevistado, dificultou a entrada de novas empresas na indústria automotiva, resultando na perda de competitividade desta indústria. É importante enfatizar que o impeditivo para mudar a base de conhecimento não foram desafios tecnológicos, mas sim decisões de estratégia de mercado.

Contrasta-se ao caso da indústria automotiva alemã, o da indústria automotiva japonesa, que liderou o mercado de carros elétricos a bateria e domina o mercado de carros a pilha a combustível, juntamente com o da Coreia do Sul.

“But the major difference between typical German OEM approach and the Japanese or Korean approach is about when is the right time to be brave enough to build that technology into a series-produced vehicle. At the time when Toyota, decided to market the Mirai, **its overall technology was not better** than any other system technology from Daimler or Hyundai or whoever. But they were just bold enough and brave enough to take that decision. [...] Knowing that **they would lose money with these first series vehicles**, they were convinced that it was the right time to introduce that product. Whereas German companies would rather **wait until a certain point where losing less money is more likely.**” (E4)

Assim como no caso das empresas asiáticas, os carros movidos a pilhas a combustível desenvolvidos por empresas alemãs apresentavam maturidade tecnológica suficiente para serem comercializados. O E4 ressalta que a entrada na fase comercial das empresas japonesas aponta uma cultura organizacional que favoreceu a implementação dessas tecnologias. Pondera-se que, no caso japonês, o menor aprisionamento tecnológico esteve de alguma forma relacionado com os direcionamentos feitos pelo governo, tal como os subsídios de 30 mil dólares ao consumidor final na compra de veículos movidos a pilhas a combustível, reduzindo a disparidade dos preços se comparados a um veículo a combustão e o amplo incentivo a instalação de estações de abastecimento para veículos a hidrogênio (TRENCHER; TAEIHAGH; YARIME, 2020). Outras formas de direcionamento tecnológico feitas no Japão incluíram um planejamento estratégico para tecnologias de hidrogênio e pilhas a combustível de longo prazo alinhado aos planos de estado (FERNANDES *et al.*, 2020).

O aprisionamento tecnológico também é percebido em outros setores além do automotivo. Empresas incumbentes dos setores do óleo e gás e gases industriais, que historicamente participaram do desenvolvimento em tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, fizeram investimentos em tecnologias do hidrogênio propositalmente insuficientes, travando o desenvolvimento tecnológico necessário à implementação e difusão das tecnologias.

“Because big companies who entered, and that is one of my personal frustrations, I thought that they, at some point, would come with indeed the **plan for the bigger projects, but that never came**. And to be quite fair, Air Liquid, Shell, Total, all supported the middle projects, or little when it comes to money and technology-wise, but they were **hanging too long in R&D of a certain size**. [...] We still don’t have a fuel cell car, not even European, sponsored by the European fuel cell and hydrogen program that has been going around for **more than 10 years now**. We quantify **€1 billion in funding**, and we have one fuel cell car from **Korea driving in Brussels**.

Let’s not forget that that Air Liquide, Linde and all industry of gas-producing hydrogen has **lock-in** in the back, **they have always been steam-reforming**, central production plants, **cheap and easy**, and they have **never invested large-scale developments** in **greening this process**.” (E2)

O relato do E2 sugere que empresas do óleo e gás e gás e gases industriais atuaram majoritariamente em processos já conhecidos na obtenção de hidrogênio através da reforma de combustíveis fósseis, sem explorarem novas trajetórias tecnológicas como processos de “esverdeamento” do hidrogênio produzido. Novamente salienta-se o aprisionamento tecnológico, onde empresas já consolidadas preferiram manter a base tecnológica operante existente para garantirem suas vantagens competitivas.

É importante observar que não há evidências de que as mudanças nas bases tecnológicas irão ocorrer de forma espontânea através de mecanismos de mercado, uma vez que não interessa às empresas incumbentes a implementação de uma base tecnológica para sistemas de energia menos intensos em emissões de CO₂ diretamente conflitante com suas operações. Empresas incumbentes conseguem evitar a substituição de seus produtos e base tecnológica. Por exemplo, empresas, principalmente as do setor de óleo e gás, conseguem reduzir os preços dos seus produtos mantendo, ainda que de forma reduzida, uma margem de lucro para suas atividades. Essa redução de preços, todavia, resulta na perda de competitividade de outras bases tecnológicas produtivas, como o caso da geração renovável de energia, já que a fonte de energia não altera a qualidade do serviço de energia ofertado ao consumidor final. Como o consumidor percebe apenas a diferenciação no preço final da energia, esse é fundamental para a adoção tecnológica. O E28 relata:

“The thing is that for hydrogen is all about the cost reduction of renewable energy production, and we have a **baseline, which is the fossil fuel-based solutions**. When we manage to get to that baseline, they can drop the price. That is why **we want the pricing of CO₂** because every time we get there, they will drop the price and make it cheaper. And if you don’t make it more expensive by law or something, you will never be competitive. They want to sell their oil. If you can’t sell it for \$50, you will sell it for \$40, but you will also sell it for \$10.” (E28)

Diferentemente das transições energéticas passadas, onde as fontes de energia acompanharam o surgimento de um nicho tecnológico intensivo em energia, a transição para fontes renováveis é impulsionada por uma demanda por menos emissões de CO₂ (FOUQUET, 2016; SMIL, 2017; SOVACOOOL, 2016). Por atenderem aos mesmos serviços de energia, as tecnologias alternativas aos sistemas de energia atuais, competem por um único ou poucos designs dominantes não apenas entre si, mas também entre as tecnologias vigentes que visam substituir (YORK; BELL, 2019). Por conseguinte, os sistemas de energia compreendendo uma nova base tecnológica precisam atender às condições de mercado e demanda atual para de fato substituírem as tecnologias vigentes. Destaca-se que os custos da mudança da base tecnológica são demasiadamente elevados, especialmente para empresas nascentes interessadas na implementação de suas tecnologias. São necessários investimentos elevados em bens de capital para operacionalizar e manter uma estrutura que disponibilize o hidrogênio para suas diversas aplicações.

“The costs to generate hydrogen are half or a third of the total cost. **It is expensive to distribute** whether you use a pipeline, a gaseous truck, or liquid. They are all fairly expensive. The **distribution of hydrogen is expensive as the cost of generating it**. Then you also have the **station cost**, which adds even more. In California, currently, hydrogen costs roughly \$13 per gallon of gasoline equivalent. In the U.S. you can buy gasoline for \$3. The fuel cell vehicles get 65 miles to gallon, so that is an advantage, like a **Toyota Mirai**. But the new hybrid **Honda Accord gets almost 50**. So now the advantage of the fuel cell vehicle of miles per gallon is not as much. So, when you are paying \$13 versus \$3, for your fuel, it doesn’t look so good. They have to get the cost down significantly. I don’t know if that is going to happen because now the **competition is with electric vehicles**. [...] **The technology development will matter**. People’s view on: do I want to charge my car over night? Can everyone do it? People in apartments in cities might not have that option. Will you **build charging stations** in every parking spot? But, on the other hand, I have read that in 3-4 years there are couple of companies that claimed that they will **have batteries that can be charged in 5 minutes to get a better 175 miles range**. Then you can almost have that in a gas station. It is not 200 or 400 like you can get with gasoline, but that could make a big difference to people. There is so many technical things happening that it is hard to know where this is all going to go. How much will the cost of hydrogen come down? That is a really big factor. How much batteries will improve? That is another big factor. **Cost, range and charging time**. To me, at least in small scale, these are biggest.” (E23)

Em um cenário de grande diversidade de problemas e soluções relacionadas, governos executam um papel fundamental no direcionamento tecnológico (SUAREZ, 2004). É possível afirmar que a importância do direcionamento do governo se intensificou a partir do segundo período, já que grande

parte dos incentivos ao desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível dependeu tanto das restrições às emissões quanto do financiamento oferecido pelos órgãos públicos. Através de regulações como em taxas de emissões e precificação de emissões CO₂, governos mudam a dinâmica do mercado que favorece um determinado padrão tecnológico. Exemplos desse tipo de atuação são o Mandato de Emissão Zero da Califórnia dos anos 1990, restrições de veículos com altas emissões em grandes centros como Paris e Londres e subsídios à carros elétricos movidos a pilha a combustível no Japão. Similarmente, ao compactuarem com direcionamentos globais mais restritivos em termos de emissões de gases do efeito estufa, como o Acordo de Paris, governos reduzem barreiras de mercado para tecnologias verdes e pressionam a mudanças tecnológicas em empresas de setores intensivos em emissões de CO₂.

As complexidades inerentes a implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível afetam negativamente a priorização de uma agenda política para esse desenvolvimento, mesmo que essas apresentem vantagens em nichos específicos comparadas a tecnologias concorrentes como baterias (HARRISON; THIEL, 2017). Por serem tecnologias com menor capacidade de lobby e mais complexas (menos observáveis e dificilmente integráveis aos sistemas existente), tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível foram frequentemente excluídas de políticas públicas que visavam, por exemplo, a mobilidade elétrica, como relatado pelo E15:

“Many policies focused on **energy affordability discriminate hydrogen and fuel cells**. Some subsidies, like the procurement vehicles, in the case of the UK, subsidies are for vehicles under £60 thousand. Because fuel cell vehicles are all over £60 thousand you can’t get the plug-in grant. **There is a grant for electric vehicles, but you can only buy electric battery vehicles because fuel cell vehicles are too expensive.**” (E15)

O exemplo relatado pelo E15 explicita o papel dos governos no direcionamento tecnológico. Regulações são necessárias para operacionalizar e potencializar o uso do hidrogênio para fins energéticos (WORLD ENERGY COUNCIL, 2019). O desenvolvimento e a implementação das tecnologias estão diretamente associados à articulação de uma demanda interna para o hidrogênio e as tecnologias associadas à sua produção, armazenamento, transporte e uso. É necessário desenvolver as tecnologias para que elas se adequem às condições de demanda do mercado local.

Para garantir a principal vantagem do hidrogênio no contexto do aquecimento global, as ofertas e demandas de energia de diferentes setores precisam estar interligadas. Uma vez interligadas, o hidrogênio produzido através do excedente de eletricidade pode ser utilizado como um combustível em

outros setores, como o de transporte, químico ou em aplicações térmicas (EMONTS *et al.*, 2019). Embora o acoplamento de setores seja bem esclarecido a um nível tecnológico e também já entendido como um passo importante para a descarbonização dos sistemas de energia, em termos regulatórios os serviços de energia referentes ao transporte, eletricidade e aquecimento ainda estão desassociados, dificultando uma abordagem que incentive a energia do hidrogênio.

“The advantage of hydrogen is that we can **couple sectors**. But the “framework”, or let’s say **the government, separates them**. We have the Ministry of Economics, which is responsible for energy, heating; and we have the Ministry of Transportation. From a technological point of view, you have to link those two, but in reality, they don’t work together, and that is why we cannot fit that together.

For Germany, it is pretty obvious. We have CO₂ reduction plans, which are separated for industry, heat, transportation... The conventional fuel production is located in the Ministry of Economics for industries, so it is an industry CO₂ emission. For the Ministry of Transportation comes only the emissions from the cars themselves. [...] There is **no link between those two Ministries in the framework**. CO₂ reduction from refineries doesn’t account for the cars! **The problem is that we have an old-world where everything was separated, and we need a new-world with these things linked**. We have that on a technological level, but not **on the political level**. [...]

The reason why renewables don’t care about hydrogen development is that we don’t have a regulation **linking the targets of those two Ministries**. We have the electricity grid in Germany, with a share of 30-40% renewable energy. If you want to produce hydrogen for the transportation sector, to reduce its CO₂ emissions it will decrease the share of renewables in the energy sector. On “paper”, the amount of CO₂ emissions of the energy sector will rise.” (E28)

Na temática do aquecimento global, o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível foi negativamente afetado uma vez que o CO₂ é contabilizado separadamente em cada setor, não criando incentivos para empresas e agentes de governo incluírem em suas atividades de design emissões geradas em outros setores correlatos. Até o fim do segundo período, não houve um conjunto de regulações que viabilizasse ou incentivasse o uso de tecnologias do hidrogênio de forma integrada. Ao mesmo tempo que a desarticulação entre os sistemas de energia desfavoreceu o uso do hidrogênio, outras tecnologias com maior maturidade tecnológica e mais integráveis aos sistemas de energia existentes, tais como as baterias, foram beneficiadas (HARDMAN *et al.*, 2017).

Na medida em que a agenda verde avança, o hidrogênio se destaca pelo seu potencial na descarbonização de indústrias não-eletrificáveis e de transporte pesado, aumentando o interesse nas suas respectivas tecnologias. Observa-se também outras motivações econômicas levam governos a investirem no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Notadamente, o desenvolvimento dessas tecnologias em indústrias locais cria empregos que absorvem profissionais com alto grau de qualificação, como ressaltado pelo E24 no caso canadense:

“I think it is because it makes **good economic sense** from a business perspective. Again, **we are not an early adopter**, and frankly, I tell you that one barrier is that **Canada has a lot of energy**. We are a net export. **Natural gas, oil, hydroelectricity**. Many of the problems is here, in British Columbia, we have an **abundance of clean hydroelectricity** that we export to the US. It means that our electricity costs are very low, our electricity is very clean. **There is not a lot of environmental drivers for us to adopt one of those technologies**. [...] But I think the **Canadian government has taken in interest**, federally and provincially, because of the **economics drivers**. **Hydrogen employs a lot of people**, there are high tech jobs that hire a lot of professionals. So, I think it makes good policy to keep funding and supporting the industry even though we are not the user of it.” (E24)

A relação entre a geração de empregos e ganhos econômicos oriundos da implementação de tecnologias verdes, incluindo as do hidrogênio e pilhas a combustível, é importante para manter o interesse político no desenvolvimento dessas tecnologias. Mais recentemente, especialmente após a Covid-19 e suas consequências econômicas, aumentou-se o interesse em promover essas tecnologias como um plano de estímulo para recuperação econômica (BARBIER, 2020; IEA, 2020b; KHANNA, 2021; NREL, 2021). Nesse sentido, reforça-se o papel dos governos para promover políticas que resultem tanto no desenvolvimento quanto na absorção dessas tecnologias localmente.

A presente seção apontou três atividades de design que abarcam os principais esforços para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Mostrou-se que o enquadramento das atividades a problemática do aquecimento global não necessariamente implicou em uma convergência de design para esse conjunto de tecnologias, especialmente pela divergência de preferências tecnológicas dos setores que influenciam majoritariamente esse desenvolvimento.

Os relatos dos entrevistados evidenciaram o aprisionamento das empresas desses setores em suas bases de conhecimento voltadas para sistemas de energia intensivos em carbono. Destacou-se que, em um primeiro momento, nenhum dos quatro setores priorizaram o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, mas preferiam outras frequentemente mais compatíveis a infraestrutura já instalada dos sistemas de energia existente. Desafios posteriores levaram ao reforço da trajetória das tecnologias, principalmente no setor automotivo e elétrico. O Quadro 11 sintetiza as preferências tecnológicas dos quatro setores destacados na problemática do aquecimento global.

Quadro 11 Preferências tecnológicas dado a problemática do aquecimento global

	Automotivo	Elétrico	Óleo e Gás	Gases industriais
Tecnologias tradicionais	Veículos a combustão	Termoelétricas	Combustíveis derivados do petróleo e gás natural	Reforma a partir do gás natural
Tecnologias alternativas	Veículos híbridos, veículos elétricos movidos a bateria	Renováveis (eólica solar)	Sequestro de carbono	Sequestro de carbono
Problema a ser solucionado	Autonomia veicular, velocidade do abastecimento e transporte pesado	Balanco entre oferta e demanda de energia Acoplamento de setores	Combustão de combustíveis com alta emissão de CO ₂	Redução das emissões de CO ₂
Design preferível	Veículos a bateria e veículos para longa distância e carga movidos a PEM	Produção de H ₂ via eletrólise	Produção de H ₂ via fontes fósseis com captura de carbono	Produção de H ₂ via fontes fósseis com captura de carbono

Fonte: elaboração própria

Por fim, os resultados da presente seção evidenciam que o design tecnológico, a depender das diferentes preferências tecnológicas, não irá necessariamente convergir, limitando a difusão das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em comparação com outras possíveis alternativas tecnológicas. Dado o papel do hidrogênio na descarbonização dos sistemas de energia (GAMBHIR *et al.*, 2019; HYDROGEN COUNCIL, 2017b; IRENA, 2019), é necessário estabelecer políticas públicas que fomentem o desenvolvimento, implementação e um design de mercado que favoreça essas tecnologias.

4.3. O avanço das tecnologias na periferia

Conforme elucidado no referencial teórico da presente tese, o desenvolvimento de tecnologias não ocorre de forma homogeneia em todo o globo. O desenvolvimento ocorre primeiramente nos países líderes e se propaga de forma mais rápida nos demais países do centro e de forma mais lenta nos países periféricos. As atividades de design apresentadas são realizadas preponderantemente em países do centro, e marginalmente em países periféricos. No caso do desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, os reflexos da disputa tecnológica que ocorre nos países centrais começam a ser percebidos em países periféricos. Foram observados sete desses países na presente tese: China, Brasil³⁸, Chile, Nova Zelândia, Índia, México, Paraguai e Argentina. Nesses países, além de entrevistas com profissionais da área trabalhando localmente, foram analisados relatórios de governos e empresas, apresentações em congressos e eventos online (no caso brasileiro presencial e online) e notícias relacionadas às tecnologias publicadas por diversas fontes.

No primeiro período (2000-2009), o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível ocorreu majoritariamente nos países do centro, embora o forte entusiasmo dos países líderes tenha motivado algumas atividades de pesquisa e desenvolvimento em países periféricos. A participação da periferia, além de secundária, era mais uma tentativa de acompanhar os desenvolvimentos internacionais acerca do tema, do que de liderar o desenvolvimento propriamente dito. O desenvolvimento tecnológico, quando presente, se limitou à universidades e centros de pesquisas, muitas vezes em conjunto com empresas ou grupos de pesquisa estrangeiros, com pouco engajamento do setor industrial local, esse último pouco interessado nesse tipo de tecnologia e nas suas atividades de desenvolvimento. Observa-se que as experiências e conhecimentos acumulados na periferia, que se tornaram posteriormente fundamentais para instruir governos e empresas a adequarem as tecnologias às condições locais. Como sugerido anteriormente na literatura (ALBUQUERQUE; SILVA; PÓVOA, 2005), a infraestrutura científica em países em desenvolvimento, majoritariamente composta por universidades e centros de pesquisa, atua como uma antena capaz de vincular esses países aos fluxos científicos e tecnológicos internacionais, porém apresenta limitações ao progresso tecnológico local propriamente dito.

³⁸ Próximas seções dedicadas às especificidades da China e Brasil

“Research yes but Chilean companies is difficult to find. There is a spin off company founded in Austrian university called Graz University and at some point, some Chilean CEO bought it. They are experts in retrofitting internal combustion engines with a fuel mix. It is called Alset, which is Tesla backwards. Alset is doing the retrofit of some hydrogen decarbonized trucks. **Besides that, honestly, related to hydrogen, not much.** There is **research in fuel cells, but not really big.** The interest is starting. They were only focusing on solar in the last 10 years, and now they reached grid parity. In a general way, **Chile has never been a country,** and this is a failure, **that produces technology. Chile would produce hydrogen, but they would prefer German technology, Japanese technology.**” (E25)

O caso chileno, assim como de outros países periféricos que serão apresentados nesta seção, evidencia o baixo envolvimento do setor industrial local nas atividades de pesquisa e desenvolvimento de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio. Ao optarem pelo uso das tecnologias estrangeiras, expõe-se também a baixa capacidade de produzir tecnologia localmente, especialmente em estágios iniciais do desenvolvimento. A ausência da indústria local articulada com as pesquisas já escassas em universidades e centros de pesquisa caracterizou o desenvolvimento das tecnologias de pilhas a combustível nos países periféricos, dificultando a construção de uma rede de atores e de conhecimento que facilitasse, pelo menos, a absorção das tecnologias desenvolvidas nos países líderes no período seguinte (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008).

A partir do segundo período (2010-2020), quando o direcionamento tecnológico se emparelhou com as questões relativas ao aquecimento global, a periferia passou a ser um importante componente do desenvolvimento tecnológico devido a suas condições naturais favoráveis para geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Transitar para sistemas de energia menos intensivos em emissões de CO₂ utilizando fontes renováveis intermitentes de energia acarretou dificuldades não apenas de gerir esses sistemas localmente, mas também de encontrar possibilidades de se gerar energia suficiente para atender às necessidades energéticas nos padrões atuais de demanda. Isto é especialmente válido para os países do centro onde a demanda por energia é superior à capacidade de geração de energia renovável (STATISTA, 2021; WORLD BANK, 2020a). A inserção do hidrogênio na problemática do aquecimento global estabeleceu novas formas de reconfigurar a transição energética, uma vez que o hidrogênio permite distribuir do conteúdo energético de fontes renováveis gerado na periferia para o centro. Com isso, o uso de fontes renováveis em diversos países para a geração de eletricidade, antes voltado para a demanda interna, passa a ser impulsionado por atividades de exportação.

É de interesse dos países do centro ter uma forma de importação de energia renovável, uma vez que, geograficamente, apenas seis países do centro são destacados por seu potencial renovável

(combinando fontes solar e eólica) – EUA, Canadá, Austrália, Noruega, Islândia e Espanha (WORLD ENERGY COUNCIL GERMANY, 2018). Após produzido, o hidrogênio pode ser comercializado balanceando a oferta e a demanda de energia global, tal como é feito por combustíveis fósseis. Hidrogênio (H_2), amônia (NH_3) ou metano (CH_4) são possíveis novas mercadorias no setor de energia, essas carreadoras de energia obtida através de processos com baixa produção de CO_2 . Dessa forma, a abundância em recursos naturais renováveis para geração de eletricidade como o vento e radiação solar disponíveis principalmente em países periféricos passam a ser um ativo energético acessível e comercializável através da produção e exportação de hidrogênio e seus derivados (HYDROGEN COUNCIL, 2017a). Ressalta-se que o alto custo de produção do hidrogênio, muito impulsionado pela baixa escala de produção, é ainda uma barreira significativa de entrada ao mercado. Devido às condições naturais favoráveis de alguns países periféricos, o hidrogênio, principalmente eletrolítico, pode ser produzido a um menor custo nessas regiões, despertando o interesse no potencial mercado local para tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível (WORLD BANK, 2020b). A periferia, antes à parte do desenvolvimento tecnológico, passa a ser um *locus* de grande potencial para a difusão das tecnologias desenvolvidas no centro necessárias para a produção e utilização do hidrogênio.

O avanço das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia a partir do segundo período passa a ser mais acentuado, porém com características diferentes das observadas nos países centrais no mesmo período. Argumenta-se nesta tese que as tecnologias apresentam inadequações ao contexto periférico, o que restringe os benefícios socioeconômicos oriundos da utilização das mesmas (FURTADO, 1920). Diferentemente dos países do centro, onde a agenda verde já se encontra enraizada nas esferas sociais, econômicas e políticas das sociedades, na periferia, a difusão desta fase do paradigma tecno-econômico não ocorreu com a mesma velocidade. Como consequência, a descarbonização, que é a principal justificativa para a implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível a partir do segundo período, não encontra a mesma ressonância no contexto periférico como nos países centrais.

De fato, o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia decorre, majoritariamente, do aumento do interesse dos países desenvolvidos i) na produção e importação do hidrogênio renovável e ii) da expansão do mercado das tecnologias desenvolvidas pelo centro que viabilizam a cadeia da energia do hidrogênio.

“We already see Mitsubishi launching its first tank for **international transport of hydrogen**. Experiments are already on their way from Brunei and South Australia to **export hydrogen to Japan** and Japan is actively looking globally for further export opportunities for **zero emission hydrogen**, including New Zealand.” (E22)

No segundo período, devido a possibilidade de produção de hidrogênio renovável a baixo custo localmente, passa a ser importante que a periferia adote tecnologias já desenvolvidas, tais como tanques de armazenamento de hidrogênio, eletrolisadores e seus componentes, para acelerar o desenvolvimento global da cadeia produtiva do hidrogênio. A exemplo disto, o relatório produzido pelo World Energy Council Germany (2018) apresenta diversas informações para subsidiar uma estratégia alemã voltada para importação de hidrogênio com essas características. Assim, o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, bem como o direcionamento tecnológico verde, ocorre “para fora”, dificultando a articulação de uma demanda interna por essas e outras tecnologias³⁹.

Logo, as atividades de produção e exportação de hidrogênio não surgem a partir de uma oportunidade vislumbrada por setores locais e nem é apropriada pelos setores industriais dos países periféricos, mas sim pelo centro para atenderem às necessidades de suprimento de energia no contexto do aquecimento global e explorarem novos mercados para suas tecnologias. Até mesmo pelo baixo envolvimento no desenvolvimento das tecnologias, não há nos países periféricos as mesmas motivações para explorar as energias do hidrogênio como nos países centrais. O que mais se destaca é, contudo, a ausência de orientação nas questões de emissões de CO₂ para embasar o desenvolvimento tecnológico localmente. A problemática do aquecimento global não está internalizada na periferia, seja nas esferas social, governamental ou industrial. Diferentemente, a trajetória das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no centro propiciou um gradual engajamento e aumento de interesse por parte das indústrias em atuarem nas diversas partes da cadeia da energia do hidrogênio conforme as tecnologias amadureciam. Por exemplo, desde o protocolo de Quioto (UN, 1998) foram estabelecidas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa a partir do princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas. Um determinado grupo de países, esses responsáveis por maior parte das emissões correntes e históricas desses gases, assumiam a responsabilidade de reduzir suas emissões, enquanto a

³⁹ É importante ponderar que i) a criação da demanda por tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível é um desafio independente de sua localidade e que ii) em alguns países da periferia, onde se encontram recursos energéticos renováveis em maior disponibilidade que no centro, existem claros potenciais que favorecem a exploração da energia do hidrogênio. Entretanto, o que se destaca aqui são as condições específicas que entravam os países periféricos de usufruírem dos benefícios do avanço tecnológico da mesma forma como no centro.

outros, excluídos deste grupo, não fora colocado a necessidade dessa redução. Existe uma forte correlação entre a lista de países com maiores taxas de emissões e o seu grau de desenvolvimento (BERGH; DREWS, 2019; SOVACOOOL; DWORKIN, 2015), o que contribuiu para ocasionar uma maior urgência da temática climática em países do centro. O único mecanismo proposto para a participação dos países em desenvolvimento na redução de emissões de CO₂ é o denominado “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo”, que foi idealizado para que países desenvolvidos implementassem atividades de projetos nos países em desenvolvimento visando a redução das emissões ou o aumento da remoção de CO₂, através de investimentos em, por exemplo, tecnologias mais eficientes, substituição de fontes de energia fósseis por renováveis, racionalização do uso da energia, florestamento e reflorestamento. Assim, enquanto o desenvolvimento de tecnologias para a descarbonização foi instigado desde pelo menos o protocolo de Quioto (UN, 1998) em países industrializados, o mesmo não ocorre na periferia, já que o protocolo isentou países periféricos do compromisso de reduzir suas emissões, seja devido a uma menor responsabilidade nas emissões globais ou por uma escassez de recursos locais.

As tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível são trazidas de forma importada, atrasada e já conceituada, alcançando apenas as partes da periferia em contato direto com o centro, como, por exemplo, setores industriais voltados para exportação, multinacionais e universidades e centros de pesquisa. As tecnologias usadas para a produção de hidrogênio, essas importadas, são inadequadas ao contexto local (ALBUQUERQUE, 2007; FURTADO, 1920), dado que não se desenvolve uma estrutura complementar que permita a utilização local das mesmas (ex. estações de abastecimento de veículo movidos a hidrogênio). Trata-se, portanto, de um desenvolvimento “para fora” no qual o interesse é essencialmente dos países centrais na produção e exportação de hidrogênio utilizando suas próprias tecnologias.

O avanço das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia segue, portanto, outras formas. No que tange a incorporação do direcionamento verde localmente, a implementação dessas tecnologias muitas vezes é justificada como essencial para os países periféricos alcançarem seus objetivos de descarbonização, aumentar a sua segurança energética e dinamizar suas economias através da geração de empregos e oportunidades de mercado localmente (WORLD BANK, 2020b). Relatórios de órgãos multilaterais como o World Bank, IEA, IPCC, IRENA e de agências de governo dos países do centro são fundamentais para reforçar a necessidade da inserção dos países em desenvolvimento no

direcionamento verde. A partir desses relatórios, governos de países periféricos adotam estratégias que se alinham com as diretrizes do centro, como relatado pelo E22:

The government provided small amounts of funding mainly for production of hydrogen from coal up until about 2012, when they in fact abandoned the concept of using hydrogen in the economy on the basis that battery electric vehicles were going to be a much better option. They had difficulties in saying that hydrogen would be zero emission. **This was partly fueled by the fact that the International Energy Agency [IEA] itself did not have a strong emphasis on hydrogen.** For instance, they did not produce a roadmap for hydrogen, whereas they have produced a road map for other technologies. **Their first road map for hydrogen came out in the last 18 months. This influenced the policy makers in New Zealand,** because if the IEA did not have an emphasis on hydrogen, then they New Zealand approach would follow the IEA approach. However, because of the growing international interest in hydrogen, and the continuing development of hydrogen vehicles and the news of hydrogen in Germany, Japan, California. (E22)

As atividades de exploração comercial do hidrogênio “tipo exportação” são fortemente articuladas com os governos da periferia, mas lideradas por empresas estrangeiras multinacionais com sua matriz em países do centro e subsidiárias operantes nos países periféricos. Os relatórios produzidos por entidades multilaterais (EUROPEAN COMMISSION, 2020; HASHIMOTO, 2020; HYDROGEN COUNCIL, 2017c; IEA, 2017; IRENA, 2019; WORLD BANK, 2020b) sustentam as atuações das multinacionais no campo político-social que visam ampliar suas estratégias de implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia. Há também forte influência de órgãos governamentais tais como europeus, japoneses e alemão, nos planejamentos estratégicos do hidrogênio, notadamente no caso chileno (MINISTERIO DE ENERGIA GOBIERNO DE CHILE, 2020).

Governos e organizações multilaterais legitimam e incentivam as atividades promovidas por empresas e entidades estrangeiras, até mesmo porque não ocorreu na periferia um desenvolvimento tecnológico prévio suficiente para evitar as catástrofes ambientais globais previstas nos relatórios dessas entidades. A alternativa posta pelo centro à periferia é importar suas tecnologias, uma vez que as mesmas já estão prontas, seja para socorrer a emergência climática do centro através da exportação do hidrogênio “verde” ou para implementar tecnologias em setores locais intensivos em energia fóssil. Vale lembrar que a despeito das possíveis e desejáveis consequências positivas da implementação das tecnologias para as economias locais, os investimentos nos países periféricos objetivam, de fato, i) o acesso à eletricidade renovável a baixo custo e ii) exportação de tecnologias para periferia. As estratégias não são traçadas a fim de gerar emprego e renda na periferia. Constam nas estratégias, principalmente, a redução do custo

do hidrogênio a partir do escalonamento das tecnologias de eletrolisadores (HYDROGEN COUNCIL, 2020; IEA, 2017; WORLD BANK, 2020b).

A presente pesquisa identificou que as multinacionais são os atores-chave na orquestração do desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia. Parte importante das decisões sobre o avanço das tecnologias na periferia foram conduzida por atividades de empresas estrangeiras a partir da lógica dos países centrais. Nem sempre essas atividades são de fato vantajosas aos países periféricos tendo em vista que as tecnologias para produção e utilização do hidrogênio local são importadas e o hidrogênio em si é parcialmente voltado para exportação, restringindo ganhos relativos as atividades dessa natureza. De forma ainda mais crítica, quando não articulada, a transição para fontes menos intensivas em carbono pode acarretar inclusive na perda de emprego em setores intensivos em CO₂. Além disso, diferentemente dos países do centro, os ganhos em termos de redução de emissões em CO₂ não ressoam com a mesma intensidade na periferia, uma vez que aqui a lógica desse direcionamento ainda não foi incorporada.

“The entire group of MotherCompanyABC **decided to go for renewable**. For example, we [*subsidiária latino-americana*] **have some guidelines, which are mandatory**. We cannot participate in new coal power plants project for example. That shaped the business. We had **300 engineer experts in coal power plants** and now we **just can’t do new ones**. We can only go in retrofit, carbon capture. But no more that type of project for us.” (E25)

Pelo relato do E25, é possível perceber que as multinacionais exercem um papel importante na disseminação do paradigma tecno-econômico em direção à periferia. Ao estabelecerem diretrizes “verdes”, alinhadas às problemáticas do centro, as matrizes frequentemente moldam também as atividades locais de suas subsidiárias. É importante enfatizar que nem sempre as multinacionais estão diretamente relacionadas com a produção de hidrogênio, ou desenvolvimentos prévios de tecnologias do hidrogênio ou pilhas a combustível. Mais comum é a multinacional estabelecer uma política interna de descarbonização ou de incentivo a tecnologias verdes como forma de pressionar ou indicar direcionamentos para uma cadeia global de valor.

As multinacionais estão inseridas em cadeias globais de valor compostas por um espectro de empresas muito mais amplo, e atuam como um ponto de acesso dessa cadeia às economias periféricas. Os fornecedores das tecnologias necessárias para a estruturação da energia do hidrogênio são recorrentemente empresas dos países do centro, em boa parte, de base tecnológica, de menor porte e sem atividade nos países periféricos. Assim, a cadeia de valor global abre mercados para empresas de base

tecnológica onde as mesmas não atuam. As relações entre as empresas multinacionais e as de base tecnológica são construídas através de projetos de pesquisa e desenvolvimento (por exemplo em programas do DoE e FCHJU na Europa (DOE, 2019; FCHJU, 2020) nos países centrais, onde governos locais atuam financiando esse tipo de atividade e estimulando essas relações. Quando as multinacionais decidem explorar comercialmente a energia do hidrogênio nas suas subsidiárias, as relações já estabelecidas no centro com empresas de base tecnológica são reafirmadas e exportadas à periferia. Ao mesmo tempo, as escolhas tecnológicas investidas no centro são as difundidas através da cadeia global de valor. Ressalta-se que a expansão de designs específicos à periferia constitui um importante mecanismo de seleção tecnológica, onde as condições de escalabilidade são fornecidas para um conjunto de tecnologias reproduzidas em diferentes mercados. Os resultados mostraram que a primeira atividade de design relatada na seção 4.2 acima foi a mais reforçada na periferia.

Por operarem em diversos países, as matrizes planejam suas atividades na energia do hidrogênio globalmente através das informações obtidas nas subsidiárias. A escala dessas informações é um ativo fundamental para o posicionamento estratégico das multinacionais no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, mesmo quando não envolvidas diretamente com essas tecnologias. Isto garante a essas empresas um forte poder de barganha tanto dentro da cadeia de valor quanto frente aos governos locais dos países periféricos (ZUCOLOTO; CASSIOLATO, 2014). Nota-se também a importância dos sistemas de informação e telecomunicações para otimizar os sistemas de produção, evidenciando a relação entre as cadeias globais de valor e as tecnologias da informação e telecomunicação (LEE; MALERBA; PRIMI, 2020).

“We are at the phase of **modeling in CompanyABC Brussels**, we co work with them with the energy transition department. We develop time series models, which is the classical one, where you have the power profile generation of a mix of renewables, in Chile is solar, for example. Afterwards **we fix a certain hydrogen demand**, and we need to optimize of the **sizing of each step of the value, that I mean the renewable generation, the electrolyzer**, the storage and transition. Then we can see how we get the lowest leveled cost of hydrogen. **That is done by a model that we have developed in CompanyABC, the same we use for MotherCompanyABC, the same the guys use for Australia, and the Netherlands with wind**. There is plenty of projects. But for the business of hydrogen, which is the business unit of **MotherCompanyABC that has the target of creating a fist massive green hydrogen business cases.**” (E25)

Acrescenta-se que o E25 se refere à três empresas distintas: a subsidiária latino-americana que o entrevistado trabalha, outra subsidiária em Bruxelas, denominada CompanyABC e a matriz MotherCompanyABC. A governança dessa cadeia de valor é dada a partir da MotherCompanyABC,

seguida da subsidiária em Bruxelas. Os modelos desenvolvidos objetivam a criação de um “grande negócio em torno do hidrogênio verde”, conectando informações sobre o perfil da matriz energética dos países das subsidiárias. Ao modelarem, as empresas otimizam a produção de hidrogênio obtendo o menor custo do hidrogênio utilizando eletrolisadores, a principal tecnologia que interliga o desenvolvimento tecnológico no centro às gerações de energia renovável na periferia. Nesse arranjo, países do centro, especialmente da Europa e Japão, maximizam o retorno dos investimentos realizados no desenvolvimento de diversas tecnologias referentes a transição energética incluídas na cadeia global de valor, tais como painéis solares, turbinas eólicas, os próprios eletrolisadores e os componentes associados a esses dispositivos.

O relato do E25 indica que, em contraste com a teoria das cadeias globais de valor, o fluxo de conhecimento das matrizes em direção à subsidiária é menos intenso do que o na direção inversa. Nesse sentido, a inserção nessa cadeia de valor não resultou em um maior acesso ao conhecimento gerado na empresa matriz por parte dos países periféricos (SZAPIRO *et al.*, 2016). Destaca-se que as subsidiárias das empresas já estavam nos países periféricos durante as fases anteriores do desenvolvimento tecnológico, porém, os entrevistados não relataram que havia um fluxo de conhecimento das matrizes para a periferia (GEREFFI; KAPLINSKY, 2001) nas fases de desenvolvimento pré-design, como sugerido pela teoria das cadeias globais de valor. A periferia entra em fases avançadas do desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, onde há menores oportunidades para o *catching up* tecnológico (PEREZ; SOETE, 1988). Ademais o desenvolvimento notadamente também não parte da demanda local, mas sim pela demanda externa, alimentado pela importação de tecnologias via relação matriz-subsidiárias.

Na maior parte dos casos⁴⁰, empresas locais situadas em países periféricos não participam do desenvolvimento de tecnologias *per se* quando acessam as cadeias globais de valor referentes a energia do hidrogênio. As empresas locais inseridas nessas cadeias são majoritariamente empresas de grande porte com alta liquidez, financeiramente capazes de importar e implementar as tecnologias do centro. Exemplos dessas empresas observadas entre os relatos dos entrevistados incluem a Codelco, mineradora chilena, Mahindra & Mahindra, empresa indiana do setor automotivo, e a Fonterra, empresa neozelandesa de derivados de leite.

⁴⁰ Exclui-se, de forma marcante, a China.

O caso do setor de mineração no Chile relatado por alguns entrevistados é ilustrativo neste aspecto. Fortemente impulsionado por multinacionais (mais notadamente a Engie) e atuação de órgãos multilaterais no país (ex. GIZ) o setor de mineração chileno passou a estabelecer metas para descarbonização dos veículos pesados utilizando pilhas a combustível ou uma mistura de hidrogênio no motor a combustão. À Engie interessa a expansão do mercado de eletricidade renovável na América Latina bem como a produção de hidrogênio eletrolítico utilizando a sua eletricidade produzida, e para isto, a multinacional necessita de eletrolisadores, os dispositivos tecnológicos que convertem a eletricidade em hidrogênio a partir da quebra da água. Esses eletrolisadores são fornecidos por outras empresas ou institutos inseridos na cadeia global de valor, como a norueguesa Nel ou o instituto alemão Fraunhofer. Para que o hidrogênio seja utilizado na mineração chilena, os motores dos tratores precisam ser operados a partir de uma pilha a combustível, esta fornecida por outras empresas estrangeiras como as canadenses Ballard e Hydrogenics. Às empresas de mineração e siderurgia chilena, Codelco e Cap, essas parcialmente ou totalmente públicas, coube a compra os tratores e do hidrogênio gerado localmente (CHILEAN SOLAR COMMITTEE, 2019).

Há na periferia um hiato de setores industriais necessários para completar a cadeia do hidrogênio desde a sua produção ao seu uso. Não é possível articular internamente uma demanda para o hidrogênio e suas tecnologias associadas sem criar essa cadeia.

“In order to sell hydrogen, we need to have applications and solutions that work. CompanyZYX is willing to invest in building the hydrogen supply chain, but if we don’t have end users, we cannot do it. [...] We have moved to approaching the clients, telling them different kinds of solution you have with hydrogen. We have partner up with people that have the technology. We are playing a role of catalyzer in order to achieve this. In the end, we win because we can sell the hydrogen, but we are pushing it and doing a lot of efforts that benefits the technology providers. This is a role that we have to do now, and it is important that big companies like CompanyZYX, Vale, take the lead.” (E9)

A CompanyZYX é uma multinacional que atua na América Latina e que recentemente iniciou atividades incentivando a produção e uso do hidrogênio na região. O interesse da CompanyZYX é a produção de hidrogênio verde via eletrólise, usando a eletricidade renovável gerada por ela própria através de painéis solares ou turbinas eólicas, que são tecnologias já existentes em seu portfólio.

O E9 relata que as atividades da CompanyZYX precisam ser complementadas por outras em setores locais para consolidar a cadeia do hidrogênio. Mesmo que a empresa arque com os custos da criação de uma cadeia de suprimento, são necessários esforços para instigar a demanda pelo hidrogênio

produzido. Por isso, o E9 também enfatiza que a empresa “catalisa” a energia do hidrogênio, já que a multinacional atua na coordenação para consolidar uma estrutura mínima que dinamize a produção e uso do hidrogênio energético. A principal questão é que, em um sistema nacional de inovação, o papel de coordenação e dinamização das atividades econômicas é realizado por governos e um conjunto de instituições⁴¹ formais e informais, visando os interesses socioeconômicos nacionais (FREEMAN, 1991, 1995; MOWERY; ROSENBERG, 1993; PEREZ, 2013). Os relatos de outros entrevistados de países periféricos mostram que, para o caso das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, houve uma inversão entre a relação dos sistemas nacionais de inovação e as multinacionais, onde essas empresas passam a acessar os sistemas de inovação local para alcançarem seus objetivos de redução de custos da tecnologia e do hidrogênio, corroborando com os resultados de outros trabalhos que descrevem esse fenômeno (SILVA, 2021; ZUCOLOTO; CASSIOLATO, 2014).

Nos países do centro os esforços para a construção de uma estrutura mínima são compartilhados não apenas entre um grupo maior e mais diversificado de empresas, mas principalmente por governos, que elaboram políticas de incentivo ao desenvolvimento das tecnologias moldando o desenvolvimento tecnológico. Já nos periféricos, essas políticas são menos articuladas localmente e continuadas. Pode-se dizer que elas são pontuais e desconectadas de uma estratégia mais ampla para o desenvolvimento das tecnologias.

“India is interested in these solutions and to set up a system that is capable of meeting the **CO₂ targets** we have in **Paris Agreement**. When you have a closer look on the imports of technologies, they have an **import tax** on everything that comes to the country. **A few years ago, they made an exemption for fuel cells, so you don’t have to pay taxes for fuel cells systems for these off-grid solutions**. In my point of view there is a political signal trying to get those systems. So, hydrogen gets interesting in spots around the world where you get to **produce renewable energy in a cheap level**, like Chile, South America, India, and Australia.” (E28)

O caso da isenção de impostos de importação de pilhas a combustível na Índia (GOVERNMENT OF INDIA; MINISTRY OF FINANCE, 2017) ilustra uma política pontual que não estabelece incentivos suficientes para o desenvolvimento da tecnologia. No caso indiano, a estratégia de governo para políticas de fomento a energia do hidrogênio datam de 2006 (NATIONAL HYDROGEN ENERGY BOARD; MINISTRY OF NEW AND RENEWABLE ENERGY; GOVERNMENT OF INDIA, 2006), essas, além de não cumpridas, já estão defasadas em relação ao atual estágio de desenvolvimento das tecnologias em

⁴¹ O termo instituições, em uma perspectiva econômica, se refere a um conjunto de normas, regras e leis.

uma escala global. As políticas criaram oportunidades específicas para algumas atividades internacionais, mas não conseguiram dinamizar a cadeia de valor do hidrogênio como um todo, tampouco promover o aprendizado necessário para adoção e absorção da tecnologia.

O reduzido papel do governo contrasta com o crescimento da influência das multinacionais na coordenação de atividades relativas a energia do hidrogênio em países periféricos. Diferentemente do que ocorre no centro, alguns obstáculos que essas empresas enfrentam referentes aos interesses sociais e políticos no desenvolvimento das tecnologias não são colocados no contexto da periferia. Exemplos são a realocação dos trabalhadores de setores que se extinguirão com a transição energética, diferentes pressões conservadoras no processo do design tecnológico ou o engajamento da sociedade civil no processo de adoção tecnológica. A lógica das multinacionais para com o desenvolvimento das tecnologias na periferia é fundamentalmente mercantil - uma forma de expandir suas atividades, reduzir seus custos e obter maiores retornos. Com isso, oportunidades do desenvolvimento através das tecnologias provocadas por efeitos positivos na economia e sociedade são mais reduzidas na periferia.

É importante enfatizar que outras trajetórias tecnológicas para produção de energia renovável que se destacam no contexto de países periféricos, principalmente no que tange o uso da biomassa para produção de hidrogênio, não recebem a mesma atenção comparadas a fontes intermitentes como as energias solar e eólica. O uso energético de biomassas é percebido de forma positiva em países abundantes em produções agropecuárias e seus rejeitos (SHUNICHI NAKADA; SAYGIN; GIELEN, 2014). Assim, países periféricos, mais intensivos em atividades primárias, apresentam um potencial de geração de energia e produção de hidrogênio a partir dessas fontes. Mesmo que a produção de hidrogênio ainda não seja almejada, rotas de produção de biogás, biometano utilizando esses processos já são de interesse dos governos locais, sendo formas potenciais de produção de hidrogênio também.

“There is a lot of effort from bioenergy in general, for an instance bioethanol and biogas (bio methane) has been more commitment of the policies and of policy makers. For instance, last year, **the Mexican government published the roadmap for the bioethanol, and this year they published the roadmap for bio methane.** But it was supposed to be a roadmap for biogases gaseous fuels, including hydrogen, **but in the end, they took out the hydrogen.** So, I don't see a clear policy from the Mexican government” (E26)

A biomassa apresenta uma grande diversidade de fontes e processos de produção de hidrogênio comparada ao da eletrólise da água. Essa diversidade, que por um lado permite um uso amplo dessa rota para a produção de hidrogênio, não favorece a emergência de um (ou poucos) designs em uma escala

global como ocorre com a produção do hidrogênio eletrolítico. Ademais, pesquisas e desenvolvimento nessa rota de produção são menos incentivados por governos e setor industrial dos países do centro se comparadas às tecnologias de produção de hidrogênio através da reforma de hidrocarbonetos e eletrólise. Há, inclusive, um esforço considerável por parte de cientistas e membros de governo contra o uso de biomassas para geração de energia (KAKOULAKI *et al.*, 2021; SHERWOOD, 2020).

“I think that they always come to the same conclusions: **biofuel has so limited availability**. And it was one of the biggest **mistakes** that a lot of governments made in **the EU, to bet too much back in 2000 on biofuels**. Suddenly everything will be biofuels... but what happened was that suddenly the **prices of land versus a food went up** because for lot of farmers said: “hey, I can make more money producing crops within biofuel then making rice or whatever for the people”. I think that the big issue with biofuels is keeping the price of food. That the **land is used for food and for people and not for bio transport fuels**” (E30)

O E30 coloca que a alta densidade populacional dos países do centro é um obstáculo para a produção em larga escala do hidrogênio através da biomassa. Ao mesmo tempo, essas rotas de produção também não são consideradas por suas subsidiárias nos países periféricos, onde as atividades primárias resultam em um grande potencial de uso energético da biomassa. É importante observar que a produção de hidrogênio através da biomassa oriunda de efluentes e rejeitos agrícolas e pecuários não cria uma disputa no uso das terras para combustível ou alimentos (UNCCD, 2017). Argumenta-se nesta tese que os baixos incentivos às rotas de produção de hidrogênio utilizando a biomassa decorrem da escolha pela expansão de tecnologias alternativas, tais como eletrolisadores, essas fortemente financiadas por governos e empresas dos países líderes. Portanto, sugere-se que a menor relevância da biomassa está mais relacionada com o fortalecimento de uma trajetória tecnológica, ou um design dominante, sobre o hidrogênio e seus métodos de produção do que obstáculos técnicos propriamente ditos, como frequentemente colocados.

É comum que as tecnologias desenvolvidas no centro cheguem de forma desconexa ao contexto local dos países periféricos, onde outros problemas são considerados levando a design tecnológicos distintos.

“If you look at our specific scenario, India is a diesel dominated country. Here the consumption of diesel is 3 to 4 times more compared to gasoline. We thought about converting the **existing diesel engines** to a perfect hydrogen one. These are vehicles with internal combustion engines for the time being because **fuel cells are still commercially inviable, especially in Indian scenario**. They are significantly subsidized, so you can say, economically inviable. For the time being, they will be internal combustion vehicles. Besides that, **you cannot discard all the existing vehicles in one day**, and replace it with new engines. **Especially in a developing**

country, that is an even bigger problem. That has to happen in a **stepwise manner**. That is the technology of duo fuel engines.” (E7)

O E7 elucida que, para que as alternativas tecnológicas proposta de fato corroborem para solucionar o problema de emissões de CO₂, elas devem ser acessíveis a países emergentes de larga população. Entretanto, os altos custos para os consumidores trocarem seus automóveis movidos a diesel por veículos movidos a pilha a combustível (e também movidos a bateria) resulta na preferência por outro design tecnológico que se ajusta melhor ao contexto do país: veículos movidos a um combustível fóssil enriquecido de hidrogênio, que reduz as emissões de CO₂. O design tecnológico resultado do ajuste entre o problema do aquecimento global e soluções tecnológicas a partir das tecnologias do hidrogênio no contexto periférico é distinto daquela proposta nos países do centro uma vez que são pensados a partir de um conjunto de problema-solução diferente. Com isto, aponta-se que o próprio design tecnológico guarda uma estreita relação com a inadequação das tecnologias no contexto periférico.

É importante fazer uma ressalva em relação aos países periféricos de grandes mercados, tais como China, Índia e Brasil. Nesses casos, interessa aos países do centro não apenas a produção de hidrogênio tipo exportação, mas também que esses países contribuam de forma decisiva para a demanda de produtos e serviços finais referentes a energia do hidrogênio.

“But where the **actual demand development will take place that is an interesting question**. If Brazil, even with ethanol, which I understand that it needs another fuel next to it, and China would embark on **a larger scale, new cars sale, like what you have already in China with the 10% quote**, I think that would trigger something different. I can’t exactly predict what, but it gives us the opportunity of collaborating in a different level and in a different way with these countries, I think.” (E2)

O interesse na possível demanda interna altera a relação entre o centro e esses países periféricos, possibilitando outras formas de se estruturar o desenvolvimento tecnológico nesses países, que será abordado mais especificamente para os casos da China e Brasil. Isto é especialmente relevante para o caso das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, que ainda não apresentam um mercado consolidado nos países do centro. Assim, esses países contribuiriam também no sentido de aquecer a demanda por hidrogênio.

Em suma, os resultados apresentados sugerem que existe uma orquestração a nível internacional resultante da crescente influência das cadeias globais de valor no avanço das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia. O emparelhamento do desenvolvimento dessas tecnologias com as questões do aquecimento global, mais especificamente com a descarbonização de sistemas de energia,

no segundo período despertou um forte interesse internacional na produção de hidrogênio eletrolítico a partir da eletricidade renovável. A abundância de recursos energéticos renováveis em países periféricos passa a ser acessível aos países do centro uma vez criada uma cadeia global para produção, distribuição, transporte e uso de hidrogênio. Mostrou-se que o desenvolvimento das tecnologias na periferia ocorre “para fora”, importando tecnologias já desenvolvidas no centro e objetivando a exportação do hidrogênio produzido. Os hiatos no setor industrial local somados a uma menor ressonância das questões ambientais na periferia dificultam o crescimento de uma demanda interna pelo hidrogênio e seus produtos associados, resultando em uma inadequação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível ao contexto periférico. As formas do avanço tecnológico na periferia apresentam características distintas do centro – o avanço é articulado através das cadeias globais de valor, que em alguma instância, competem com o papel de coordenação que deveria ser executado por governos a fim de preservar os interesses socioeconômicos locais. Destacou-se também que a inserção da periferia na cadeia de valor do hidrogênio ocorreu em fases tardias do desenvolvimento tecnológico, apesar das subsidiárias já estarem instaladas nessas regiões nos estágios de pré-design tecnológico. Para o caso das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, o fluxo de conhecimento direcionado da matriz a subsidiária para o desenvolvimento tecnológico propriamente dito não ocorreu. Somente em meados do segundo período as subsidiárias passam a ser acionadas como um ponto de acesso das cadeias de valor aos mercados periféricos, indicando que o fluxo de informação ocorre no sentido inverso do proposto pelos teóricos da cadeia global de valor, ou seja, da subsidiária para as matrizes. Por fim, mostrou-se que designs tecnológicos preferíveis em alguns países periféricos, como a produção do hidrogênio a partir de biomassas, são frequentemente descartados, corroborando o caráter inadequado do avanço das tecnologias na periferia.

4.3.1.1. *Notas sobre a influência da China no desenvolvimento tecnológico*

Dentre os países periféricos, destaca-se entre os entrevistados o papel da China no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Pondera-se que não foram entrevistados atores do desenvolvimento tecnológico situados na China e que, portanto, as breves análises contidas nesta presente subseção decorrem de percepções externas de outros atores que apresentam relações afins no país. Esta subseção tem como objetivo apontar outras características do desenvolvimento chinês que vão além daquelas que derivam do seu grande mercado interno e que propiciam o posicionamento estratégico do país na corrida tecnológica.

Apesar de não ter desenvolvido tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível desde seus primórdios, como no caso dos países líderes, existe um grande esforço por parte do governo chinês, especialmente a partir do segundo período (2010-2020), de alcançar a fronteira do conhecimento dessas tecnologias visando a sua implementação utilizando tecnologia nacional. Diferentemente de outros países periféricos, a forte presença do governo chinês na coordenação das atividades relacionadas ao desenvolvimento e implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no país sinalizam um importante crescimento da demanda por hidrogênio ao mercado internacional, atraindo empresas desenvolvedoras das tecnologias ao mercado chinês, como colocado pelo E19:

“Obviously, everybody wants to industrialize **make and understand the fuel cells**. Every government wants to make the MEA⁴². When you talk to universities, professors, students, that is all they want to talk about. “How can we cooperate in making the MEA or researching the MEA?” What people have to understand is this: **our MEA** got where it is today after a little bit more than **U\$5 billion of investment**. That is a bit of money. If I would go to your university, the chances are that I would be the one talking. They won’t have much to talk to me. People have to understand that. Although we are extraordinary open, there is **far too much investment in our core technology for us just to cooperate**. So, are you going to sign up a check for 5 billion dollars? People jump ahead all of that as if we would open for explaining every single patent, manufacturing process, no, we are not! **Can we do that? Ya, sure, we are getting there with China**. But why are we getting there? **They are creating an entire market.**” (E19)

Os esforços do governo chinês em promover o desenvolvimento das tecnologias localmente através de políticas de subsídio e desenvolvimento tecnológico robustecem a criação de um mercado interno. Pelo relato do E19, é possível perceber que a atuação do governo tanto pela criação do mercado interno quanto pelas políticas de transferência de conhecimento e tecnologia incentiva a entrada de empresas de base tecnológica e suas tecnologias na China. É possível dizer que esses esforços tem sido

⁴² MEA é membrane electrode assembly, que é a tecnologia principal de pilhas de membrana polimérica (PEM)

bem-sucedidos e acelerado o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Atribui-se parte desse sucesso ao *modus faciendi* chinês, este um importante facilitador do desenvolvimento global, singular no tocante as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Sustenta-se nesta tese que o desenvolvimento tecnológico é feito diferentemente na China comparado a outros países periféricos (BINZ *et al.*, 2017) e que as peculiaridades desse desenvolvimento resultam em importantes vantagem competitivas para o país.

O desenvolvimento tecnológico na China é marcado pelo vasto montante dos investimentos realizados pelo governo chinês, que impulsiona e acelera os desenvolvimentos de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível.

“That will bring us to probably €400 million of public money per year in Europe in this technology. Then you have the DOE that puts around \$150 million on the table every year. Then there is about Japan, putting around €250 million on the table. **And then you have China, which is very impressive, they put €2-4 billion per year on the table.** That has changed very recently.” (E3)

Diferentemente do que ocorre em diversos países da periferia, os investimentos são feitos com o propósito de desenvolver as tecnologias nacionalmente, articulando empresas e centros de pesquisas chineses (LU *et al.*, 2013; ZHANG, FANGZHU; COOKE, 2010). Os recursos são, na maioria das vezes, públicos e com um forte direcionamento para o desenvolvimento específico de uma trajetória tecnológica, que normalmente segue a dos países do centro. Embora ainda não se perceba trajetórias genuinamente chinesas, objetiva-se alcançar e reproduzir os avanços já realizados (REN *et al.*, 2020). Os investimentos são feitos de acordo com planos quinquenais elaborados e coordenados pelo governo chinês, nos quais são planejados desenvolvimentos tecnológicos integrando diversos setores da economia, e através de metas específicas (ZHANG, LONG *et al.*, 2017).

“Chinese development is really driven **top-down** by the central **government**, by regional government with **money being available** not only to fund R&D, not only to invest into pre-production processes but also money to make sure that product gets into the market. So, it is all these 3 elements: **R&D, investments, and consumer subsidies**, which with the enormous amount of money that China has available, it gets to a point that **scaling up takes place faster**. They have **by now thousands of light-duty vehicles and fuel cell busses. Few OEMs’ cars are developing fuel cell systems**” (E4)

Nota-se que na China ocorre simultaneamente o investimento i) em pesquisa e desenvolvimento, ii) na construção de um setor industrial e iii) na adoção das tecnologias. Por um lado, países do centro investiram primeiramente em pesquisa e desenvolvimento, em seguida no setor industrial e finalmente

em formas de estimular a demanda. Por outro lado, na periferia esses investimentos além de muito mais escassos são majoritariamente do setor industrial internacional para a criação de unidades de produção de hidrogênio. A China usufrui de uma maior clareza no direcionamento tecnológico devido ao seu estágio de maturidade para investir simultaneamente em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias com potencial já revelado, na construção de indústrias, mesmo que inicialmente constituídas de empresas estrangeiras e em formas de subsidiar e direcionar o consumo para essas tecnologias.

O E11 Ressalta que a estrutura política centralizada e autoritária é uma diferença importante entre a China e outros países que permitiu uma reação rápida e estratégica em relação a entrada no desenvolvimento dessa trajetória tecnológica.

“In the last 2 or 3 years, the interest of China has grown significantly. **The Chinese government doesn’t have to negotiate and ask all the political parties about anything.** They just do it. In the Danish parliament, that would be a discussion that would take several years, and nothing would come out of it.” (E11)

Em outros países, inclusive os periféricos, seria necessário um maior diálogo com o setor industrial e sociedade civil para justificar os investimentos locais tais como os feitos pelo governo chinês na tecnologia. Contudo, é importante observar que as pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio fazem parte de um portfólio de tecnologias investidas pelo governo chinês no contexto da descarbonização, no qual ainda não se sabe ao certo quais serão as tecnologias dominantes.

Fato é que as particularidades do desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na China já se repetiu no desenvolvimento de outras tecnologias, e por isso, propõem-se na presente tese que se trata mais de um *modus faciendi* do que apenas uma estratégia de desenvolvimento tecnológico (BINZ *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2012). Para o caso das tecnologias em análise, esse *modus faciendi*, se diferenciou tanto do centro quanto da periferia por uma centralização quase absoluta das tomadas de decisão e coordenação das trajetórias tecnológicas, uma visão não linearizada do processo de inovação e uma abundância de recursos destinados simultaneamente a quase a todos os estágios desse processo. Como consequência, a China se beneficia tanto de um processo de aprendizagem tecnológico mais acelerado que o de outros países quanto de uma maior agilidade nos processos de transição para novas bases técnicas produtivas. A velocidade de atuação nas diversas etapas do desenvolvimento tecnológico assegura que as informações reveladas somente através da implementação das tecnologias sejam incorporadas num processo não linear de inovação, onde as etapas ocorrem concomitantemente. O caso do rápido desenvolvimento e implementação de tecnologias de baterias para veículos (IEA,

2020c) mostra como os chineses puderam reconhecer antecipadamente as limitações tecnológicas e se despontaram no desenvolvimento de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio.

“China has **recognized** that doing **battery** in cities is fine and needs to happen fast, and that is what they achieved, but it **doesn’t cover the full portfolio of customer’s needs** in the mobility sector. If you want to do that with zero-emission as well with hydrogen, so let’s take the same approach. That is to **throw money** in them and let **Chinese companies** develop these technologies” (E4)

Até o momento que se dá a escrita desta tese, os países que lideram o desenvolvimento das tecnologias não conhecem formas de conciliarem a corrida tecnológica com os chineses. Os grandes recursos despendidos pelos chineses em fases avançadas do desenvolvimento tecnológico, seguidos por uma produção a baixo custo das tecnologias tem resultado em perdas sistemáticas de competitividade dos países do centro. O caso do desenvolvimento de painéis fotovoltaicos ilustra a capacidade de escalonamento tecnológico do país e o potencial de liderança do mercado:

“But we recognize that China is poised potentially **zoom away** with hydrogen and fuel cell technology **just like they did with solar technology**. They have their **government**, and when the government decides it going to **support** it they have **patience and deep pockets**.” (E1)

Apesar da China ser percebida como um país chave para o desenvolvimento da tecnologia, entrevistados dos países do centro apresentaram uma preocupação em relação a entrada do país na disputa tecnológica. Isto porque a China ameaça o retorno dos investimentos de longo prazo feitos pelos países que lideraram o desenvolvimento tecnológico até então. Se de fato desenvolverem rapidamente as tecnologias e comercializá-las a baixo custo, o mercado final será composto majoritariamente por empresas chinesas como ocorreu com outras tecnologias (GOSENS; BINZ; LEMA, 2020; HAAKONSSON; KIRKEGAARD; LEMA, 2020; LEMA *et al.*, 2011). Após experiências na perda de competitividade de suas indústrias com tecnologia emergente, os países do centro se atentam para evitar esse cenário. Com isso a entrada da China na disputa tecnológica acelera também o desenvolvimento tecnológico nos países líderes.

“Germany has few major companies when it comes to hydrogen technologies. In my point of view, that was the reason why Ministry of Economics started to have a closer look at the technology, for industrial development. They started to get interested because they learned from the PV⁴³ technology. **We developed the PV** here in Germany and now **somebody else is earning money with that**. German companies don’t earn money on PV, and **they don’t want that to happen again**, so they will try to keep the technology here in Germany.” (E28)

⁴³ Fotovoltaico

Países líderes no desenvolvimento tecnológico empenham-se em proteger suas indústrias locais. A principal forma de conter o avanço chinês identificada nos dados obtidos foi em torno de um discurso que combina segurança, normas e regulações. Os desenvolvedores dos países líderes argumentam que as tecnologias chinesas não apresentam o mesmo nível de segurança das desenvolvidas em seus países. As questões de segurança em relação ao hidrogênio são importantes para elaboração de normas e regulações, especialmente por se tratar de um combustível. A segurança é também um ponto de interação entre a tecnologia e o consumidor sendo a garantia da mesma necessária para percepção positiva em relação as tecnologias.

As normas de segurança tanto acompanham quanto moldam o desenvolvimento tecnológico. Por um lado, as normas refletem o desenvolvimento tecnológico, legitimando os avanços técnicos ao normatizar as condições de fabricação e operação das tecnologias. Por outro lado, as normas privilegiam determinados padrões tecnológicos na medida que normatizam práticas específicas. Frequentemente, normas, essas de caráter sugestivo, embasam regulações que são de caráter obrigatório e normalmente precedem a operacionalização das tecnologias. As normas são estabelecidas por comitês técnico-científicos sob forte influência dos setores industriais que visam a comercialização das tecnologias, sendo as normas uma forma de manter vantagens competitivas no desenvolvimento tecnológico. As normas revelam acordos selados para compatibilizar diferentes tecnologias desenvolvidas por empresas que atuam em diferentes componentes. Comunicam-se, através das normas, condições de contorno já testadas e configuradas de acordo com o desenvolvimento tecnológico dos líderes na tecnologia. Os demais devem desenvolver suas tecnologias seguindo às normas colocadas, caso contrário sua comercialização fica limitada aos locais de exceção à regra.

“That's what I'm worried about these Chinese companies, and I am pushing them also to move to **our standards**. It's all about **technology knowledge** because if you make an international standard and your country doesn't have the technology to meet that standard, then you try to **reduce your standard**. Those companies lobby the Chinese government to **reduce the standard** so that they can sell. And **they will say that it is safe**. So, you don't know how serious they are in “safe”. That's why you have to be careful. So, for example, **what is the refueling protocol?** [...] We have a continuous connection between the station and the car during the refueling. So, for example, the car will continuously inform the station how warm it is inside the tank. So, there is a temperature sensor in the tank, which shows the temperature of the gas inside the tank, so it cannot grow up to 80 85°C. This is collected in a kind of product interface, so as soon as the temperature goes to 80°C, for example, then the flow rate of the refueling is drastically reduced. Why does it get warm? Because you have to fill it up 700 bars. [...] So, what happens is that the friction in your refueling hose heats the gas. Just before the gas goes into the hose it goes through a cooler of minus 40°C. So, we cool down the gas to minus 40°C, then it goes to the refueling house where then it heats up because of the friction, and then it goes into the tank. So, it is always

well controlled to stay under the 80-85°C. **Do they have this kind of standards in China? It is a global standard, same in Japan, same in Europe and same in the U.S.**

[...] If you say you want an Air Liquide or a Linde station, and you want to refuel a [...] car that doesn't **meet the international standard**, then they will say: "I won't refuel that car". They will have the debate triggered automatically. I can assure you that Air Liquide will not **go down the standard**. This kind of international companies will not take any reputational risk. They will say that if somebody else wants to do that, do it. But if you want us to do it, it will be on our terms." (Entrevistado não revelado)

O relato do entrevistado acima exemplifica o uso de normas e padrões como uma estratégia de barreira de mercado para tecnologias chinesas. Adota-se um design tecnológico com sistemas fechados e interligados, onde o tanque de hidrogênio em carros e as estações de abastecimento se conectam através de tecnologias concebidas conjuntamente pelas partes interessadas para se comunicarem durante o abastecimento. Essas tecnologias asseguram que os sistemas desenvolvidos por empresas separadamente precisam ser compatíveis, possuindo determinado padrão tecnológico. Dessa forma, as tecnologias fornecem não apenas mais segurança aos usuários dos veículos, mas também formas para as empresas manterem a liderança tecnológica.

Em suma a entrada da China dinamiza o desenvolvimento tecnológico tanto localmente, pelo seu ritmo acelerado de desenvolvimento, quanto nos países líderes, que até então postergaram a comercialização das tecnologias. As especificidades do *modus faciendi* chinês são determinantes para que, mesmo de início atrasado, o desenvolvimento tecnológico na China alcance a fronteira de conhecimento internacional e potencialize sua liderança de mercado. Diferentemente tanto do centro, que contou com longos períodos de desenvolvimento tecnológico, e da periferia, que muitas vezes se abstém desse desenvolvimento, a China se desponta como um caso único também para o desenvolvimento de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio.

4.4. A trajetória das tecnologias no Brasil

O Brasil compartilha similaridades com os outros países periféricos apresentados especialmente no que tange a abundância de recursos naturais para geração de eletricidade renovável e o seu importante mercado interno potencial capaz de absorver a demanda por hidrogênio e suas tecnologias associadas em setores específicos. Apesar da sua condição periférica, a longa trajetória de desenvolvimento de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio no Brasil acompanhou, precocemente, as tendências dos países líderes e, mesmo que sob uma forte influência do centro, o desenvolvimento local permitiu um enfoque nas especificidades baseadas nas oportunidades do próprio mercado interno do país.

O hidrogênio para fins energéticos e o uso de pilhas a combustível para geração de eletricidade se despontaram como alternativas tecnológicas no Brasil em meio a duas crises energéticas: a do petróleo nos anos 1970 e a crise do apagão nos anos 2000. Mesmo não sendo essas tecnologias as principais apostas para solucionar os problemas postos pelas crises, em ambos os períodos houve um interesse expressado através de planejamentos e investimentos para o desenvolvimento das tecnologias nacionais por parte do governo brasileiro, mobilizando indústrias, universidades e centros de pesquisa para tal.

No que tange os avanços no desenvolvimento das tecnologias no Brasil frente às crises do petróleo, o Projeto Ipiranga, instituído em 1976, foi um marco importante porque tornou o hidrogênio parte da estratégia para o setor de energia a nível nacional. O Projeto contou com uma forte orientação do governo para articular, supervisionar e promover esforços de ciência e tecnologia visando superar os desafios da escassez do petróleo. Às Sociedades de Economia Mista públicas vinculadas ao Ministério de Minas e Energia (MME) como a Petrobrás e a Eletrobrás foram delegadas as responsabilidades de gerir e executar projetos voltados para fontes não-convencionais de energia, tais como atividades de pesquisa e desenvolvimento relacionadas ao hidrogênio (FILHO, 1978).

Sem pormenorizar os avanços viabilizados frente às crises do petróleo, pondera-se que a trajetória anterior das pesquisas e desenvolvimentos em hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil foi fundamental para que essas tecnologias fossem até mesmo prospectadas nos anos de crise. Pode-se dizer que o desenvolvimento dessas tecnologias no Brasil teve suas raízes em universidades e centros de pesquisa específicos nas quais as agências nacionais de planejamento científico designavam grandes quantias de recursos para o desenvolvimento de tecnologias de fronteira, sob uma ideologia dominante no período pós-guerra que condicionava a ciência e a tecnologia ao desenvolvimento econômico

(SCHWARTZMAN, 2001). Nessa perspectiva, foram fundadas as denominadas “instituições de alta tecnologia” centrais para o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, tais como a Universidade de Campinas (UNICAMP) e a Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Essas e outras instituições⁴⁴ realizavam projetos de pesquisa na fronteira do conhecimento científico nas tecnologias em análise envolvendo, por exemplo, eletrólise, construção de estação-piloto para a geração, transporte, armazenamento e utilização do hidrogênio (FILHO, 1978; SILVA, NEVES, 1992).

A reintegração de cientistas exilados que trouxeram uma forte experiência de pesquisa internacional ao país também propiciou o desenvolvimento de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio. Neste mesmo sentido, professores estrangeiros convidados a lecionar e compor projetos de pesquisas no Brasil igualmente contribuíram para o aumento da influência de temáticas internacionais nas pesquisas no país. Acadêmicos estrangeiros tiveram um papel primordial na criação de programas em eletroquímica, de onde se originaram as pesquisas em pilhas a combustível, nas universidades do interior paulista, formando a “legião estrangeira” composta por pesquisadores como o Drs. Ernesto Rafael González e Luis Alberto Avaca na USP, o Prof. Dr. Julien Françoise Coleta Boodts na USP de Ribeirão Preto e o Prof. Dr. Carlos Ventura D’Alkaine na UFSCar (AVACA; TOKORO, 2002). Com isso, essas políticas promoviam um intenso alinhamento entre as atividades relativas ao desenvolvimento de tecnologias no mundo e no país, moldando também a pesquisa nacional em hidrogênio e pilhas a combustível.

O desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no período pré-criSES do petróleo se beneficiou de um intenso investimento em pesquisa e desenvolvimento no país em áreas tecnológicas consideradas oportunas para o desenvolvimento econômico. Supunha-se que altos investimentos em pesquisa básica e aplicada, nesta ordem, resultariam naturalmente em uma eventual adoção das tecnologias devido a suas qualidades técnicas. Por isso, eram várias as políticas que objetivaram integrar a ciência no Brasil com os desenvolvimentos internacionais de fronteira, que, na época, incluíam tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível (SILVA, D. B. DA; BITU, 1988; SILVA, NEVES, 1992). Assim, posteriormente com as crises do petróleo, essas tecnologias que já

⁴⁴Outras instituições de alta tecnologia: Instituto de Física e Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Centro Técnico de Aeronáutica, Instituto Militar de Engenharia

apresentavam uma trajetória de pesquisa e desenvolvimento puderam ser projetadas e reforçadas como uma alternativa, mesmo que distante, de inserção na matriz energética brasileira.

As atividades até então embrionárias encontraram condições favoráveis ao seu desenvolvimento a partir dos anos 2000, impulsionadas pelas crescentes preocupações acerca do suprimento de hidroeletricidade no Brasil ao longo dos anos 1990, quando a marca dos reservatórios ao final dos períodos secos já não ultrapassava 30%, ao passo que nos mesmos períodos anteriores a 1997 a reserva chegava a 66% (TOLMASQUIM, 2000). O ápice da crise hidrelétrica em 2001, conhecida como “crise do apagão”, provocou um severo racionamento de energia devido a uma incapacidade do setor elétrico de suprir a demanda nacional. Os cortes de gastos para controlar a inflação impediram investimentos na expansão da capacidade do setor elétrico, apesar da alta rentabilidade e disponibilidade de recursos das empresas públicas do setor. Além disso, ao contrário do esperado pelo governo após a abertura do setor de geração à iniciativa privada em 1995, adversidades, como incertezas regulatórias e desvalorização cambial, inibiram os investimentos privados no país, levando a um imenso vácuo no setor elétrico (TOLMASQUIM, 2000).

A partir do diagnóstico da crise em 2001, o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) passou a efetivamente receber recursos para promover o desenvolvimento de tecnologias para o setor de energia provenientes do CT-Energ, vinculado aos recém-criados Fundos Setoriais⁴⁵. A crise do apagão levou a uma forte priorização da energia na agenda política brasileira que, somada ao entusiasmo internacional acerca das tecnologias, aqueceu o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Com isso, nos anos 2000, o país apresentava um grande número de atividades de design dessas tecnólogas apoiados inclusive com participação de empresas como Copel, Petrobras, Cemig e AES do Brasil (SUDBRACK *et al.*, 2012). Destaca-se também como resultado desta conjuntura o Programa Brasileiro de Células a Combustível⁴⁶ (ProCaC⁴⁷) que objetivou o financiamento e integração projetos de pesquisas

⁴⁵Decreto nº 3.867 estabeleceu que os recursos oriundos através da Lei nº9.991 seriam destinados ao recém-criado Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), no CT-Energ, vinculados aos Fundos Setoriais. A Lei nº9.991 de 2000 obriga as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica a aplicarem anualmente um valor de no mínimo 0,65% de suas receitas operacionais líquidas em pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico e no mínimo 0,25% em eficiência energética (BRASIL, 2000b).

⁴⁶ Denominadas no presente trabalho como pilhas a combustível

⁴⁷ Em 2005 o programa passou a incluir pesquisa e desenvolvimento de processos para obtenção de hidrogênio, recebendo o nome de Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2)

pulverizados referentes às tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível que enquadrassem nas metas de longo prazo acordadas entre governo, indústria, universidades e centros de pesquisa.

A crise do apagão fez com que a temática do hidrogênio chegasse no Brasil concomitantemente com um período de forte entusiasmo tecnológico internacional, como colocado na seção 4.1, no primeiro período do desenvolvimento (2000-2009). Ressalta-se que enquanto a geopolítica do petróleo e a poluição do ar eram os principais direcionadores do desenvolvimento das tecnologias nos países do centro, o Brasil já havia equacionado esses problemas com um outro conjunto de alternativa tecnológica, os biocombustíveis. O problema que a maioria das atividades de design de pilhas a combustível e tecnologias do hidrogênio buscavam solucionar no Brasil estava principalmente relacionado à crise hidrelétrica, levando a diferentes propósitos, soluções e setores industriais envolvidos. Diferentemente do centro, não se observou um forte interesse da indústria automotiva no país, mas sim das empresas do setor elétrico e do óleo e gás.

A trajetória da pesquisa e desenvolvimento nessas tecnologias garantiu uma posição de destaque do Brasil internacionalmente, propiciando o país a ser cofundador da IPHE⁴⁸, composta por um seleto grupo de países que lideraram o desenvolvimento dessas tecnologias, como Estados Unidos, Japão, Alemanha, Reino Unido, França e Canadá.

“Em 2003, houve uma visita do então presidente Lula aos EUA em uma reunião de trabalho entre a comitiva do Brasil e dos EUA. O presidente americano, o G.W. Bush, convidou o Brasil para participar de uma parceria internacional do hidrogênio que ainda não tinha nome. A ideia dessa parceria era ter países líderes em pesquisa, que era o caso do Brasil. Mas principalmente, outros países entraram porque já tinham desenvolvimento em projetos demonstrativos, alguns já tinham comercialização de produtos”. (E33)

A IPHE foi criada em 2003 pelos Estados Unidos com objetivo de promover a cooperação internacional em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, códigos e padrões comuns e compartilhamento de informações sobre desenvolvimento de infraestrutura global. Assim, a parceria harmoniza os desenvolvimentos das tecnologias nos diferentes países membros para que seus avanços tecno-econômicos sejam convergentes. Essa harmonização ajuda a reduzir as possibilidades de design tecnológicos disponíveis, uma vez que se discute de forma conjunta as diferentes formas de problematizar o desenvolvimento tecnológico.

⁴⁸ *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*

Através de reuniões anuais do seu comitê de direção, a IPHE estimulou a criação de roteiros estratégicos para o hidrogênio nos seus países membros, a qual, no Brasil, foi conduzida pelo MME. No roteiro brasileiro foram estabelecidos 6 eixos para os avanços da agenda do hidrogênio: i) códigos, normas e regulamentos, coordenado pelo INMETRO; ii) produção de hidrogênio, coordenado pela Unicamp; iii) o armazenamento transporte e distribuição do hidrogênio, coordenados pela Petrobras, iv) sistemas de conversão, coordenado pela Coppe; v) aplicações, coordenado pelo Lactec; e o vi) atividades horizontais, coordenadas pelo próprio MME (FOSTER, 2004). Percebe-se que o avanço das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível era realizado de forma articulada em universidades e centros de pesquisa, entidades regulatórias e empresas públicas, o que não apenas aumentava a credibilidade do desenvolvimento das tecnologias, mas também o incitava em outras instituições. A participação do Brasil na IPHE requeria esforços internos e contínuos de coordenação para o desenvolvimento do hidrogênio no país por parte dos pesquisadores, membros do governo e empresas. Ademais, existia um desejo por parte da administração do governo do Presidente Luís Inácio Lula da Silva que o Brasil se posicionasse como um líder no desenvolvimento das tecnologias e que isto fosse comunicado aos membros da IPHE.

“Todos nós, eu, os líderes dos capítulos do *roadmap* brasileiro na época e outras poucas éramos **convidados pelo MME para reunirmos** de vez em quando, principalmente quando estava se **aproximando uma reunião do IPHE** presencial, para que a delegação brasileira tivesse **uniformidade de atuação harmonizada** com os interesses do Ministério e os nacionais brasileiros. Então havia essas reuniões.” (Entrevistado não revelado)

Tal como o MME, o MCT também tinha uma atuação presente nas questões do hidrogênio. Cabia ao MME o programa do hidrogênio e o MCT o de pilhas a combustível (MAZZAROLLO, 2004). Com a visibilidade dada ao tema durante os anos 2000 e a condução das atividades de design voltadas para o hidrogênio e pilhas a combustível, consolidou-se uma rede articulada de pesquisadores e empresas no país que avançava no desenvolvimento de tecnologias nacionais. O próprio programa de hidrogênio do MME, o ProH2, acumulava cerca de U\$56 milhões investidos, coordenação de 40 laboratórios de pesquisa em 20 instituições de pesquisa em todo Brasil, formando mais de 200 doutores no país. Assim, até o início da década de 2010 o Brasil apresentava uma trajetória promissora e consistente e um relativo destaque no contexto internacional no desenvolvimento dessas tecnologias.

É possível afirmar que as crises energéticas do petróleo e do apagão catalisaram o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil uma vez que tornaram urgente a necessidade do avanço tecnológico para a manutenção da segurança energética nacional,

mesmo que essa já tivesse sido evidenciada de alguma forma anteriormente. A partir das crises, principalmente os governos buscaram articular o desenvolvimento de soluções tecnológicas para os problemas colocados, ao mesmo tempo que se constatava a importância da diversificação de alternativas energéticas investindo em diversas trajetórias tecnológicas. O fato das tecnologias terem sido soluções tecnológicas encontradas para problemas locais específicos foi fundamental para a construção de atividades de design próprias, que atendessem desafios enfrentados no mercado interno. Diferentemente do centro, o primeiro período (2000-2009) no Brasil contou com uma forte participação do setor elétrico, esse mais proeminente no segundo período (2010-2020) nos países centrais. Trajetórias de tecnologias visando aplicações estacionárias, como pilhas a combustível de óxido sólido, ganharam uma ênfase importante no país devido ao problema central da crise hidrelétrica posto às atividades de design, voltadas para solucionar às demandas nacionais.

As empresas públicas foram fundamentais para capilarizar e executar os projetos estabelecidos pelo governo. Através das mesmas, entidades públicas como o MME e o MCTI conseguiram direcionar recursos para atividades que não necessariamente estavam submetidas à uma lógica financeira, mas sim a interesses nacionais de desenvolvimento de tecnologias estratégicas de longo prazo. Pelas dimensões de seus projetos e seu respaldo nas estratégias nacionais, as empresas públicas dinamizaram os investimentos nas tecnologias ao mesmo tempo que reduziam as incertezas inerentes ao processo de inovação tecnológica. Assim, impulsionavam o desenvolvimento das tecnologias tanto nas universidades quanto em empresas privadas nacionais e estrangeiras. O fato de serem muitas vezes as mesmas empresas públicas executando projetos referentes a tecnologias distintas evitou que essas tecnologias fossem entendidas como competidoras, mas sim complementares. Por exemplo, destaca-se um projeto de pilhas a combustível de geração distribuída da CEMIG, sendo o mesmo diretamente conflitante com o nicho da empresa, focado em distribuição de energia centralizada (SILVA *et al.*, 2009).

Vale lembrar, entretanto, que no Brasil, ambas as crises do petróleo e da hidroeletricidade, tiveram um papel mais proeminente em promover uso de biomassas como uma alternativa aos combustíveis fósseis do que em implicações na geração de energia através do uso de pilhas a combustível e hidrogênio. Após quatro séculos extraindo o açúcar como principal produto da produção canavieira, as crises do petróleo abriram espaço para a expansão do setor sucroalcooleiro, criando um arranjo único no país no que diz respeito ao transporte e a própria matriz energética nacional. Analogamente, em reflexo da crise do apagão, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) de 2005 intensifica

novamente a rota tecnológica dos biocombustíveis, desta vez, mais especificamente o biodiesel. Argumenta-se que a trajetória dos biocombustíveis solidificada a partir das crises propiciou indiretamente a formação de uma base de conhecimento para produção de hidrogênio a partir das biomassas no Brasil. Por exemplo, em 2005, dentre as prioridades traçadas através do roteiro para estruturação do hidrogênio no Brasil, a reforma do etanol e biomassa foi colocada como uma rota principal para produção do hidrogênio, refletindo a orientação do governo para os biocombustíveis⁴⁹, almejando o uso direto do etanol em pilhas a combustível, tanto para aplicações estacionárias quanto de transporte pesado e ônibus (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2005).

De fato, esse tipo de exploração da base de conhecimentos para entrada em outras atividades tecnológicas caracterizou a própria trajetória da biomassa como combustível no Brasil, e não somente no que tange a energia do hidrogênio. Por exemplo, as crises do petróleo certamente impulsionaram o uso do álcool carburante. Afinal, com aumento do seu preço em meados dos anos 1970, o petróleo representava quase 50% do déficit comercial brasileiro. Entretanto, os projetos do carro a álcool datam de pelo menos 40 anos antes quando Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (EECM)⁵⁰ testava um Ford movido a álcool etílico hidratado 70% em 1925 ainda sem uma definição clara para o combustível automobilístico⁵¹ (INT, 2001; MARCOLIN, 2008). Ali já se acumulava conhecimento referente ao uso da biomassa como combustível no Brasil. Não obstante, constata-se que a própria EECM foi estabelecida no início dos anos 1920 desassociada dos automóveis ou seus combustíveis, objetivado, alternativamente, o aprimoramento de métodos e tipos de fornalha para queima de lenha e carvão - combustíveis ferroviários majoritários até então. O surto automobilístico no fim da mesma década levou a EECM a explorar o álcool carburante como substituto do petróleo, tido como caro e escasso (SCHWARTZMAN; CASTRO, 1985). Assim, a instituição, criada com um determinado foco, incorporou às suas atividades outras tecnologias emergentes. Similarmente, o setor canavieiro, uma vez incentivado, adentrou outras atividades produtivas expandido o uso do etanol. Esses exemplos evidenciam a causalidade entre as trajetórias tecnológicas, onde a acumulação de uma base de

⁴⁹ Outras rotas também priorizadas foram a eletrólise da água e a reforma do gás natural.

⁵⁰ Em 1933 se tornou o Instituto de Tecnologia (INT)

⁵¹ Como no caso do Ford Model T, produzido entre 1908 e 1927 que operava a gasolina, querosene ou etanol. Em 1919, a empresa iniciou a montagem do Modelo T em um galpão em São Paulo com peças importadas

conhecimento e recursos humanos qualificados permitiram o acesso a trajetórias tecnológicas emergentes.

É importante avaliar que a consolidação das trajetórias tecnológicas, tanto do hidrogênio quando da própria biomassa, a partir da base de conhecimento em biocombustíveis dependeu de um conjunto de ações, acionando diferentes atores e pondo em prática regulações, que pavimentaram caminhos para a participação de outras alternativas tecnológicas na matriz energética brasileira tais como as em análise. A construção dessa trajetória não foi trivial, tanto que o Brasil se tornou um exemplo único no que tange a transição para combustíveis não-fósseis. Uma parte significativa desta façanha é atribuída a capacidade das instituições nacionais em se projetarem em novas trajetórias tecnológicas, que dependeu tanto da flexibilidade organizacional de suas gestões quanto da capacidade do governo em apoiar e direcionar o desenvolvimento tecnológico.

As regulações foram instrumentos importantes usados pelos governos para a consolidação das tecnologias. A de maior notoriedade para o caso do uso de biomassas como combustíveis é a adição do biocombustível ao combustível fóssil como forma de reduzir o consumo do último. Isto ocorreu em pelo menos três momentos distintos, nos anos 1920 e 1930, pela escassez do petróleo; 1970 e 1980, pelos preços do petróleo; e a partir de 2008, principalmente por questões de poluição e pressões do setor sucroalcooleiro. O Programa Nacional do Álcool, mais conhecido como Proálcool, em 1975 contou com a adição do álcool à gasolina em 4,5% como medida de redução da importação da mesma. Com a segunda alta dos preços do petróleo em 1979 a adição obrigatória na gasolina passou a ser de 15%. A força do direcionamento do governo é ilustrada no acordo entre o governo e a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) que, apesar da resistência inicial das montadoras, deu início a produção de carros a álcool no país⁵².

A mesma abordagem regulatória se repetiu com a agenda do biodiesel foi reforçada em 2008, quando estabelecido a obrigatoriedade da mistura de biodiesel no diesel⁵³. Através dos incentivos ao biodiesel renovou-se também atividades de design referentes a outros processos de biomassa. Novas pesquisas sobre diferentes processos de obtenção de biodiesel, amplamente incentivadas no país desde 2005, induziram a formação de uma massa crítica de pesquisadores também interessados em expandir a

⁵² No mesmo ano, a Fiat desenvolveu o primeiro carro a álcool para o mercado brasileiro, o Fiat 147, seguido por outras montadoras.

⁵³ Obrigatoriedade de 2% em 2008, 4% em 2009 e 5% em 2010.

aplicabilidade dos seus processos de transformação da biomassa, incluindo rotas de produção de combustíveis gasoso como o biogás e hidrogênio.

A partir dos anos de 1990, mas principalmente após os anos 2000, o avanço da pauta ambiental contribuiu positivamente para a expansão do uso de biocombustíveis no país, em um primeiro momento, impulsionada pelos problemas relativos à poluição do ar. A fim de reduzir questionamentos ambientais foi aprovado o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil em 2009 para evitar o plantio de soja e cana em áreas de mata nativa, mostrando uma preocupação do governo em associar os biocombustíveis à soluções para os problemas ambientais emergentes. Na mesma direção ambiental do zoneamento agroecológico, resíduos também passaram a ser controlados no Brasil nesse período⁵⁴ por apresentarem problemas de contaminação de solo, ar e água, estimulando pesquisas e desenvolvimentos de tecnologias voltadas para produção de combustíveis advindos da biomassa de resíduos, como o biogás. Observa-se que essas questões ambientais implicam em atividades de design de uma natureza distinta das postas mais recentemente referentes às emissões de CO₂. Trata-se os problemas ambientais de uma forma ampla, sem se limitar às emissões, onde outros compartimentos da biosfera, como a hidro e a litosfera, são igualmente ou até mesmo mais influentes do que a atmosfera.

“Em 2013 já tinham **muitos pesquisadores** trabalhando no tema do biodiesel que foi reflexo de uma **política de governo de 2005** [...] Em **2010-2013 isto estava no auge**. Teve uma greve na universidade em 2013 e tinha **um edital na Itaipu, bem diferente**, para fazer o levantamento bibliográfico sobre o **biogás na rota do hidrogênio**. Eu me inscrevi e ganhei. **O laboratório já existia desde 2010** focado no desenvolvimento de **catalisadores usando o biodiesel**. A partir de 2013 a gente começou a **adquirir infraestrutura para gases, hidrogênio, metano ou o próprio biogás**. Nós incrementamos essa infraestrutura e **reduzimos o enfoque do biodiesel**. [...] Dentro do contexto estadual, regional, para mim isso foi muito mais interessante, porque nós estamos num polo de **produção de resíduos**, e existe um problema real que é o **saneamento ambiental**. [...] O resíduo, se não tratado, vai parar, **pelos corpos hídricos, nos lagos de Itaipu**, onde começa o processo de **eutrofização, algas, acúmulo de matéria orgânica**. Isto causa uma série de **problemas para a usina**. [...] Por isso também a Itaipu criou o CIBiogás, para continuar preservando a qualidade d’água e evitar problemas para a usina depois. [...] O biogás, até um tempo, era um produto descartado no meio ambiente. Hoje, para avançar na produção de animais, você **precisa ter autorização do órgão ambiental**. Para expandir a atividade o resíduo tem que ser tratado. Aqui mesmo, o produtor suíno só consegue expandir a atividade se ele **propuser a biodigestão. E ele não pode somente descartar o metano por questões ambientais** - ou ele **queima** ou gera **energia elétrica com o gás**.” (E31)

⁵⁴ A produção e destinação desses resíduos foram regulamentadas em 1998 e em seguida reformuladas pela Lei 12.305 em 2010 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (NOGUEIRA *et al.*, 2015). No tocante a contaminação de águas, o tratamento de resíduos sólidos já havia sido regulamentado pela Lei 9.966 em 2000, quando colocado formas de prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências (BRASIL, 2000a).

A rota de produção de hidrogênio a partir do biogás salienta e resume importantes características do desenvolvimento das tecnológicas do hidrogênio no Brasil. Primeiramente, destaca-se o papel das regulações para impulsionar o desenvolvimento tecnológico. No caso, relatado pelo E31, as regulações desencadearam importantes avanços no desenvolvimento dos biocombustíveis no Brasil, seja pela obrigatoriedade da mistura do biodiesel no diesel fóssil ou pela necessidade do tratamento dos resíduos no caso do biogás. Outra característica foi a preexistência da trajetória tecnológica em biomassa que facilitasse a exploração de novas tecnologias. Como o E31 coloca, o laboratório já apresentava uma estrutura, seja ela física ou tácita, para os estudos em biodiesel quando eles decidiram explorar o biogás. Da mesma forma, enfatiza-se a importância dos desenvolvimentos anteriores das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível para propiciar um salto tecnológico da produção de biogás para a produção do hidrogênio a partir do mesmo.

O relato do E31 também confirma a importância de uma empresa pública na liderança e coordenação do desenvolvimento de tecnologias para o uso do biogás, no caso Itaipu. Ressalta-se que uso do biogás já havia sido incentivado em períodos anteriores, mas devido à falta de conhecimento e tecnologia dos produtores rurais para a caracterização e purificação do gás, os equipamentos e processos de biodigestão utilizados não apresentavam a vida útil para viabilizar o retorno dos seus investimentos. A utilização devida do biogás requer que o mesmo seja submetido a processos purificação que envolvem o uso de tecnologias distintas e resultam, preferencialmente, no biometano ou no hidrogênio. Nessa forma purificada, viabiliza-se seu uso em outras aplicações, como na geração de energia elétrica ou combustíveis no setor de transporte. O hidrogênio e o biometano com maiores graus de pureza garantem vantagens de armazenamento, sendo ambos, inclusive possíveis fontes energéticas para suprirem períodos de baixa oferta de biogás ocasionados por sazonalidades da produção agropecuária; portanto, são mercadorias de maior valor agregado.

De uma forma geral, pode-se dizer que a trajetória da produção de hidrogênio a partir das biomassas é resultado da expansão do horizonte tecnológico a partir da exploração de bases de conhecimento já consolidada no país combinada a um arcabouço regulatório que induziu esse desenvolvimento. A repetição da estrutura e relações dos agentes (empresas públicas e universidades e centros de pesquisa) e dos padrões das regulações apontam para possíveis formas de se sistematizar trajetórias tecnológicas no Brasil, como no caso das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível.

A existência de um outro combustível não-fóssil diferenciou substancialmente o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil nos períodos subsequentes na medida que i) os interesses da indústria sucroalcooleira também passaram a ser equacionados para o desenvolvimento de combustíveis alternativos, ii) o etanol e outras biomassas se transformam na solução imediata para os problemas de emissões de CO₂ para o setor de transporte e aplicações termomecânicas e elétricas, e iii) o uso da biomassa para produção de hidrogênio ganha maior relevância no país. A exemplo disto, destaca-se um grande otimismo em relação a reforma do etanol para produção de hidrogênio ou do uso direto do etanol em pilhas a combustível, como no caso do projeto de pesquisa CEMIG/ANEEL - 008 em 1999 denominado Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico. O projeto envolveu as empresas Clamper, UniTech Ltda e o Instituto de Química de São Carlos (IQSC) para o desenvolvimento de pilhas a combustível poliméricas utilizando etanol (tecnologia da patente da Clamper), ao invés de hidrogênio, sem reforma externa, resultando nas duas primeiras pilhas a combustível da América do Sul, sendo essas desenvolvidas com tecnologia brasileira (DINIZ *et al.*, 2001).

É importante ressaltar que nem o pioneirismo do etanol nem a abundância da biomassa inibiram o avanço do petróleo no Brasil a partir de 1945 com a indústria petrolífera nascente e, sobretudo, após a criação da Petróleo Brasileiro – PETROBRAS em 1953 (TÁVORA, 2011). O aumento do preço do petróleo foi uma condição *sine qua non* para retomada do álcool através do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), da mesma forma, que sua queda (de U\$40 para U\$13) interrompeu as subvenções a produção de etanol em 1986, revelando a influência da geopolítica do petróleo no uso de combustíveis alternativos. Ainda assim, pondera-se que outros fatores também contribuíram para o recuo do uso do etanol, como a deficiência mecânica dos carros movidos a álcool, e a abertura comercial dos anos 1990 que facilitou a importação de veículos (MORAES; BACCHI, 2014).

Similarmente, as políticas públicas de incentivo ao hidrogênio e biomassa nos anos 2000 foram afetadas após a descoberta do petróleo no pré-sal da costa brasileira, anunciada em 2006 e explorada a partir de 2008. A partir de 2010, o petróleo passou a dominar as agendas políticas no Brasil, seja para sua exploração e uso ou para o desenvolvimento de tecnologias que permitissem sua extração em águas profundas. Assim como em outros países, o preço, a escassez ou abundância do petróleo, influenciou diretamente o interesse no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil.

“Depois de um certo tempo, o MME começou a **sair um pouco de cena nas questões do hidrogênio**. Na época do governo Lula, quem era a Ministra do MME era a Dilma. Após o governo Lula, realmente, até quando a própria Dilma virou presidente, acho que **reduziu um pouco o interesse do governo no hidrogênio**. Na época do governo Lula havia um grande interesse nos **biocombustíveis**, e já quando ingressou na Era da Dilma, o governo dela se interessou mais pela parte do **pré-sal**. **Os biocombustíveis ficaram um pouco de lado**”.

A temporalidade do desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil relatadas até aqui coincidem com a periodização sugerida na seção 4.1 acima referente ao período entre 2000 e 2009, marcado por um entusiasmo inicial seguido por uma queda nas atividades ao fim dos anos 2000. A coincidência reflete a forte integração internacional do desenvolvimento das tecnologias no país. Contudo, até o fim dos anos 2000, os determinantes do desenvolvimento das tecnologias foram intrínsecos a demanda por tecnologias para a superação de problemas locais, como no caso da crise hidrelétrica ou a exploração de novas trajetórias para o uso de biocombustíveis na geração de eletricidade. De forma análoga, os determinantes para sua desaceleração estiveram fortemente relacionados à exploração do pré-sal brasileiro. Foram componentes locais que propiciaram (ou não) as atividades tecnológicas, o que subordinou o desenvolvimento tecnológico às necessidades sociais, econômicas e políticas do país. Com isso, foi possível que as atividades de design das tecnologias ocorressem não apenas em universidades e centros de pesquisas, mas também integradas com setor industrial que buscava soluções para seus problemas (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010; CHUM, 2002).

Definitivamente, os sucessivos atrasos no desenvolvimento tecnológico em uma escala global contribuíram para o afastamento de iniciativas do setor industrial em relação à energia do hidrogênio no Brasil no final dos anos 2000. Entretanto, outros fatores além dos obstáculos tecnológicos referentes aos problemas estruturais do país levaram a redução do interesse nessas tecnologias, tal como a descontinuidade de políticas de incentivo às tecnologias. Pode-se dizer que o apogeu do tema da energia do hidrogênio no Brasil no início dos anos 2000 dependeu da sua articulação nas esferas governamentais, este último influenciado pela crise hidrelétrica. Neste período, a aceitação internacional sobre a relevância e a alta maturidade das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível fez com que essas fossem consideradas em resposta à crise, dando preferência às tecnologias desenvolvidas nacionalmente. Contudo, o foco era evitar um novo apagão, sendo claro para o governo que a importação dessas tecnologias ou uso de outras seria priorizado caso o cenário pessimista se concretizasse. Assim, mesmo com os avanços tecnológicos ao longo de décadas, as justificativas para sustentar os investimentos nas

tecnologias eram frágeis, condicionadas a um progresso imediato das tecnologias nacionais capaz tanto de alcançar os níveis internacionais de desenvolvimento quanto de solucionar a crise instalada.

“Na época até 2010, quando o hidrogênio deu aquele boom no Brasil, o próprio MME dizia: “a gente vai impulsionar o hidrogênio **por um tempo**. Se o hidrogênio por si só não gerar renda, a gente vai deixar de lado porque nós **não podemos deixar ter outro apagão** aqui no Brasil”. Eles priorizariam o nacional, é claro, mas se por acaso houvesse algum tipo de risco de ocorrer um apagão, eles não iriam pensar duas vezes e passar a **buscar fonte de hidrogênio fora** se o hidrogênio deslanchasse. Todo o governo Lula estava muito impactado pelo apagão que teve em 2001. **Era um jogo político** de quem assumisse não podia deixar faltar luz, não podíamos ter outro apagão no Brasil” (E33)

Vale ressaltar que o fim dos anos 2000 também interrompeu, em alguma instância, o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível nos países líderes. Entretanto, ao contrário do Brasil, pondera-se que nesses países as trajetórias tecnológicas envolveram um volume de agentes e esforços suficientes para resultar em um desenvolvimento entrelaçado e enraizado em diversas indústrias, que posteriormente passaram a advogar pelas tecnologias.

Fato é que a partir do fim dos anos 2000, no Brasil, as coordenações para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível por parte do governo foram se definindo. Os investimentos nas atividades de design se mantiveram nos principais grupos de pesquisa em hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil, tais como os da Coppe, Unicamp, UFSCar, UFMG e do IPEN, sendo esses recursos oriundos principalmente da obrigatoriedade de investimentos das empresas públicas do setor elétrico⁵⁵. Contudo, sem uma ação coordenada para o desenvolvimento e implementação das tecnologias, as regulações para destinar recursos a pesquisa e desenvolvimento no setor elétrico pulverizavam os investimentos que tampouco eram percebidos como algo estratégico por essas empresas ou mesmo de importância para o seu nicho principal como ao longo dos anos 1990 e 2000 (QUANDT; JUNIOR; PROCOPIUCK, 2017). Tratava-se de investimentos vultuosos, que apesar de efetuados, eram frequentemente isolados e sem perspectiva de comercialização.

“O governo, através do MCT [*pausa*]... teve uma época que tinham vários asiáticos desenvolvendo tecnologias e percebeu-se que as empresas brasileiras investem muito pouco em P&D. Ao passo que os asiáticos investem muito, os EUA começaram a fazer... Lá tem empresas que já nasceram com essa vocação, mas o Brasil não tem. **Então foi criada uma regra para empresas de governo** na qual ele ficou obrigado a **investir uma porcentagem da sua receita em P&D**. De uma maneira objetiva, os investimentos em tecnologias do hidrogênio vieram de uma **necessidade de uma questão legal, de você ter que investir em P&D**” (E29).

⁵⁵ Estipulado pela Lei 9.991

A descontinuidade de políticas públicas apontava para a redução do interesse do governo no desenvolvimento das tecnologias. Reflexo disto foi, por exemplo, a participação ínfima do Brasil na IPHE antes preconizada pelo MME. Pesquisadores mais influentes politicamente buscavam articulações que incentivassem o MCTI a assumir o posto de representar o Brasil nos compromissos da IPHE, nos investimentos em pesquisa e desenvolvimento e nas diretrizes das políticas na medida que o hidrogênio e pilhas a combustível se distanciavam da agenda do MME. Porém, somente em 2017 o Brasil anunciou que estava no processo de transferência oficial da representação do país na IPHE do MME para o MCTI (MIRANDA, 2017), resultando em apenas três participações do país entre os anos de 2010 e 2017 nas reuniões anuais⁵⁶. Vale lembrar que o MCTI, através dos recursos do Fundo Setorial de energia (CT-Energia) já incentivava as tecnologias do hidrogênio em universidades e centros de pesquisa, mas destaca-se que o MCTI e o MME apresentam formas de atuação e propósitos diferentes que influenciou a estruturação da energia do hidrogênio no Brasil. Enquanto que dentro do MME o hidrogênio apresenta um programa específico visando metas de desenvolvimento e implementação, no MCTI as atividades são mais horizontais visando principalmente pesquisas aplicadas.

A baixa maturidade tecnológica comprovada ao final dos 2000 a nível internacional, que contrapunha o entusiasmo no início da mesma década, desestimulou os incentivos à pesquisa e desenvolvimento no setor industrial, o que evidenciou a baixa capacidade das empresas nacionais de investirem a longo prazo em estratégias tecnológicas e suas preferências por adotarem tecnologias estrangeiras. As tecnologias eram percebidas como uma forma de explorar possíveis retornos financeiros dos ganhos técnico-produtivos inerentes às funcionalidades do artefato tecnológico. Esta racionalidade visando prioritariamente os benefícios diretos do uso da tecnologia, desencorajou investimentos de alto risco no desenvolvimento tecnológico, ao mesmo tempo que aumentavam a dependência da tecnologia estrangeira.

“O investimento em **hidrogênio é feito porque ele é não-convencional**, é um desafio, **pode ser futuro**. Quem chega tarde, bebe água suja. Quando você está fazendo P&D, você está necessariamente pensando em inovação, se não é mais do mesmo. Quando a gente fala em **desenvolvimento**, é **quando eu pego uma tecnologia existente e trago para cá** para compreendê-la e nacionalizá-la. Por exemplo, hoje o painel solar, para aquecimento já está barato, mas para geração de energia fotovoltaica, é **caro no Brasil** porque a tecnologia não é nossa. Então

⁵⁶ O Brasil foi representado pelo professor Paulo Emílio Valadão de Miranda nas reuniões da IPHE. Paulo Emílio Valadão de Miranda é um pesquisador renomado na área de pilhas a combustível professor titular da Coppe UFRJ no país. Atuou no desenvolvimento dos roteiros estratégicos do hidrogênio e pilhas a combustível de 2002. É um pesquisador com forte influência política que atua fortemente impulsionando a agenda do hidrogênio no Brasil.

eu posso fazer um **convênio com fabricante lá fora, ele se dispõe a transferir tecnologia, bota a academia junto**. A EmpresaBR1 sai fora, é sempre assim que a gente faz, é a academia e alguém, e nós, como financiadores, temos alguns direitos em cima disso. [...] No caso de outras renováveis, o **meu raciocínio é financeiro**, quanto eu vou ganhar com isso”. (Entrevistado não identificado)

O relato do entrevistado acima ilustra a dependência da importação tecnológica da indústria brasileira, na medida que se limita o desenvolvimento tecnológico à adaptação de tecnologias maduras. Pondera-se que artefatos complexos muitas vezes são engendrados a partir de um conjunto de tecnologias desenvolvidas conjuntamente em diversos países e que a importação de subsistemas nesse contexto é imprescindível. Porém, o exemplo ressalta um aspecto repetido como uma rotina da empresa, referente à importação de tecnologias maduras, nas quais o Brasil não participou do desenvolvimento. Percebe-se também, que apesar do entrevistado ter conferido o raciocínio financeiro somente ao caso de outras renováveis com maior grau de maturidade, argumenta-se que a “nacionalização” de tecnologias prontas também segue a mesma lógica, onde o custo do desenvolvimento tecnológico é minimizado e o principal ganho da adoção tecnológica é o financeiro.

As tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível encontraram no Brasil e em outros países um cenário negativo ao fim dos anos 2000 pelas adversidades encontradas ao longo do desenvolvimento. Conforme argumentado na seção 4.1, a crise econômica de 2008 interrompe o desenvolvimento tecnológico fundamentado nas questões do paradigma relativo a 4ª Revolução Tecnológica ao restringir orçamentos de governos destinados a pesquisa e desenvolvimento nos países líderes. De forma alternativa, no Brasil, em um primeiro momento, a descontinuidade dos incentivos às tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível estiveram mais relacionados com a exploração e o preenchimento da agenda política brasileira com as questões do pré-sal. Enquanto no primeiro período o país se destacou no desenvolvimento das tecnologias pelos seus aspectos ambientais tanto pela matriz elétrica limpa quanto pelo amplo uso da biomassa no setor de transporte, a partir do segundo período, quando internacionalmente os desenvolvimentos dos setores elétrico e de transporte passaram a preconizar o desenvolvimento de alternativas aos combustíveis fósseis, o Brasil não consegue reorientar o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível nesta nova trajetória tecnológica com a mesma velocidade dos países líderes. A presente tese sugere que neste ponto ocorre uma inversão do posicionamento do Brasil na corrida por tecnologias de energia renovável em relação aos demais países que reforçaram compromissos com metas de emissões zero.

Apesar da agenda do petróleo ter concentrado grandes esforços em pesquisa e desenvolvimento antagônicos à transição para fontes renováveis de energia, argumenta-se que os entraves ao desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil não estiveram, após um primeiro momento, diretamente relacionados com o avanço dessa agenda. Contrariamente, destaca-se o potencial do próprio setor em desenvolver tecnologias, tal como demonstrado na exploração de petróleo em águas profundas e os incentivos dados aos biocombustíveis. Como ocorrido em outros casos, ressalta-se também a capacidade das empresas públicas de se inserem em novas trajetórias tecnológicas quando direcionadas a partir de políticas públicas. Não obstante, a Petrobrás é a principal produtora de hidrogênio no país, esse obtido através da reforma de gás natural e utilizado em suas refinarias para o hidrotreatamento do petróleo. Ademais, a própria Comissão de Tecnologia na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a CEE0067, foi criada em 2007 a pedido da Petrobras, sendo acordado que a comissão deveria ser um espelho da norma internacional ISO TC197. Entretanto, a empresa foi intensamente afetada pela operação Lava Jato, reduzindo drasticamente sua atuação em pesquisa e desenvolvimento. As atividades de desenvolvimento de biocombustíveis, por exemplo, foram encerradas em 2017 (PICKL, 2019). Com isso, no contexto atual de redução de emissões de gases de efeito estufa, quando empresas do setor do petróleo e gás, tais como Shell, ExxonMobil, Chevron, Total, BP, Eni e Equinor, vem buscando alternativas tecnológicas para aumentar suas participações em geração renovável de energia, a Petrobras apresenta o segundo pior desempenho nas iniciativas de energia renovável, ficando à frente apenas da ExxonMobil (PICKL, 2019).

De um modo geral, mesmo com uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo, não se articulou no Brasil um desenvolvimento local de tecnologias capaz de explorar e manter sua liderança frente às fortes indicações do direcionamento ambiental do setor de energia como um todo a partir dos anos 2010. Inclusive, o sucesso da matriz elétrica limpa está mais relacionado com a condição hidrográfica brasileira do que com um investimento em tecnologias propriamente dito. Ainda assim, argumenta-se que o esvaziamento dos incentivos direcionados às atividades de design tecnológico relacionadas à energia do hidrogênio foi intensificado pela conjuntura econômica e política no país, interrompendo uma trajetória tecnológica em que o Brasil apresentava relativo destaque. A conjuntura refletiu, por exemplo, em uma menor disponibilidade de recursos para financiar suas atividades não apenas no tocante às tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível do MCTI a partir de 2013.

“Quando a gente tinha recurso, o dos fundos setoriais, o setorial de energia estava nas nossas mãos. **As últimas grandes chamadas foram em 2013, via CNPq**, os temas de referência foram nós que elaboramos e depois passamos para o CNPq. **Um dos temas foi hidrogênio dentre outros, como energia solar e eólica**. Hoje a gente atua dentro da **Estratégia Nacional de Pesquisa e Inovação**⁵⁷, que foi divulgada em 2016/2017 e vai até 2022. **Os últimos grandes projetos foram aprovados em 2013**, na chamada do CNPq. A chamada do hidrogênio é a chamada 55. **Esses projetos não foram concluídos**. Tinham duração de 2 anos, mas **a fonte secou**. [...]

Nossos recursos aqui... nós temos uma meta de fazer **5-6 projetos no ano** em energia do futuro. A gente **tem R\$800 mil para fazer 5 projetos em 1 ano**. É muito pouco. Sendo que uma chamada estratégica para **15 projetos era R\$6,5 milhões** e juntando todos os fundos setoriais a gente tinha cerca de **R\$100 milhões para energia**. Então a gente está vivendo tempos de vacas magras. A gente depende de **parcerias estratégicas**, de outros fundos, **fundos internacionais**. A gente tem contato com a **União Europeia** com o Programa Horizonte 2020, contato com a GIZ que é um fundo **alemão**, o Prosperity Fund do **Reino Unido**, **o banco mundial**... A gente tem parcerias para os projetos estratégicos no país. A gente **não tem um fundo soberano** que vai tornar a energia do hidrogênio essencial. **A gente precisa mover muito os atores políticos**. Isto demora, 4-5 anos. Por exemplo, a gente teve um caso aqui com a **Alemanha** de energia **geotérmica**, que estava sendo discutida aqui desde 2010, hoje está na **EPE**. Teve uma chamada estratégica em 2015.” (Entrevistado não revelado)

A contenção de gastos e políticas de austeridade reforçadas a partir de 2014 em resposta às crises de caráter político-econômico afetou a continuidade dos investimentos realizados pelo governo em pesquisa e desenvolvimento (PAULA; PIRES, 2017). Ainda, o cenário de desestabilização política em meio aos escândalos de corrupção desfavoreceu a relação governo-empresa, frequentemente alvo de investigação no período. Como colocado pelo entrevistado acima, devido a conjuntura, optou-se por estabelecer parcerias internacionais para os projetos estratégicos, essas cada vez mais preenchendo o papel do governo e empresas públicas na coordenação, financiamento e execução de projetos relacionados às tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. A influência de agências multilaterais internacionais marca o início do segundo período do desenvolvimento das tecnologias no Brasil. Similarmente com a segunda periodização (2010-2020) sugerida na seção 4.1, o início dos anos 2010 foram marcados por uma dificuldade de se reestabelecer os propósitos das atividades de design relacionadas ao desenvolvimento dessas tecnologias. No caso brasileiro, essa dificuldade se prorrogou devido à crise que afetou a capacidade do governo em coordenar políticas industriais e de desenvolvimento (BASTOS, PEDRO PAULO ZAHLUTH, 2015; ROSSI; MELLO, 2017). Assim,

⁵⁷ A Estratégia Nacional de Pesquisa e Inovação (MCTIC, 2016) foi criada no último ano do Presidente Michel Temer integrando, em uma única política, uma miscelânea de temas a serem administrados pelo MCTI. Os temas estratégicos são: Aeroespacial e Defesa; Água; Alimentos; Biomas e Bioeconomia; Ciências e Tecnologias Sociais; Clima; Economia e Sociedade Digital; Energia; Minerais Estratégicos; Nuclear; Saúde; e Tecnologias Convergentes e Habilitadoras (MCTIC, 2016).

quando governos dos países que já se recuperavam da crise de 2008 retomavam o desenvolvimento nas tecnologias a partir da agenda verde, o Brasil, conflitava com a desconstrução do poder do estado, inviabilizando esse tipo de política.

A principal característica do segundo período no Brasil foi a ascendente participação de agências e empresas estrangeiras no desenvolvimento das tecnologias, essas também responsáveis por dinamizar a temática do hidrogênio no período. Ao mesmo tempo, observou-se uma ausência de coordenação por parte do governo e empresas brasileiras no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível. Por exemplo, a expansão das renováveis (solar e eólica) seguindo as tendências do período, não oportunizou desenvolvimentos de tecnologias para a economia do hidrogênio, como nos países onde houve uma continuidade dos incentivos às tecnologias. A abertura do financiamento de projetos estratégicos para empresas internacionais impactou os interesses das tecnologias financiadas, uma vez que as mesmas não foram impulsionadas por demandas nacionais como no início dos anos 2000. Como em outros países periféricos já destacados, o interesse internacional é que o Brasil se torne um importador de tecnologias para a produção de hidrogênio “tipo exportação”. Nesse sentido, destacam-se os projetos que a alemã Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) desenvolve no Brasil. A GIZ apresenta fortes incentivos a “transição energética” da matriz brasileira, com um extenso programa junto a diversos Ministérios brasileiros, tais como MME, Ministério do Desenvolvimento Regional, Ministério do Meio Ambiente e Ministério da Economia. Dentre os programas, consta uma agenda específica para implementar tecnologias alemãs no Brasil para a produção de hidrogênio verde “tipo exportação” para a própria Alemanha. É importante ponderar que, comparada ao restante do mundo, a matriz energética Brasileira já é uma das mais limpas, levantando questionamentos sobre a intencionalidade dos investimentos alemães no país.

“O **governo alemão** também está **consciente** da importância do hidrogênio verde e levou à adoção da **Estratégia Nacional de Hidrogênio** (Nationale Wasserstoffstrategie - NWS) em 2020. O objetivo da NWS é promover o **aquecimento no mercado internacional de tecnologias de hidrogênio, fortalecer as empresas alemãs do setor de hidrogênio e assegurar o suprimento nacional de hidrogênio verde**. O governo federal alemão gostaria, portanto, de atrair **parceiros internacionais** que possam **exportar futuramente hidrogênio verde para a Alemanha**.

O **Brasil** tem boas condições **de se tornar um importante exportador de hidrogênio verde** para a Alemanha. O Brasil não só possui a maior **base de produção da indústria alemã fora da Alemanha**, como também está posicionado de forma ideal devido às suas condições climáticas, sua infraestrutura logística e suas fortes relações comerciais com a Alemanha” (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT, 2019)

Embora o Brasil possua a maior base de produção da indústria alemã fora da Alemanha, os investimentos do setor industrial no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível não foram feitos no Brasil, mas apenas nas matrizes alemãs e em subsidiárias dos países do centro. A abordagem dos projetos da GIZ visa trazer a tecnologia alemã utilizando essa ampla base de apoio industrial no país, e para isto os projetos financiam o que é estratégico para alcançar tal objetivo, tal como o treinamento de pessoas para operarem os equipamentos alemães, consultoria política e promoção de iniciativas da própria GIZ para influenciar os diferentes Ministérios do governo brasileiro.

“O projeto **orienta os tomadores de decisão política, reguladores, fornecedores de eletricidade e operadores de rede na avaliação do uso técnico e opções de armazenamento de energia e na criação das condições estruturais necessárias.** Além disso **aconselha** aos fornecedores independentes de eletricidade e operadores de rede no **norte do Brasil no planejamento e integração de instalações** de armazenamento de energia em redes elétricas isoladas. Adicionalmente **apoia** instituições de **pesquisa públicas e privadas** no Brasil no estabelecimento de **cooperações** e redes com **empresas internacionais** e na realização de pesquisas orientadas à aplicação, com especial ênfase em parcerias com a **Alemanha**.

A estratégia de "desenvolvimento da capacidade" prevê a **expansão de pessoal, competências organizacionais e também sociais.** Em relação ao desenvolvimento pessoal o projeto realiza **cursos de treinamento** e oferece **consultoria técnica e política** para apoiar o amplo uso das tecnologias de armazenamento de energia no Brasil” (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT, 2019)

Esta prática da GIZ e de outras organizações multilaterais ocorre não apenas para o hidrogênio, mas de uma forma muito intensa na agenda verde voltada para expansão desse mercado. Empresas estrangeiras com fortes atividades ligadas ao hidrogênio e que atuam no país também não desenvolvem a tecnologia no Brasil. Por exemplo, dentre as 92 empresas⁵⁸ que compõem o Hydrogen Council até então, quase todas estão também situadas no Brasil, porém sem promoverem o hidrogênio de forma efetiva como fazem nos países centrais. O Hydrogen Council, foi criado em 2017 através de uma iniciativa de diretores executivos de grandes empresas de diversos setores cujos objetivos são 1) acelerar

⁵⁸ 3M, Airbus, Air Liquide, Air Products, Alstom, Anglo American, Audi AG, BMW GROUP, BP, Bosch, China Energy, CMA CGM, CNH Industrial (via IVECO), Cummins, Daimler, EDF, ENEOS Corporation, ENGIE, Equinor, Faurecia, General Motors, Great Wall Motor, Honda, Hyundai Motor, Iwatani, Johnson Matthey, Kawasaki, KOGAS, Linde, Michelin, Microsoft, Plastic Omnium, Saudi Aramco (via the Aramco Overseas Company), Schaeffler Group, Shell, Siemens Energy, Sinopec, thyssenkrupp, Total, Toyota and Weichai, AFC Energy, AVL, Baker Hughes, Ballard Power Systems, Chart Industries, Chevron, Clariant, ElringKlinger, Faber Industries, First Element Fuel (True Zero), Fortescue Metals Group, Galp, W. L. Gore, Hexagon Composites, ILJIN Composites, ITOCHU Corporation, Liebherr, MAHLE, MANN+HUMMEL, Marubeni, McDermott, McPhy, Mitsubishi Corporation, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Mitsui & Co, Nel Hydrogen, NGK Spark Plug Co., Nikola Motor, NYK Line, Plug Power, Port of Rotterdam, Power Assets Holdings, Re-Fire Technology, Sinocat, SinoHytec, Snam, Southern California Gas, Sumitomo Mitsui Banking Corporation, Sumitomo Corporation, TechnipFMC, Toyota Tsusho, Umicore, Vopak, and Woodside Energy, Antin Infrastructure Partners, BNP Paribas, Crédit Agricole, John Laing, Mubadala Investment Company, Providence Asset Group and Société Générale.

investimentos significativos no desenvolvimento e comercialização dos setores de hidrogênio e pilhas a combustível e 2) encorajar as principais partes interessadas a aumentar seu apoio ao hidrogênio como parte da futura matriz de energia. Destaca-se alguns esforços mais recentes das subsidiárias da Air Products, Linde, thyssenkrupp e Siemens no Brasil, na instalação de plantas para produção de hidrogênio e eletrolisadores.

Assim como em outros países da periferia, no segundo período o desenvolvimento das tecnologias passa a se orientar nas necessidades internacionais no mercado de hidrogênio como alternativa para substituição de combustíveis fósseis. Porém, enquanto o argumento da redução das emissões facilita o convencimento para a implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível em países periféricos, o mesmo é dificultado devido as especificidades da matriz energética nacional.

“For Brazil, you have petrol, ethanol economy. Going to hydrogen is not a strait forward choice. I think this is the reason why the government is a little bit absent today. The only thing that might be a reason for them is using hydrogen for electric mobility, in order to clean a little bit the cities. But large-scale hydrogen would mean that they are **cannibalizing the potential incomes of the complete petrol economy**. If the **government doesn’t give the right signals**, as we are looking in Chile they do, but in Brazil, up to now they are still a little bit lacking. All the **private old companies** that don’t have any petrol interest, **for example Vale**, that are willing to go greener with their products, they will be the drivers for this transition to cleaner technology.”
(E9)

A partir do segundo período, empresas privadas multinacionais passam a ocupar um papel central nas estratégias vislumbradas pelos agentes internacionais que impulsionam as tecnologias no Brasil. Inclui-se neste grupo, empresas multinacionais brasileiras, já que essas se interessam na importação de tecnologias para assegurarem suas atividades no exterior dado o crescimento da agenda verde. Diferentemente das empresas públicas que atuam no mercado local, as multinacionais brasileiras apresentam um maior alinhamento aos interesses internacionais, não dependendo necessariamente das diretrizes do governo local. Contudo, é importante ressaltar que da mesma forma como empresas subsidiárias não promoveram incentivos continuados no desenvolvimento tecnológico, a iniciativa privada brasileira também tem exercido poucos esforços para a consolidação desse mercado localmente (CÉSAR *et al.*, 2019). Dessa forma, assim como ocorrido em países do centro, as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, dentro do contexto das emissões de CO₂, demonstraram necessitar de apoio de governos em políticas que evidenciem a preferência por essa trajetória tecnológica.

Por fim, ressalta-se que a insistência dos pesquisadores em dar continuidade a esta agenda do hidrogênio também constitui numa outra vertente do desenvolvimento das tecnologias no Brasil, essa

ressaltada a partir de 2017 quando o entusiasmo internacional ganha força no país. Marcos importantes nesse sentido foram, por exemplo, a realização da vigésima segunda edição da World Hydrogen Energy Conference – WHEC em 2018 e a criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2). Ambos contribuíram para revigorar o tema do hidrogênio nas esferas de governo, como no MME e no MCTI. A WHEC, por exemplo, contou com a participação do MCTI e outros órgãos públicos chamados a debater sobre o tema. A ABH2 vem promovendo esforços para integrar o setor industrial brasileiro nas questões do hidrogênio através da associação de membros, promoção de eventos, participação na CEE0067 dentre outros.

“De 1 ano para cá, apesar de se dizer que o governo atual não gosta de sustentabilidade e essas coisas, coincidentemente, algumas ações importantes foram tomadas nos últimos 2 anos. **Mas isto foi muito do esforço dos pesquisadores, grupos de trabalho e do próprio MCTI.** Na verdade, o MME passou as suas funções para o MCTI. Quando isto aconteceu, as coisas começaram a florir de novo. Na época, havia no MCTI uma coordenadora lá que o nome dela era Samira Sana, hoje é o Dante que está bastante empolgado. Então nós estamos sentindo na área do hidrogênio que a porta abriu um pouquinho, antes nós estávamos confinados, respirando aquele ar viciado. A porta abriu um pouco e veio um pouco de ar fresco. Estamos sentindo bastante movimento no Brasil neste momento” (E33)

O capital físico e humano acumulado durante o início dos anos 2000 possibilitou que alguns grupos mantivessem suas pesquisas ativas mesmo com a desaceleração da temática no Brasil. Esses grupos, articulados principalmente com empresas nacionais do setor elétrico, foram fundamentais para perceber os movimentos crescentes acerca da economia do hidrogênio e a retomada, ainda que menos expressiva, da participação do governo na coordenação dessas tecnologias. Ademais as pesquisas e desenvolvimentos no uso energética da biomassa foram importantes para a construção de novas rotas tecnológicas para produção do hidrogênio no início dos anos 2010. Esses fatores expõem a centralidade de universidades e centros de pesquisa para as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil, sendo *locus* de geração e preservação de conhecimento, acionados em distintos períodos ao longo da trajetória tecnológica.

Em suma, a trajetória das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível no Brasil acompanhou os movimentos do desenvolvimento das tecnologias internacionalmente, indicando certa dependência desse desenvolvimento. Destaca-se que os dois períodos analisados (2000-2009 e 2010-2020) foram caracterizados por diferentes conduções desse desenvolvimento. Pode-se dizer, que inicialmente apesar de uma forte orientação internacional, predominava-se no Brasil esforços de governo, empresas e academia em promover o desenvolvimento de tecnologias nacionais, refletindo em atividades de designs

motivadas por problemáticas intrínsecas ao país, como o caso da crise do apagão e o do uso dos biocombustíveis para o aproveitamento em carros elétricos movidos a pilha a combustível. Já o segundo período foi marcado por uma crescente participação das agendas internacionais nesse desenvolvimento, conforme também ocorrido em outros países periféricos. Exemplos disso foram as buscas por investimentos estrangeiros no desenvolvimento de tecnologias estratégicas para o setor de energia e transporte.

Diferentemente de alguns outros países periféricos, especialmente os de grande mercado, a combinação entre i) uma matriz energética relativamente limpa, ii) uma longa trajetória de acúmulo de conhecimento nas tecnologias e iii) a crescente atividade de produção de hidrogênio a partir da biomassa possibilitou ao Brasil, até o atual momento, um alto poder de barganha na entrada de tecnologias estrangeiras no país. Contudo, esse privilégio é pouco aproveitado, uma vez que não se articula de forma planejada e estratégica incentivos ao desenvolvimento das tecnologias. Mais do que isto, tomadores de decisões, muitas vezes pela pouca informação que tem acerca da temática do hidrogênio, não conseguem se quer entrever ou diferenciar oportunidades para alavancar o desenvolvimento no país.

In Brazil, in 2009 to 2014, we came to Brazil very strongly. We brought to Brazil an entire proposal to completely change this whole thing. **We wanted to bring Company123 all of the production and development.** We talked to the local academia, the biggest universities, to SENAI, a massive number of local suppliers, potential joint venture partners, government. **We tried** everything we could to have fuel cells and hydrogen technologies breakthrough in Brazil. **We failed.** Either because **politically** Brazil was not ready for it or Brazil **didn't believed we had the intentions** we had. I don't know. We took that plan and translated every document to Chinese. **18 months later, we had our first factory running and producing fuel cell stacks in China."** (E19)

Os principais fatores identificados através dos relatos dos entrevistados que resultam no baixo aproveitamento das vantagens do país foram: a perspectiva financeira das empresas nacionais e internacionais no desenvolvimento tecnológico no Brasil; a desconstrução da relação governo-empresa devido às questões relacionadas à corrupção; e a perspectiva liberal da agenda política visando de redução de gastos e intervenções do governo na economia. É essencial compreender que a agenda verde é inexecutável sem a participação de governos, seja financiando o desenvolvimento tecnológico ou criando aparatos institucionais que viabilizem o uso dessas tecnologias. Por isso agências internacionais que impulsionam essa agenda atuam fortemente dentro de órgãos públicos, sugerindo designs que favorecem as trajetórias investidas e desenvolvidas nos países líderes.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo compreender *como a dinâmica dos paradigmas tecno-econômicos influenciou o design de tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível entre os anos 2000 e 2020*. Mais especificamente, a pesquisa explorou as diferenças nas atividades de design tecnológico das tecnologias durante dois períodos distintos. O primeiro, entre os anos 2000 e 2010, é caracterizado pela interseção entre a instalação do paradigma tecno-econômico referente a 5ª Revolução Tecnológica, a Era da Informação e Comunicação e o fim do paradigma tecno-econômico anterior, referente a 4ª Revolução Tecnológica, a Era do Automóvel e Produção em Massa. O segundo período, entre 2010 e 2020, se situa no ponto de inflexão da 5ª Revolução Tecnológica, quando começam a ser notados os direcionamentos tecnológicos para a agenda verde. Assim, o período estudado (entre 2000 e 2020) permitiu observar atividades de design referentes a um mesmo conjunto de tecnologias em dois paradigmas tecno-econômicos distintos.

Os resultados foram analisados a partir de duas principais perspectivas teóricas, a de paradigmas tecno-econômicos e a de designs tecnológico. Por um lado, em um nível de análise abstrato, os paradigmas tecno-econômicos indicam profundas alterações sociais e tecnológicas que afetam a economia como um todo (PEREZ, 2002, 2009). Por outro, as teorias de design acompanham a concepção da tecnologia ao nível do agente que atua ajustando um conjunto de soluções (ou artefatos tecnológicos) e problemas (GOEL; PIROLI, 1992; VACCARI, 2013; VON HIPPEL, 1994).

Os resultados mostram alterações na trajetória do desenvolvimento das tecnologias analisadas a partir do alinhamento das atividades de design à 5ª Revolução Tecnológica e suas distintas implicações para o centro e a periferia. O Quadro 12 sintetiza as alterações nas atividades de design dada a mudança do paradigma tecno-econômico, diferenciando o desenvolvimento das tecnologias nos países do centro e periferia, destacando as especificidades do Brasil dos demais países periféricos.

Durante a fase da instalação da 5ª Revolução Tecnológica, as atividades de design das tecnologias estiveram mais relacionadas aos desafios referentes a 4ª Revolução Tecnológica. Essa influência foi percebida através dos objetivos e diretrizes apontadas por governos, empresas e outros agentes atuantes no desenvolvimento das tecnologias, que apresentavam uma estreita relação com problemas centrados no automóvel. A mudança do paradigma tecno-econômico foi percebida principalmente após a crise econômica de 2008, quando uma parte significativa dos investimentos nas tecnologias foi interrompida.

A retomada dos investimentos foi acompanhada por uma mudança em seus propósitos, que passaram a objetivar a descarbonização dos sistemas de energia.

Quadro 12 Desenvolvimento das tecnologias entre 2000-2020

	Primeiro período - 2000-2009			Segundo período - 2010-2020		
	Centro	Periferia	Brasil	Centro	Periferia	Brasil
Contexto	Geopolítica do petróleo e poluição do ar	-	Crise hidrelétrica	Aquecimento global	Exportação de H ₂ para países do centro	Crescimento da temática do H ₂ internacionalmente
Problema	Combustão de combustíveis derivados do petróleo	-	Escassez de água para geração de energia hidrelétrica	Emissões de CO ₂	Custo de oportunidade do H ₂	Aproveitamento da biomassa Custo de oportunidade do H ₂
Tecnologias incentivadas	Pilhas a combustível e reformadores	-	Pilhas a combustível Reformadores Eletrolisadores	Eletrolisadores	Importação de eletrolisadores e componentes associados	Reformadores Importação de eletrolisadores e componentes associados
Interrupção da trajetória	Crise de 2008 Obstáculos tecnológicos	-	Exploração do pré-sal e crise político-econômica		-	
Motivadores da trajetória	Conflitos do petróleo / segurança energética Regulações poluição do ar	-	Regulação setor elétrico (Obrigatoriedade de investimento em P&D)	Instalação de energia renovável intermitente Regulações emissões CO ₂	Multinacionais e organizações multilaterais	Incentivos ao biogás (regulação no setor agropecuário) Multinacionais e organizações multilaterais
Setores envolvidos	Automotivo Óleo e gás Gases industriais	-	Elétrico Óleo e gás (Ambos nacionais)	Elétrico Equipamento elétrico Gases industriais Óleo e gás; Automotivo	Setores intensivos em energia Setor "hidrogênio exportação"	Sucroalcooleiro Automotivo Setor "hidrogênio exportação" Equipamento elétrico
Principais atores	Empresas multinacionais Governos		Governos, empresas públicas nacionais e universidades	Governos, empresas multinacionais	Empresas multinacionais (cadeias globais)	Universidades Empresas multinacionais (cadeias globais)

Fonte: elaboração própria

Os resultados indicaram que a mudança do paradigma tecno-econômico redefiniu os propósitos das atividades de design das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível alterando o problema percebido nessas atividades e o conjunto de tecnologias disponíveis e concorrentes para solucioná-lo. No

centro, a mudança no paradigma tecno-econômico resultou em preferências distintas nas tecnologias a serem desenvolvidas. No primeiro período, a dominância da temática do petróleo favoreceu atividades de design relacionadas ao desenvolvimento de pilhas a combustível para o setor de transporte. Já no segundo período, as atividades de design foram re-moldadas para se adequarem aos problemas emergentes referentes a expansão da eletricidade renovável e intermitente no contexto do aquecimento global, intensificando o desenvolvimento de tecnologias para a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio, mais notadamente, eletrolisadores. O contexto do aquecimento global relacionado às emissões de CO₂ também resultaram em um menor incentivo a processos de produção de hidrogênio utilizando combustíveis fósseis. Assim, enquanto no primeiro período pilhas a combustíveis e o setor automotivo determinavam as condições de contorno, a partir do segundo período os eletrolisadores e o setor elétrico passaram a ocupar o topo dessa hierarquia.

Os resultados apresentados mostraram que os designs das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível dependeram do contexto em que as mesmas foram desenvolvidas. O contexto era exógeno às atividades de design e intrínseco ao paradigma tecno-econômico. Ao mesmo tempo que revelava os problemas a serem abordados, o contexto determinava quais seriam os parâmetros para a seleção e descarte de designs. Observou-se que os **designs eram estabelecidos a partir de uma trajetória tecnológica**, cujos eventos oriundos do contexto (ex. regulações, novas descobertas, difusão de outras tecnologias) influenciavam uma sequência de escolhas que moldavam o desenvolvimento tecnológico. Exemplo disto foi a dependência dos avanços das energias renováveis para a retomada dos investimentos para hidrogênio nos sistemas de energia.

Percebeu-se que a nível do design, **a mudança do paradigma tecno-econômico alterou as funcionalidades das tecnologias**. Enquanto no primeiro período, a funcionalidade das tecnologias era reduzir a dependência do petróleo, a partir do segundo, passou a ser corroborar para redução das emissões de CO₂. Assim, dado que os artefatos tecnológicos apresentam estruturas físicas intrínsecas às suas funcionalidades e vice-versa (VACCARI, 2013), **as tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível desenvolvidas no primeiro e segundo período são ontologicamente distintas, mesmo que suas propriedades técnicas permanecessem semelhantes ou inalteradas**. Pondera-se que, de fato, o que se alterou foi a priorização dos atributos funcionais das tecnologias, uma vez que os mesmos já existiam. Ademais, incontestavelmente, a funcionalidade das tecnologias sempre foi a geração de energia a partir do hidrogênio, mas o que se mostra são as nuances do design frente a diferentes paradigmas tecno-

econômicos. Por isso, em termos de design, o papel das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível nos sistemas de energia alterou consideravelmente. A mudança do paradigma refletiu em, por exemplo, uma mudança dos setores interessados no design tecnológico, das alternativas concorrentes e das barreiras tecnológicas a serem superadas.

Posto a mudança do paradigma tecno-econômico, da mesma forma como tecnologias se tornavam parcialmente obsoletas interrompendo trajetórias tecnológicas, evidenciava-se que outras tecnologias preferíveis **reforçavam bases de conhecimentos distintas das atividades de design realizadas no período anterior**. Para o caso das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível, foram redefinidas as problemáticas para novas atividades de designs, que resultaram tanto na exclusão quanto inclusão de rotas tecnológicas. A partir disto, **parte do conhecimento acumulado na trajetória anterior foi descontinuado ao passo que novos conhecimentos se tornaram necessários para o progresso tecnológico**.

Os resultados permitiram perceber a forte correlação entre a instalação da 5ª Revolução Tecnológica e a ascensão de uma economia global, especialmente através da crescente importância das cadeias de valor para o avanço das tecnologias. São as tecnologias da informação e telecomunicações que fornecem um instrumental para a gestão dessas cadeias, viabilizando uma atuação global das empresas multinacionais (GEREFFI; KAPLINSKY, 2001; ZUCOLOTO; CASSIOLATO, 2014). Como colocado por Perez (2016, p. 201), “não estamos mais na era do pós-guerra de economias nacionais claramente definidas com abundância de energia e materiais; estamos agora em uma economia globalizada e temos apenas um planeta”. **No que tange o desenvolvimento das tecnologias *per se*, é a narrativa de um planeta único em aquecimento que traz o engajamento e aprovação social para a transição energética renovável**. Pressupõe-se que somente o avanço tecnológico e a substituição dos sistemas de energia darão condições seguras para as gerações seguintes pós 2050 (IEA, 2020a; IPCC, 2019; UNEP, 2020). O termo “global” é utilizado como uma ideia de compromisso comum, compartilhado, onde todos os países, ainda que reconhecendo uma maior responsabilidade das economias desenvolvidas, precisam reduzir suas emissões para alcançar as metas climáticas. Nesse sentido, a globalização levaria as empresas multinacionais a reforçarem seus compromissos ambientais também em suas subsidiárias, uma vez que o planeta é único.

Entretanto, **no contexto periférico, a globalização das economias levou a um esvaziamento dos governos em sua função de coordenar o direcionamento tecnológico local** (FLEURY; FLEURY, 2020; LEE; MALERBA; PRIMI, 2020; SZAPIRO *et al.*, 2016). A partir do segundo período, observou-se uma crescente atuação das empresas multinacionais através das cadeias globais de valor na implementação das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível na periferia. Mostrou-se que em fases iniciais do desenvolvimento tecnológico não foram realizados investimentos com a mesma intensidade nos países periféricos apesar das subsidiárias já estarem instaladas na periferia desde então. **As tecnologias são trazidas tardiamente, desconectadas das necessidades locais e desfavorecendo trajetórias tecnológicas que emergiram a partir das condicionantes locais**, como no caso do uso da biomassa para produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono. **As empresas multinacionais são a principal entrada para as tecnologias desenvolvidas nos países do centro na periferia.** Ao estabelecerem estratégias de descarbonização, as matrizes das empresas multinacionais alinham essas diretrizes com as subsidiárias em países periféricos, mesmo que a problemática do aquecimento global ainda não tenha sido assimilada como nos países do centro, reforçando a inadequação das tecnologias ao contexto local (ALBUQUERQUE, 2007).

Para o caso das tecnologias em análise, as cadeias globais de valor são importantes para garantir o acesso dos países centrais aos mercados periféricos, onde há condições naturais favoráveis à geração de eletricidade renovável, facilitando a escalabilidade e viabilidade econômica das tecnologias. Com isso, através de suas estruturas de governança, **empresas multinacionais passam a ser fundamentais para empresas de base tecnológica (sem atuações na periferia) e para governos do centro garantirem um retorno dos investimentos realizados nas tecnologias em questão.** As multinacionais, mesmo que não desenvolvam tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível de forma direta, ao replicarem uma base tecnológica já conhecida, **reiteram, na periferia, um conjunto de relações previamente estabelecidas no centro** com empresas de base tecnológica, universidades e centros de pesquisa. Devido as dotações naturais desfavoráveis em parte significativa dos países do centro para a geração de eletricidade renovável, **a produção do hidrogênio tipo exportação e a atuação das multinacionais nos países periféricos passa a ser incorporada no planejamento dos governos do centro para atingirem metas climáticas.** Destacou-se que o principal objetivo de organizações multilaterais e empresas multinacionais no desenvolvimento na periferia é na produção do hidrogênio

eletrolítico a baixo custo para a exportação utilizando as tecnologias desenvolvidas nos países do centro, mais notadamente eletrolisadores, pilhas a combustível tipo PEM e seus componentes associados.

Os resultados apontam para uma incongruência inerente às transições energéticas no contexto da globalização. Mostrou-se que **somente os mecanismos de mercado não resultarão na adoção de tecnologias do hidrogênio, tampouco numa ampla adoção de tecnologias para geração renovável de energia necessárias para a mitigação de problemas climáticos** (JAFFE; NEWELL; STAVINS, 2005). Isto porque, empresas incumbentes dos setores automotivo, elétrico, do óleo e gás e de gases industriais se apoiam sobre uma base que as garantem amplas vantagens comparativas na cadeia de energia e que as aprisionam em sistemas intensivos em emissões de carbono. Essas vantagens são oriundas de séculos de investimento em suas cadeias de produção e aperfeiçoamentos, assegurando suas condições de concorrência em oligopólios.

Ademais, o consumo de diferentes fontes de energias não é diretamente percebido pelos consumidores. Resultado disto é uma alta sensibilidade aos preços finais dos serviços de energia, determinantes para as transições energéticas passadas (SOVACOOOL, 2007; WARD; GREEN; STAFFELL, 2019). Esses argumentos indicam a **necessidade da coordenação governamental para o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível**, bem como outras relativas à transição energética. Ao mesmo tempo, os resultados mostraram que, em oposto a economias nacionais, **o avanço de uma economia global fragilizou exatamente as possibilidades de atuação dos governos, que dependem cada vez mais das empresas multinacionais para o desenvolvimento e implementação tecnológica** tanto no centro quanto na periferia. Enquanto a globalização e o crescimento das cadeias globais de valor fazem parte de uma agenda política liberal de redução de barreiras de mercado e menor intervenção e regulação dos governos em questões econômicas, a agenda verde exige cada vez mais do oposto: uma forte atuação dos governos em regulações, investimento e direcionamento da economia. Mais do que uma correção de falhas de mercado, a agenda verde é uma proposta de estímulo tecnológico, industrial e econômico que requer um protagonismo de governos. O “Golden Age”, historicamente, também dependeu desse protagonismo (PEREZ, 2009).

A principal diferença do impacto das restrições de emissões de CO₂ no desenvolvimento tecnológico no centro e na periferia é que enquanto o **centro se beneficia da expansão tecnológica, fazendo com que novos sistemas gerem um ciclo virtuoso de emprego e crescimento impulsionado**

por indústrias nascentes e transformações de empresas incumbentes, a periferia não usufrui desses benefícios com a mesma intensidade. Os resultados apontam que, nos países periféricos, a fragilidade tanto do setor industrial, esse em grande parte composto por subsidiárias de multinacionais, quanto das políticas públicas de longo prazo dificultaram a articulação do desenvolvimento e implementação das tecnologias de acordo com as necessidades e características das demandas locais. Assim, **o desenvolvimento de uma cadeia voltada para a energia do hidrogênio na periferia interessa, sobretudo, ao centro e a um setor exportador minoritário local que confunde seus objetivos com os das próprias multinacionais que os influenciam.**

A consequência imediata da mudança do paradigma tecno-econômico para o Brasil foi que a partir da problemática das emissões de CO₂, os objetivos de exportação do hidrogênio passaram a prevalecer sobre o então desenvolvimento local e articulado, voltado para a demanda interna do país. Mostrou-se também que, apesar de um forte desenvolvimento iniciado precocemente no país nos anos 1970, a conjuntura político-econômica, principalmente a partir de 2014, resultou em uma perda sistemática de competitividade das tecnologias do hidrogênio e pilhas a combustível desenvolvidas localmente. Após o apogeu dessas tecnologias no início dos anos 2000, o tema da energia do hidrogênio foi conduzido no Brasil em virtude de pesquisas e desenvolvimentos realizados por universidades e centros de pesquisa, sem perspectiva industrial a não ser pelo financiamento obrigatório das empresas do setor elétrico. Ao mesmo tempo, a partir de 2014, crescia a influência de organizações multilaterais em órgãos do governo brasileiro com interesses tanto de induzir a entrada de tecnologia estrangeira no Brasil quanto de acessar o enorme potencial renovável da matriz elétrica brasileira.

A pesquisa também mostrou a importância da China nas atividades de design em uma escala global. Ao mesmo tempo que a entrada da China na corrida tecnológica aponta para um potencial de escalonamento tecnológico devido à precedentes históricos do país (ex. painéis solares e veículos a bateria), **o rápido desenvolvimento chinês representa uma possível ameaça aos países que lideraram e custearam o desenvolvimento tecnológico até então.** Mostrou-se que a principal forma de proteção, mesmo que temporária, que países líderes no desenvolvimento tecnológico utilizam para **evitar o domínio do mercado pelos chineses é a elaboração e alteração constante e intencional de normas e padrões que concatenem suas tecnologias em “sistemas fechados”**, resultando em um conluio empresarial que discute e acorda esses padrões tecnológicos de antemão.

Por fim, vale a pena ressaltar que **a produção de hidrogênio verde, tipo exportação, traz inúmeras oportunidades para o desenvolvimento nos países periféricos**, incluindo formas de transferência tecnológica, instalação de novas indústrias localmente, geração de empregos, dentre outros. Questiona-se na presente tese os moldes desse desenvolvimento nos países periféricos: tardio ou pouco engajado com governos, indústrias e sociedade civil, sendo conduzido majoritariamente por multinacionais e organizações multilaterais interessadas na expansão das tecnologias em direção a periferia. As atividades dessas organizações na periferia, são justificadas pela possibilidade de produzir hidrogênio a um menor custo comparado aos países do centro, esses menos privilegiados de recursos naturais para geração de eletricidade renovável. **Não se objetiva o desenvolvimento tecnológico nos moldes do centro nem necessariamente o desenvolvimento econômico local**. Cabe então aos governos locais criarem as oportunidades para que a periferia desfrute da entrada de novas tecnologias de uma forma mais ampla, ao invés da proposta visando somente exportação de hidrogênio eletrolítico aos países do centro.

6. REFERÊNCIAS

- ABDALLA, Abdalla M. *et al.* Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, v. 165, n. April, p. 602–627, 2018.
- ABERGE, Thibaut *et al.* *Perspectives for the Clean Energy Transition*. . [S.l.: s.n.], 2019.
- ABERNATHY, William J.; UTTERBACK, James M. Patterns of industrial innovation. *Technology Review*, v. 80, n. 7, p. 40- end, 1978.
- AHMAD, Ehtisham; NEUWEG, Isabella; STERN, Nicholas. Growth, structural transformation, and the new global agenda: what this means for China and the world. In: FOUQUET, ROGER (Org.). . *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 200–216.
- AJANOVIC, A.; HAAS, R. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 16, p. 10049–10058, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122>>.
- ALBINO, Vito *et al.* Understanding the development trends of low-carbon energy technologies: A patent analysis. *Applied Energy*, v. 135, p. 836–854, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.012>>.
- ALBUQUERQUE, Eduardo da Motta *et al.* An investigation on the contribution of universities and research institutes for maturing the Brazilian Innovation System. 2008, Mexico City: Globelix, 2008. p. 26.
- ALBUQUERQUE, Eduardo da Motta. Inadequacy of technology and innovation systems at the periphery. *Cambridge Journal of Economics*, v. 31, n. 5, p. 669–690, 2007.
- ALBUQUERQUE, Eduardo da Motta. National Systems of Innovation and Non-OECD Countries: Notes About a Rudimentary and Tentative “Typology”. *Brazilian Journal of Political Economy*, v. 19, n. 4 (76), p. 35–52, 1999.
- ALBUQUERQUE, Eduardo da Motta; SILVA, Leandro Alves; PÓVOA, Luciano. Diferenciação intersetorial na interação entre empresas e universidades no Brasil. *São Paulo em Perspectiva*, v. 19, n. 1, p. 95–104, 2005.
- ALEXANDER, Christopher. *Notes on the synthesis of form*. Seventh Pr ed. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1964.
- AUTENRIETH, Rainer; KRUMBERGER, Otto. *Method for the treatment of a methanol reforming catalyst*. . Deutchland: [s.n.], 1997
- AVACA, Luis Alberto; TOKORO, Roberto. A História, Evolução e Crescimento da Eletroquímica/Eletoanalítica nestes Últimos 25 Anos. *Química Nova*, v. 25, n. 1, p. 25–30, 2002.
- BAEYENS, Jan *et al.* Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 131, p. 110023, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110023>>.
- BARBIER, Edward B. Greening the Post-pandemic Recovery in the G20. *Environmental and Resource Economics*, v. 76, n. 4, p. 685–703, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10640-020-00437-w>>.
- BARDIN, Laurence. *Análise de Conteúdo*. Traduzida ed. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BARNETT, Vincent. *Kondratiev and the Dynamics of Economic Development: Long Cycles and Industrial Growth in Historical Context*. [S.l.]: Macmillan Press, 1998.
- BARNEY, Jay. *Firm Resources and Sustained Competitive Advantage*. *Journal of Management*. [S.l.: s.n.], 1991
- BARRETT, Steve. Progress in the European hydrogen & fuel cell technology platform. *Fuel Cells Bulletin*, v. 2005, n. 4, p. 12–17, 2005.
- BASTOS, Carlos Pinkusfeld; BRITTO, Gustavo. Introdução. In: AGARWALA, AMAR NARAIN;

SINGH, SAMPAT PAL (Org.). . *A Economia do Subdesenvolvimento*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2009. p. 7–41.

BASTOS, Pedro Paulo Zahluth. Austeridade para quem? A crise global do capitalismo neoliberal e as alternativas no Brasil. *Texto para discussão (Instituto de Economia - Unicamp)*, n. 257, p. 1–95, 2015. Disponível em: <papers2://publication/uuid/1DD33CA0-C019-4C95-B64D-170107DD350B>.

BATINGE, Benjamin; MUSANGO, Josephine Kaviti; BRENT, Alan C. Sustainable energy transition framework for unmet electricity markets. *Energy Policy*, v. 129, n. August 2018, p. 1090–1099, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.016>>.

BEHLING, Noriko Hikosaka. *Fuel Cells: Current Technology Challenges and Future Research Needs*. 1st. ed. Oxford: Elsevier, 2013.

BERGH, Jeroen C.J.M. Van den; DREWS, Stefan. Green ‘agrowth’ – the next development stage of rich countries. In: FOUQUET, ROGER (Org.). . *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 52–65.

BINZ, Christian *et al.* Toward Technology-Sensitive Catching-Up Policies: Insights from Renewable Energy in China. *World Development*, v. 96, n. 2015, p. 418–437, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.03.027>>.

BISHOP, Russell; BRAHMBHATT, Milan. Economic transformation and green growth for African economies. In: FOUQUET, ROGER (Org.). . *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 425–445.

BMW. *The National Hydrogen Strategy 2020*. . Berlin: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6>.

BONHOFF, Klaus. NIP The German National Innovation Programme Hydro- gen and Fuel Cell Technology This document appeared in NIP – The German National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology. 2010, Essen: [s.n.], 2010. p. 11. Disponível em: <https://juser.fz-juelich.de/record/135833/files/78_11.pdf>.

BOUDELLAL, Méziane. *Power-to-Gas: Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition*. Berlin; Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2018.

BOWEN, Alex; HEPBURN, Cameron. Green growth: An assessment. *Oxford Review of Economic Policy*, v. 30, n. 3, p. 407–422, 2014.

BRASIL. *Lei Nº 12.305*. . Brasil: [s.n.], 2010

BRASIL. *Lei No 9.966*. . Brasil: [s.n.], 2000a

BRASIL. *Lei No 9.991*. . Brasil: [s.n.], 2000b

BRUNDTLAND COMMISSION. *Our Common Future*. [S.l.]: Oxford University Press, 1987.

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT. *Tecnologias de armazenamento de energia - a chave para a transformação do sistema energético no Brasil*. . Brasília: [s.n.], 2019

CARVALHO, Maria. Addressing the political economy of green industrial policy with economic geography. In: FOUQUET, ROGER (Org.). . *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 288–323.

CASTAGNETO GISSEY, Giorgio *et al.* Value of energy storage aggregation to the electricity system. *Energy Policy*, v. 128, p. 685–696, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.037>>.

CASTELLACCI, Fulvio *et al.* *Advances and challenges in innovation studies*. , DINÂMIA – CENTRO DE ESTUDOS SOBRE A MUDANÇA SOCIOECONÓMICA., nº 37. Lisbon: [s.n.], 2004.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Hidrogênio energético no Brasil: subsídios*

para políticas de competitividade 2010-2025. . Brasília: [s.n.], 2010.

CÉSAR, Aldara da Silva *et al.* Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers. *Journal of Cleaner Production*, v. 207, n. 2019, p. 751–763, 2019.

CHAVES, Catari Vilela *et al.* Sistemas de innovación y cambios en la división centro-periferia: Notas sobre una metodología para determinar las trayectorias de los países a partir de las estadísticas de ciencia y tecnología. *Cepal Review*, v. 2020, n. 130, p. 45–64, 2020.

CHEN, Bin *et al.* Pathways for sustainable energy transition. *Journal of Cleaner Production*, v. 228, p. 1564–1571, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.372>>.

CHILEAN SOLAR COMMITTEE. *Hydrogen Valleys - CHILE Mission Innovation Workshop 26-27 March*. . Antwerp, Belgica: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/204-MI_Antwerp-H2_Valleys-Chile.pdf>.

CHOI, Hyundo. Technology-push and demand-pull factors in emerging sectors: evidence from the electric vehicle market. *Industry and Innovation*, v. 25, n. 7, p. 655–674, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13662716.2017.1346502>>.

CHUM, Helena Li. *Programa Brasileiro de Células a Combustível Proposta*. . [S.l: s.n.], 2002.

CIMOLI, Mario; DOSI, Giovanni. *Technological Paradigms, Patterns of Learning And Development An Introductory Roadmap*. , nº WP-94-83. Laxenburg, Austria: [s.n.], 1994.

CLARK, Kim B. The interaction of design hierarchies and market concepts in technological evolution. *Research Policy*, v. 14, n. 5, p. 235–251, 1985.

CLEAN ENERGY PARTNERSHIP. *Clean Energy Partnership*. Disponível em: <www.cep-berlin.de/tcep.html>. Acesso em: 23 nov. 2020.

COASE, Ronald H. The problem of the Social Cost. *The Journal of Law and Economics*, v. III, p. 203–207, 1960.

COLLANTES, Gustavo; SPERLING, Daniel. The origin of California's zero emission vehicle mandate. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 42, n. 10, p. 1302–1313, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2008.05.007>>.

COSTANZA, Robert; DALY, Herman E. Natural Capital and Sustainable Development. *Conservation Biology*, v. 6, n. 1, p. 37–46, 1992. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2385849>><http://www.jstor.org/page/info/about/policies/terms.jsp>>.

CRESWELL, John W. *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. Second ed. Thousand Oaks, London, New Delhi: Sage Publications, 2007.

DAWOOD, Furat; ANDA, Martin; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 7, p. 3847–3869, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>>.

DECHEZLEPRÊTRE, Antoine; MARTIN, Ralf; BASSI, Samuela. Climate change policy, innovation and growth: Policy Brief. In: FOUQUET, ROGER (Org.). . *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 217–239.

DINCER, Ibrahim; ACAR, Canan. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 34, p. 11094–11111, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>>.

DINIZ, José Henrique *et al.* Célula a Combustível de Polímero Condutor Iônico. 2001, [S.l: s.n.], 2001. p. 3–5.

DOE. *Comparison of Fuel Cell Technologies*. *FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE*. [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>>.

DOE. *Department of Energy: FY 2012 Congressional Budget Request*. . Washington, DC: [s.n.], 2012.

- DOE. *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program: 2018 annual progress report. FY 2018 Annual Progress Report*. Washington, DC: [s.n.], 2019.
- DOE. *Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies: FY 2003 Progress Report*. [S.l.: s.n.], 2003.
- DOE. *Progress Report for Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program*. Washington, DC: [s.n.], 2002.
- DOSI, Giovanni. *Technical change and industrial transformation*. London: The MacMillan Press LTD, 1984.
- DOSI, Giovanni. Technological Paradigms and Technological Trajectories. *Research Policy*, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982.
- DOSI, Giovanni; GRAZZI, Marco. On the nature of technologies: Knowledge, procedures, artifacts and production inputs. *Cambridge Journal of Economics*, v. 34, n. 1, p. 173–184, 2009.
- DUSEK, Val. *The Philosophy Of Technology*. [S.l.: s.n.], 1985. v. 63.
- EDQUIST, Charles; JOHNSON, Bjorn. Institutions and organizations in systems of innovation. *Systems of innovation: Technologies, institutions and organizations*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 41–63.
- EKINS, Paul; HUGHES, Nick. The prospects for a hydrogen economy (1): Hydrogen futures. *Technology Analysis and Strategic Management*, v. 21, n. 7, p. 783–803, 2009.
- EKINS, Paul; HUGHES, Nick. The prospects for a hydrogen economy (2): Hydrogen transitions. *Technology Analysis and Strategic Management*, v. 22, n. 1, p. 1–17, 2010.
- EMONTS, Bernd *et al.* Flexible sector coupling with hydrogen: A climate-friendly fuel supply for road transport. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 26, p. 12918–12930, 2019.
- EUROPEAN COMMISSION. *The hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf>.
- EUROPEAN COMMISSION. *What is the European Green Deal*. Brussels: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu_en>.
- EUROPEAN HYDROGEN & FUEL CELL TECHNOLOGY PLATFORM. *Deployment Strategy*. Berlin: [s.n.], 2005.
- FAGERBERG, Jan; MOWERY, David C.; VERSPAGEN, Bart. *Innovation and Economic Growth*. [S.l.]: Oxford University Press. , 2009
- FAGERBERG, Jan; VERSPAGEN, Bart. Innovation studies-The emerging structure of a new scientific field. *Research Policy journal*, v. 38, p. 218–233, 2009.
- FCHJU. *Annual Activity Report 2019*. Brussels: [s.n.], 2020.
- FERNANDES, Marina Domingues *et al.* Solid oxide fuel cell technology paths: National innovation system contributions from Japan and the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 127, n. April, 2020.
- FILHO, Cesar Cals de Oliveira. Fontes alternativas de energia elétrica. *Administração Pública*, v. 12, n. 4, p. 199–226, 1978.
- FLEURY, Afonso; FLEURY, Maria Tereza Leme. A reconfiguração das Cadeias Globais de Valor (global value chains) pós-pandemia. *Estudos Avancados*, v. 34, n. 100, p. 203–219, 2020.
- FOSTER, Maria das Graças. *Brazil's Current Status in Hydrogen Technologies*. 2004, Beijing: [s.n.], 2004.
- FOUQUET, Roger. Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation. *Energy Research and Social Science*, v. 22, p. 7–12, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.014>>.
- FOUQUET, Roger. Introduction to the Handbook on Green Growth. In: FOUQUET, ROGER (Org.). *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 1–19.
- FOUQUET, Roger. The demand for environmental quality in driving transitions to low-polluting energy

sources. *Energy Policy*, v. 50, p. 138–149, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.068>>.

FOUQUET, Roger. The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service. *Energy Policy*, v. 38, n. 11, p. 6586–6596, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.029>>.

FOUQUET, Roger; HIPPE, Ralph. The transition from a fossil-fuel economy to a knowledge economy. In: FOUQUET, ROGER (Org.). *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 473–500.

FOUQUET, Roger; PEARSON, Peter J.G. Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy*, v. 50, p. 1–7, 2012.

FOXON, Timothy J.; STEINBERGER, Julia K. The role of energy in economic development: a co-evolutionary perspective. 2011, Vienna: [s.n.], 2011. p. 1–14. Disponível em: <http://sure-infrastructure.leeds.ac.uk/enecon/wp-content/uploads/sites/7/2014/01/eaepe2011_183_foxon_steinberger.pdf>.

FREDRIKSSON, Gustav; ROTH, Alexander; TAGLIAPIETRA, Simone. *Is the European automotive industry ready for the global electric vehicle revolution?*. Brussels: [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10419/208034>>.

FREEMAN, Christopher. Networks of innovators: of research issues. *Research Policy*, v. 20, p. 499–514, 1991.

FREEMAN, Christopher. *Technology Policy and Economic Performance*. London: Pinter Publishers, 1987.

FREEMAN, Christopher. The National System of Innovation in Historical Perspective. *Cambridge Journal of Economics*, v. 19, n. March 1993, p. 5–24, 1995.

FREEMAN, Christopher; LOUÇÃ, Francisco. *As Time Goes By: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*. New York: Oxford University Press, 2001. Disponível em: <<https://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/0199251053.001.0001/acprof-9780199251056>>.

FREEMAN, Christopher; PEREZ, Carlota. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour. *Technical change and economic theory*. London and New York: Printer, 1988. p. 38–66.

FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION. *US Hydrogen Road Map*. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2020/10/05/2103399/0/en/McKinsey-Study-Road-Map-to-a-US-Hydrogen-Economy-Promotes-Scale-Up-Activities-in-the-Growing-Hydrogen-Economy.html>>.

FURTADO, Celso. *Desenvolvimento e subdesenvolvimento*. 5a Edição ed. [S.l.]: Contraponto, 1961.

FURTADO, Celso. *Introdução ao Desenvolvimento enfoque historico-estrutural*. 3rd. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1920.

GAMBHIR, Ajay *et al.* Energy system changes in 1.5 °C, well below 2 °C and 2 °C scenarios. *Energy Strategy Reviews*, v. 23, p. 69–80, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.006>>.

GANDÍA, Luís M.; ARZAMENDI, Gurutze; DIÉGUEZ, Pedro M. Renewable Hydrogen Energy: An Overview. *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. [S.l.]: Elsevier B.V., 2013. p. 1–17.

GEREFFI, Gary. The Organization of Buyer-Driven Global Commodity Chains: How US Retailers Shape Overseas Production Networks. In: GEREFFI, GARY; KORZENIEWICZ, MIGUEL (Org.). *Commodity chains and global capitalism*. Westport, Connecticut, London: Praeger, 1994. p. 95–122.

GEREFFI, Gary; HUMPHREY, John; STURGEON, Timothy. The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, v. 12, n. 1, p. 78–104, 2005.

GEREFFI, Gary; KAPLINSKY, Raphael. Introduction: Globalisation, Value Chains and Development. *IDS Bulletin*, v. 32, n. 3, p. 1–8, 2001.

GHASEMZADEH, Kamran; JALILNEJAD, Elham; TILEBON, Seyyed Mohamad Sadati. *Hydrogen production technologies from ethanol*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811458-2.00012-2>>.

GIBBONS, Andrew S. The Value of the Operational Principle in Instructional Design. *Educational Technology*, v. 49, n. 1, p. 3–9, 2009. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/44429638> Accessed:>.

GIELEN, Dolf *et al.* The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, v. 24, n. June 2018, p. 38–50, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>>.

GIULIANI, Elisa; PIETROBELLI, Carlo; RABELLOTTI, Roberta. Upgrading in global value chains: Lessons from Latin American clusters. *World Development*, v. 33, n. 4, p. 549–573, 2005.

GOEL, Vinod; PIROLI, Peter. The structure of design problem spaces. *Cognitive Science*, v. 16, p. 395–429, 1992.

GOLDEN, Timothy Christopher; WEIST, Edward Landis. *Carbon monoxide/water removal from fuel cell feed gas*. . Canada: [s.n.] , 2001

GOSENS, Jorrit. The greening of South-South trade: Levels, growth, and specialization of trade in clean energy technologies between countries in the global South. *Renewable Energy*, v. 160, p. 931–943, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.014>>.

GOSENS, Jorrit; BINZ, Christian; LEMA, Rasmus. China's role in the next phase of the energy transition: Contributions to global niche formation in the Concentrated Solar Power sector. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 34, n. January, p. 61–75, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.12.004>>.

GOVERNMENT OF INDIA; MINISTRY OF FINANCE. *Notification No. 5 / 2017 – Customs*. . India: The Gazette of India. Disponível em: <cbic.gov.in/resources/htdocs-cbec/customs/cs-act/notifications/notfn-2017/cs-tarr2017/cs05-2017.pdf;jsessionid=F5C5BC72B7ED71523ABAE217D18D8E4C>. , 2017

GOVERNMENT OF KOREA. Hydrogen Roadmap Korea. n. November, p. 1–60, 2018.

HAAKONSSON, Stine; KIRKEGAARD, Julia Kirch; LEMA, Rasmus. The decomposition of innovation in Europe and China's catch-up in wind power technology: the role of KIBS. *European Planning Studies*, v. 28, n. 11, p. 2174–2192, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1712329>>.

HAAS, Reinhard *et al.* Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies. *Energy Policy*, v. 36, n. 11, p. 4012–4021, 2008.

HALL, Bronwyn H. Innovation and Diffusion. In: FAGERBERG, JAN; MOWERY, DAVID C.; NELSON, RICHARD R. (Org.). . *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2005. p. 459–484.

HARDMAN, Scott *et al.* Barriers to the adoption of fuel cell vehicles: A qualitative investigation into early adopters attitudes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 95, p. 166–182, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2016.11.012>>.

HARJANNE, Atte; KORHONEN, Janne M. Abandoning the concept of renewable energy. *Energy Policy*, v. 127, p. 330–340, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.029>>.

HARRISON, Gillian; THIEL, Christian. An exploratory policy analysis of electric vehicle sales competition and sensitivity to infrastructure in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 114, p. 165–178, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.007>>.

HASHIMOTO, Michio. *Energy Transition and Japan's Strategy for Hydrogen Society Ongoing Energy Transition in Japan*. . Tokyo: [s.n.], 2020.

HASHIMOTO, Michio. *Japan's Hydrogen Policy and Fuel Cells Development in NEDO*. *New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)*. [S.l: s.n.], 2015

HEAD, Brian. Wicked Problems in Public Policy. *Public Policy*, v. 3, n. 2, p. 101, 2008.

HEINE, Dirk *et al.* Financing Low-Carbon Transitions through Carbon Pricing and Green Bonds. *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung*, v. 88, n. 1, 2018. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/808771566321852359/Financing-Low-Carbon-Transitions-through-Carbon-Pricing-and-Green-Bonds?cid=WBW_AL_whatnews_EN_EXT>.

HEKKERT, Marko P.; HOED, Robert Van Den. Competing technologies and the struggle towards a new dominant design: The emergence of the hybrid vehicle at the expense of the fuel-cell vehicle? *Greener Management International*, v. 47, n. Autumn, p. 29–43, 2004. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/10.2307/greemanainte.47.29%0AREFERENCES>>.

HENDERSON, Rebecca M.; CLARK, Kim B. Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly*, v. 35, n. 1, p. 9–30, 1990. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2393549?origin=crossref>>.

HIESL, Albert; AJANOVIC, Amela; HAAS, Reinhard. On current and future economics of electricity storage. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, v. 10, n. 6, p. 1176–1192, 2020.

HIRSCHMAN, Alberto O. *The Strategy of Economic Development*. New Haven: Yale University Press, 1958.

HO, Win-Sow Winston. *CO₂-Selective membrane process and system for reforming a fuel to hydrogen for a fuel cell*. . United States: [s.n.], 1998

HOU, Tengfei *et al.* Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 132–148, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.023>>.

HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008.

HUANG, Cui *et al.* Government funded renewable energy innovation in China. *Energy Policy*, v. 51, p. 121–127, dez. 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421511007488>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

HULSHOF, Daan; JEPMA, Catrinus; MULDER, Machiel. Performance of markets for European renewable energy certificates. *Energy Policy*, v. 128, n. January, p. 697–710, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.051>>.

HUMPHREY, John; SCHMITZ, Hubert. Governance and upgrading: Linking industrial cluster and global value chain research. *Local Enterprises in the Global Economy*, v. 29, n. November 2017, p. 349–381, 2004.

HYDROGEN COUNCIL. *How hydrogen empowers the energy transition*. . [S.l: s.n.], 2017a.

HYDROGEN COUNCIL. Hydrogen Council. n. January, p. 1–3, 2017b.

HYDROGEN COUNCIL. *Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*. . [S.l: s.n.], 2021.

HYDROGEN COUNCIL. *Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition*. . [S.l: s.n.], 2017c. Disponível em: <www.hydrogencouncil.com>.

HYDROGEN COUNCIL. Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective. n. January, p. 88, 2020. Disponível em: <www.hydrogencouncil.com>.

IEA. *Covid-19 impact on electricity*. . Paris: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity>>.

IEA. *Energy Technology Perspectives 2020*. . [S.l: s.n.], 2020a.

IEA. *Global Energy Review 2021: Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021*. . Paris: [s.n.], 2020b.

IEA. *Global EV Outlook 2020*. *Global EV Outlook 2020*. [S.l: s.n.], 2020c.

IEA. *Global Trends and Outlook for Hydrogen*. . [S.l: s.n.], 2017.

IEA. *The Future of Hydrogen. The Future of Hydrogen*. Japan: [s.n.], 2019a.

IEA. *The latest trends in energy and emissions in 2018. Global Energy and CO2 Status Report*. [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/geco/>>.

IEA. *World Energy Investment 2020*. . [S.l: s.n.], 2020d. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEIO2014.pdf%5Cnhttp://www.smithschool.ox.ac.uk/wp-content/uploads/2010/06/Fatih-Birol.pdf>>.

IEA. *World oil production by region, 1971-2019*. . Paris: IEA. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-oil-production-by-region-1971-2019>>. , 2019b

INT. *Instituto Nacional de Tecnologia, desde 1921 gerando tecnologia para o Brasil*. . Brasília: [s.n.], 2001.

IPCC. *Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. (V. Masson-Delmotte et al., Org.). [S.l: s.n.], 2019.

IPHE. *IPHE Infographics*.

IRENA. *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*. [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>>.

IRENA. *Hydrogen: a renewable energy perspective*. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <www.irena.org>.

IRENA. *Hydrogen From Renewable Power: Technology outlook for the energy transition*. [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <www.irena.org>.

IRENA. *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. . Abu Dhabi: [s.n.], 2021.

ISO14687-3. *Hydrogen fuel — Product specification — Part 3: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for stationary appliances*. . [S.l: s.n.]. , 2014

JAFFE, Adam B.; NEWELL, Richard G.; STAVINS, Robert N. A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological Economics*, v. 54, p. 164–174, 2005.

KAKOULAKI, G. *et al.* Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, v. 228, n. November 2020, 2021.

KANGER, Laur; SCHOT, Johan. Deep transitions: Theorizing the long-term patterns of socio-technical change. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 32, n. September 2017, p. 7–21, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.07.006>>.

KHANNA, Madhu. COVID-19: A Cloud with a Silver Lining for Renewable Energy? *Applied Economic Perspectives and Policy*, v. 43, n. 1, p. 73–85, 2021.

KIRUBAKARAN, A.; JAIN, Shailendra; NEMA, R. K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 2430–2440, 2009.

KIVIMAA, Paula; KERN, Florian. Creative destruction or mere niche support? Innovation policy mixes for sustainability transitions. *Research Policy*, v. 45, n. 1, p. 205–217, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2015.09.008>>.

KRIPPNER, Greta. The financialization of the American economy. *Socio-Economic Review*, v. 3, n. May, p. 173–208, 2005.

KUHN, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. Second Edi ed. [S.l.]: The University of Chicago Press, 1962.

LECHTENBÖHMER, Stefan *et al.* Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy*, v. 115, p. 1623–1631, 2016.

LEE, Keun; LEE, Jongho; LEE, Juneyoung. Variety of national innovation systems (NIS) and alternative pathways to growth beyond the middle-income stage: Balanced, imbalanced, catching-up, and trapped NIS. *World*

Development, v. 144, n. April, 2021.

LEE, Keun; MALERBA, Franco. Catch-up cycles and changes in industrial leadership: Windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems. *Research Policy*, v. 46, n. 2, p. 338–351, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2016.09.006>>.

LEE, Keun; MALERBA, Franco; PRIMI, Annalisa. The fourth industrial revolution, changing global value chains and industrial upgrading in emerging economies. *Journal of Economic Policy Reform*, v. 00, n. 00, p. 1–12, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17487870.2020.1735386>>.

LEMA, Rasmus *et al.* *Competition and Cooperation between Europe and China in the Wind Power Sector. IDS Working Paper, Working Paper.*, n° 377. London: [s.n.], 2011.

LEWIS, W. Arthur. The Dual Economy Revised. *The Manchester School*, v. 47, n. 3, p. 211–229, 1979.

LIPSEY, Richard G. Policies for green growth versus policies for no growth: a matter of timing. In: FOUQUET, ROGER (Org.). *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 21–29.

LU, Jun *et al.* Building the hydrogen economy in China: Drivers, resources and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 23, p. 543–556, 2013.

LUNDEVALL, Bengt-Åke. *National systems of Innovation: Toward a theory of Innovation and Interactive Learning*. London: Anthem press, 1992.

MAEDA, Akira. *Fuel Cell Technologies in the Japanese National Innovation System*. . Washington, DC: [s.n.], 2003a.

MAEDA, Akira. *Innovation in Fuel Cell Technologies in Japan : Development and Commercialization of Polymer Electrolyte Fuel Cells*. . [S.l.: s.n.], 2003b.

MALTHUS, Thomas R. An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers. p. 340, 1798.

MARCOLIN, Neldson. Era quase aguardante. *Pesquisa Fapesp*, n. 145, p. 12–13, 2008.

MATHEWS, John A. The renewable energies technology surge: A new techno-economic paradigm in the making? *Futures*, v. 46, p. 10–22, 2013.

MATZAKOS, Andreas Nicholas *et al.* *Apparatus and process for production of high purity hydrogen Abstract*. . Canada: [s.n.], , 2003

MAZZAROLLO, Claynor. Brazilian Perspectives - Brazilian Actions on Hydrogen Technology. 2004, Beijing: [s.n.], 2004.

MAZZUCATO, Mariana. *The entrepreneurial state*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 49. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/10.3898/136266211798411183>>.

MAZZUCATO, Mariana. *The Green Entrepreneurial State*. , SWPS., n° 2015–28. Sussex: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.sussex.ac.uk/webteam/gateway/file.php?name=2015-28-swps-mazzucato.pdf&site=25>>.

MAZZUCATO, Mariana; PEREZ, Carlota. Innovation as Growth Policy. *The Triple Challenge for Europe*, p. 229–264, 2015.

MCMEEKIN, Andrew; GEELS, Frank W.; HODSON, Mike. Mapping the winds of whole system reconfiguration: Analysing low-carbon transformations across production, distribution and consumption in the UK electricity system (1990–2016). *Research Policy*, v. 48, p. 1216–1231, 2019.

MCTIC. *Estratégia Nacional de Pesquisa e Inovação 2016-2022*. . Brasília: [s.n.], 2016. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/a-finep/Politica/16_03_2018_Estrategia_Nacional_de_Ciencia_Tecnologia_e_Inovacao_2016_2022.pdf>.

MECKLING, Jonas; NAHM, Jonas. The politics of technology bans: Industrial policy competition and green goals for the auto industry. *Energy Policy*, v. 126, n. November 2018, p. 470–479, 2019. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.031>>.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Current status of hydrogen energy development in Brazil. 2005, Kyoto: [s.n.], 2005.

MINISTERIO DE ENERGIA GOBIERNO DE CHILE. *National Green Hydrogen Strategy*. . Santiago de Chile: [s.n.], 2020.

MINTZBERG, Henry. The Structuring of Organizations. In: ASCH, D.; BOWMAN, C. (Org.). . *Readings in Strategic Management*. London: Palgrave, 1989. .

MIRANDA, Paulo Emílio Valadão De. Hydrogen energy: Sustainable and perennial. *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation*. Rio de Janeiro: Elsevier Inc., 2019. p. 1–38.

MIRANDA, Paulo Emílio Valadão De. IPHE Country Update November, 2017: Brazil. 2017, Hague e Brussels: [s.n.], 2017.

MORAES, Marcelo Lopes De; BACCHI, Mirian Rumeno Piedade. Etanol - do início às fases atuais de produção. *Revista de Política Agrícola*, v. 23, n. 4, p. 5–22, 2014.

MOREIRA DOS SANTOS, Ricardo *et al.* Blue sky mining: Strategy for a feasible transition in emerging countries from natural gas to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, n. xxxx, 2021.

MOWERY, David C.; ROSENBERG, Nathan. *National innovation systems: A comparative analysis*. [S.l.: s.n.], 1993.

MULDER, Machiel; ZOMER, Sigourney P.E. Contribution of green labels in electricity retail markets to fostering renewable energy. *Energy Policy*, v. 99, n. 2016, p. 100–109, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.040>>.

MUNDACA, Luis; LUTH RICHTER, Jessika. Assessing “green energy economy” stimulus packages: Evidence from the U.S. programs targeting renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 1174–1186, 2015.

MUNDACA, Luis; MARKANDYA, Anil. Assessing regional progress towards a ‘Green Energy Economy’. *Applied Energy*, v. 179, n. December 2019, p. 1372–1394, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.098>>.

NATIONAL HYDROGEN ENERGY BOARD; MINISTRY OF NEW AND RENEWABLE ENERGY; GOVERNMENT OF INDIA. *National Hydrogen Energy Road Map: Path Way for Transition to Hydrogen Energy for India*. . Delhi: [s.n.], 2006.

NELSON, Laura *et al.* *Green Hydrogen Guidebook*. . [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <www.ghcoalition.org/education>.

NELSON, Richard R. *National Innovation Systems*. New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1993.

NELSON, Richard R. The Simple Economics of Basic Scientific Research. *Journal of Political Economy*, v. 67, n. 3, p. 297–306, 1959.

NELSON, Richard R.; SCHUETTE, Herbert; WINTER, Sidney G. *Technical Change in an Evolutionary Model. Discussion Papers*, Discussion Papers., n° 229. New York: EliScholar, 1975.

NELSON, Richard R.; WINTER, Sidney G. *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge, Massachusetts; London, England: Harvard University Press, 1982. Disponível em: <http://books.google.com/books?id=6Kx7s_HXxrC&pgis=1>.

NELSON, Richard R.; WINTER, Sidney G. Neoclassical vs. Evolutionary Theories of Economic Growth: Critique and Prospectus. *The Economic Journal*, v. 84, n. 336, p. 886–905, 1974. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2230572>>.

NELSON, Richard R.; WINTER, Sidney G. Toward an Evolutionary Theory of Economic Capability. *The American Economic Review*, v. 63, n. 2, p. 440–449, 1973. Disponível em:

<<http://strategy.sjsu.edu/www.stable/pdf/Nelson, Winter, AER 1973.pdf>>.

NIKOLAIDIS, Pavlos; POULLIKKAS, Andreas. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 597–611, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305366>>.

NOGUEIRA, Rony Elson Gomes *et al.* Destinação dos resíduos sólidos de atividade agropecuária e riscos de poluição ambiental em comunidade do município de Cascavel - Paraná. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 8, p. 93–101, 2015.

NREL. *Powering Post- COVID-19 Resilient Recovery with Green Stimulus*. . Denver: [s.n.], 2021.

NURKSE, Ragnar. Some International Aspects of the Problem of Economic Development. *The American Economic Review*, v. 42, n. 2, p. 571–583, 1952. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/1910629>>.

PAULA, Luiz Fernando De; PIRES, Manoel. Crise e perspectivas para a economia brasileira. *Revista Estudos Avançados*, v. 31, n. 89, p. 125–144, 2017.

PEARSON, Peter J.G.; FOXON, Timothy J. A low carbon industrial revolution? Insights and challenges from past technological and economic transformations. *Energy Policy*, v. 50, p. 117–127, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.061>>.

PENROSE, Edith. The Theory of The Growing of the Firm. *OXFORD, University Press*, p. 301, 1959.

PEREZ, Carlota. Capitalism, Technology and a Green Global Golden Age: The Role of History in Helping to Shape the Future. *The Political Quarterly*, v. 86, p. 191–217, 2016. Disponível em: <www.beyondthetechrevolution.com>.

PEREZ, Carlota. Structural change and assimilation of new technologies in the economic and social systems. *Futures*, v. 15, n. 5, p. 357–375, 1983.

PEREZ, Carlota. *Technological Revolutions and Financial Capital The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*. Cheltenham, UK Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing Limited, 2002.

PEREZ, Carlota. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2009.

PEREZ, Carlota. Transitioning to smart green growth: lessons from history. In: FOUQUET, ROGER (Org.). *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 447–463.

PEREZ, Carlota. Unleashing a golden age after the financial collapse: Drawing lessons from history. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 6, p. 9–23, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eist.2012.12.004>>.

PEREZ, Carlota; LEACH, Tamsin Murray. A Smart Green “European Way of Life”: the Path for Growth, Jobs and Wellbeing. *BTTTR Working Paper*, v. 1, n. March, p. 1–24, 2018.

PEREZ, Carlota; SOETE, Luc. Catching up in technology: entry barriers and windows of opportunity. In: DOSI, GIOVANNI; FREEMAN, CHRISTOPHER; NELSON, RICHARD R. (Org.). *Technical change and economic theory*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 458–479. Disponível em: <<http://arno.unimaas.nl/show.cgi?fid=3536>>.

PICKL, Matthias J. The renewable energy strategies of oil majors – From oil to energy? *Energy Strategy Reviews*, v. 26, n. August 2018, p. 1–8, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100370>>.

PRAHALAD, C. K.; HAMEL, Gary. The Core Competence of the Corporation. *Harvard Business Review*, v. May-June, p. 79–91, 1990.

PREBISCH, Raul. *The Economic Development of Latin America and its Principal Problems*. *Economic Bulletin for Latin America*. Santiago de Chile: [s.n.], 1962. Disponível em: <<https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/10079/S6200129.pdf?sequence=1%0Ahttp://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/10079/S6200129.pdf?sequence=1>>.

QUAH, Danny. The invisible hand and the weightless economy. In: FOUQUET, ROGER (Org.). *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 464–472.

QUANDT, Carlos Olavo; JUNIOR, Roberto Gregório da Silva; PROCOPIUCK, Mario. Estratégia e inovação: análise das atividades de P&D no setor elétrico brasileiro. *Rebrae*, v. 1, n. 2, p. 243, 2017.

RANIS, Gustav; FEI, John C. H. A Theory of Economic Development. *The American Economic Review*, v. 51, n. 4, p. 533–565, 1961. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1812785>>.

RAPINI, Márcia Siqueira *et al.* University-industry interactions in an immature system of innovation: Evidence from Minas Gerais, Brazil. *Science and Public Policy*, v. 36, n. 5, p. 373–386, 2009.

REN, Xusheng *et al.* Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 59, p. 34326–34345, 2020.

RICARDO, David. *The Principles of Political Economy and Taxation*. (1926) ed. New York: JMDENT & SONS, 1817.

RITTEL, Horst W. J.; WEBBER, Melvin M. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, v. 4, p. 155–169, 1973a.

RITTEL, Horst W. J.; WEBBER, Melvin M. Dilemmas in General Theory of Planning. *Policy Sciences*, v. 4, p. 155–169, 1973b.

RODRÍGUEZ, Octavio. *O estruturalismo latino-americano*. tradução M ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2009.

ROMER, Paul M. Endogenous Technological Change. *The journal of political economy*, v. 98, n. 5, p. S71–S102, 1990.

ROSENBERG, Nathan. Innovative responses to materials shortages. *Perspectives on Technology*, v. 63, n. 2, p. 111–118, 1973.

ROSENBERG, Nathan. The Direction of Technological Change: Inducement Mechanisms and Focusing Devices. *Economic Development and Cultural Change*, v. 18, n. 1, p. 1–24, 1969.

ROSSI, Pedro; MELLO, Guilherme. Choque recessivo e a maior crise da história: A economia brasileira em marcha à ré. *Centro de Estudos de Conjuntura e Política Econômica - IE/Unicamp*, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2017. Disponível em: <https://www.eco.unicamp.br/images/arquivos/NotaCecon1_Choque_recessivo_2.pdf>.

SANDBERG, J. Understanding human competence at work: An integrative approach. *Academy of Management Journal*, v. 43, n. 1, p. 9–25, 2000. Disponível em: <http://infotrac.galegroup.com/itw/infomark/291/664/50646460w5/purl=rc1_GBFM_0_A60473513&dyn=10!bmk_1_0_A60473513?sw_aep=telaviv>.

SCHAFFER, Lena Maria; BERNAUER, Thomas. Explaining government choices for promoting renewable energy. *Energy Policy*, v. 68, p. 15–27, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.064>>.

SCHUMPETER, Joseph Alois. *Business Cycles: A Theoretical, Historical, and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Abridged ed. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, 1939. Disponível em: <<http://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/255640>>.

SCHUMPETER, Joseph Alois. *Capitalism, Socialism and Democracy*. 2003. ed. [S.l.]: Taylor & Francis e-Library, 1942. Disponível em: <<https://www.amazon.com/Capitalism-Socialism-Democracy-Joseph-Schumpeter/dp/1169832121>>.

SCHUMPETER, Joseph Alois. *The Theory of Economic Development (An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest and the Business Cycle)*. [S.l.]: Editora Nova Cultural Ltda, 1911.

SCHWARTZMAN, Simon. Modernização do pós-guerra. *Um espaço para ciência: a formação da comunidade científica no Brasil*. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2001. .

SCHWARTZMAN, Simon; CASTRO, Maria Helena Magalhães. Nacionalismo, iniciativa privada e o papel da pesquisa tecnológica no desenvolvimento industrial: Os primórdios de um debate (Nationalisme, initiative privée et rôle de la recherche technologique dans le développement industriel: le début d'un débat). *Dados Revista de Ciências Sociais*, v. 28, n. 1, p. 89–111, 1985.

SEMIENIUK, Gregor; MAZZUCATO, Mariana. Financing Green Growth. In: FOUQUET, ROGER (Org.). *Handbook on Green Growth*. [S.l.]: Edward Elgar Publishing Limited, 2019. p. 240–259.

SHERWOOD, James. The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, v. 300, n. January, 2020.

SHUNICHI NAKADA; SAYGIN, Deger; GIELEN, Dolf. *Global Bioenergy supply and demand projections. A working paper for REmap 2030*. . Abu Dhabi: [s.n.], 2014. Disponível em: <www.irena.org/remap%0Ahttp://www.igc.int/en/downloads/grainsupdate/igc_5yrprojections.pdf>.

SILVA, Claudio Homero Da *et al.* Produção de Hidrogênio Através de Reforma de Etanol. 2009, Belém: [s.n.], 2009. p. 9.

SILVA, D. B. Da; BITU, R. S. Electrolytic hydrogen production in Brazilian electric utilities—a way to increase return on investments. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 13, n. 2, p. 77–79, 1988.

SILVA, Ennio Peres Da; NEVES, Newton Pimenta. Research and development at the UNICAMP laboratory of hydrogen, Brazil, 1975-1992. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 17, n. 12, p. 935–944, 1992.

SILVA, Leandro Alves. Internacionalização e Sistemas Nacionais de Inovação. In: RAPINI, MÁRCIA SIQUEIRA *et al.* (Org.). *Economia da ciência, Economia da ciência, Fundamentos teóricos tecnologia e inovação Fundamentos teóricos tecnologia e inovação e a economia global e a economia global*. Belo Horizonte: População e Economia, 2021. p. 700.

SINIGAGLIA, Tiago *et al.* Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications—a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 39, p. 24597–24611, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.063>>.

SMIL, Vaclav. *Energy and Civilization: A history*. Revised Ed ed. Cambridge, Massachusetts and London, England: MIT Press, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.018%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.005%0Ahttp://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.902757%0Ahttp://dx.>>>.

SMIL, Vaclav. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Santa Barbara, Denver, Oxford: Praeger, 2010.

SMIL, Vaclav. World History and Energy. *Encyclopedia of Energy*, v. 6, p. 549–561, 2004.

SOLOW, Robert M. Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, v. 39, n. 3, p. 312–320, 1957. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/1926047>>.

SOVACOOOL, Benjamin K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research and Social Science*, v. 13, p. 202–215, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>>.

SOVACOOOL, Benjamin K. Solving the oil independence problem: Is it possible? *Energy Policy*, v. 35, n. 11, p. 5505–5514, 2007.

SOVACOOOL, Benjamin K.; DWORKIN, Michael H. Energy justice: Conceptual insights and practical applications. *Applied Energy*, v. 142, p. 435–444, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.002>>.

STATISTA. *Technical potential of renewable energy worldwide in 2050, by region*. . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/758238/global-renewable-energy-potential-by-region/>>. , 2021

SUAREZ, Fernando F. Battles for technological dominance: An integrative framework. *Research Policy*, v. 33, n. 2, p. 271–286, 2004.

SUDBRACK, Fredy *et al.* Programa Brasileiro Sistemas Célula a Combustível - ProCaC. p. 31, 2012. Disponível em: <<http://livroaberto.ibict.br/handle/1/977>>.

SZAPIRO, Marina *et al.* *Global Value Chains and National Systems of Innovation: policy implications for developing countries*. , Texto para Discussão., nº 005/2016. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.ie.ufrj.br/index.php/index-publicacoes/textos-para-discussao>>.

SZAPIRO, Marina; MATOS, Marcelo Gerson Pessoa De; CASSIOLATO, José Eduardo. Sistemas de inovação e desenvolvimento. In: RAPINI, MÁRCIA SIQUEIRA *et al.* (Org.). *Economia da ciência, Economia da ciência, Fundamentos teóricos tecnologia e inovação Fundamentos teóricos tecnologia e inovação e a economia global e a economia global*. Belo Horizonte: População e Economia, 2021. p. 700.

TAN, Ru Shien *et al.* Catalytic steam reforming of tar for enhancing hydrogen production from biomass gasification: a review. *Frontiers in Energy*, p. 1–25, 2020.

TÁVORA, Fernando Lagares. *História e Economia dos Biocombustíveis no Brasil*. Centro de Estudos da Consultoria do Senado, Textos para Discussão., nº 89. Brasília: [s.n.], 2011. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-89-historia-e-economia-dos-biocombustiveis-no-brasil>>.

TERMAN, Frederick E. A brief history of electrical engineering education. *Proceedings of the IEEE*, v. 64, n. 9, p. 1339–1407, 1976.

TOLMASQUIM, Mauricio. The origins of the Brazilian energy crisis (in Portuguese). *Ambiente & Sociedade*, n. 6–7, p. 179–183, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2000000100012&lng=pt&tlng=pt>.

TRENCHER, Gregory; TAEIHAGH, Araz; YARIME, Masaru. Overcoming barriers to developing and diffusing fuel-cell vehicles: Governance strategies and experiences in Japan. *Energy Policy*, v. 142, n. March, p. 111533, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111533>>.

TYBOUT, Richard A. Pricing Pollution and Other Negative Externalities. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, v. 3, n. 1, p. 252–266, 1972. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/3003077>>.

UN. *Kyoto Protocol*. . Kyoto: [s.n.], 1998.

UN. *Paris Agreement*. . Paris: United Nations. , 2015

UNCCD. *Energy and land use*. , Global land outlook. [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.academia.edu/download/54584848/Fritsche_et_al_2017_Energy_and_Land_Use_-_GLO_paper-corr2.pdf>.

UNEP. *Emissions Gap Emissions Report 2020*. . Nairobi: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>>.

UTTERBACK, James M.; ABERNATHY, William J. A Dynamic Model of Process and Product Innovation. *Omega*, v. 3, n. 6, p. 639–656, 1975.

VACCARI, Andrés. Artifact dualism, materiality, and the hard problem of ontology: Some critical remarks on the dual nature of technical artifacts program. *Philosophy and Technology*, v. 26, n. 1, p. 7–29, 2013.

VAN DE GRAAF, Thijs *et al.* The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. *Energy Research and Social Science*, v. 70, n. April, p. 101667, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101667>>.

VAN DER ZWAN, Natascha. Making sense of financialization. *Socio-Economic Review*, v. 12, n. September, p. 99–129, 2014.

VAN DINGENEN, R. *et al.* *Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations*. . Luxembourg: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc>>.

VAN RENSSSEN, Sonja. The hydrogen solution? *Nature Climate Change*, v. 10, n. 9, p. 799–801, 2020.

VISSER, Willemien. Design: one, but in different forms. *Design Studies*, v. 30, n. 3, p. 187–223, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2008.11.004>>.

VON HIPPEL, Eric. “Sticky Information” and the Locus of Problem Solving: Implications for Innovation. *Management Science*, v. 40, n. 4, p. 429–439, 1994. Disponível em: <<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.40.4.429>>.

WARD, K. R.; GREEN, R.; STAFFELL, Iain. Getting prices right in structural electricity market models. *Energy Policy*, v. 129, p. 1190–1206, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.077>>.

WEART, Spencer R. *The discovery of global warming*. Revised ed. CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS and LONDON, ENGLAND: Harvard University Press, 2008.

WHITE HOUSE. Fact Sheet: The American Jobs Plan. *White House Briefing Room*, 2021. Disponível em: <<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/31/fact-sheet-the-american-jobs-plan/>>.

WILBERFORCE, Tabbi *et al.* Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of the Total Environment*, v. 657, p. 56–72, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>>.

WINTER, Sidney G. Schumpeterian competition in alternative technological regimes. *Journal of Economic Behavior and Organization*, v. 5, n. 3–4, p. 287–320, 1984.

WORLD BANK. *Global Photovoltaic Power Potential by Country*. . Washington, DC: [s.n.], 2020a.

WORLD BANK. *Green Hydrogen in Developing Countries*. . Washington, DC: [s.n.], 2020b.

WORLD ENERGY COUNCIL. *New Hydrogen Economy: Hope or Hype?* . London: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WEInnovation-Insights-Brief-New-Hydrogen-Economy-Hype-or-Hope.pdf>>.

WORLD ENERGY COUNCIL GERMANY. *International aspects of a power-to-X roadmap*. (Jens Perner & David Bothe, Org.). Berlin: [s.n.], 2018.

YANG, Myriam Linster and Chan. *China’s Progress Towards Green Growth: an international perspective*. *Green Growth Paper OECD*. Paris: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/china-s-progress-towards-green-growth_76401a8c-en>.

YIN, Robert K. *Estudo de caso: Planejamento e Métodos*. Traduzida ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

YORK, Richard; BELL, Shannon Elizabeth. Energy transitions or additions? Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. *Energy Research and Social Science*, v. 51, n. January, p. 40–43, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008>>.

ZAPPA, William; JUNGINGER, Martin; VAN DEN BROEK, Machteld. Is a 100% renewable European power system feasible by 2050? *Applied Energy*, v. 233–234, n. July 2018, p. 1027–1050, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>>.

ZGONNIK, Viacheslav. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, v. 203, n. February, p. 103140, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>>.

ZHANG, Fangzhu; COOKE, Philip. Hydrogen and fuel cell development in China: A review. *European Planning Studies*, v. 18, n. 7, p. 1153–1168, 2010.

ZHANG, Long *et al.* The Dragon awakens: Innovation, competition, and transition in the energy strategy of the People’s Republic of China, 1949–2017. *Energy Policy*, v. 108, n. May, p. 634–644, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.06.027>>.

ZHILI, Du; BOQIANG, Lin; CHUNXU, Guan. Development path of electric vehicles in China under environmental and energy security constraints. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 143, n. December 2018, p. 17–26, 2019.

ZUCOLOTO, Graziela Ferrero; CASSIOLATO, José Eduardo. Desenvolvimento tecnológico por empresas estrangeiras no Brasil e na Coreia do Sul. *Revista de Economia Contemporânea*, v. 18, n. 2, p. 210–240, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/141598481823>>.

ANEXO 1: PERGUNTAS QUESTIONÁRIO DISPONIBILIZADO NA WHEC

Perguntas Comuns	
C1	Nome e afiliação
C2	Faixa etária
C3	País que exerce a atividade
C4	Tipos de tecnologias
C5	Há quanto tempo você está envolvido com tecnologias de hidrogênio
C6	Qualificação (Graduação)
C7	Qualificação G7 A (pós-graduação)
	Nível de responsabilidade
*C8	Se classificação = Gerentes; Você também é o fundador da empresa? Se sim, então vá para a seção fundadora da empresa "
Pesquisador	
P1	Quanto (%) do seu P&D é financiado por empresas privadas? Seu P&D recebeu apoio financeiro de uma empresa de tecnologia de hidrogênio? O que foi financiado?
*P2	E1 Quanto (%) é o seu P&D financiado pelo governo? Como o governo financiou?
P3	Quanto (%) é o seu P&D financiado por recursos da própria organização?
P4	E2 Como começou a pesquisa e desenvolvimento de H ₂ ?
P5	Quais foram os obstáculos <i>científicos</i> para sua pesquisa?
P6	E3 Quais foram os obstáculos <i>tecnológicos</i> para sua pesquisa?
P7	Quais foram os obstáculos <i>financeiros</i> para sua pesquisa?
*P8	E4 Sua pesquisa tem colaborações? Como foi estabelecida a parceria? Por que a parceria foi estabelecida?
P9	Quando começou seu envolvimento com as tecnologias de hidrogênio?
P10	Como você se envolveu com as tecnologias de hidrogênio?
P11	E5 Por que você ainda está envolvido com as tecnologias de hidrogênio?
P12	Qual é o principal objetivo do seu envolvimento em P&D em hidrogênio?
P13	Quais são os recursos importantes para suas atividades de tecnologia de hidrogênio?
Gerentes	

G1		O principal negócio da sua empresa está relacionado às tecnologias de hidrogênio?
G2		Quanto (%) das suas atividades relacionadas a tecnologias de hidrogênio é financiado por empresas privadas? Sua organização recebeu apoio financeiro de uma empresa de tecnologia de hidrogênio? O que foi financiado?
*G3	E1	Quanto (%) das suas atividades relacionadas a tecnologias de hidrogênio é financiado pelo governo? Como o governo financiou?
*G4		Quanto (%) das suas atividades relacionadas a tecnologias de hidrogênio é financiado pelos recursos da própria organização?
G5	E2	Como o desenvolvimento da tecnologia começou na organização?
G6		Quais foram os obstáculos à <i>comercialização</i> para o desenvolvimento da tecnologia na organização?
G7	E3	Quais foram os obstáculos <i>tecnológicos</i> para o desenvolvimento da tecnologia na organização?
G8		Quais foram os obstáculos <i>financeiros</i> para o desenvolvimento da tecnologia na organização?
*G9	E4	Sua organização possui colaborações de pesquisa e desenvolvimento? Como foi estabelecida a parceria? Por que a parceria foi estabelecida?
G10		Quando começou seu envolvimento com as tecnologias de hidrogênio?
G11		Como você se envolveu com as tecnologias de hidrogênio?
G12	E5	Por que você ainda está envolvido com as tecnologias de hidrogênio?
G13		Qual é o principal objetivo do seu envolvimento em P&D em hidrogênio?
G14		Quais são os recursos importantes para suas atividades de tecnologia de hidrogênio?
Fundador da empresa		
F1	E1	O principal negócio da sua empresa está relacionado às tecnologias de hidrogênio? O governo financiou a criação da sua empresa?
F2		Você teve a ideia da tecnologia de hidrogênio em que está envolvido?
F3		Você é o único fundador da empresa?
*F4		Que formação educacional os fundadores têm?
*F5		Quanto (%) das suas atividades relacionadas a tecnologias de hidrogênio é financiado por empresas privadas? Sua organização recebeu apoio financeiro de uma empresa de tecnologia de hidrogênio? O que foi financiado?
*F6	E1	Quanto (%) das suas atividades relacionadas a tecnologias de hidrogênio é financiado pelo governo? Como o governo financiou?
F7		Quanto (%) das suas atividades relacionadas a tecnologias de hidrogênio é financiado pelos recursos da própria organização?

F8	E2	Como o desenvolvimento da tecnologia começou na organização?
F9	E3	Quais foram os obstáculos à <i>comercialização</i> para o desenvolvimento da tecnologia na organização?
F10		Quais foram os obstáculos <i>tecnológicos</i> para o desenvolvimento da tecnologia na organização?
F11		Quais foram os obstáculos <i>financeiros</i> para o desenvolvimento da tecnologia na organização?
*		Sua organização possui colaborações de pesquisa e desenvolvimento?
F12	E4	Como foi estabelecida a parceria? Por que a parceria foi estabelecida?
F13		Motivação pessoal para criação de start-up com tecnologias de hidrogênio?
F14		Como foi criada a empresa?
F15		O que era necessário para criar a empresa?
F16		Quando começou seu envolvimento com as tecnologias de hidrogênio?
F17	E5	Como você se envolveu com as tecnologias de hidrogênio?
F18		Por que você ainda está envolvido com as tecnologias de hidrogênio?
F19		Qual é o principal objetivo do seu envolvimento em P&D em hidrogênio?
F20		Quais são os recursos importantes para suas atividades de tecnologia de hidrogênio?
Formuladores de políticas		
PP1		Por que tecnologias de hidrogênio?
PP2		Quais tipos de organizações se beneficiam do seu suporte
PP3		Que estágio do desenvolvimento da tecnologia se beneficia do seu suporte
PP4	E1	Como você apoiou o desenvolvimento da tecnologia?
PP5		Normalmente, quanto tempo uma única organização recebe seu apoio?
PP6		Quais <i>são</i> os principais obstáculos tecnológicos para as tecnologias de hidrogênio?
PP7	E2	Quais <i>foram</i> os principais obstáculos tecnológicos para as tecnologias de hidrogênio?
PP8		Quais são os principais obstáculos tecnológicos que recebem o suporte da sua instituição?

ANEXO 2: ROTEIRO DE NORTEADOR DAS ENTREVISTAS

Eixo 1: Percepção sobre a relação da instituição (e relação pessoal) com tecnologias de hidrogênio

Eixo 2: Percepção da trajetória da tecnologia

Eixo 3: Percepção sobre o financiamento da tecnologia

Eixo 4: Percepção sobre o estágio de maturidade, obstáculos e implementação da tecnologia

Eixo 5: Percepção do relacionamento entre tecnologias de hidrogênio e o Crescimento Verde

Eixo 6: Percepção da inserção global da tecnologia

	Formadores de política pública	Fundadores de Empresa	Membros de empresa	Pesquisadores
Eixo 1	Qual o papel da instituição no fomento de tecnologias de H ₂ ?	O que a empresa desenvolve? Como a empresa se formou?	O que a instituição que você trabalha faz, e qual sua relação com tecnologias de H ₂ ?	O que é pesquisado pelo seu grupo em relação a tecnologias de H ₂ ?
	Como você começou sua trajetória em tecnologias de H ₂ ?	Como você começou sua trajetória em tecnologias de H ₂ ?	Como você começou sua trajetória em tecnologias de H ₂ ?	Como você começou sua trajetória em tecnologias de H ₂ ?
Eixo 2	Como e por que a instituição começou a fomentar tecnologias de H ₂ ?	Como e por que a instituição começou a desenvolver tecnologias de H ₂ ?	Como e por que a instituição começou a desenvolver tecnologias de H ₂ ?	Como e por que o grupo de pesquisa começou a desenvolver tecnologias de H ₂ ?
	Desde que você se juntou a instituição, o que mudou em relação às atividades relacionadas a tecnologias de H ₂ ?	Desde a fundação da empresa, o que mudou?	Desde que você se juntou a empresa, o que mudou em relação às atividades relacionadas a tecnologias de H ₂ ?	Desde que você iniciou a pesquisa, o que mudou?
Eixo 3	Como os projetos de desenvolvimento são financiados? Quais as contrapartidas?	Quais são as principais fontes de recurso de financiamento?	Quais são as principais fontes de recurso de financiamento?	Quais são as principais fontes de financiamento da pesquisa?
Eixo 4	Qual o principal obstáculo da tecnologia hoje?	Qual o principal obstáculo da tecnologia hoje?	Qual o principal obstáculo da tecnologia hoje?	Qual o principal obstáculo da tecnologia hoje?
	Quais as principais políticas de incentivo à tecnologia	Quem são os principais clientes?	Quem são os principais clientes?	Há alguma parceria com empresas?
	Como lidar com design diferentes de tecnologia?	Quem são os principais competidores?	Quem são os principais competidores?	Pesquisa tem reconhecimento fora da academia?
	Como estão sendo feitas as regulações para economia do H ₂	Como a empresa se coloca no mercado?	Como a empresa se coloca no mercado?	
Eixo 5	Qual o impacto de acordos como o de Paris para o desenvolvimento de tecnologias de H ₂ ?			
	Qual o papel do H ₂ na questão ambiental?			
Eixo 6	Qual o papel das nações entrantes, como China na economia do H ₂ ?			
	Quais os principais países desenvolvendo tecnologias de H ₂ ?			