

Sumário



Preâmbulo	v
CAPÍTULO 1	
<i>Introdução (Geraldo Lúcio Tiago Filho)</i>	1
1.1 CARACTERÍSTICAS DO HIDROGÊNIO	1
1.2 A IMPORTÂNCIA DO HIDROGÊNIO NA MATRIZ ENERGÉTICA	2
1.3 CONCEITO DE HIDROGÊNIO VERDE E SUAS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AOS DEMAIS TIPOS	3
1.4 OBJETIVOS E ESCOPO DO LIVRO	4
1.5 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	5
REFERÊNCIAS	6
CAPÍTULO 2	
<i>Conhecendo os Tipos de Hidrogênio (Adriele Maria de Cássia Crispim; Geraldo Lúcio Tiago Filho)</i>	9
2.1 INTRODUÇÃO	9
2.2 CLASSIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO	12
2.3 HIDROGÊNIO PRETO OU MARROM	13
2.3.1 Como Ocorre a Gaseificação do Carbono	13
2.4 HIDROGÊNIO CINZA	14
2.4.1 Como é Produzido o Hidrogênio Cinza	15
2.5 HIDROGÊNIO AZUL	17
2.5.1 Captura de Carbono	17
2.6 HIDROGÊNIO TURQUESA	19
2.6.1 Como Ocorre a Pirólise do Metano	20

2.7	HIDROGÊNIO MUSGO	22
2.7.1	Processos Fermentativos	23
2.7.2	Parâmetros Fundamentais para a Produção de Hidrogênio Musgo . .	26
2.8	HIDROGÊNIO VERDE	27
2.8.1	Eletrólise da Água	27
2.9	HIDROGÊNIO BRANCO	30
2.9.1	Como é Produzido o Hidrogênio Branco	30
2.9.2	Exploração do Hidrogênio Branco	32
2.10	INTERESSE DO MERCADO E POTENCIAL COMO FONTE DE ENERGIA LIMPA	33
2.10.1	Custos de Produção do Hidrogênio Branco	34
2.10.2	Primeira Instalação de Exploração e Uso do Hidrogênio Branco na Geração de Eletricidade	35
2.10.3	Riscos e Influência no Mercado de Hidrogênio Verde	36
2.11	EXERCÍCIOS PROPOSTOS	36
2.11.1	Perguntas	36
	REFERÊNCIAS	40

CAPÍTULO 3

Rotas Tecnológicas para a Produção de Hidrogênio Verde

(Geraldo Lúcio Tiago Filho)	45
3.1 INTRODUÇÃO	45
3.2 HIDROGÊNIO OBTIDO A PARTIR DA ELETRÓLISE	46
3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA ELETRÓLISE	46
3.4 TIPOS DE ELETRÓLISE	47
3.4.1 Eletrólise Aquosa	47
3.4.2 Eletrólise Ígnea	49
3.4.3 Eletrólise Alcalina (AEL)	50
3.4.4 Eletrólise por Membrana de Troca Protônica (PEM)	52
3.4.5 Eletrólise de Óxidos Sólidos (SOE)	54
3.5 HIDROGÊNIO OBTIDO A PARTIR DAS REFORMAS BIOLÓGICAS	56
3.6 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE PROCESSOS TERMOQUÍMICOS E CICLOS DE ALTAS TEMPERATURAS.	58
3.7 PROCESSOS DOS CICLOS TERMOQUÍMICOS	58
3.8 PROCESSO DA TERMÓLISE DIRETA	61
3.9 HIDROGÊNIO OBTIDO A PARTIR DA FOTOELETROQUÍMICA	63
3.10 CENÁRIOS DAS DIFERENTES ROTAS.	66

3.11 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	67
3.11.1 Perguntas	67
REFERÊNCIAS	68

CAPÍTULO 4

Balanço Energético na Produção do Hidrogênio (Aylla Joani

Mendonça de Oliveira Pontes; Geraldo Lúcio Tiago Filho	73
4.1 CONCEITOS E PRINCÍPIOS DE BALANÇO ENERGÉTICO	73
4.1.1 Balanço Energético para a Produção de Hidrogênio	75
4.2 EFICIÊNCIA E PERDAS NAS ETAPAS DE PRODUÇÃO	79
4.2.1 Eficiências e Perdas no Processo da Eletrólise	79
4.2.2 Eficiências e Perdas no Processo de Fermentação	84
4.3 COMPARAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENTRE PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	89
4.3.1 Comparação entre os Processos de Eletrólise	91
4.3.2 Comparação entre os Processos de Fermentação	100
4.4 IMPACTO DO FATOR DE CAPACIDADE DAS FONTES RENOVÁVEIS	102
4.5 BALANÇO ENERGÉTICO NO CICLO DE VIDA DO HIDROGÊNIO VERDE	107
4.6 DESENVOLVIMENTO DA INFRAESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO	111
4.7 USO FINAL	111
4.7.1 Conversão do Hidrogênio em Eletricidade	111
4.7.2 Uso Industrial do Hidrogênio	112
4.8 BALANÇO ENERGÉTICO	113
4.9 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	114
4.9.1 Perguntas	114
4.9.2 Problemas	116
REFERÊNCIAS	119

CAPÍTULO 5

Aplicações do Hidrogênio Verde (Geraldo Lúcio Tiago Filho)

5.1 INTRODUÇÃO	125
5.2 O HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA	127
5.3 PODER ENERGÉTICO DO HIDROGÊNIO	129
5.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA E <i>BACKUP</i> PARA FONTES RENOVÁVEIS	131
5.4.1 O Que vem a ser Armazenamento de Energia Elétrica	131
5.4.2 O Uso do Hidrogênio como Vetor Energético para o	

Armazenamento e o Transporte de Energia.	135
5.5 USO DO HIDROGÊNIO NO TRANSPORTE	138
5.5.1 Introdução	138
5.5.2 Processos para o Uso do Hidrogênio como Combustível em Veículos	140
5.5.3 Aplicações do Hidrogênio em Diferentes Tipos de Veículos	141
5.5.4 Armazenamento e Transporte de Hidrogênio: Desafios e Aplicações	142
5.5.5 O Uso do Hidrogênio como Combustível para a Aviação	144
5.5.6 O Uso do Hidrogênio no Transporte Pesado.	147
5.5.7 O Uso do Hidrogênio nos Transportes Fluvial e Marítimo: Uma Perspectiva Sustentável	153
5.5.8 O Uso do Hidrogênio em Veículos Menores: Vans e Automóveis.	162
5.5.9 Uso do Hidrogênio na Indústria e em Processos Químicos.	167
5.5.10 Aplicações Domésticas do Hidrogênio	172
5.5.11 Uso do Hidrogênio para o Armazenamento e a Geração no Sistema de Energia Elétrica	174
5.6 EXERCÍCIOS PROPOSTOS.	175
5.6.1 Perguntas	175
5.6.2 Problemas	179
REFERÊNCIAS.	183

CAPÍTULO 6

Análise de Viabilidade Econômica do Hidrogênio Verde

(Ivan Felipe Silva dos Santos; Wanya Mendonça Carlos)	193
6.1 INTRODUÇÃO	193
6.2 ANÁLISE DE DEMANDA DO HIDROGÊNIO VERDE	193
6.3 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE PRODUÇÃO	197
6.4 CUSTOS DE ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE	199
6.5 CAPEX E OPEX.	200
6.6 INDICADORES FINANCEIROS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE	201
6.6.1 Tempo de Retorno do Investimento (<i>Payback</i>)	201
6.6.2 Valor Presente Líquido (VPL)	201
6.6.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)	202
6.6.4 Custo Nivelado de Energia (LCOE).	203
6.6.5 Custo Nivelado de Hidrogênio (LCOH).	203
6.6.6 Análise de Sensibilidade.	204

6.7	INCENTIVOS E SUBSÍDIOS PARA O HIDROGÊNIO VERDE	204
6.8	ANÁLISE DE RISCOS	205
6.9	PERSPECTIVA DE REDUÇÃO DE CUSTOS COM AVANÇOS TECNOLÓGICOS . .	206
6.10	ESTUDO DE CASO: VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE A PARTIR DA ENERGIA SOLAR	207
6.11	EXERCÍCIOS PROPOSTOS	215
6.11.1	Perguntas	215
6.11.2	Problemas	216
	REFERÊNCIAS	217

CAPÍTULO 7

Hidrogênio Verde para Exportação (Wanya Mendonça Carlos)	221
7.1 INTRODUÇÃO	221
7.2 POR QUE OS PAÍSES QUEREM IMPORTAR HIDROGÊNIO VERDE?.	221
7.3 INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA PARA EXPORTAÇÃO	222
7.3.1 Modos de Armazenamento e Transporte no Estado Gasoso.	223
7.3.2 Modos de Armazenamento e Transporte no Estado Líquido	224
7.3.3 Modos de Armazenamento e Transporte sob a Forma de Compostos Intermediários.	224
7.3.4 Custos de Transporte do Hidrogênio	226
7.3.5 Infraestrutura Portuária e os Hubs de Hidrogênio Verde	227
7.4 MERCADO INTERNACIONAL DE HIDROGÊNIO VERDE	228
7.4.1 Países Importadores	230
7.4.2 Países Exportadores	231
7.4.3 Países Autossuficientes	231
7.4.4 Países Líderes em Tecnologia ou em Recursos Financeiros	231
7.4.5 Centros de Importação e Exportação	232
7.5 O BRASIL NO MERCADO INTERNACIONAL DE HIDROGÊNIO.	232
7.6 ANÁLISE DAS ROTAS GLOBAIS DE EXPORTAÇÃO E IMPORTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE	233
7.7 CONDIÇÕES E PADRÕES DE EXPORTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE.	235
7.8 ESTUDO DE CASO: O JAPÃO E O HIDROGÊNIO.	238
7.9 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	239
7.9.1 Perguntas	239
7.9.2 Problemas	240
REFERÊNCIAS	240

CAPÍTULO 8

Mercado Global e Estratégias para o Hidrogênio de Baixo

<i>Carbono (Ana Beatriz Goulart; Samara Calçado; Rafael Capaz)</i>	245
8.1 MERCADO ATUAL DE PRODUÇÃO E USO DE HIDROGÊNIO	245
8.2 INICIATIVAS DE EXPANSÃO DA CADEIA DE HIDROGÊNIO NO MUNDO	250
8.2.1 Mercado Europeu: Políticas, Metas e Investimentos	250
8.2.2 Mercado Americano: Políticas, Metas e Investimentos	253
8.2.3 Mercado Asiático (China e Índia).	256
8.2.4 Mercado Brasileiro	259
8.3 ESTRATÉGIAS GLOBAIS E GEOPOLÍTICA DO HIDROGÊNIO	264
8.3.1 Cooperação e Competição Internacional	264
8.3.2 Oportunidades para Exportação e Acordos Internacionais.	266
8.3.3 Riscos e Desafios Geopolíticos.	268
8.4 ASPECTOS REGULATÓRIOS E CERTIFICAÇÃO DE HIDROGÊNIO	270
8.5 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	272
8.5.1 Perguntas	272
REFERÊNCIAS	274

CAPÍTULO 9

Participação do Hidrogênio Verde na Transição Energética

<i>(Regina Mambeli Barros; Geraldo Lúcio Tiago Filho)</i>	279
9.1 O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA DESCARBONIZAÇÃO	279
9.2 CONTRIBUIÇÃO PARA METAS GLOBAIS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES.	281
9.3 INTEGRAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE EM SETORES INDUSTRIAIS	284
9.4 DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE	284
9.5 TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO.	285
9.6 O HIDROGÊNIO COMO SUBSTITUTO DO GÁS NATURAL E DE OUTROS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	287
9.7 HIDROGÊNIO NA INDÚSTRIA	287
9.7.1 Indústria Química	288
9.7.2 Produção de Aço.	289
9.8 HIDROGÊNIO VERDE E ELETRIFICAÇÃO: COMPLEMENTARIDADE E SINERGIAS.	291
9.9 HIDROGÊNIO COMO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA E BACKUP PARA RENOVÁVEIS	292
9.10 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	295
9.10.1 Perguntas	295

9.11 EXERCÍCIOS RESOLVIDOS	295
9.12 PROBLEMA	297
REFERÊNCIAS	298

CAPÍTULO 10

Aspectos Regulatórios do Uso do Hidrogênio no Brasil

(Geraldo Lúcio Tiago Filho; Carlos Adriano Rosa)	301
10.1 INTRODUÇÃO	301
10.2 MARCOS REGULATÓRIOS DO HIDROGÊNIO NO BRASIL	302
10.3 PROGRAMAS JÁ EXISTENTES PARA USO DO HIDROGÊNIO	303
10.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	305
10.5 DESAFIOS E PERSPECTIVAS	306
10.6 REGULAMENTAÇÃO QUANTO AO TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO	308
10.7 CONCLUSÃO	309
10.8 EXERCÍCIO PROPOSTOS	311
10.8.1 Perguntas	311
REFERÊNCIAS	312

CAPÍTULO 11

Questões Ambientais Relacionadas à Produção, Transporte e

<i>Uso do Hidrogênio (Carlos Adriano Rosa)</i>	315
11.1 INTRODUÇÃO	315
11.2 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE	320
11.3 TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO: DESAFIOS LOGÍSTICOS E TECNOLÓGICOS	333
11.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DO HIDROGÊNIO VERDE	344
11.5 REGULAÇÃO AMBIENTAL E LICENCIAMENTO NO BRASIL	361
11.5.1 A Legislação e o Hidrogênio Verde	361
11.5.2 O Licenciamento Ambiental do Hidrogênio	368
11.5.3 Desafios Regulatórios do Hidrogênio Verde	372
11.6 CONCLUSÃO	375
11.7 EXERCÍCIOS PROPOSTOS	377
11.7.1 Perguntas	377
REFERÊNCIAS	378

CAPÍTULO 12

Estudo de Caso: Dimensionamento de uma Unidade de

<i>Produção de H_2V (Fábio José Horta Nogueira)</i>	385
12.1 INTRODUÇÃO	385

12.2	PREMISSAS INICIAIS	386
12.3	FINALIDADE DA UNIDADE	387
12.4	ESPAÇO NECESSÁRIO E DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.	389
12.5	ABASTECIMENTO DE ÁGUA.	394
12.6	CONSUMO DE ÁGUA.	396
12.7	FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	397
12.8	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	399
12.9	DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO	400
12.10	PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DA UNIDADE DE PRODUÇÃO	403
12.10.1	Sistema de Eletrólise.	404
12.10.2	Compressor	406
12.10.3	Reservatórios de Estocagem	408
12.11	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE VEÍCULOS.	415
12.12	UTILIDADES E SISTEMAS AUXILIARES	421
12.12.1	Ar Comprimido.	421
12.12.2	Nitrogênio.	423
12.12.3	Água de Resfriamento	425
12.13	EXERCÍCIOS PROPOSTOS	428
12.13.1	Perguntas	428
12.13.2	Questão Aberta	430
	REFERÊNCIAS	431

CAPÍTULO 13

O Hidrogênio Verde como Pilar da Nova Era Energética

(Geraldo Lúcio Tiago Filho)	433
13.1 INTRODUÇÃO	433
13.2 O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	433
13.3 DESAFIOS A SUPERAR: ENTRE A TECNOLOGIA E O MERCADO	434
13.4 OPORTUNIDADES PARA O BRASIL	435
13.5 O HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	435
13.6 REFLEXÃO FINAL	435

ANEXO

<i>Respostas das Questões e dos Exercícios Propostos</i>	437
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	437

CAPÍTULO 2 – CONHECENDO OS TIPOS DE HIDROGÊNIO	438
CAPÍTULO 3 – ROTAS TECNOLÓGICAS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE .	439
CAPÍTULO 4 – BALANÇO ENERGÉTICO NA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO	441
CAPÍTULO 5 – APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO VERDE	443
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO HIDROGÊNIO VERDE . . .	446
CAPÍTULO 7 – HIDROGÊNIO VERDE PARA EXPORTAÇÃO	448
CAPÍTULO 8 – MERCADO GLOBAL E ESTRATÉGIAS PARA O HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO	449
CAPÍTULO 9 – PARTICIPAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	450
CAPÍTULO 10 – ASPECTOS REGULATÓRIOS DO USO DO HIDROGÊNIO NO BRASIL . .	453
CAPÍTULO 11 – QUESTÕES AMBIENTAIS RELACIONADAS À PRODUÇÃO, TRANSPORTE E USO DO HIDROGÊNIO	454
CAPÍTULO 12 – ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO DE H ₂ V.	459
<i>Curriculo dos Autores</i>	<i>461</i>