

Elissandro Monteiro do Sacramento

*Um Sistema de Energia a Hidrogênio-
Solar-Eólico para o Estado do Ceará*

FORTALEZA, CE - BRASIL

JULHO DE 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Elissandro Monteiro do Sacramento

*Um Sistema de Energia a Hidrogênio-
Solar-Eólico para o Estado do Ceará*

Dissertação apresentada a Universidade Estadual do Ceará como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Ciências Físicas Aplicadas.

Orientador: Prof. Dr. Lutero C. de Lima.

FORTALEZA - Ce

2007

Um Sistema de Energia a Hidrogênio-Solar-Eólico para o Estado do Ceará.

Elissandro Monteiro do Sacramento

Dissertação de mestrado elaborada na Universidade Estadual do Ceará, defendida e aprovada em 20 de Julho de 2007 pela banca examinadora convidada:

Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima - Orientador

Prof. Dr. Fernando Pinto Ramalho

Dr. Manoel Régis Lima Verde Leal

Aos Meus pais
Maria Eliana Monteiro e
Hilário Moura Sacramento.

Agradecimentos

Ao professor Lutero Carmo de Lima, pela sua atenção e apoio incondicional durante todo o trabalho.

Ao professor Carlos Jacinto de Oliveira pela sua colaboração.

Aos colegas de mestrado Érick Batista de Araújo Castro Cunha, Paulo Henrique de Santiago Maria, Henrique do Nascimento Camelo, Otacílio Leandro, Juliana Oliveira, Gerardo Majela, Luis Sousa e Djalma Gomes pelos bons momentos vivenciados durante todo o curso.

Ao professor Paulo César Marques de Carvalho, pela sua disposição em fornecer dados pertinentes ao trabalho.

Aos professores Alexandre de Araújo Costa, Fernando Pinto Ramalho, João Bosco Verçosa Leal Júnior e Jaidete Monteiro de Souza pelas suas dedicações ao curso.

Ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas, na pessoa do coordenador Francisco Sales Ávila Cavalcante, pelos conhecimentos repassados.

Ao meu primo José Caldas Júnior e aos amigos Fabiano Viana e Renato Martins Leitão, este último pelas proveitosas discussões e constante incentivo para com o caminho que escolhi.

Ao bolsista Rodrigo Alves Patrício, pela ajuda nas construções dos gráficos do trabalho.

"Ninguém chega ao seu céu sem uma luta"

Neil Peart

ÍNDICE GERAL

Resumo.....	VII
Abstract.....	VIII
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tabelas.....	XIV
Lista de Símbolos.....	XV
Capítulo 1 – Introdução	
1.1 - Motivação.....	1
1.2 - Objetivos.....	4
Capítulo 2 – Economia do Hidrogênio	
2.1 - Introdução.....	6
2.2 - Tecnologias de Produção do Hidrogênio.....	7
2.3 - Armazenamento de Hidrogênio.....	13
2.4 - Transporte de Hidrogênio.....	17
2.5 - Hidrogênio Seguro.....	18
2.6 - Equipamentos para Utilização do Hidrogênio.....	19
2.7 - Sistema Híbrido Hidrogênio-Solar-Eólico.....	23
Capítulo 3 – A Matriz Energética Cearense e breves Caracterizações de seus Potenciais Eólico e Solar	
3.1 - O Balanço Energético do Estado do Ceará(BENCE) 2000.....	28
3.2 - Energia e Desenvolvimento.....	29
3.3 - Insumos Energéticos e suas Contribuições na Matriz Energética do Estado do Ceará.....	30
3.3.1 - Petróleo.....	30
3.3.2 - Gás Natural.....	32
3.3.3 - Carvão-Vapor.....	33

3.3.4 - Lenha.....	34
3.3.5 - Óleo Diesel.....	35
3.3.6 - Óleo Combustível.....	36
3.3.7 - Gasolina.....	37
3.3.8 - Gás Liquefeito de Petróleo.....	38
3.3.9 - Álcool Etílico.....	39
3.3.10 - Querosene.....	41
3.3.11 - Eletricidade.....	42
3.3.12 - Carvão Vegetal.....	43
3.4 - Dependência Externa de Energia e os Insumos Óleos Diesel, Óleo Combustível, Gasolina e GLP.....	44
3.5 - Breve Caracterização do Potencial Eólico do Estado do Ceará.....	46
3.6 - Breve Caracterização do Potencial Solar do Estado do Ceará.....	49
Capítulo 4 - Descrição do Modelo Matemático	
4.1 - Introdução.....	52
4.2 - População.....	52
4.3 - Demanda Energética.....	55
4.4 - Produto Interno Bruto.....	57
4.5 - Produção de Hidrogênio.....	58
4.6 - Preços de Energia.....	62
4.7 - Poluição.....	64
4.8 - Qualidade de Vida.....	64

4.9 - Área de Célula Fotovoltaica Requerida e Área Total do Utilizado.....	65
4.10 - Área Total de Células Fotovoltaicas para Produção de Hidrogênio.....	65
4.11 - Capacidade da Usina de Dessalinização da água.....	66
4.12 - Benefícios Ambientais.....	66
4.13 - Economia Devido a Maior Eficiência Obtida com a Utilização de Hidrogênio.....	67
4.14 - Crédito para o Oxigênio.....	67
4.15 - Ganho na Venda de Hidrogênio.....	68
4.16 - Células Fotovoltaicas.....	68
4.17 - Eletrolisador	69
4.18 - Armazenamento e Transmissão de Hidrogênio.....	71
4.19 - Usina de Dessalinização.....	71
4.20 - Custos de Operação e Manutenção(O & M).....	71
4.20.1 - Células Fotovoltaicas.....	71
4.20.2 - Armazenamento e Distribuição.....	72
4.20.3 - Eletrolisadores.....	72
4.20.4 - Usina de Dessalinização.....	72
4.21 - Número de Geradores Eólicos Necessários à Dessalinização da água para Alimentar o Processo de Eletrólise.....	72

Capítulo 5 - Energia do Hidrogênio e a Atmosfera

5.1 - A Atmosfera Terrestre.....	75
5.1.1 - O Ozônio.....	77
5.1.2 - O Gás Carbônico.....	77

5.1.3 - O Óxido de Nitrogênio.....	78
5.1.4 - O Vapor d'água.....	79
5.1.5 - Óxido de Enxofre.....	80
5.1.6 - Monóxido de Carbono.....	81
5.1.7 - Metano.....	81
5.2 - O Efeito Estufa.....	82
5.3 - Mudanças Climáticas.....	83
5.4 - Protocolo de Kyoto.....	86
5.5 - Economia do Hidrogênio e Emissão de Poluentes.....	86
5.6 - Resultados e Análises.....	88
Capítulo 6 - Resultados e Análises.....	92
Capítulo 7 - Conclusões e Propostas para trabalhos Futuros.....	119
Referências Bibliográficas.....	121
Anexo 1.....	128
Anexo 2.....	129
Anexo 3.....	130

SACRAMENTO, E.M., "UM SISTEMA DE ENERGIA A
HIDROGÊNIO-SOLAR-EÓLICO PARA O ESTADO DO CEARÁ"

Resumo

A utilização de combustíveis fósseis tem causado sérios impactos ambientais, principalmente a intensificação do efeito estufa, resultando em céleres mudanças climáticas. A sociedade do hidrogênio é um termo que vem ganhando notoriedade mundial. Isto se deve ao fato de que está cada vez mais dispendioso o processo de obtenção de combustíveis fósseis e que a queima desses combustíveis emite muitos poluentes à atmosfera. Uma série de mudanças climáticas está relacionada diretamente com essas emissões, causando sérios danos à sobrevivência humana. O hidrogênio é classificado como o combustível do futuro, isto se deve ao fato de que sua queima emite pouquíssimas quantidades de poluentes à atmosfera, quando comparada à queima de combustíveis fósseis. Uma opção bastante limpa para obtenção de hidrogênio é a sua produção a partir da utilização de fontes renováveis de energia. Este trabalho apresenta como resultados os comportamentos de algumas variáveis para o Estado do Ceará, tais como população, PIB, razão de poluição, demanda energética, importação de energia, qualidade de vida, dentre outras, a partir de um modelo matemático desenvolvido para um sistema de energia a hidrogênio-solar-eólico. O modelo prevê a produção de hidrogênio a partir da água dessalinizada do mar, sendo que para devida alimentação elétrica do processo total são aproveitadas as fontes renováveis solar e eólica. O hidrogênio produzido será introduzido na matriz energética da região em substituição à utilização de alguns combustíveis fósseis fluidos em três cenários, sendo um de introdução rápida de hidrogênio, outro de introdução lenta de hidrogênio e um terceiro em que não haverá introdução de hidrogênio, seguindo tendências a partir do consumo atual.

Palavras-chaves: Hidrogênio, energia eólica e energia solar.

SACRAMENTO, E.M., " A WIND-SOLAR-HYDROGEN
ENERGY SYSTEM FOR CEARA STATE"Abstract

The utilization of fossil fuels has caused serious environmental impacts , mainly the intensification of the greenhouse effect, resulting in fast climate change. The hydrogen society is a term that has been receiving world notoriety. This is due to the increasing costs of obtaining fossil fuels and the emission of many pollutants to atmosphere, mainly greenhouse gases. A series of climates changes is directly related to these emissions, causing serious risks to the human survival. The hydrogen is called the future fuel, this is due to the fact that it is clean combustion, with no major emission pollutants to atmosphere. A enough clean option to obtain hydrogen is the utilization of renewable sources. This work presents data of the behavior of some variables for the Ceará State, such as population, gross intern product, pollution ratio, energetic demand, energy imports, quality of life, and others, as result of the mathematics model development for a wind-solar-hydrogen energy system. The hydrogen will be produced from the sea desalinization, using solar and wind energies. The produced hydrogen eventually will be introduced in Ceará State through three cenarios, a fast introduction, a slow introduction and no introduction of hydrogen.

Keywords: Hydrogen, Solar Energy, Wind Energy.

Lista de Figuras

1.1 - Layout do Sistema a Hidrogênio-Solar-Eólico.....	4
2.1 - Economia do hidrogênio.....	7
2.2 - Eletrólise padrão.....	8
2.3 - Célula combustível.....	21
3.1 - Esquema de uma torre de fracionamento de petróleo.....	31
3.2 - Evolução temporal da produção e importação total de petróleo.....	32
3.3 - Evolução temporal da produção e consumo total de gás natural no Estado do Ceará.....	33
3.4 - Evolução temporal do consumo total de carvão-vapor.....	34
3.5 - Evolução temporal da produção e consumo total de lenha.....	35
3.6 - Evolução temporal da importação total de óleo diesel.....	36
3.7 - Evolução temporal da produção e consumo total de óleo combustível.....	37
3.8 - Evolução temporal da importação e do consumo total de gasolina.....	38
3.9 - Evolução temporal da produção, importação total e consumo total de GLP.....	39
3.10 - Processos de produção do álcool etílico.....	39
3.11 - Evolução temporal da produção e consumo total de álcool etílico.....	40
3.12 - Evolução temporal do consumo total de querosene.....	41
3.13 - Evolução temporal do consumo total de energia elétrica.....	42
3.14 - Evolução temporal da importação e consumo total de carvão vegetal.....	43
3.15 - Evolução temporal da dependência externa de energia do Estado do Ceará.....	44

3.16 - Evolução temporal do consumo de óleo diesel, óleo combustível e gasolina no setor de transportes.....	45
3.17 - Evolução temporal da participação do óleo diesel, óleo combustível, gasolina e GLP no volume total de importações de energia.....	45
3.18 - Potencial eólico anual do Estado do Ceará a 50m de altura.....	47
3.19 - Direção predominante do vento.....	48
3.20 - Distribuição de frequência da velocidade do vento no litoral cearense a uma altura de 50m para o segundo semestre.....	48
3.21 - Gráfico da energia média diária entre os meses de Abril de 2003 e Março de 2004.....	49
3.22 - Histograma da radiação solar para o mês de Setembro nos anos de 2001 e 2003.....	50
3.23 - Histograma da radiação solar para o mês de Fevereiro nos anos de 2001 e 2004.....	51
5.1 - Perfil vertical médio de temperatura na atmosfera.....	75
5.2 - As camadas atmosféricas e seus constituintes.....	76
5.3 - Emissão de poluentes por um motor de combustão interna de ignição por centelha em função da razão ar/combustível.....	79
5.4 - Curvas de distribuição espectral da irradiância solar, sendo a irradiância observada no topo da atmosfera e irradiância observada ao nível do mar. A área sombreada indica a quantidade de energia absorvida por alguns gases atmosféricos, como o O ₂ , O ₃ , H ₂ O e o CO ₂	80
5.5 - Esquema do efeito estufa.....	82
5.6 - Emissões de dióxido de carbono no Estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.....	87

5.7 - Emissões de metano no Estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.....	88
5.8 - Emissões de óxido de enxofre no Estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.....	88
5.9 - Emissões de óxido de nitrogênio no Estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.....	89
6.1 - Tempo de dobramento da produção de hidrogênio.....	92
6.2 - Projeção da população do Estado do Ceará.....	93
6.3 - Projeção da demanda energética total do Estado do Ceará.....	94
6.4 - Projeção do PIB do Estado do Ceará.....	95
6.5 - Projeções da produção de energia do hidrogênio, demanda de energia fóssil fluida e demanda total de energia para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.....	96
6.6 - Projeções da produção de energia do hidrogênio, demanda de energia fóssil fluida e demanda total de energia para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.....	97
6.7 - Projeção da demanda de energia fóssil fluida.....	98
6.8 - Importação de energia fóssil fluida, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o cenário sem introdução de hidrogênio.....	99
6.9 - Importação de energia fóssil, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.....	100

6.10 - Importação de energia fóssil, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.....	100
6.11 - Projeção da economia ambiental gerada.....	101
6.12 - Projeção para o crédito gerado com a venda de oxigênio.....	102
6.13 - Ganho na venda de hidrogênio.....	102
6.14 - Demanda de água para usina de dessalinização.....	103
6.15 - Quantidade de geradores eólicos requeridos para dessalinização da água do mar.....	104
6.16 - Área requerida para instalação dos módulos solares.....	105
6.17 - Capital requerido para instalação dos módulos fotovoltaicos.....	106
6.18 - Capital requerido para implementação da usina de dessalinização da água do mar.....	107
6.19 - Capital requerido para implementação do sistema de eletrólise da água.....	108
6.20 - Capital requerido para implementação do sistema de armazenamento e distribuição de hidrogênio.....	109
6.21 - Custos de O&M com os módulos fotovoltaicos.....	109
6.22 - Custos de O&M com os geradores eólicos.....	110
6.23 - Custos de O&M com o sistema de armazenamento e distribuição do hidrogênio produzido.....	111
6.24 - Custos de O&M com eletrolizadores requeridos.....	111
6.25 - Razão de poluição.....	112
6.26 - Índice de qualidade de vida.....	113

XIII

6.27 - Custo total do projeto e seu ganho bruto para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.....	114
6.28 - Custo total do projeto e seu ganho bruto para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.....	115
6.29 - Evolução temporal dos preços da gasolina e do hidrogênio para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.....	116
6.30 - Evolução temporal dos preços da gasolina e do hidrogênio para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.....	116
6.31 - Economia devido à melhor eficiência de conversão do hidrogênio.....	117

Lista de Tabelas

2.1 - Principais tecnologias desenvolvidas de células combustíveis e suas diferenças.....	22
4.1 - Custos de armazenamento e distribuição de hidrogênio.....	70
4.2 - Dados relativos ao funcionamento do gerador eólico E-70 da empresa ENERCON.....	73
5.1 - Alguns gases de efeito estufa e suas vidas médias na atmosfera.....	81
5.2 - Poder de Aquecimento Global para o CO ₂ , CH ₄ e o NO _x	84
5.3 - Fatores de emissão a gases de efeito estufa.....	85
5.4 - Valores médios para os fatores de emissão do CO ₂ , CH ₄ , SO _x e NO _x	85

Lista de Símbolos

A, a - Constantes Adimensionais;

A_{cn} - Área Total de Células fotovoltaicas;

A_{hn} - Área Total de Células Fotovoltaicas para Produção de Hidrogênio;

A_{pn} - Área Total de Projeto;

B_{wn} - Energia Elétrica Total requerida no ano tn ;

B, b - Constantes Adimensionais;

CAER - Custos com Geradores Eólicos;

CC - Custo de Células Fotovoltaicas por Unidade de Área;

C_{dn} - Custo Total da Usina de Dessalinização;

C_{eln} - Capital Requerido com Eletrolizadores;

C_{fn}, C_{rfn} - Preços dos Combustíveis Fósseis e sua Razão de Preços, respectivamente;

C_{hn}, C_{rhn} - Preços do Hidrogênio e sua Razão de Preços, respectivamente;

C_p - Custos de Danos Ambientais por Unidade de Energia Fóssil consumida;

C_o - Crédito para o Oxigênio por GJ de Hidrogênio produzido;

COMA - Custos de O&M com Geradores Eólicos;

C_{sn} - Capital Total Requerido para Armazenamento e Distribuição do Hidrogênio
Produzido;

$C1, C2$ - Constantes Independentes;

$C3$ - Custo de Armazenamento e Distribuição do Hidrogênio produzido.

$C4$ - Capital Necessário para Usina de Dessalinização;

$C5$ - Custo de O&M por m^2 de célula fotovoltaica;

$C6$ - Custo de O&M com eletrolizadores por GJ de hidrogênio produzido;

$C7$ - Custo de O&M para armazenamento e distribuição de hidrogênio;

$C8$ - Custo de O&M com Usina de Dessalinização da água do mar por m^3 de água;

D_{en} - Custo dos Danos Ambientais;

D_{hn} - Custo causado pelo Hidrogênio e pelos combustíveis fósseis ao ambiente;

EE_n - Demanda de Energia em Atividades que Necessitam de Combustíveis Fósseis;

E_n - Demanda de Energia do Estado do Ceará no ano t_n ;

E_0 - Demanda inicial de Energia;

E_1 - Consumo de Energia da Usina de Dessalinização em GJ/m^3 ;

F_{dn} , F_{in} , F_{pn} - Demanda, importação e produção de combustíveis fósseis;

GER - Número de Geradores Elétricos Requeridos para Dessalinização da água.

G_n - Produto Interno Bruto(PIB) do Estado do Ceará no ano t_n ;

G_0 - PIB para o ano inicial;

H_n - Produção de Hidrogênio no ano t_n ;

I_{hn} - Renda anual devido à venda de Hidrogênio;

L_{rn} - Indicador de Qualidade de Vida;

n - Índice de Tempo;

O_{eln} - Custo Total de O&M do eletrolizador no ano t_n ;

O_{dn} - Custo Total de O&M da Usina de Dessalinização no ano t_n ;

O_{pvn} - Custo Total de O&M com Módulos Fotovoltaicos no ano t_n ;

O_{sn} - Custo Total de O&M para armazenamento e Distribuição de Hidrogênio;

P_n , P_{rn} - Poluição e Razão de Poluição;

Q_n - População do Estado do Ceará no ano t_n ;

Q_0 - População inicial do Estado do Ceará;

R_n - Reservas de combustíveis fósseis no ano t_n ;

R_0 - Reservas no ano inicial;

S_{av} - Média anual de irradiância solar;

S_{on} - Ganho na venda de Oxigênio;

S_{un} - Economia Devido a Maior Eficiência de Utilização do Hidrogênio;

TCPV - Capital total requerido para Células Fotovoltaicas;

t_n - ano;

t_0 - Tempo inicial;

U - Poluição por unidade de energia fóssil consumida, em kg/GJ;

V_q, V_e, V_g - Modificadores adimensionais dos tempos de dobramento do crescimento populacional, demanda de energia e PIB;

v, x e y - expoentes;

W_{dn} - Demanda Total de água no ano t_n ;

W_n - Modificador de crescimento populacional;

W_1 - Consumo de água no sistema de eletrólise por GJ de Hidrogênio produzido;

z - expoente.

LETRAS GREGAS

β - Coeficiente que acrescenta à área dos módulos fotovoltaicos o espaçamento entre os mesmos;

δ - Espaçamento para vias de acesso;

Δt - Variação de tempo;

γ_{fn}, γ_{hm} - Fração de consumo de combustíveis fósseis e energia do hidrogênio;

ε - Razão entre a poluição produzida por um sistema a hidrogênio por unidade de energia consumida e a poluição produzida por um sistema a combustíveis fósseis por unidade de energia;

θ_e - Tempo de dobramento para o crescimento do padrão de vida da população;

θ_q - Tempo de dobramento para o crescimento populacional;

XVIII

θ_{et} - Tempo de dobramento para o crescimento da demanda de energia;

θ_g - Tempo de dobramento para o crescimento do PIB devido aos avanços tecnológicos;

θ_{gt} - Tempo de dobramento para o crescimento do PIB total;

η_{el} - Eficiência do eletrolizador;

η_{pv} - Eficiência do sistema fotovoltaico;

η_r - Razão de eficiência de utilização de hidrogênio em relação aos combustíveis fósseis;

η_{re} - Eficiência do retificador;

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

As diversas fontes energéticas constituem um papel fundamental na construção de uma sociedade moderna, colaborando para amenizar determinadas tarefas que, outrora, exibiriam grandes dificuldades para serem realizadas. A qualidade de vida da população de uma região está diretamente relacionada com seus níveis de consumo energéticos, bem como à qualidade de conversão das várias fontes de energia ofertadas e como elas estão distribuídas na matriz energética deste local. Saúde e bem-estar físicos são fatores determinantes na devida análise dos padrões de vida dos indivíduos residentes em uma localidade.

O impacto ambiental gerado por uma economia baseada na queima de combustíveis fósseis influencia diretamente no aumento gradual da poluição atmosférica, concomitantemente aos mais variados efeitos ambientais adversos. Isso tem conduzido a intensificação do efeito estufa, este último que representa a absorção e reemissão da radiação de ondas longas para a superfície terrestre, o que tem gerado mudanças climáticas nocivas à sobrevivência humana.

A busca incessante pelo petróleo tem causado uma série de conflitos entre nações no mundo inteiro. As reservas deste insumo energético em alguns países estão bastante comprometidas, estimulando desta forma que os mesmos procurem, algumas vezes de maneira não passiva, adquiri-lo em outras regiões.

As dificuldades cada vez mais crescentes na produção de petróleo mundial, juntamente com o célere aumento na demanda por este insumo, têm conduzido a elevações freqüentes na cotação internacional do barril de petróleo. Este fato, associado ao desenvolvimento da tecnologia no aproveitamento energético de fontes renováveis, resulta em utilizações cada vez mais viáveis destas fontes alternativas.

O estado do Ceará importa grandes quantidades dos combustíveis fósseis consumidos em seu território, deixando o mesmo refém do mercado internacional do petróleo. Porém, com a elaboração do mapa eólico, juntamente com estudos para análise

do potencial solarimétrico, ficaram evidenciadas as elevadas capacidades de aproveitamento destas fontes de energia nesta região. Este fato tem elevada importância, pois proporciona um potencial para alcançar a independência energética da região, já que a mesma importa elevadas quantidades de energia, principalmente a elétrica. Porém, essas fontes renováveis possuem características intermitentes, ou seja, sofrem uma variabilidade sazonal.

O setor da sociedade, no estado do Ceará, que se configura como o maior consumidor de combustíveis fósseis é o de transportes. Diariamente grandes quantidades em volume de derivados do petróleo, como o óleo diesel, óleo combustível e a gasolina, são consumidos pelos diversos tipos de meio de transportes. Isto leva a uma dependência econômica fortíssima, associada a elevadas emissões de poluentes a atmosfera.

Neste contexto, de busca por aproveitamento de energéticos não convencionais para devida intensificação da matriz energética do estado do Ceará, o hidrogênio eventualmente constitui um excelente vetor energético, pois

- o mesmo pode ser convertido em eletricidade ou vice-versa com eficiências relativamente altas;
- o Ceará possui um litoral de aproximadamente 573 km, proporcionando uma grande disponibilidade de uma das matérias-primas para produção de hidrogênio, a água;
- geograficamente o estado do Ceará encontra-se em posição privilegiada, oferecendo maiores facilidades para escoamento do produto hidrogênio gerado, já que o mesmo pode ser armazenado nas formas líquida, sólida e gasosa;
- pode-se aproveitar a infra-estrutura já existente de distribuição de gás natural para devida entrega do hidrogênio gasoso ao consumidor final;
- o hidrogênio, quando de sua combustão, é ambientalmente limpo, ou seja, não proporciona emissão de gases de efeito estufa.

A disponibilidade de recursos financeiros na área de infra-estrutura tende a ser incrementado, a fim de proporcionar o crescimento econômico da região. O PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) prevê investimentos para devida diversificação da matriz energética brasileira. O estado do Ceará encontra-se numa posição privilegiada, pois são previstas no programa a construção de vários parques eólicos neste local, contribuindo para devida emancipação energética deste local.

Neste trabalho é proposto a utilização do hidrogênio obtido a partir da eletrólise de água dessalinizada do mar como substitutivo aos combustíveis fósseis fluidos óleo diesel, óleo combustível, gasolina e gás liquefeito de petróleo(GLP). Seriam previstas as construções de um parque eólico, juntamente com uma planta de dessalinização e eletrólise para devido tratamento da água do mar e produção de hidrogênio, no litoral desta região, aproveitando de seu potencial eólico e sua disponibilidade de água do mar. O processo de dessalinização proposto é a osmose reversa, que consiste na passagem da água salobra por meio de membranas, resultando em água dessalinizada e rejeito. A energia elétrica requerida para dessalinização será fornecida pelo parque eólico.

A eletrólise seria realizada por meio de eletrolizadores ali instalados, produzindo hidrogênio e oxigênio, tendo este último valor de mercado. De acordo com o anexo 2 esta é uma região bastante afetada pelo clima semi-árido, não propício a atividade agrícola, sendo um dos fatores do êxodo rural sofrido nesta região. Para aproveitar esta área desabitada, é prevista a instalação de painéis fotovoltaicos para devida geração de energia elétrica, sendo esta última transmitida pelas linhas de transmissão da concessionária local, a fim de alimentarem os eletrolizadores.

A inserção do hidrogênio na matriz energética do estado do Ceará, em substituição aos combustíveis fósseis fluidos, ocorrerá em três cenários diferentes, que são um considerando uma introdução mais célere de hidrogênio(introdução rápida), outro de introdução mais lentamente(introdução lenta) e um terceiro no qual o hidrogênio não será inserido, seguindo as tendências atuais de consumo dos derivados do petróleo.

A figura 1.1 mostra o layout do sistema a hidrogênio-solar-eólico proposto neste trabalho.

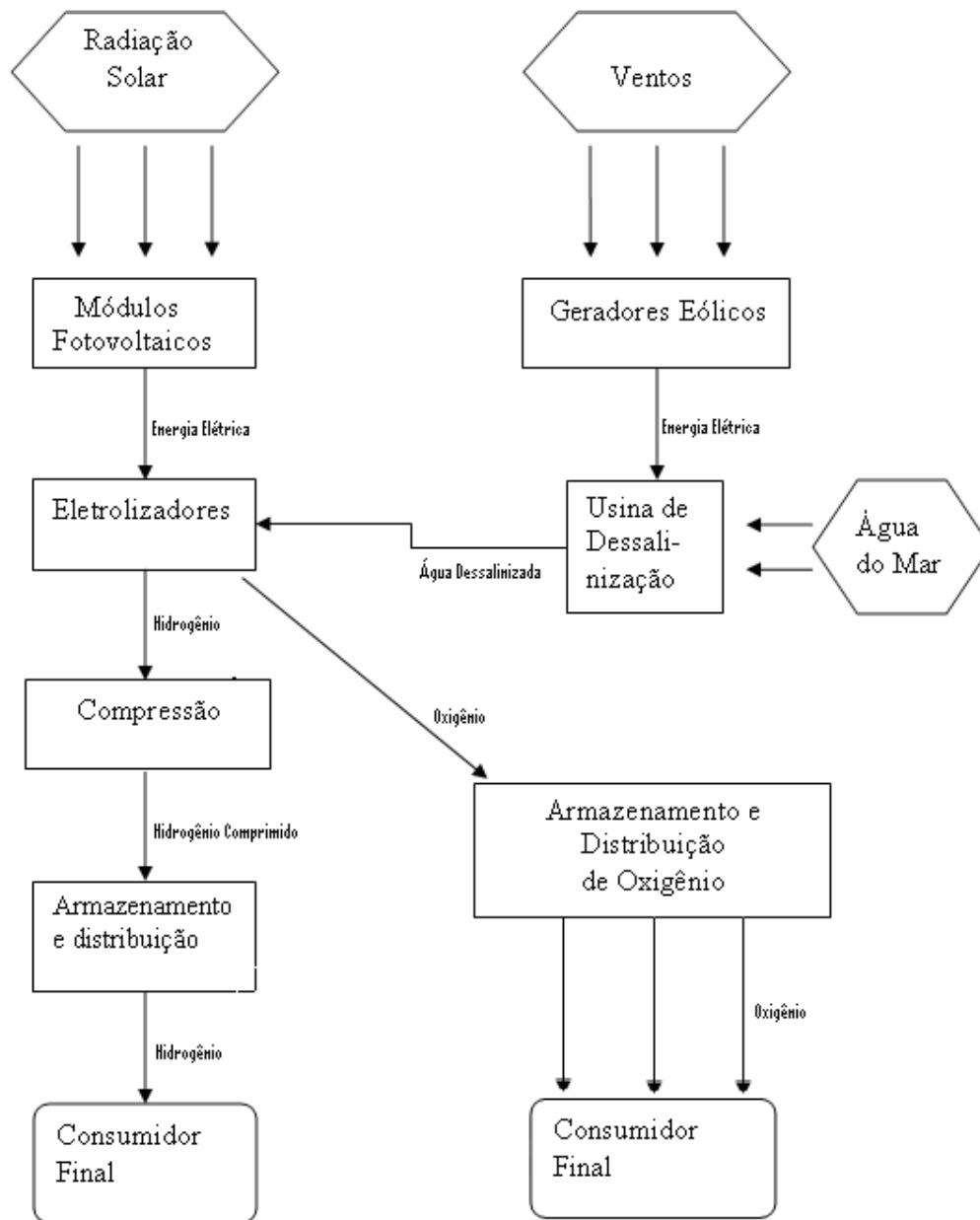


Fig. 1.1 - Layout do Sistema a Hidrogênio-Solar-Eólico.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho é realizar um estudo para devida avaliação da viabilidade da implantação de um sistema a hidrogênio-solar-eólico no estado do Ceará, estimando:

- Quais seriam os efeitos na evolução do PIB no estado do Ceará em decorrência desta introdução do hidrogênio na matriz energética do estado,

avaliando quais seriam os ganhos com a venda de oxigênio e hidrogênio gerados a partir da eletrólise de água do mar dessalinizada;

- A projeção da demanda total de energia e demanda de energia fóssil;
- A demanda de energia importada e a produção de combustíveis fósseis;
- A projeção de hidrogênio;
- A evolução dos preços dos combustíveis fósseis e do hidrogênio;
- O efeito da introdução de hidrogênio na demanda de combustíveis fósseis;
- A economia devido a melhor eficiência na utilização de hidrogênio;
- A economia ambiental;
- A demanda de água para dessalinização;
- O capital necessário para instalação da infra-estrutura para devida conversão de energia solar e eólica;
- Os custos de operação e manutenção dos equipamentos de conversão de energia solar, energia eólica e obtenção de hidrogênio;
- A mitigação da poluição;
- A qualidade de vida;

Capítulo 2

Economia do Hidrogênio

2.1 Introdução

A crescente demanda energética mundial, juntamente com a limitação na produção de petróleo, tem levado a uma busca por novas fontes alternativas de energia, como a solar, eólica, as PCH's (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e a biomassa. Os custos para implantação de tecnologias para o devido aproveitamento dessas fontes ainda são altos, relativamente aos dos combustíveis fósseis, mas espera-se uma viabilidade destas em virtude dos aumentos dos preços da energia produzida a partir de insumos fósseis.

O nordeste brasileiro possui um elevado potencial para produção de energia a partir das fontes eólica e solar, isso comprovado por atlas eólicos e solarimétricos de alguns estados dessa região. Sabe-se, porém, que estas são fontes de energia intermitentes, ou seja, possuem uma variabilidade sazonal em suas saídas de energia. Assim, a necessidade para armazenamento de energia se faz necessária. Uma alternativa a esse problema seria a utilização do hidrogênio como um vetor energético, onde o mesmo proporcionaria um acúmulo de energia produzida em períodos de baixas demandas. Faz-se necessário ressaltar que o hidrogênio não é uma fonte de energia, ou seja, ele não é encontrado em minas ou jazidas, nem produzido, pelo menos em grandes quantidades, através de processos naturais espontâneos.

Conforme Sherif et al. [72], o hidrogênio apresenta algumas características as quais o torna um vetor energético ideal, ou seja:

- o hidrogênio pode ser produzido e convertido em eletricidade numa eficiência relativamente alta;
- uma das matérias primas para a produção de hidrogênio é água, disponível em abundância;
- o hidrogênio pode ser armazenado nas formas líquida, gasosa ou sólida;

- pode ser transportado por grandes distâncias pelo uso de gasodutos, navios-tanques ou em veículos ferroviários e rodoviários;
- o hidrogênio como vetor energético é compatível com o meio ambiente.

A figura 2.1 apresenta um esquema de uma economia baseada na produção e consumo de hidrogênio em substituição aos combustíveis fósseis. O hidrogênio seria produzido a partir de processos envolvendo as várias fontes de energia que compõem a matriz energética de uma dada região. Sua utilização ocorreria principalmente nos setores de transportes e geração de energia.

Neste capítulo é feita uma revisão do estado da arte da tecnologia de produção do hidrogênio a partir de energia solar e eólica, visando com isto, uma avaliação das possíveis alternativas para o aproveitamento dos recursos energéticos solar e eólico do estado do Ceará.

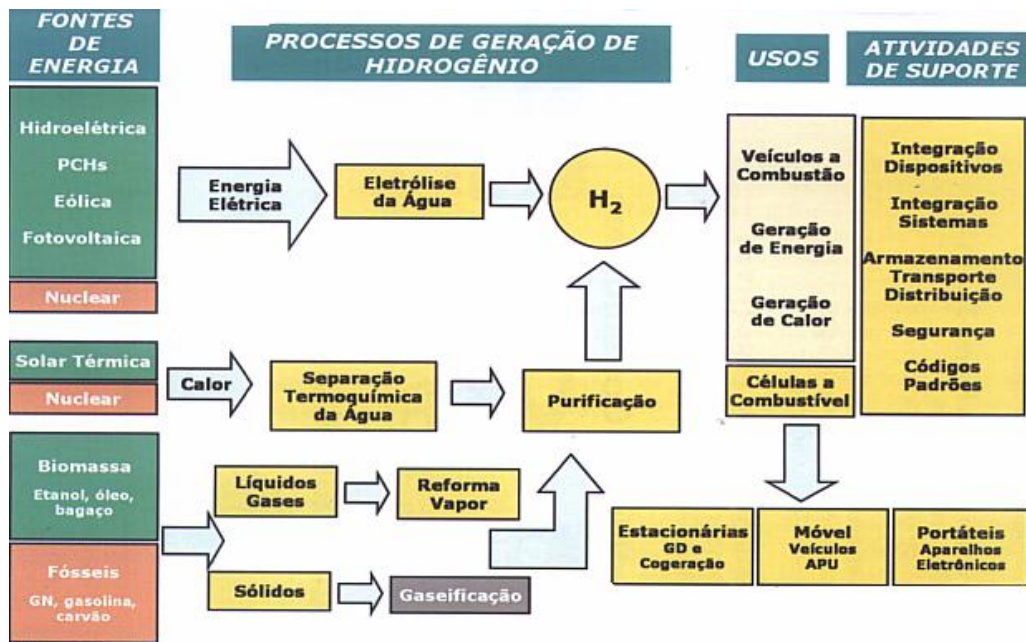


Fig. 2.1 - Economia do hidrogênio (Capaz, 2006).

2.2 Tecnologias de Produção do Hidrogênio

A produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água é, em princípio, bem simples. Este é um processo no qual eletricidade é requerida para decompor a água em

seus constituintes básicos, oxigênio e hidrogênio. Na eletrólise, dois eletrodos, sendo um carregado positivamente e o outro negativamente, são dispostos em uma solução de água com um eletrólito (solução iônica). Uma corrente DC é aplicada à célula eletrolítica, resultando na liberação de hidrogênio no cátodo (eletrodo carregado negativamente) e de oxigênio no ânodo (eletrodo carregado positivamente).

Fisicamente, os eletrolisadores consistem em pequenas células eletrolíticas conectadas entre si. Em relação à disposição dos eletrodos, os eletrolisadores podem ser classificados como unipolar (tipo tanque), em que os eletrodos estão conectados em paralelo, e o bipolar (tipo prensa), em que os eletrodos estão conectados em série. A figura 2.2 mostra um esquema padrão para eletrólise.

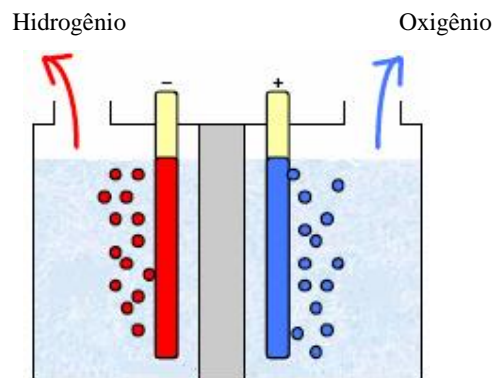


Fig. 2.2 - Eletrólise padrão (Dutton, 2002)

A célula tipo tanque é mais simples, resistente e, pelas suas características físicas, são mais fáceis de serem isoladas para manutenção. Todavia, elas requerem elevados níveis de corrente e baixos níveis de tensão, elevando os custos com materiais para o processo de retificação do sinal de corrente [61]. A célula tipo prensa é mais compacta, diminuindo assim o caminho a ser percorrido pela corrente elétrica em fios e eletrodos, reduzindo as perdas devido à resistência ôhmica interna do eletrólito, incrementando a eficiência do eletrolisador, podendo o mesmo trabalhar com elevadas densidades de corrente, temperaturas e pressões. Há algumas desvantagens dessas células, como o surgimento de correntes parasitas que podem causar problemas de corrosão, além dos custos de fabricação elevados devido à sua "compactância", resultando em altas pressões de trabalho [80]. Na célula unipolar os eletrodos encontram-se separados a uma certa distância um do outro. No bipolar, os eletrodos encontram-se separados

apenas por um insulador, ou seja, eletrodo positivo de um lado e o outro negativo do outro. Dependendo da utilização, pode-se escolher dentre os dois tipos básicos.

Como a água é um condutor iônico muito pobre, ela necessita de uma outra substância para aumentar sua condutividade. Assim, na eletrólise alcalina, o eletrólito utilizado é o hidróxido de potássio (KOH), numa concentração de 25-30% da massa de água, dado a sua boa condutividade e uma notável resistência à corrosão do ferro inoxidável nessa concentração, material esse utilizado na fabricação de eletrolisadores [60]. Esses tipos de eletrolisadores operam numa faixa de temperatura de 70-100°C, sob pressão de 1-30 bar. Átomos de hidrogênio juntam-se em pares na superfície do cátodo para formar moléculas de hidrogênio, as quais deixam o eletrodo sob a forma de gás. Na ocorrência da eletrólise alcalina da água, íons OH^- migram continuamente do cátodo para o ânodo. Para que não ocorra uma eventual mistura entre moléculas de oxigênio e hidrogênio, uma membrana permeável (ou diafragma) à passagem de íons é colocada entre as câmaras que contêm os eletrodos. Revestimentos catalíticos são aplicados às superfícies dos eletrodos. Sem esses revestimentos catalíticos a concentração de átomos de hidrogênio sobre os eletrodos poderia aumentar, reduzindo assim o fluxo de corrente, diminuindo a produção de gás hidrogênio. Esses revestimentos aumentam a cinética de reação nos eletrodos, diminuindo assim as probabilidades de ocorrência de sobretensões nas células.

Membranas poliméricas sólidas podem ser utilizadas como eletrólitos em alguns tipos de eletrolisadores. São utilizadas membranas ácidas que possuem uma alta condutividade à prótons e uma muito baixa condutividade eletrônica, ou seja, ela é permeável à passagem de prótons e não permite a passagem de elétrons. A membrana que constitui o eletrólito é composta de teflon sulfurizado com ácido sulfônico (HSO_3). Este HSO_3 é uma substância hidrofílica. Este ocasiona uma hidratação da membrana e um acúmulo de íons H^+ . Esses íons atravessam a membrana, já que a mesma é permeável à passagem de prótons, e carregam consigo moléculas de água, originando os íons H_3O^+ . Os eletrodos são constituídos de carbono e platina (a qual exerce a função catalisadora), estando presos à membrana eletrólita. A quantidade de platina a ser utilizada, tanto no ânodo quanto no cátodo, está diminuindo com o passar do tempo, pois novas tecnologias desenvolvidas na área de células poliméricas tem proporcionado essa redução. Apesar de possuírem custos mais elevados, eletrolisadores poliméricos trabalham com maiores densidades de correntes em relação aos eletrolisadores alcalinos. Assim, uma área menor será requerida para uma mesma razão de produção de

hidrogênio em uma eficiência relativamente alta. Os eletrolisadores poliméricos também trabalham a pressões mais elevadas.

Alguns tipos de eletrolisadores trabalham a temperaturas bem mais elevadas do que os eletrolisadores alcalinos e os poliméricos. Estes são constituídos por um eletrólito de material cerâmico permeável à íons oxigênio. Essa alta temperatura é requerida para que a cerâmica ofereça uma boa condutividade iônica. Os íons de oxigênio dirigem-se do cátodo para o ânodo por meio da membrana, fazendo com que os elétrons movimentem-se através de um circuito externo em sentido contrário. O eletrólito cerâmico também age como um separador de gás. Água sob a forma de vapor alimenta a câmara que contém o cátodo, suas moléculas juntam-se aos elétrons contidos nessa região, formando íons de oxigênio e hidrogênio. Os íons de oxigênio passarão por meio do eletrólito cerâmico, já que o mesmo é permeável à esses íons, em direção à câmara que contém o ânodo, onde liberarão elétrons e juntarão a um outro átomo para formar uma molécula de oxigênio.

Sistemas fotoquímicos são aqueles em que a luz solar é absorvida por moléculas isoladas em solução. Estes podem ser utilizados para produzir hidrogênio. Para que a reação de separação da água em moléculas de hidrogênio e oxigênio ocorra é necessário uma dada quantidade de energia. Como a água absorve radiação solar apenas referente ao infravermelho, esta torna-se insuficiente para estimular a reação. Assim, alguns elementos são adicionados ao sistema, os chamados sensibilizadores, que podem ser uma molécula ou um semicondutor, os quais possam absorver radiação solar e estimular a ocorrência de reações que gerem hidrogênio e oxigênio a partir da água [11]. Porém esses processos de produção fotoquímica de hidrogênio possuem rendimentos muito baixos, menores que 10%. Estes sistemas possuem algumas desvantagens, como uma eficiência quântica para reações de fotodegradações, que destroem o fotosensibilizador, menores do que 10^{-6} , sendo uma característica bem severa; ocorrência de reações colaterais degradativas; custos adicionais para separar os gases hidrogênio e oxigênio produzidos [11].

Na produção fotoeletroquímica de hidrogênio, células eletroquímicas são utilizadas para produção de hidrogênio. Os rendimentos destes tipos de células são mais baixos do que os das células fotovoltaicas. Porém, as mesmas não utilizam uma junção semicondutor/semicondutor, mas uma junção é formada espontaneamente em uma interface semicondutor/eletrólito. As desvantagens das células fotoeletroquímicas, em relação às fotovoltaicas, são seus menores rendimentos em relação à estas últimas e uma

eventual exibição de fotocorrosão, causando uma degradação dos fotoeletrodos ativos [11].

A produção fotobiológica de hidrogênio é uma alternativa desenvolvida em laboratórios. Há três métodos básicos para produção de hidrogênio a partir de processos biológicos, que são através da fotossíntese (o qual utiliza algas verdes e cianobactérias, na fotólise, e as bactérias fotossintetizantes, na fotodecomposição de compostos orgânicos), através da fermentação (fermentação de compostos orgânicos) e por meio de sistemas híbridos (bactérias fermentativas, juntamente com as fotossintetizantes) [11]. As bactérias fermentativas degradam substratos orgânicos e liberam moléculas de dióxido de carbono e de hidrogênio durante o processo fermentativo. Elas utilizam-se de enzimas como a nitrogenase, a Fe-hidrogenase e a NiFe hidrogenase para catalização das reações químicas durante a produção de hidrogênio. As reações químicas que geram hidrogênio ocorrem como forma de dissipar elétrons contidos nas células e também para que haja um incremento na energia para o metabolismo celular [10]. Os processos de fotossíntese de plantas e algas resultam na quebra da molécula de água para produção de carboidratos ou hidrogênio. Nas plantas verdes somente ocorre redução de dióxido de carbono, pois as mesmas são desprovidas da enzima hidrogenase, a qual é responsável pela produção de hidrogênio. Porém, as microalgas, tanto as eucariontes quanto as procariontes possuem essas enzimas, produzindo, em sua fotossíntese, sob certas condições, hidrogênio.

Há dois tipos básicos de fotólise: a biofotólise direta e a indireta. Na direta, ocorre formação de hidrogênio com um agravante, que é a sensibilidade da enzima hidrogenase e da reação de biofotólise direta ao oxigênio. Como há, naturalmente como produto das reações, liberação de oxigênio, isso pode causar uma inibição à formação de hidrogênio. Assim, estudos na direção de como superar essa sensibilidade ao oxigênio tem ganhado interesse por parte de alguns cientistas. As cianobactérias produzem hidrogênio e oxigênio através da biofotólise indireta da água. Neste processo três enzimas são utilizadas, que são a nitrogenase, a hidrogenase de assimilação e a hidrogenase bidirecional. A nitrogenase e a hidrogenase bidirecional são muito sensíveis ao oxigênio, comprometendo assim a produção de hidrogênio [10]. A eficiência de conversão da energia solar em energia química, na prática, por alguns seres clorofilados como a grande maioria das espécies vegetais, seria de 1%. No entanto, alguns organismos fotossintéticos, como as microalgas, podem armazenar, sob a forma de energia química, 22% da energia solar que sobre elas incidem [11]. Os custos para

produção de hidrogênio biológico foram estimados como sendo o dobro daqueles se o hidrogênio fosse produzido por meio de eletrólise utilizando células fotovoltaicas. O rendimento máximo atingido para produção de hidrogênio biológico foram da ordem de 10% , menor que os 13% para o processo de eletrólise com células fotovoltaicas [11].

A produção de hidrogênio a partir da gaseificação de carvão representa 18% da produção total deste produto no mundo [23]. Os vários tipos de carvão podem reagir com alguns elementos, tais como o oxigênio e o hidrogênio, e produzir certas misturas compostas por monóxidos de carbono, dióxidos de carbono, hidrogênio e metano; sendo assim, um método para obtenção de hidrogênio. Neste método, inicialmente carvão é transformado em uma pasta fluida pelo trituração do mesmo em um pó fino e misturado com água. Então esta pasta fluida é gaseificada com oxigênio puro. O gás formado é então resfriado, misturado à água para remoção de cinzas, antes de passar pelos ciclos de obtenção do hidrogênio [88]. Para a obtenção do produto final, hidrogênio, várias reações intermediárias são processadas. A complexidade deste processo está relacionada com o desconhecimento de parte destas reações. As várias reações dependerão diretamente do reagente injetado junto ao carvão, que influenciará a composição do gás resultante. Como este estudo focaliza-se no hidrogênio como produto final, é interessante que o processo de gaseificação apresente um alto teor deste gás, atentando-se sempre aos custos e à operacionalidade destes sistemas. Uma peça fundamental neste processo é o gaseificador, que será escolhido de acordo com o percentual de hidrogênio contido no gás resultante, os gases produzidos e os tipos de carvão a serem utilizados. A gaseificação do carvão representa custos maiores do que a reforma-vapor do metano [85]. Este processo consiste em submeter o hidrocarboneto vaporizado à altas temperaturas, utilizando assim calor para separar átomos de hidrogênio do átomo de carbono no metano. Superfícies catalíticas, como níquel e platina são utilizadas nas reações. A reforma do gás natural é uma das formas mais utilizadas hoje para obtenção de hidrogênio. Como a reforma-vapor transforma moléculas estáveis em reativas, este é um processo endotérmico, com uma $H = 225,4$ kJ/mol [66].

Sistemas para reforma-vapor de gás natural modernos possuem tubulações de gás natural seguidas por um reator e um equipamento PSA (Pressure Swing Adsorption) onde ocorrerá a purificação do produto final (hidrogênio). As tubulações para reforma-vapor encontram-se no interior de fornalhas, por meio das quais calor será fornecido para que o processo ocorra. Então, serão esperadas elevadas tensões térmicas sobre o

material dos tubos. Esse é um fator bastante relevante quando da escolha do tipo de material para compor as tubulações. Normalmente são feitas de tubos de ferro, tendo catalisadores em seu interior, com diâmetros na faixa de 70-160 mm, com espessuras de 10-20 mm [66]. Após a reação de substituição, um sistema PSA é utilizado para devida purificação do produto final. Tem-se obtido um grau de pureza para o hidrogênio em torno de 99,9%. As desvantagens deste processo são a poluição gerada, pois dióxido de carbono é emitido à atmosfera, e os elevados custos da energia produzida a partir do hidrogênio gerado em comparação à que seria obtida a partir da queima direta do metano. Este é um meio bastante utilizado devido aos seus baixos custos relativos em relação à outros.

2.3 Armazenamento de Hidrogênio

O gás hidrogênio possui baixa densidade volumétrica. Sendo assim, todos os processos para armazenamento do mesmo implica em reduzir seu volume ocupado por unidade de massa. Desta maneira, pode-se aumentar a densidade volumétrica do hidrogênio por meio de três processos, que são: a realização de trabalho sobre o mesmo, com a finalidade de comprimí-lo; redução de sua temperatura à uma abaixo da crítica; e, por fim, a redução da repulsão intermolecular pela adição de um outro material ao hidrogênio [92].

Análises de duas variáveis são importantíssimas quando o armazenamento de hidrogênio é estudado. São elas a densidade de energia volumétrica, que é a relação entre a quantidade de energia disponível (E) por unidade de volume (V), e a densidade de energia gravimétrica, que é a quantidade de energia disponível (E) por unidade de massa do sistema (m). O hidrogênio sob a forma de vapor pode ser armazenado em gasômetros, cilindros, gasodutos e em locais subterrâneos.

Gasômetros são reservatórios para gás que contém volume variável. Sua estrutura interna é composta por dois cilindros, um menor e outro maior, de forma que quando há entrada de gás no mesmo, seu volume interno aumenta, do contrário, na saída de gás, seu volume interno diminui. Há um fluido disposto entre os cilindros de forma que o confinamento total do gás está assegurado dentro do gasômetro [19]. A utilização de gasômetros se dá quando da necessidade de armazenamento em grandes quantidades, sendo muito utilizado em refinarias.

Para o caso da utilização de cilindros, o hidrogênio armazenado é previamente pressurizado por um compressor (valores que podem chegar até a aproximadamente 200 atm), resultando numa maior densidade de energia volumétrica armazenada. A densidade de energia gravimétrica, para armazenamento em cilindros de alta pressão, sofrerá uma redução quando do incremento da mesma. Isto é expresso na equação [91]:

$$\frac{e}{d} = \frac{\Delta p}{2\sigma + \Delta p} \quad (2.1)$$

onde e representa a espessura da parede do cilindro, d o diâmetro externo do cilindro, Δp a variação na pressão interna do gás e σ a dureza do material. Assim, um aumento desejado na densidade de energia volumétrica implica uma redução na densidade de energia gravimétrica. Uma desvantagem da utilização deste equipamento é o uso de um compressor, o qual consumirá parte da energia total estocada.

Os gasodutos têm como função principal transportar hidrogênio de um local à outro. Porém, quando o ponto consumidor não solicitar hidrogênio, o mesmo encontra-se armazenado no interior destes dutos. Ressaltando que o hidrogênio é previamente pressurizado antes de entrar nos dutos. As desvantagens da utilização de gasodutos estão nas probabilidades de vazamentos nas juntas e uniões, bem como a utilização de compressores para pressurizar o hidrogênio. Problemas relacionados com o desgaste podem ocorrer com o material da tubulação se não houver uma atenção especial com os níveis de pressão e temperatura do hidrogênio.

Outro método utilizado é o armazenamento de grandes quantidades de hidrogênio em minas de sal, ou aquelas construídas pelo homem, cavernas e aquíferos. Este é um tipo não muito comum para armazenamento de hidrogênio, visto que depende muito das condições geográficas de cada região. Alguns procedimentos devem ser tomados para reduzir perdas de gás, já que o hidrogênio tem um alto coeficiente de difusibilidade. No caso de armazenamento de hidrogênio em cavernas, pressões variando numa faixa de 80 à 160 bar são encontradas. A densidade volumétrica de energia varia de 250 à 465 kWh/m³. As perdas referentes à vazamentos em cavernas e minas giram em torno de 1 à 3% do volume total de hidrogênio por ano [72].

O hidrogênio somente é encontrado na forma líquida em temperaturas abaixo de sua temperatura crítica, aproximadamente 33K (-243°C), sob pressão ambiente. Normalmente o hidrogênio líquido é armazenado em temperatura da ordem de 21,2K. A

densidade do hidrogênio líquido é de $70,8 \text{ kg/m}^3$ [92]. Em relação às direções dos spins dos elétrons e núcleos de uma molécula de hidrogênio, podemos classificar o mesmo em para-hidrogênio ou orto-hidrogênio. O hidrogênio normal, em temperatura ambiente, é constituído de 25% da forma para- e 75% da forma orto-hidrogênio. Estas formas possuem uma suave diferença em seus níveis energéticos, resultando em diferentes propriedades físicas. Para liquefazer o gás hidrogênio é necessário a passagem de orto-hidrogênio à para-hidrogênio. A reação de conversão orto- para- é exotérmica, onde o calor liberado é maior do que o próprio calor de vaporização. Sendo assim, um catalisador, normalmente o óxido de ferro hidratado, é utilizado para acelerar a conversão orto-para, de modo a evitar a evaporação de parte da massa de hidrogênio. A liquefação é realizada através do ciclo de Joule-Thompson. Este consiste inicialmente na compressão do gás por meio de um compressor, seguido de resfriamento num trocador de calor, para finalmente sofrer uma expansão isentálpica, produzindo hidrogênio nos estados líquido e gasoso. A parte líquida é retirada do sistema, porém a parte gasosa retorna para reiniciar todo o processo novamente [19]. É de fundamental importância o conhecimento do fato de que o gás somente sofrerá uma expansão seguida de resfriamento se as variáveis de estado pressão e temperatura possuírem valores iniciais abaixo de seu ponto de inversão, este representado pelos valores de máximo de cada curva característica num gráfico pressão x temperatura. Em relação ao hidrogênio, como sua temperatura de inversão é menor do que a temperatura ambiente, é necessário resfriá-lo antes que o mesmo entre na válvula de expansão [19]. Os grandes desafios para a tecnologia do armazenamento de hidrogênio líquido estão associados à eficiência energética do processo de liquefação e ao isolamento térmico dos vasos armazenadores.

Hidretos metálicos são compostos que possuem forma AH_x , onde A é um metal ou uma de suas ligas, H é o átomo de hidrogênio e x a quantidade de átomos de hidrogênio por fórmula. Os hidretos serão considerados armazenadores de hidrogênio quando, pela sua dissociação devido à algum processo, liberarem hidrogênio. Como a natureza apresenta alguns tipos de metais, podemos classificar os melhores compostos destes armazenadores de hidrogênio pelas características seguintes [19]:

- O hidreto metálico deverá apresentar um calor de formação menor do que zero, ou seja, o mesmo deverá ser formado a partir de um processo exotérmico. Desta maneira, hidrogênio será liberado quando calor for cedido ao sistema. Porém esse calor de formação não deverá ser muito menor do que zero;

- É desejável que todo ou quase todo o hidrogênio armazenado seja recuperado na dissociação do hidreto. Desta forma devem ser utilizados hidretos que não possuam um calor de formação muito menor do que zero, ou seja, muito estáveis; de modo a não dificultar a reversibilidade da reação de formação do hidreto metálico;

- Que o composto hidreto metálico possua uma alta densidade volumétrica de hidrogênio armazenada;

- Possuam elevadas cinéticas de reação de formação e dissociação, visto que é necessário o fornecimento quase que imediato de hidrogênio nas várias aplicações ;

- Baixos custos para sua formação e dissociação;

- Hidretos que possuam baixas densidades volumétricas, mas com elevadas densidades energéticas.

Este processo de armazenamento de hidrogênio possui uma característica que o destaca em relação aos demais, sua elevada densidade volumétrica de átomos de hidrogênio presentes no material hospedeiro. Razões hidrogênio/metal tem sido encontradas em até 2 para hidretos metálicos [92]. A maior densidade volumétrica de átomos de hidrogênio encontrada até hoje foi de 150 kg/m^3 , encontrada nos compostos Mg_2FeH_6 e $\text{Al}(\text{BH}_4)_3$, estes são conhecidos como hidretos complexos, os quais diferem estruturalmente dos hidretos metálicos. Estes hidretos complexos podem atingir razões hidrogênio/metal maiores do que 2. A grande desvantagem destes tipos de hidretos é a sua estabilidade. Para que ocorra sua decomposição é necessário temperaturas elevadas [91]. A utilização de hidretos metálicos para armazenamento de hidrogênio em larga escala é uma escolha segura e compacta. A grande desvantagem é a baixa densidade gravimétrica destes tipos de sistemas. Sendo assim, desafios futuros rumam neste caminho.

O processo de fisissorção ou adsorção física do hidrogênio ocorre como consequência da interação entre moléculas de hidrogênio gasoso, chamado adsorbato, com moléculas de um sólido, o adsorvente. As moléculas de hidrogênio são atraídas por um campo de forças existente na superfície do sólido. Essas interações envolvidas no processo são as forças de Van der Waals. Na adsorção física, a interação entre as moléculas do adsorbato e as do adsorvente é composta por um termo atrativo, o qual diminui com a distância numa potência de -6, e um outro repulsivo, que diminui com a distância numa potência de -12 [92]. A energia mínima apresentada no equilíbrio entre os processos de atração e repulsão das moléculas de hidrogênio pela superfície sólida foi de 1-10 kJ/mol de H . Desta forma, devido à fraca interação, hidrogênio é liberado

com o aumento da temperatura e o processo de adsorção física somente ocorrerá em baixas temperaturas, menores do que 0°C. Esta é uma forma de armazenamento de hidrogênio bem promissora quando do ponto de vista de densidade gravimétrica de hidrogênio. Segundo R. Ströbel et al. (2006), um valor máximo de capacidade de armazenamento de hidrogênio adsorvido em grafite encontrado foi da ordem de 0,03 kg H₂/ Kg de substrato, para uma área de superfície de 1315 m²/g. Porém, este valor somente pôde ser atingido em temperaturas muito baixas. O DOE (US Department of Energy) estima que, para o ano de 2010, teremos avançado tecnologicamente o suficiente para atingirmos a meta de 0,06 kg H₂/ Kg de substrato. Materiais que tem sido evidenciado como promissor à essa meta são os nanomateriais de carbono. Muitos pesquisadores têm sido atraídos para esta área após um paper escrito por Dillon et al. (1997), no qual os autores descrevem resultados para dessorção de hidrogênio a partir de nanotubos de carbonos. As vantagens da utilização deste processo estão relacionadas com as baixas pressões de operação, baixos custos dos materiais envolvidos e a simplicidade do sistema de armazenamento. Porém, as baixas razões (kg de hidrogênio armazenado)/(kg de substrato) e as baixas temperaturas requeridas são obstáculos a serem superados no estudo desta tecnologia.

2.4 Transporte de Hidrogênio

O transporte de hidrogênio gasoso poderá ocorrer sob duas formas usuais, com a utilização de gasodutos ou com a utilização de tanques armazenadores em caminhões. A utilização desta última forma citada proporciona um inconveniente, sendo os elevados custos de produção de energia em potencial devido à baixa densidade volumétrica do hidrogênio. Outro problema envolve o gasto de energia para alimentar compressores, a fim de pressurizar o hidrogênio nos tanques para transporte. O transporte de hidrogênio por tanques ocorre sob pressões tipicamente de 150-200 atm [19]. Os gasodutos são bastante utilizados no mundo, principalmente em países que utilizam o gás natural em larga escala. Para a utilização destes no transporte e distribuição de hidrogênio é necessário que seu material constituinte não seja à base de titânio ou alumínio, pois estes reagem muito facilmente com o hidrogênio, produzindo a deterioração do material, causando sérios problemas de vazamentos. A transmissão de hidrogênio por meio de gasodutos requer algumas considerações, que são maiores diâmetros das tubulações e maiores potências de compressão do que para sistemas a gás natural [72]. Em relação

aos custos de transporte de hidrogênio utilizando gasodutos, foi estimado que os mesmos giram em torno de 1,5-1,8 vezes maiores do que aqueles para transmissão de gás natural [72]. Porém, sabe-se que a transmissão de energia por meio de hidrogênio é menos dispendiosa, em situações de grandes distâncias (acima de 1000 km), do que sua transmissão por meio de eletricidade. Um outra opção seria o transporte de hidrogênio líquido. Esta alternativa está associada ao aumento de densidade volumétrica de energia a ser transportada, pois a densidade volumétrica do hidrogênio no estado líquido é bem superior em comparação a que seria em seu estado gasoso. Porém, alguns inconvenientes estão associados à esta opção, que são os elevados custos dos recipientes para armazenar o hidrogênio líquido, a considerável quantidade de energia gasta durante o processo de condensação do hidrogênio e, por fim, a perda de gás devido à evaporação, em torno de 0,5-1% ao dia [19].

2.5 Hidrogênio Seguro

A natureza do hidrogênio faz com que alguns cuidados sejam necessários em sua manipulação. A molécula de hidrogênio é diatômica em seu estado natural, ou seja, muito pequena. Isto faz com que o mesmo tenha muita facilidade em escapar por meio de pequenos furos ou em junções nas tubulações para transporte de hidrogênio. Baseado em algumas propriedades, tais como densidade e coeficiente de difusão no ar, o hidrogênio escapa 1,26 - 2,8 vezes mais rapidamente por meio de um furo do que o gás natural [72]. O hidrogênio possui uma energia de ignição extremamente baixa, da ordem de 0,02 mJ. Porém para que o mesmo acenda, é necessário uma razão combustível/ar adequada, numa faixa de 25-30% [76]. Sua inflamabilidade com o ar está numa faixa de 4,1 - 75% do volume de ar, enquanto que para a gasolina está entre 1 - 7,8% do volume de ar. O hidrogênio pode reagir com muitos materiais metálicos e causar eventuais falhas nestes, ocorrendo até, em casos extremos, a ruptura dos mesmos. Esta é uma reação que ocorre principalmente em ligas de aço com alta dureza e com o alumínio. Algumas características físicas do hidrogênio elevam os riscos de sua utilização. Em seu estado natural, o hidrogênio é inodoro. A chama deste é bastante clara à luz solar. Porém, para que esse problema da ausência de visibilidade de sua chama seja resolvido, alguns produtos químicos de efeito corante já são utilizados. Acredita-se que, com o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente na área de sensoriamento, os riscos devido à essas características físicas do hidrogênio venham a ser reduzidos. A

expansão da utilização de sistemas à hidrogênio perpassa pelo desenvolvimento de uma legislação clara e segura. Em alguns estados norte-americanos o hidrogênio é tido como um produto anormalmente perigoso, classificação dada àqueles em que os riscos de seu manejo não podem ser eliminados com razoável prudência [53]. Os riscos calculados por algumas companhias seguradoras, nos EUA, inviabilizam a prestação de seus serviços nessa área. Porém, há outras empresas seguradoras que já propõem-se a trabalhar com sistemas à hidrogênio. Mas, estas últimas afirmam que é necessário criar códigos de segurança e padrões de comportamento para que o devido estabelecimento de uma infraestrutura do hidrogênio venha a emergir [53]. Na ocorrência de um acidente, a energia de explosão por unidade de energia armazenada pelo hidrogênio é muito baixa. Para um dado volume, hidrogênio possuiria 22 vezes menos energia explosiva do que o mesmo volume ocupado com vapor de gasolina [72].

O hidrogênio líquido possui relevantes características quando a segurança é evidenciada. O mesmo apresenta uma maior volatilidade do que a gasolina, sendo uma interessante propriedade quando da ocorrência de vazamentos.

2.6 Equipamentos para utilização do hidrogênio

Máquinas de combustão interna à hidrogênio são bem eficientes. Possuem em torno de 20% maiores eficiências do que máquinas à gasolina [8]. Isto deve-se ao fato das elevadas razão de compressão e razão de calor específico em relação aos outros combustíveis. A maior vantagem da utilização do hidrogênio nessas máquinas é o produto da combustão do mesmo: vapor d'água e pequenas quantidades de NO_x . As emissões de NO_x por máquinas de combustão interna à hidrogênio são uma ordem de magnitude menores do que aquelas para combustão à gasolina [8]. Pequenas quantidades de CO, CO_2 e hidrocarbonetos são descarregadas devido à utilização de óleos lubrificantes. Devido à sua extensa faixa de inflamabilidade, hidrogênio pode ser queimado numa larga faixa de mistura hidrogênio/ar em máquinas de combustão interna. Isto traz como consequência a possibilidade de ocorrência da queima de uma mistura pobre, a qual é aquela em que a quantidade de ar é maior do que para a quantidade estequiométrica, havendo uma maior quantidade de oxigênio. Porém, este tipo de mistura acarreta numa maior emissão de NO_x para a atmosfera. Como o hidrogênio possui baixa densidade de energia volumétrica, em relação à outros combustíveis, há uma perda da potência de saída da máquina. Uma mistura

estequiométrica gasolina/ar ocupa 2% do volume do cilindro na máquina, enquanto que uma mistura estequiométrica hidrogênio/ar ocupa 30% . Desta maneira, a energia da mistura hidrogênio/ar é somente 85% desta, resultando numa perda de potência em 15% [7]. Então, a máquina funcionando à hidrogênio terá 15% de perda de potência quando comparada utilizando gasolina como combustível. Porém, com tecnologias avançadas na área de injeção de combustíveis, pode-se reduzir estas perdas. O hidrogênio possui uma baixa energia de ignição. Sabe-se que a energia necessária para que o hidrogênio inflame é uma ordem de magnitude menor do que a solicitada pela gasolina. Isto viria a ser um problema em casos de pontos quentes nos cilindros, o que poderia ocasionar um acendimento indesejável no sistema. O hidrogênio possui alta temperatura de auto-ignição. Esta elevada temperatura de auto-ignição do hidrogênio permite maiores razões de compressão utilizadas do que para outros combustíveis. Como a eficiência térmica de uma máquina a combustão interna está diretamente ligada com a razão de compressão, quanto maior for esta última, maiores eficiências térmicas serão obtidas.

Um dispositivo, hoje com algumas utilizações práticas, que executa a ação de produzir eletricidade e água a partir de hidrogênio e oxigênio é a célula combustível. Esta consiste num arranjo composto por dois eletrodos porosos, o anodo (eletrodo negativo) e o catodo (eletrodo positivo), revestidos com um catalisador, normalmente platina, em contato com um eletrólito. A figura 2.3 mostra o esquema básico de uma célula combustível.

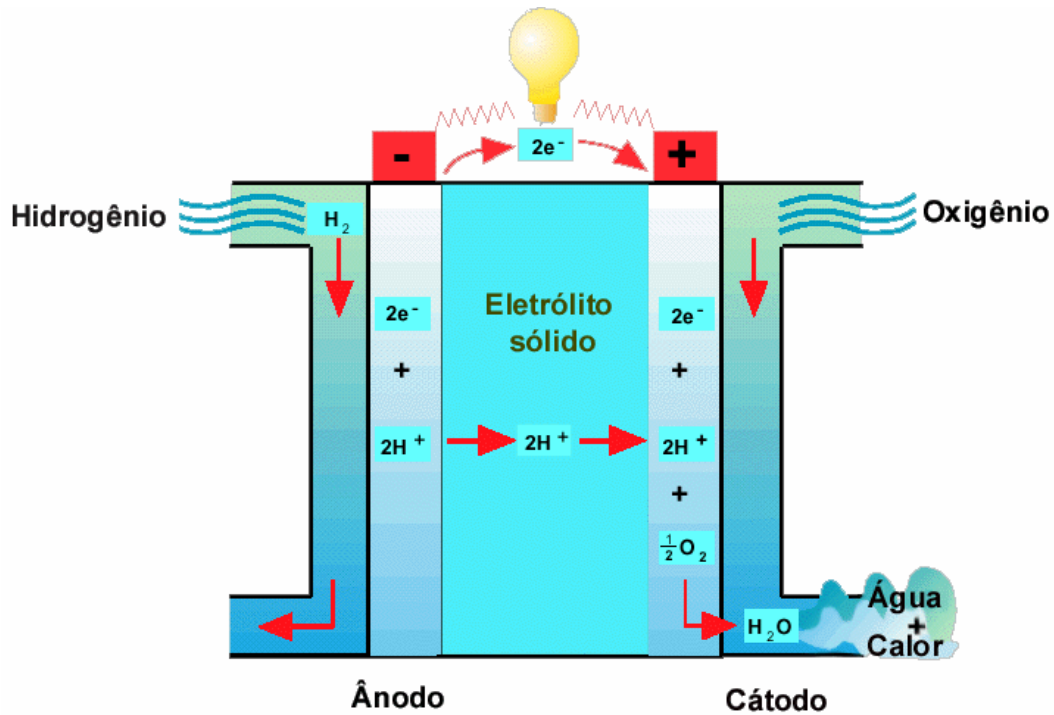


Fig. 2.3 - Célula combustível (Capaz, 2006).

O anodo é alimentado com hidrogênio e o catodo é alimentado com oxigênio. Reações químicas ocorrerão nos eletrodos, produzindo uma corrente elétrica. Um catalisador de platina, aplicado aos eletrodos, trata da separação dos íons, hidrogênio no anodo, e oxigênio no catodo. Os íons passam por meio de uma membrana, normalmente localizada ao centro da célula, produzindo eletricidade e água, a qual será expelida sob a forma de vapor. Em condições normais, 25°C e pressão atmosférica, o potencial reversível nas reações eletroquímicas ocorrentes nas células é de 1,229V. A tensão operacional de uma célula combustível é sempre inferior ao potencial reversível, devido à várias perdas, como as causadas por concentrações de íons nas proximidades dos eletrodos e a resistência ôhmica do circuito elétrico por onde os íons fluem. A eficiência de uma célula combustível é uma função da tensão da célula. A eficiência teórica de uma célula combustível é dada por

$$\eta = \Delta G^\circ \cdot \Delta H \quad (2.2)$$

onde ΔG° representa a variação na energia livre de Gibbs e ΔH a variação de entalpia da reação ou o valor térmico do hidrogênio, superior ou inferior [7]. Níveis elevados de

eficiência, deste modo, são alcançadas; da ordem de 80 - 90%. Porém, como dito anteriormente, a tensão de operação de uma célula combustível é sempre inferior ao potencial reversível. Sendo assim, a eficiência de uma célula combustível (η_R) será sempre inferior à teórica, e dada por [7]

$$\eta_R = \eta_T \cdot \eta_V \cdot \eta_F \cdot \eta_U \quad (2.3)$$

onde η_T - eficiência térmica, a qual é a relação entre a energia livre de Gibbs para a reação e o valor térmico do combustível, G° / H ; η_V - eficiência voltaica, expressa pela relação entre a tensão de operação da célula e a tensão termodinâmica, V/E ; η_F - eficiência de Faraday, sendo a relação entre a corrente de funcionamento da célula e a corrente correspondente à razão na qual as espécies reagentes são consumidas, ou seja, I/nFm , onde m é a razão na qual os reagentes são consumidos; η_U - eficiência de utilização do combustível, definidas pela relação entre a quantidade de combustível consumido na reação eletroquímica e a quantidade de combustível que é suprida a célula. A tabela 2.1 apresenta as características gerais de alguns tipos de células combustíveis.

Tabela 2.1 - Principais Tecnologias desenvolvidas de Células combustíveis e suas diferenças.

Denominação	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
Eletrólito	Membrana polimérica	Hidróxido de Potássio	ácido fosfórico	Mistura de carbonatos	cerâmico	cerâmico
Temp. de operação(°C)	80	65-220	200	650	600-800	800-1000
Invólucro da célula	carbono	Carbono	grafite	aço	cerâmico	cerâmico
Catalisador	platina	Platina	platina	níquel	C0-ZrO2 ou Ni-ZrO2	C0-ZrO2 ou Ni-ZrO3

Fonte: SACRAMENTO, 2006.

onde, PEMFC - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell; AFC - Alkaline Fuel Cell; PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell; MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell; ITSOFC - Intermediate Temperature Solid Oxide; TSOFC - Tubular Solid Oxide Fuel Cell. Alguns tipos de células combustíveis, como as alcalinas, tiveram sua utilização iniciada desde os anos 60 em programas espaciais. Outras, como aquelas à ácido fosfórico, já encontram-se atualmente disponíveis para comercialização, em aplicações de geração de eletricidade. As células PEM fazem parte de projetos em desenvolvimento relacionados à veículos automotores. Outros tipos estão sendo estudadas para determinados fins.

O atual contexto da matriz energética brasileira exige investimentos em novas fontes de energia. A tecnologia das células combustíveis ainda possui custos relativamente elevados, mas é uma opção viável para devido aproveitamento energético num futuro próximo. Alguns países já utilizam sistemas à células combustíveis para geração de energia elétrica e para outros fins, como alimentação energética de um veículo automotor. Sendo assim, é interessante que o Brasil participe dessa fase pioneira em direção à independência de combustíveis fósseis, investindo em outras tecnologias alternativas.

2.7 Sistema híbrido hidrogênio-solar-eólico

O hidrogênio produzido a partir de fontes solares e eólicas é denominado limpo. Os custos para implantação de sistemas híbridos envolvendo essas fontes alternativas de energia são ainda elevados. Porém há uma necessidade de redução de poluentes na atmosfera devido à queima de, principalmente, combustíveis fósseis. Desta forma, justificam-se investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias alternativas, como a fotovoltaica e a eólica.

As células fotovoltaicas consistem, basicamente, na junção de duas placas de material semicondutor. Uma chamada tipo-n sofrerá dopagem com fósforo, resultando assim num excesso de elétrons nesse material. A outra, chamada tipo-p, dopada com boro, contém um déficit de elétrons, onde surgirão lacunas ou sítios desocupados. Os fótons incidem na junção dessas placas, ocasionando num movimento de elétrons. A tecnologia em células fotovoltaicas tem-se desenvolvido consideravelmente. As células solares inicialmente fabricadas com silício, classificadas como de primeira geração, possuem eficiências que variam numa faixa de 8 a 15%. Uma segunda geração, baseada no desenvolvimento de filmes delgados os quais são depositados sobre um suporte de

vidro ou de uma outra matéria sintética, tem sua utilização na fabricação de alguns elementos eletrônicos, tais como calculadoras e relógios. Estes filmes são compostos por um material amorfo à base de silício [30]. Esta tecnologia permite uma redução considerável de material semicondutor no produto acabado, porém a eficiência desta encontra-se numa faixa de 5 à 10%. Alguns materiais envolvendo telúrio de cádmio ou um composto de cobre, índio e selênio, tem sido utilizados em pesquisas laboratoriais. Porém, eficiências em torno de 18% são atingidas em células que apresentaram muitas dificuldades de fabricação. A saída de energia elétrica de um módulo fotovoltaico é dada pela equação [71]

$$E = \eta_{\text{mod}} \cdot A_T \cdot I_T \quad (2.4)$$

onde A_T é a área total do módulo, em m^2 , I_T é a radiação solar incidente instantânea por unidade de área e η_{mod} é a eficiência instantânea do módulo, representada pela equação

$$\eta_{\text{mod}} = \eta_r \cdot \eta_{pt} \cdot \left\{ 1 - \beta_T \cdot (T_a - T_r) - \beta_i \cdot I_T \cdot \left[\left(\frac{\tau \cdot \alpha}{U_L} \right) \cdot (1 - \eta_r \cdot \eta_{pt}) \right] \right\} \quad (2.5)$$

sendo η_r a eficiência de referência do módulo ou eficiência no máximo ponto de potência numa dada temperatura de referência, dada pela equação $\eta_r = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{1000 \cdot A_T}$, onde

I_{mp} e V_{mp} são, respectivamente, a corrente e a tensão elétrica no ponto de potência máxima; η_{pt} a eficiência do controlador de carga, sendo igual a 1 para um controlador perfeito; β_T o coeficiente de temperatura, tendo seu valor, para células de silício, variando numa faixa de 0,004 - 0,006 por $^{\circ}\text{C}$; T_a a temperatura ambiente; T_r a temperatura de referência do módulo; τ a transmitância de alguma superfície disposta sobre a célula; α a fração da radiação incidente na superfície das células que é absorvida; U_L o coeficiente de perdas. A relação $\frac{\tau \cdot \alpha}{U_L}$ pode ser expressa por meio da temperatura nominal de operação da célula (NOCT), através de

$$\frac{\tau \cdot \alpha}{U_L} = \frac{NOCT - 20}{800} \quad (2.6)$$

Os parâmetros η_{pt} , β_t , T_r , $NOCT$, A_T , I_{mp} e V_{mp} são fornecidos, para cada tipo, pelos fabricantes.

Tecnologias acerca de uma concentração da energia solar tem sido desenvolvida. Neste caso, concentradores são utilizados a fim de elevar, consideravelmente, a eficiência e conversão. A saída do conjunto fototransformador será conectado ao eletrolisador, o qual receberá essa energia, que será utilizada para realizar a eletrólise da água. Essa água, antes de ser submetida ao processo de eletrólise, deverá passar por uma unidade dessalinizadora para que impurezas indesejáveis ao processo de obtenção de hidrogênio sejam retiradas, a fim de elevar a eficiência de conversão dos eletrolisadores.

Uma outra fonte renovável de energia é aquela proporcionada pelos movimentos dos ventos. Esses movimentos ocorrem devido à diferença no aquecimento solar terrestre, sendo assim uma forma indireta de energia solar. Turbinas eólicas transformam a energia cinética dos ventos em energia elétrica, que será posteriormente consumida. A potência disponível contida no vento é dada pela equação

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.7)$$

onde ρ é a densidade do ar, A a área da secção transversal de um tubo de corrente no qual o vento escoia numa dada velocidade V [14]. Mas, apenas um percentual dessa potência contida nos ventos podem ser extraídas por turbinas eólicas. A relação entre a potência retirada pelas pás de uma turbina e a potência total disponibilizada pelos ventos é chamada coeficiente de potência. O aproveitamento máximo teórico por uma turbina de vento é dada pelo coeficiente de Betz, que possui valor de 59%. Na prática esse valor ainda não foi atingido. Esta é uma tecnologia que passa por uma evolução bastante considerável em seus equipamentos. Atualmente já estão trabalhando com turbinas com potência nominal de 5MW. Em consequência do desenvolvimento desta tecnologia, os custos para geração de energia elétrica a partir da fonte primária eólica tem sofrido uma redução bastante considerável. Em algumas regiões que possuem excelentes condições meteorológicas para o devido aproveitamento desta fonte renovável, os custos para produção de energia elétrica equivalem-se aos de outras fontes

tradicionais. O grande problema inerente à produção eólica de eletricidade é a sua intermitência. Variações de velocidade intensas podem ocorrer, podendo ocasionar uma fadiga no material que compõe a turbina, principalmente em suas pás. Essa característica intermitente do vento resulta num baixo fator de capacidade de funcionamento dos equipamentos, não atingindo valores além de 40% [72]. Em algumas áreas no mundo, a disponibilidade para aproveitamento dessas duas fontes renováveis justifica todos os custos para implantação de um sistema híbrido eólico-solar-hidrogênio como meio de incremento da matriz energética do local e, principalmente, uma opção para redução da emissão na atmosfera de gases que intensificam o efeito estufa. O devido acoplamento dessas tecnologias, juntamente com a produção de hidrogênio, proporcionaria um aumento na disponibilidade de energia utilizável, contribuindo para o desenvolvimento da região.

Uma planta eólico-solar-hidrogênio proporcionaria a produção de hidrogênio eletrolítico a ser utilizado para abastecer o mercado interno do país, como também o excesso poderia ser comercializado com outros países que não possuem uma certa disponibilidade de fontes de energia renováveis. Para devida escolha da região onde será instalada a planta híbrida é necessária a observação prévia do comportamento de alguns parâmetros meteorológicos ao longo de um determinado período, normalmente um ano. Estes são a velocidade média diária de vento e a irradiação média diária sobre o local. Como o objetivo é a produção de hidrogênio eletrolítico e a sua comercialização, é necessário que o local seja um ponto com proximidades a outros consumidores e que possua uma infra-estrutura portuária adequada para devido escoamento do produto hidrogênio. O sistema de acoplamento entre a turbina de vento, o conjunto de fotocélulas e o eletrolizador deve receber uma atenção especial. Alguns problemas podem decorrer da característica intermitente de funcionamento das turbinas eólicas. Em eletrolizadores alcalinos, na situação de baixos carregamentos na saída de potência da turbina eólica, a razão na qual os gases hidrogênio e oxigênio são produzidos, que é diretamente proporcional ao sinal de entrada de corrente no eletrolizador, pode ser inferior à razão na qual esses gases permeiam por entre o eletrólito, causando uma mistura dos mesmos [72]. Como o limite de inflamabilidade do hidrogênio no oxigênio situa-se numa faixa de 4,6-93,9% , então a possibilidade de ocorrência de uma chama dentro do equipamento é bastante considerável. Para que isso não venha a ocorrer, equipamentos de monitoramento de alguns parâmetros são instalados no sistema. Outro

problema que poderia ocorrer seria uma queda da eficiência durante o funcionamento do eletrolizador, quando o mesmo estivesse operando em temperaturas abaixo da nominal.

Capítulo 3

A Matriz Energética Cearense e Breves Caracterizações de seus Potenciais Eólico e Solar

3.1 O Balanço Energético do Estado do Ceará (BENCE) 2000

O planejamento no setor energético exerce um papel fundamental na busca por metas que assegurem um desenvolvimento sustentável de uma população, ou até mesmo, de uma nação. Este proporcionaria a continuidade do abastecimento e suprimento de energia à custos acessíveis, com menores riscos e com menores impactos sócio-econômicos e ambientais.

Uma ferramenta indispensável ao planejamento energético é o Balanço Energético de uma dada região. Este consiste no devido levantamento da demanda, produção, importação e exportação de energia nos diversos setores da sociedade.

O Balanço Energético do Estado do Ceará, ou BENCE 2000, ano base 1999 foi elaborado contendo uma série histórica de 11 anos de informações energéticas deste estado, apresentando fluxos de fontes primárias e secundárias de energia, em tabelas, gráficos e matrizes referente às séries [6]. O trabalho final trata alguns conceitos importantes para devido entendimento dos dados em questão, quais sejam:

- Energia primária: parcela de energia provida pela natureza em sua forma direta, como o petróleo, gás natural, o carvão mineral, energia solar, eólica, dentre outras.
- Energia secundária: são os produtos energéticos resultantes dos centros de transformação, que tem como destino os diversos setores de consumo e eventualmente, outro centro de transformação.
- Energia final: é a energia na forma como é recebida pelo usuário nos diferentes setores.
- Energia útil: é a energia na forma em que é demandada pelos consumidores.
- Produção: energia primaria que se obtém de recursos minerais, vegetais e animais, hídricos, reservatórios geotérmicos, sol, vento, marés.
- Importação total: quantidade de energia primária e secundária proveniente de outros países e estados, que entra no Ceará e constitui parte da oferta no balanço.

- Centros de transformação: São os locais onde se processam as transformações dos insumos energéticos encontrados na natureza em outras formas de energia, como as refinarias de petróleo, plantas de gás natural, usinas de gaseificação, coquearias ciclo do combustível nuclear, centrais elétricas de serviço público e de autoprodutores, carvoarias e destilarias.

- Consumo final: estão inclusos neste item os diferentes setores da atividade sócio-econômica do Estado, para onde convergem a energia primária e secundária.

3.2 Energia e desenvolvimento

A quantidade de energia utilizada por indivíduo tem-se elevado com o tempo. O homem primitivo necessitava de poucas quantidades energéticas, apenas aquelas proporcionadas pelos alimentos. Com o passar dos tempos, várias necessidades foram surgindo, ao tempo que novas formas de obtenção de energia foram sendo descobertas pelo homem. Atualmente a quantidade de energia gasta por indivíduo é bastante elevada quando comparada a épocas atrás.

Na visão tradicionalista, o nível de desenvolvimento econômico de uma sociedade está relacionado ao seu consumo energético. Desta forma, países com maiores intensidades energéticas, estas que representam a relação entre o consumo de energia e o PIB de uma dada região, seriam mais desenvolvidos do que aqueles com menores intensidades [15].

Uma teoria corrente a partir da década de 50 afirma que o desenvolvimento econômico de uma região está estritamente relacionado com o consumo energético da mesma. Assim, números cada vez maiores de demanda energética seriam esperados, com crescentes suprimentos de energia para atender estas demandas. Porém, conceitos como eficiência energética têm posto em questão esta teoria.

São observados na atualidade extremas diferenças de consumo energético e em quão eficientemente a energia é utilizada entre as várias nações mundiais. Isto está diretamente relacionado com os diversos níveis de crescimento econômico encontrados no mundo.

Uma classificação bastante utilizada atualmente é aquela que usa os termos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Do ponto de vista da estruturação da matriz energética, os primeiros encontram-se bem mais organizados, com planejamentos de

crescimento de consumo e expansão da malha energética bem definidos. Os segundos possuem uma estrutura energética menos organizada e planejada.

Os países em desenvolvimento possuem algumas características que lhes são inerentes [15], quais sejam uma forte dependência econômica, gerada principalmente pela forma de como este país foi colonizado e explorado; desarticulação interna, observada em vários setores da sociedade, revelando extremas dificuldades ao desenvolvimento, gerados principalmente pela burocracia interna devido às questões jurídicas mal definidas; desigualdades entre grupos sociais e regiões geográficas, bem observada no Brasil, onde há uma polarização do desenvolvimento nas regiões sudeste e sul; má administração dos recursos naturais, contribuindo para intensificação da poluição dos ecossistemas.

Algumas características das matrizes energéticas são inerentes aos países em desenvolvimento, que são o baixo nível de consumo por habitante das energias convencionais, grandes disparidades entre países em relação às intensidades energéticas, forte preponderância dos hidrocarbonetos em seus sistemas energéticos, elevada importância de fontes tradicionais (como a lenha), papel preponderante dos grandes grupos sociais produtores na elaboração de sistemas energéticos, fragilidades dos sistemas de produção e de distribuição de energia e a existência de disparidades regionais entre a oferta e a demanda de energia [15].

3.3 Insumos energéticos e suas contribuições na matriz energética do Estado do Ceará

3.3.1 Petróleo

O petróleo consiste num hidrocarboneto, sendo uma mistura de óleo cru, gás natural em solução e semi-sólidos asfálticos espessos e pesados. Este possui uma razão média em massa de hidrogênio para carbono de 1 para 7. Nele são encontrados outros elementos químicos, tais como o enxofre, níquel e vanádio.

Este insumo tem origem orgânica, ou seja, é formado a partir da decomposição de matéria orgânica em decorrência de elevadas pressões e temperaturas a que estas foram submetidas.

O estado do Ceará produz pequenas quantidades de petróleo, com plataformas localizadas no litoral de Paracuru. Todo o petróleo produzido é exportado para os centros onde existem refinarias e sistemas de tratamento para o mesmo.

Para produção de seus derivados, é realizado um processo denominado refinação, onde o petróleo passa por diversos estágios até a obtenção de cada subproduto seu. Conforme a figura 3.1, a primeira etapa é a destilação, onde o petróleo bruto é colocado numa torre de craqueamento e aquecido a elevadas temperaturas, onde os vários produtos derivados são separados físico-quimicamente pelas diferenças em seus pontos de ebulição. Os produtos obtidos são separados após suas liquefações em diferentes camadas, cada uma contendo um insumo formado.

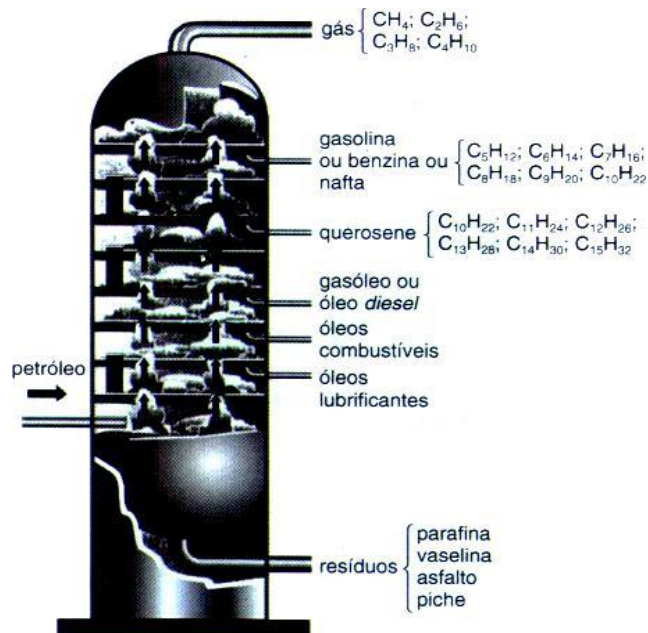


Fig. 3.1 - Esquema de uma torre de fracionamento de petróleo
(<http://www.saojose.com.br/prof/ivete/petroleo.doc>)

A figura 3.2 mostra a evolução temporal da produção e importação total desta fonte no estado do Ceará nos referidos anos. A produção de petróleo nesta região, em 1989, foi de 837.000 tep, caindo para 565.000 tep em 1999. Os níveis de importação total, que é a soma das importações estaduais e internacionais, em 1989 foram de 221.000 tep, sofrendo uma redução em 1996, quando ocorre uma estabilização em torno de 182.000 tep.

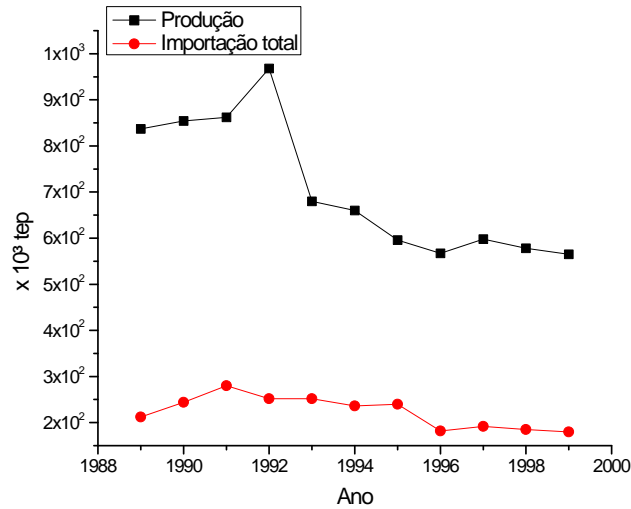


Fig. 3.2 - Evolução temporal da produção e importação total de petróleo (BENCE 2000).

3.3.2 Gás Natural

Este consiste numa mistura de hidrocarbonetos leves, tendo como molécula base o metano(CH_4). É formado a partir da decomposição da matéria orgânica sob altas pressões e temperaturas. Pode ser encontrado em reservas contendo elevado ou pequeno conteúdo de petróleo, sendo denominado gás associado. Quando encontrado em locais onde não haja presença de petróleo é denominado gás não-associado [33].

As principais utilizações do gás natural são em sistemas de aquecimento de água, de calefação; no setor elétrico, sendo o combustível queimado para devida geração de calor em caldeiras nas termelétricas; no setor de transportes, em substituição principalmente à gasolina; ou como matéria-prima na indústria química. No estado do Ceará este insumo energético foi consumido, entre os anos de 1989 e 1999, principalmente no setor industrial (BENCE 2000).

A figura 3.3 mostra a evolução temporal da produção e consumo total desta fonte no estado do Ceará nos referidos anos. O consumo de gás natural em 1989 foi de 42.000 tep, sofrendo uma queda brusca para 25.000 tep em 1994, retomando o crescimento e alcançando o pico de consumo em 1999, com 61.000 tep, devido a utilização deste como combustível no setor de transportes e para geração de calor em algumas indústrias cearenses. Neste intervalo de tempo é verificado que todo o gás produzido satisfaz às necessidades da região.

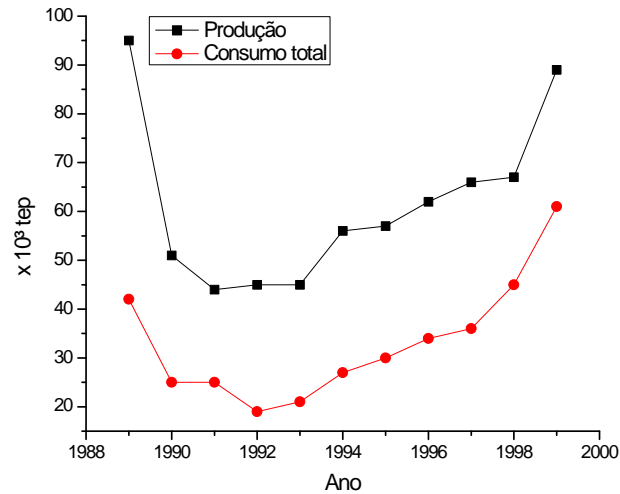


Fig. 3.3 - Evolução temporal da produção e consumo total desta fonte no estado do Ceará (BENCE 2000).

3.3.3 Carvão-Vapor

O carvão-vapor é um tipo de carvão mineral muito utilizado em caldeiras para a devida produção de calor. No Estado do Ceará ele possui uma restrita utilização na indústria de cimento. Todo o carvão-vapor consumido nesta região é importado de outras (BENCE 2000). O grande inconveniente da utilização do carvão-vapor para geração de energia são os elevados níveis de poluição gerados, pois sua queima produz maiores quantidades de poluentes quando comparado à queima de derivados do petróleo.

A figura 3.4 mostra a evolução temporal do consumo total desta fonte no estado do Ceará nos anos citados. Há um pico de consumo em 1991 em 42.000 toneladas, tendo uma baixa logo em seguida, atingindo níveis em torno de 0 toneladas em 1993 e 1994. A partir deste ano observa-se um novo crescimento no consumo de carvão-vapor.

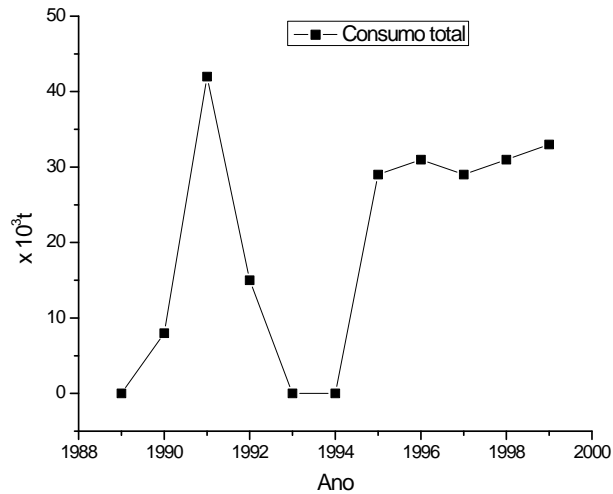


Fig. 3.4 - Evolução temporal do consumo total de carvão-vapor (BENCE 2000).

3.3.4 Lenha

Esta fonte energética está relacionada com toda a madeira, usada como combustível, diretamente queimada para produção de calor. São troncos ou ramos grossos usados na produção de fogo. Tipo de combustível mais antigo, pois o homem primitivo utilizava-se desta alternativa energética. A eficiência na conversão da madeira em calor depende diretamente do tipo de vegetal usado e sua composição química.

O consumo de lenha possui uma elevada importância no levantamento de qualquer balanço energético no Brasil, principalmente na região nordeste. Porém há controvérsias quanto ao método mais adequado para devido levantamento dos dados de consumo desta fonte. A produção desmedida e não planejada de lenha tem causado a desertificação de várias áreas.

A figura 3.5 mostra a evolução temporal da produção e consumo total de lenha no estado do Ceará nos referidos anos. Nota-se uma sobreposição da curva de produção à curva de consumo, revelando que todo produto produzido é consumido com pequenas porções de perdas. Observa-se uma tendência de crescimento do consumo, revelando um pico em 1998 com $6.262 \times 10^3 \text{ m}^3$. A utilização da lenha no Estado do Ceará se dá no setor residencial, indústria cerâmica, setor comercial (principalmente em comércios

alimentícios), setor agropecuário, indústria química, indústria de alimentos e bebidas e indústria têxtil.

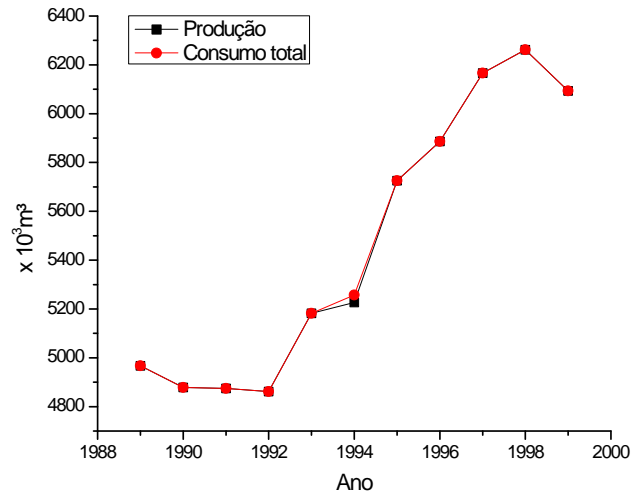


Fig.3.5 - Evolução temporal da produção e consumo total de lenha (BENCE, 2000).

3.3.5 Óleo Diesel

Este insumo energético é produzido através do craqueamento do petróleo. Ele possui elevada utilização no setor de transportes em motores de combustão interna por compressão, sendo também utilizado em processos de geração de energia elétrica. Possui um menor consumo específico de combustível e oferece maiores eficiências de conversão de combustível do que a gasolina.

A figura 3.6 mostra a evolução temporal da importação total de óleo diesel no Estado do Ceará nos referidos anos. Este não produz óleo diesel, importando toda a quantidade necessária para satisfazer à sua demanda interna. Desta forma, há uma forte dependência externa em relação a este insumo energético. Em 1989 a importação deste insumo energético foi de 295.000 tep, caindo para 281.000 no ano seguinte, quando inicia um crescimento, alcançando 397.000 tep em 1999. A utilização do óleo diesel no Estado do Ceará ocorre com maiores intensidades no setor de transportes, seguido dos setores energético e industrial.

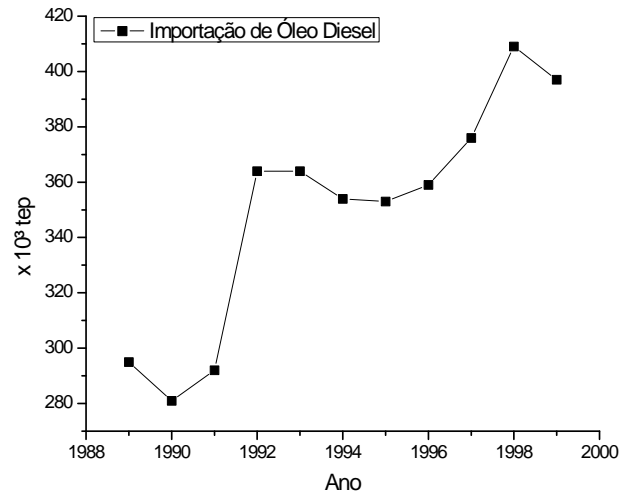


Fig. 3.6 - Evolução temporal da importação total de óleo diesel (BENCE 2000).

3.3.6 Óleo Combustível

O óleo combustível é um subproduto do petróleo, sendo produzido a partir de seu fracionamento. É classificado como um hidrocarboneto pesado. Sua composição depende diretamente do tipo de petróleo utilizado ou de aditivos que lhe são adicionados. Possui algumas características bem interessantes, como a produção de uma combustão mais completa possível, os gases provenientes da combustão não devem apresentar toxidez e nem corrosividade elevada, não produz depósitos inorgânicos nos queimadores, possui alto poder calorífico, escoar facilmente em baixas temperaturas e é de fácil manuseio e transporte seguro.

Possui utilização em equipamentos destinados a geração de energia ou calor, sendo aquecimentos de fornos e caldeiras ou em motores de combustão interna.

A figura 3.7 mostra a evolução temporal da produção, importação total e consumo total de óleo combustível no Estado do Ceará nos referidos anos. A produção interna deste insumo inicia em 1996, com 105.000 tep, sofrendo uma queda entre os anos de 1997 e 1998, passando a produzir somente 49.000 tep. É perceptível o caráter importador do estado do Ceará em relação a este insumo, pois sua produção interna não atende totalmente à sua demanda.

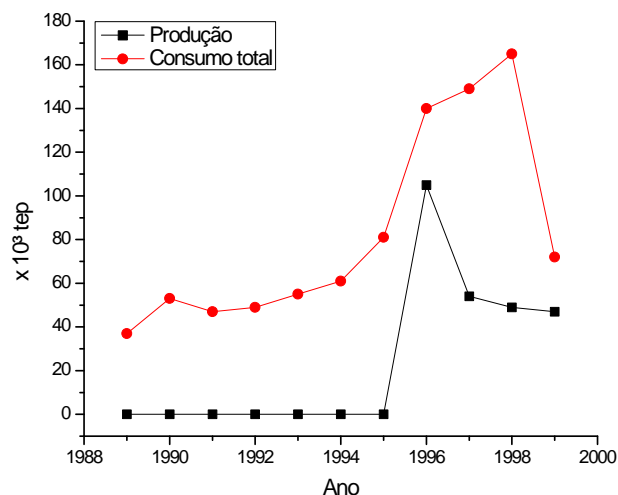


Fig. 3.7 - Evolução temporal da produção e consumo total de óleo combustível (BENCE 2000).

3.3.7 Gasolina

A gasolina, produto obtido através do craqueamento do petróleo, é encontrada no estado líquido, sendo de boa volatilidade e inflamabilidade. Ela é constituída por hidrocarbonetos mais leves do que aqueles que constituem o óleo diesel, pois são formados por moléculas de menores cadeias carbônicas. Esta apresenta uma composição complexa e variável, dependente do processo de utilização da mesma. Normalmente um percentual de álcool anidro lhe é acrescentado.

A figura 3.8 apresenta a evolução temporal da importação e do consumo total de gasolina no estado do Ceará entre 1989 e 2000. No ano de 1989 o consumo deste insumo energético era de 102.000 tep, tendo o mesmo aumentado para 365.000 tep em 1999. Percebe-se que toda a gasolina consumida neste estado é importada de outras regiões. Todo este insumo energético é consumido no setor de transportes.

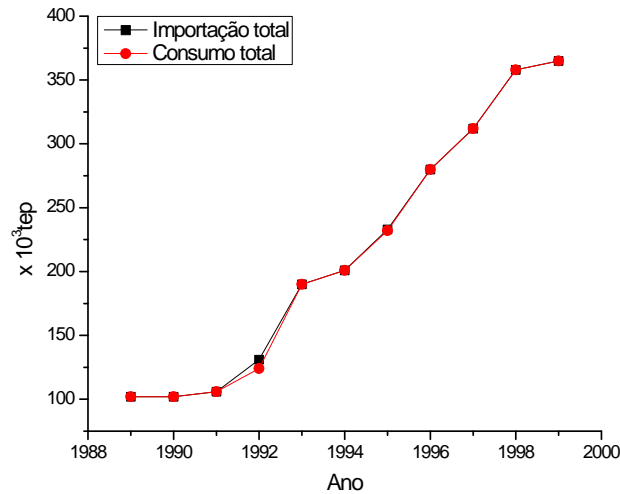


Fig. 3.8 - Evolução temporal da importação e do consumo total de gasolina (BENCE 2000).

3.3.8 Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)

O GLP é uma mistura gasosa de hidrocarbonetos, contendo três ou quatro átomos de carbono, como o propano, propeno, butano e o buteno. É um gás inodoro, sendo misturado a compostos s base de enxofre para lhe caracterizar um cheiro, com fins de detecção de vazamentos. Não constitui um gás tóxico, nem corrosivo e muito menos poluente. Possui um poder calorífico de 24.000 kcal/m³.

Este é um gás amplamente conhecido no Brasil como gás de cozinha, por sua extrema utilização em cocção. É comercializado no estado líquido, transformando-se para o estado gasoso na temperatura e pressão ambientes. Possui uma grande aplicabilidade como combustível, devido à facilidade de armazenamento e transporte a partir de seu engarrafamento em botijões, cilindros ou tanques [81].

A figura 3.9 mostra a evolução temporal da produção, importação total e consumo total deste insumo energético nos referidos anos. Esta revela uma forte dependência externa deste estado no consumo de GLP. Até o ano de 1996 não havia nenhuma produção local deste insumo, sendo produzidas pequenas quantidades, em torno de 10.000 tep, a partir deste ano.

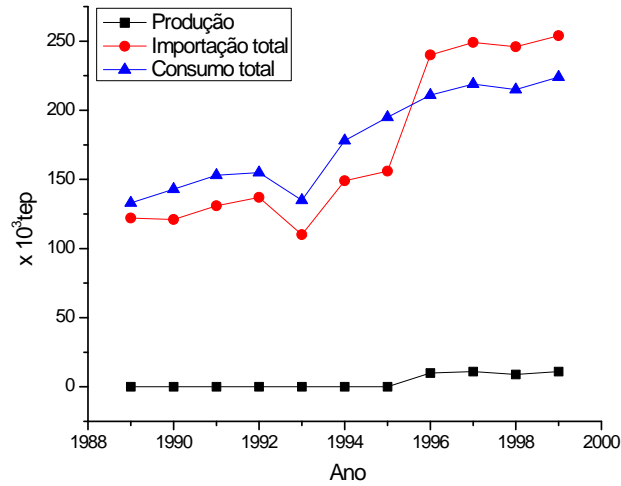


Fig. 3.9 - Evolução temporal da produção, importação total e consumo total de GLP (BENCE 2000).

3.3.9 Álcool Etílico

Também conhecido como etanol, é uma substância líquida, incolor, de odor característico, volátil e inflamável. É miscível em água, podendo contaminar esgotos, rios, córregos e outras águas correntes. Como é uma substância isenta de hidrocarbonetos, sua queima provoca pouca emissão de poluentes à atmosfera.

O álcool etílico é produzido a partir da cana-de-açúcar, onde uma série de processos são exigidos. A figura 3.10 mostra o esquema básico dos processos de produção de álcool etílico.

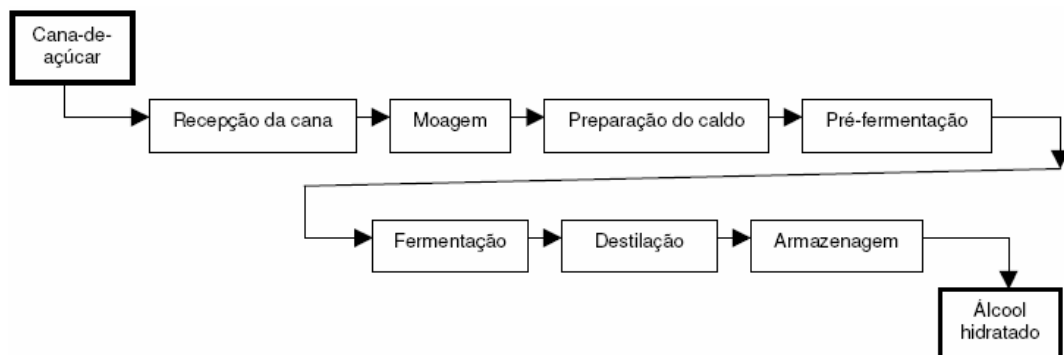


Fig. 3.10 - Processos de produção do álcool etílico (<http://www.sbrt.ibict.br>).

Ao final de todo estes processos, são geradas algumas substâncias como subprodutos da produção de álcool etílico, que são o dióxido de carbono, obtido durante a fermentação; o levedo, como resíduo da fermentação; o óleo fúsel, mistura de álcool superiores, podendo ser utilizado em várias aplicações, como em resinas, graxas e vernizes; o vinhoto, que normalmente é armazenado para utilização como fertilizantes em lavouras de cana-de-açúcar [35].

A figura 3.11 mostra a evolução temporal da produção e consumo total de álcool etílico no estado do Ceará. Nota-se que esta é uma região importadora deste insumo, produzindo o mesmo em pequenas quantidades. Em 1989 a produção deste insumo energético foi de 9.000 tep, reduzindo para 2.000 tep em 1999. O consumo de álcool em 1989 foi de 118.000 tep, atingindo o valor de 136.000 tep em 1994, devido aos incentivos concedidos à cadeia produtiva em função do Proálcool (Programa Nacional do Álcool). Observa-se uma queda brusca nos níveis de consumo a partir de 1996, caindo para 45.000 tep em 1999 devido ao insucesso do programa.

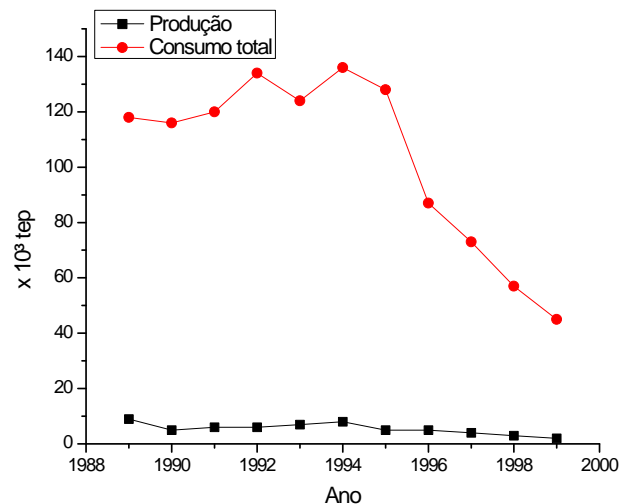


Fig. 3.11 - Evolução temporal da produção e consumo total de álcool etílico (BENCE 2000).

3.3.10 Querosene

Este é um composto formado por uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, naftalênicos e aromáticos, com faixa de destilação compreendida entre 150°C e 239 °C. Este possui uma ampla curva de destilação, conferindo-lhe um excelente poder de solvência e uma taxa de evaporação lenta, além de um ponto de fulgor que oferece relativa segurança em seu manuseio[59].

Tem sua aplicação em combustível para turbinas de avião a jato, líquido de limpeza, iluminação, geração de calor e solventes para produção de asfaltos diluídos para pavimentação.

A figura 3.12 mostra a evolução temporal do consumo total de querosene no Estado do Ceará nos referidos anos. Em 1989 o Estado do Ceará consumiu 40.000 tep. Observa-se um crescimento deste consumo, alcançando 80.000 tep em 1995, quando, a partir de 1996, sofre uma queda, chegando aos 64.000 em 1997. A partir de 1998 há uma retomada do crescimento do consumo deste insumo energético, alcançando 83.000 tep em 1999. O Estado do Ceará é uma região importadora de querosene, não produzindo nenhuma quantidade do mesmo em seu território. Os maiores consumidores deste produto encontram-se nos setores de transporte e residencial, seguidos pelos setores industriais e comerciais.

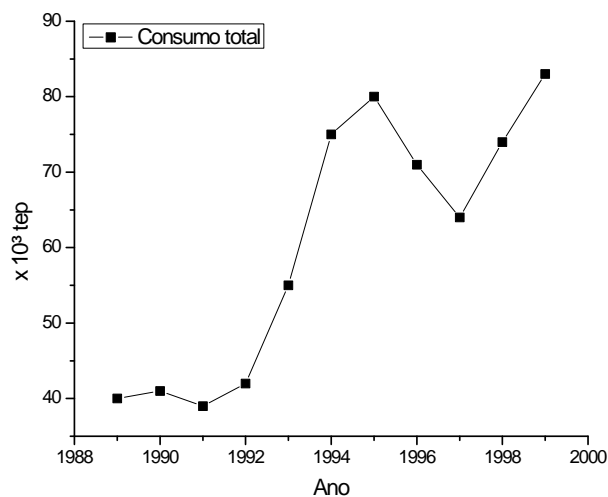


Fig. 3.12 - Evolução temporal do consumo total de querosene (BENCE 2000).

3.3.11 Eletricidade

Vetor energético muito utilizado no Brasil. A maior fonte geradora de energia elétrica no Brasil é a hidráulica, por meio de hidrelétricas. Este país possui um elevado potencial hidrelétrico em suas várias bacias hidrográficas. O maior potencial hidrelétrico encontra-se disposto na região norte, porém não é explorado.

A região nordeste brasileira é alimentada pelas hidrelétricas que utilizam as águas do rio São Francisco, este que vem sofrendo problemas de assoreamento. O potencial hidráulico desse rio tem sua utilização maximizada, necessitando portanto que esta região procure outros meios de geração de energia elétrica.

O estado do Ceará possui elevados potenciais para geração de energia elétrica a partir de outras fontes renováveis que não seja a hidráulica, como a eólica e a solar.

A figura 3.13 mostra a evolução temporal da importação total e do consumo total de energia elétrica no estado do Ceará. Em 1989 o consumo de energia elétrica no Estado do Ceará foi de 773.000 tep, alcançando o valor de 1.653.000 tep em 1999, tendo um crescimento superior ao dobro em dez anos. Há uma forte dependência externa desta região em relação a este insumo energético, pois a mesma importa, praticamente, toda a energia elétrica consumida dentro do estado.

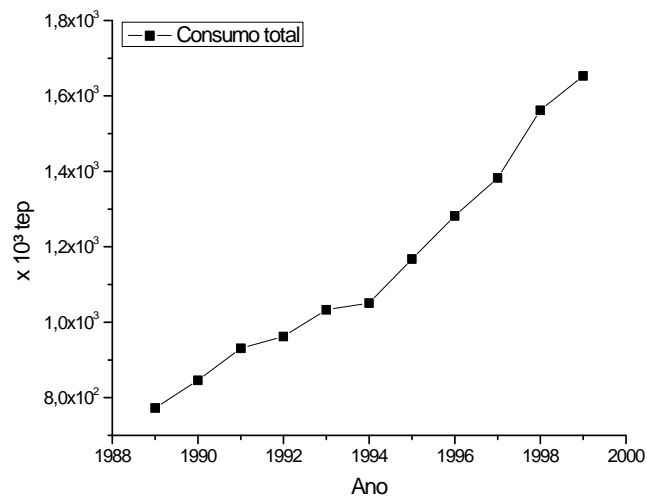


Fig. 3.13 - Evolução temporal do consumo total de energia elétrica (BENCE 2000).

3.3.12 Carvão Vegetal

O carvão vegetal no Brasil é produzido a partir da lenha pelo processo de carbonização ou pirólise [16], sendo este país o maior produtor mundial deste insumo energético. O PCI médio do carvão vegetal é de 30,8 MJ/kg.

A figura 3.14 exibe a evolução temporal da importação e consumo total de carvão vegetal no Estado do Ceará nos referidos anos. Verifica-se, a partir da análise do gráfico abaixo, que a região estudada tem característica exportadora deste produto. O consumo deste insumo energético em 1989 foi de 232.000 toneladas, enquanto que em 1999 foi de 248.000 toneladas. Os maiores consumidores de carvão vegetal no estado do Ceará são: o setor residencial, seguido do setor industrial na indústria de cimento, por fim o setor comercial.

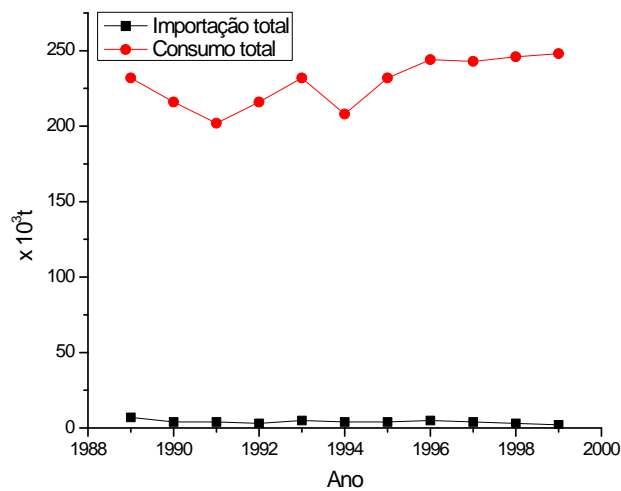


Fig. 3.14 - Evolução temporal da importação e consumo total de carvão vegetal (BENCE 2000).

3.4 Dependência Externa de Energia e os Insumos Óleo Diesel, Óleo Combustível, Gasolina e GLP

A partir da análise da figura 3.15 verifica-se uma forte dependência externa de Energia do Estado do Ceará, configurando-o como um importador de energia. Os insumos energéticos que possuem maiores influências nesta dependência são a eletricidade, importada da CHESF, óleo diesel e gasolina, pois a região em análise não se configura produtora destes.

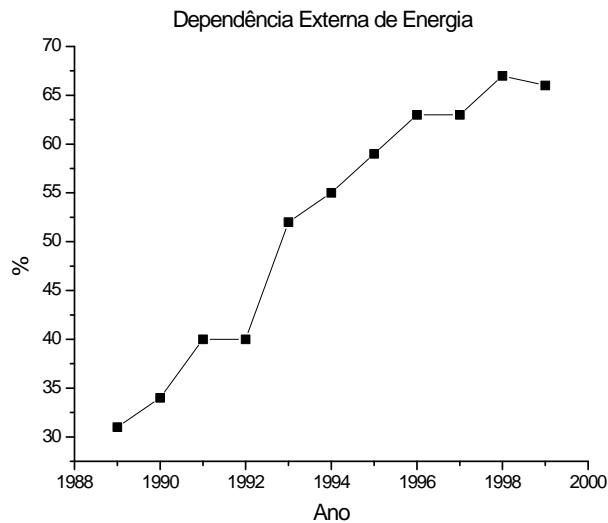


Fig. 3.15 - Evolução temporal da Dependência Externa de Energia do Estado do Ceará (BENCE 2000).

A figura 3.16 revela a participação do óleo diesel, óleo combustível e gasolina no setor de transportes, este que é o maior consumidor destes insumos energéticos dentre os outros setores econômicos.

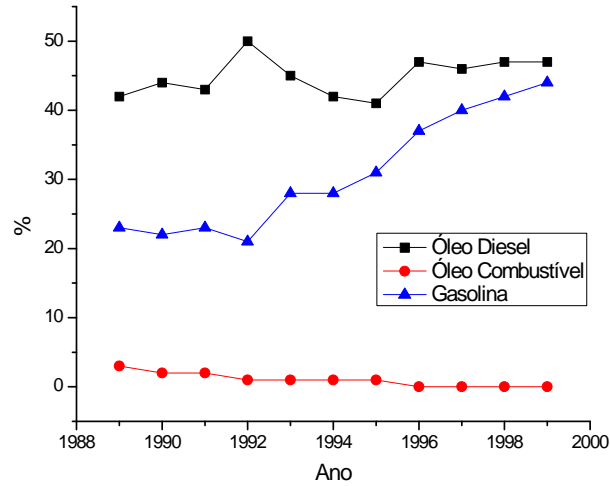


Fig. 3.16 - Evolução temporal do consumo de óleo diesel, óleo combustível e gasolina no setor de transportes (BENCE 2000).

A figura 3.17 mostra a participação do óleo diesel, óleo combustível, gasolina e GLP no volume total de importações energéticas. É evidente o aumento nas importações de gasolina, em decorrência da elevação da frota de veículos nesta região.

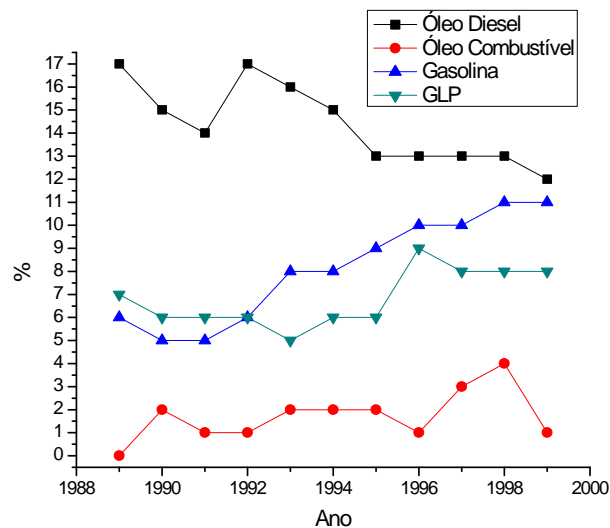


Fig. 3.17 - Evolução temporal da participação do óleo diesel, óleo combustível, gasolina e GLP no volume total de importações de energia (BENCE 2000).

3.5 Breve Caracterização do Potencial Eólico do Estado do Ceará

No Estado do Ceará são observados ventos com intensidade e direção constantes, isto justifica-se pela sua posição geográfica, próxima à Linha do Equador, na qual tem como principal forçante os ventos alísios, intensificados por circulações regionais marítimas por todo o seu extenso litoral de 640 km.

Os ventos alísios constituem o movimento contínuo de massas de ar de superfície, em direção às menores pressões da aquecida faixa equatorial. Esse é defletido no sentido oposto à rotação da Terra, pelo Princípio de Conservação do Momento Angular das massas de ar [3].

O Ceará encontra-se bem próximo à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sendo uma região em baixíssimas latitudes onde ocorre o encontro dos ventos alísios. Como estes carregam bastante umidade e são gradualmente aquecidos, a ZCIT é uma região de muita instabilidade atmosférica, sendo caracterizada por fortes convecções e chuvas quase contínuas.

Este Estado possui cerca de 543 km² de dunas em seu litoral, sendo refrescadas por brisas de ventos intensos e constantes. A baixa rugosidade associada à estas características orográficas proporciona uma excelente eficiência de conversão de energia, visto aquelas apresentadas por parques eólicos já instalados nesta região [3].

O anexo 1 mostra o potencial eólico anual do Ceará a uma altura de 50 metros. Quando da devida análise da mesma, percebe-se que o segundo semestre possui velocidades de vento mais intensas. Isto ocorre em consequência do movimento sazonal da ZCIT, em decorrência da inclinação do eixo de rotação da Terra de 23°27' em relação à normal ao seu plano de translação, quando nesse período o hemisfério sul terrestre recebe mais energia proveniente do Sol do que o hemisfério norte, levando esta zona de sua posição mais ao norte (8°N) para outra mais ao sul (1°N) durante o mês de abril. A figura 3.18 mostra valores de velocidades médias, medidas entre os anos de 1999 e 2000 numa localidade no litoral do Estado do Ceará.

A figura 3.19 mostra a direção predominante do vento num ponto no litoral cearense. É perceptível a constância nas direções do mesmo, gerando boas condições para geração de energia elétrica a partir de geradores eólicos.

A figura 3.20 mostra uma distribuição de frequência para velocidade do vento no litoral cearense. A partir desta são verificadas maiores frequências de ocorrência de

ventos no intervalo de 8 a 13 m/s , sendo mais freqüentes aqueles situados entre 10 e 11 m/s, níveis estes de velocidade em que a maioria dos aerogeradores funcionam com excelentes coeficientes de potência.

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará, publicado no ano 2000, foram estimados potenciais eólicos de 25 GW em superfície continental e 10,5 GW no mar, prevendo para este último construções de plataformas off-shore de fazendas eólicas.

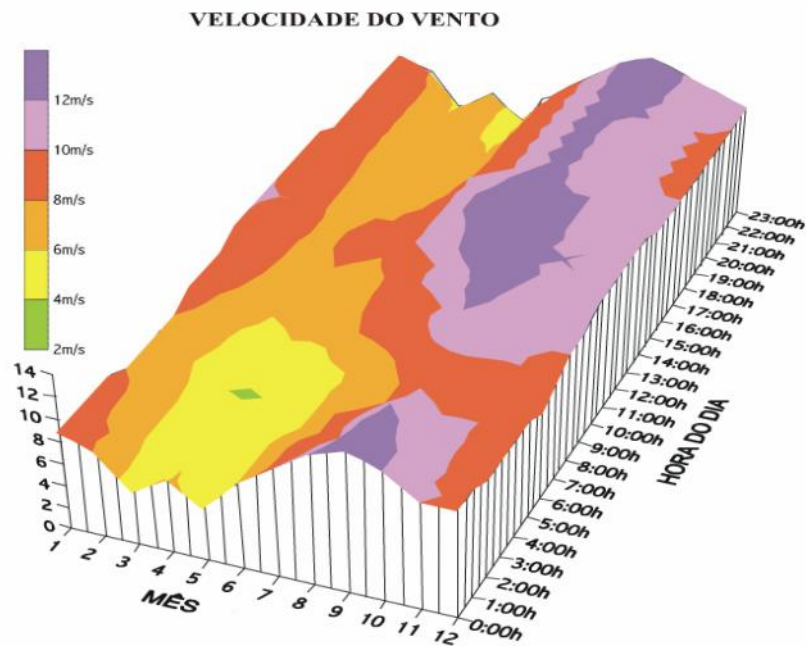


Fig. 3.18 - Potencial eólico anual do estado do Ceará a 50m de altura

<http://www.seinfra.ce.gov.br>

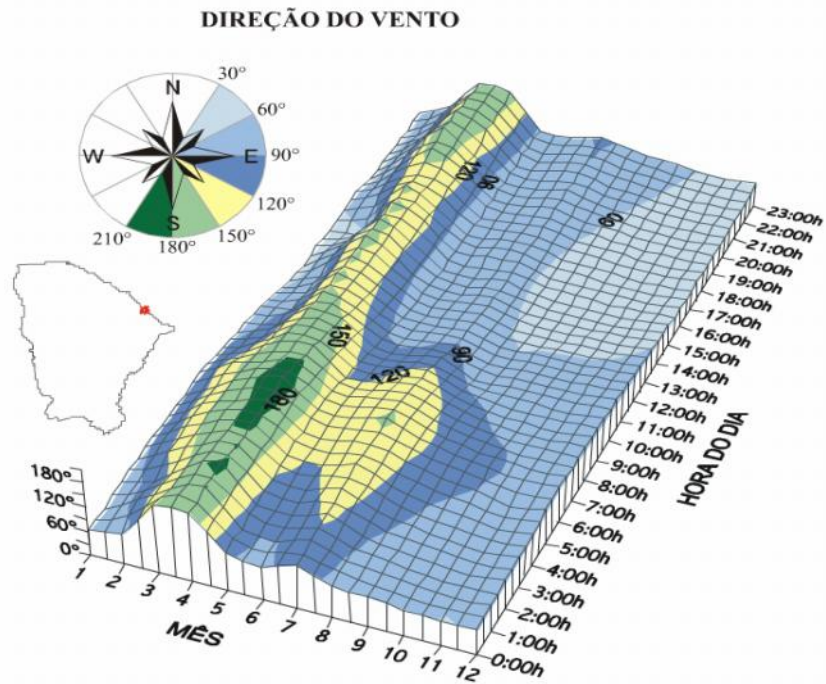


Fig. 3.19 - Direção predominante do vento

(<http://www.seinfra.ce.gov.br>).

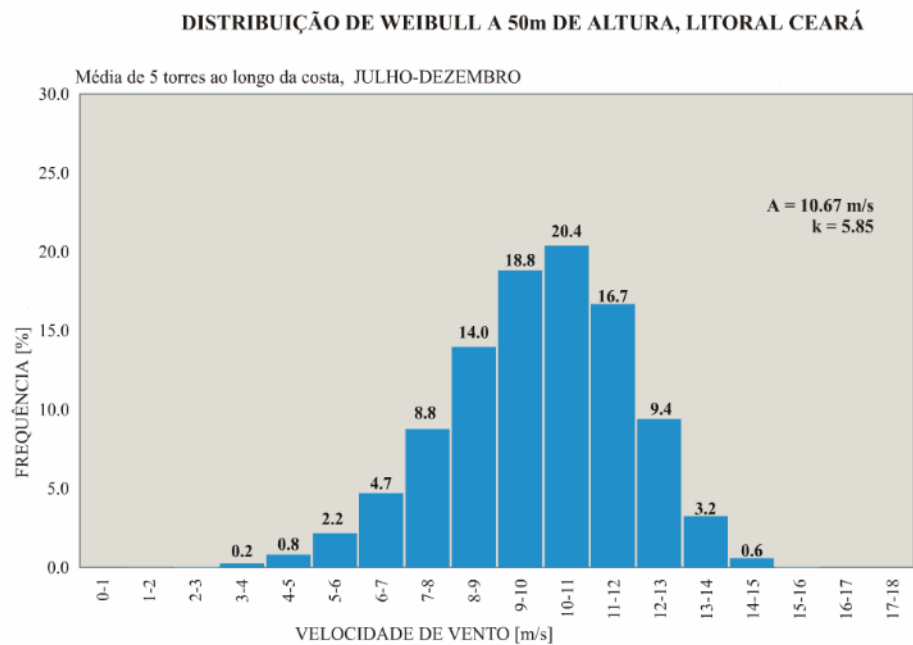


Fig. 3.20 - Distribuição de frequência da velocidade do vento no litoral cearense a uma altura de 50 metros para o segundo semestre.

(<http://www.seinfra.ce.gov.br>)

3.6 Breve Caracterização do Potencial solar do Estado do Ceará

A posição geográfica do Estado do Ceará, situando-se próximo à Linha do Equador, entre as latitudes 2° 46'30" e 7° 52'15" sul, proporciona elevados índices de irradiância solar em seu território. Esta é uma região bastante afetada pelo fenômeno Zona de Convergência Intertropical, causando uma sazonalidade nos níveis de precipitações, influenciando a distribuição temporal da radiação incidente sobre tal localidade.

De acordo com Carvalho et al [13], numa análise da irradiância média diária entre os anos de 2003 e 2004, foram verificadas pequenas variabilidades entre os meses de Julho de 2003 à Dezembro do mesmo ano, e elevadas variabilidades nos meses de Janeiro de até Abril de 2004, verificando um maior potencial para geração de energia no segundo semestre. Isto ocorre pelo fato de que no primeiro semestre ocorre o período chuvoso desta região, tendo uma atmosfera com bastante presença de nuvens, estas que pela sua composição são grandes absorvedoras de radiação solar.

A figura 3.21 mostra os valores de energia produzidos em cada mês a partir de dados de radiação médios em W/m^2 e do tempo considerado [12]. O maior nível energético foi observado no mês de Setembro, época de ocorrência de equinócio, elevando a radiação incidente em baixas latitudes, como é o caso do Estado do Ceará.

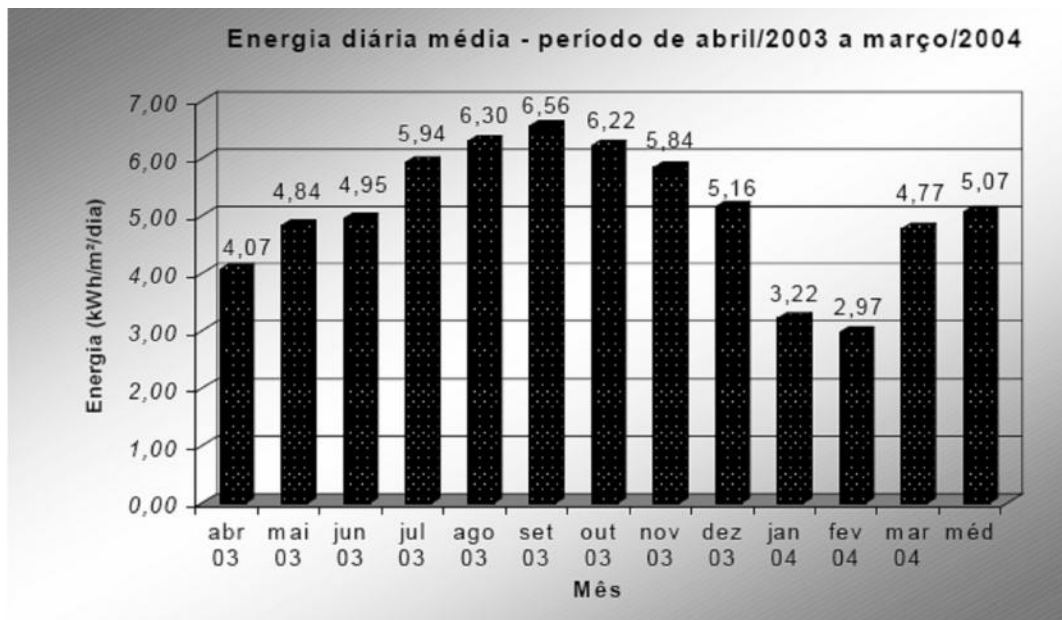


Fig. 3.21 - Gráfico da energia média diária entre os meses de Abril de 2003 e Março de 2004 (CARVALHO ET AL)

A figura 3.22 mostra um histograma para radiação solar no mês de Setembro, nos anos de 2001 e 2003. Pode-se perceber maiores concentrações temporais nas faixas de radiação mais elevadas, mais especificamente em 800 e 900 W/m². Por outro lado, analisando os resultados plotados na figura 3.23, que correspondem ao mês de fevereiro, há ocorrência de baixos níveis de radiação na maior parte do tempo de medição considerado, pois este encontra-se na quadra chuvosa da região. De acordo com dados fornecidos pela FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), a média anual de radiação incidente na superfície do Estado do Ceará é de 300 W/m², sendo este considerado um excelente valor para geração de energia elétrica.

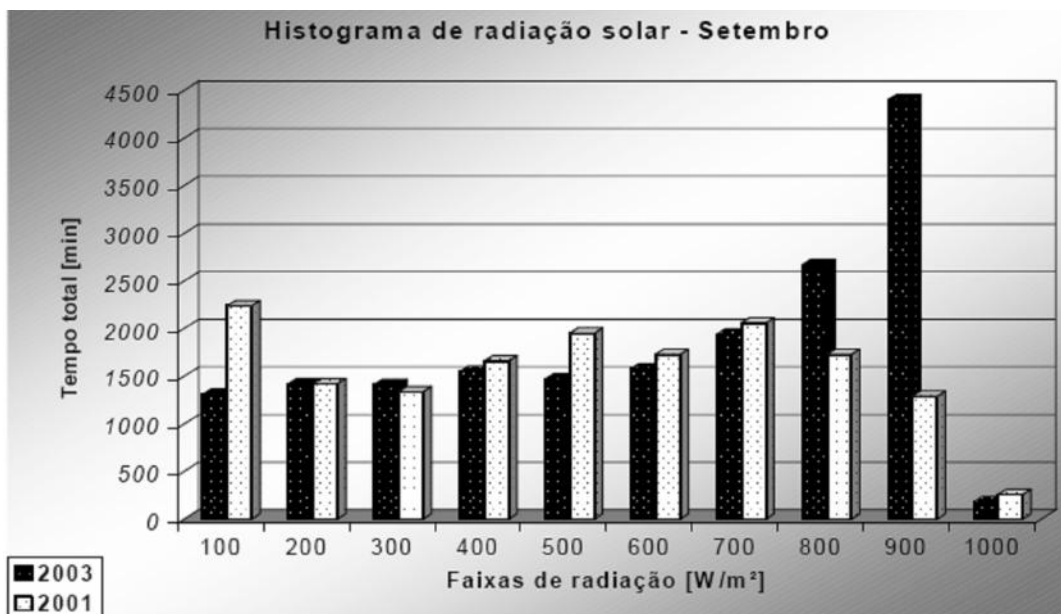


Fig.3.22 - Histograma da radiação solar para o mês de Setembro nos anos de 2001 e 2003 (CARVALHO ET AL)

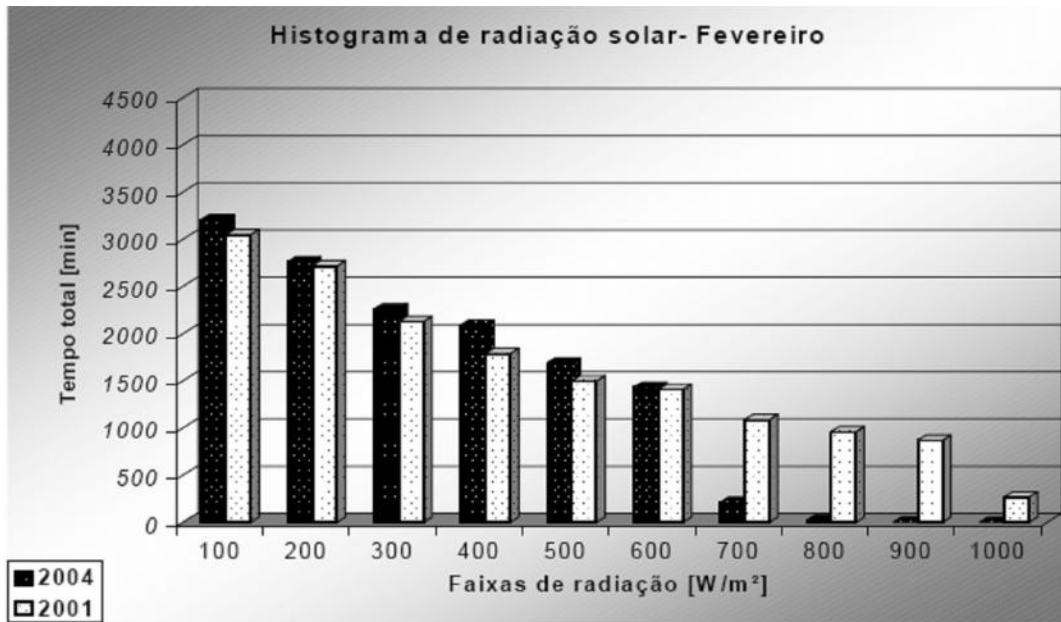


Fig. 3.23 – Histograma da radiação solar para o mês de Fevereiro nos anos de 2001 e 2004 (CARVALHO ET AL).

Capítulo 4

Descrição do Modelo Matemático

4.1 Introdução

Um modelo matemático foi desenvolvido, em linguagem Fortran, por O. T. Basar e T. N. Veziroglu para verificar o comportamento de algumas variáveis relacionadas com a implantação de um sistema energético a base de hidrogênio-solar numa dada região em análise, sendo uma formulação dinâmica contínua entre população e os recursos ambientais, tendo estes últimos papéis preponderantes para atender às necessidades humanas em um padrão de vida aceitável. Neste trabalho foram realizadas modificações para inserção da fonte de energia eólica e adaptações deste modelo matemático para gerar dados futuros, com fins de análises devidas do comportamento das variáveis tratadas, que são população da região, sua demanda energética, Produto Interno Bruto (PIB), taxa de introdução do hidrogênio, importação de energia fóssil, preços de energia fóssil, preços do hidrogênio, poluição atmosférica, índice de qualidade de vida, economia ambiental devido à maior eficiência de utilização do hidrogênio, ganho na venda do hidrogênio, ganho na venda do oxigênio gerado, área abrangida pela instalação de células fotovoltaicas, número de geradores elétricos instalados, volume de água demandada pela usina de dessalinização, capital total demandado para o investimento, custos de operação e manutenção para suporte devido ao sistema e renda total do mesmo. A situação do estado do Ceará devido à inserção do hidrogênio na matriz energética do mesmo em substituição às fontes fósseis fluidas óleo diesel, óleo combustível, gasolina e gás liquefeito de petróleo (GLP), subprodutos do petróleo mais utilizados na região em análise, será objeto de estudo em dois cenários a serem descritos, um com a inserção de hidrogênio lentamente e outro com a inserção de hidrogênio rapidamente, também será objeto de análise um outro cenário, em que não haverá introdução do hidrogênio na matriz energética do estado, supondo uma situação de continuidade no consumo de combustíveis fósseis.

4.2 População

A população será estimada através da utilização da relação

$$Q_n = Q_{n-1} \exp \left[(\ln 2) (\Delta t_n) (W_n) \times \frac{1}{\theta_{q0}} \right] \quad (4.1)$$

onde Q_n é o valor da população no ano n , Q_{n-1} é o valor da população no ano anterior $n-1$, $\Delta t_n (t_n - t_{n-1})$ é o incremento no tempo e será dado em ano, W_n é o modificador do crescimento populacional para o intervalo de tempo Δt_n e, por fim, θ_{q0} é o tempo de dobramento inicial para a população cearense, dado em anos. Esta equação poderá ser aplicada ao mundo, em algum país, no Ceará ou em alguma outra região.

O valor inicial para a variável tempo considerado foi 2000. Sendo assim, os valores iniciais a serem inseridos no programa foram:

- $t_0 = 2000$;
- $Q_0 = 7.430.000$ habitantes, para o estado do Ceará [36];
- $Q_{w0} = 6,1$ bilhões de habitantes para o mundo [2];
- $\theta_{q0} = 40$ anos para o estado do Ceará;
- $\theta_{q0} = 59$ anos para o mundo.

O valor de θ_{q0} para o Ceará foi obtido através de cálculos estatísticos considerando-se a taxa média geométrica de crescimento anual da população em torno de 1,7% [34]. Já o valor de θ_{q0} para o mundo foi obtido de análises estatísticas da evolução do crescimento populacional durante os 20(vinte) anos antecedentes ao ano 2000, considerando-se uma taxa média geométrica de 1,16%.

O modificador do crescimento populacional, W_n , é uma função adimensional dada pela razão entre o tempo de dobramento da população inicial e o tempo para dobramento da população no ano n , ou seja, $W_n = \left(\frac{\theta_{q0}}{\theta_{qn}} \right)$. Sua utilização deve-se ao ajuste da variável θ_q para cada ano, pois a mesma não possui valores constantes, sendo fortemente influenciada pelas variações das condições sócio-econômicas da população no decorrer do tempo. Esta variável está correlacionada com outras, que são:

- Razão adimensional de população $Q_m = Q_n/Q_0$;
- Razão adimensional de PIB $G_m = G_n Q_0/G_0 Q_n$;
- Razão adimensional para poluição $P_m = P_n/P_0$.

Assim, a melhor forma geral de correlação destas variáveis com W_n é

$$W_n = A - B(G_{rqn})^a (P_m)^b (Q_m)^c - \frac{C}{(G_{rqn})^a (P_m)^b (Q_m)^c} \quad (4.2)$$

onde A, B, C, a, b e c são constantes adimensionais, calculadas por Eljrushi [28] utilizando-se informações estatísticas disponíveis para o mundo inteiro e algumas sub-regiões. Desta forma, a equação 4.2 será escrita como

$$W_n = 1,3 - 0,22(G_{rqw})^0 (P_{rw})^{0,1} (Q_{rw})^{0,5} - \frac{0,08}{(G_{rqn})^0 (P_m)^{0,1} (Q_m)^{0,5}} \quad (4.3)$$

onde W_n , G_m , P_m e Q_m possuem valores iniciais 1 para o primeiro ano considerado.

Como a equação 4.3 foi estimada utilizando-se dados estatísticos para o mundo e algumas sub-regiões, não se justifica sua utilização para a região aqui tratada. Isto conduziria a uma sob ou sobre-estimativa dos parâmetros dessa região em relação aos do mundo. Por exemplo, para o mundo foi estimado um crescimento populacional de aproximadamente 1,13% ao ano [38] para os primeiros vinte anos contados a partir do ano 2000. Foi também estimada uma taxa de crescimento do PIB mundial em 3,2% ao ano [91]. O tempo para dobramento do PIB cearense foi tomado como 9 (nove) anos, e foi estimada uma taxa média de crescimento populacional de 1,7% ao ano. Assim, a equação abaixo foi desenvolvida para representar o modificador de crescimento populacional para o estado do Ceará

$$W_n = 1,3 - 0,077(G_{rqn})^0 (P_m)^{0,1} (Q_m)^{0,5} - \frac{0,228}{(G_{rqn})^0 (P_m)^{0,1} (Q_m)^{0,5}} \quad (4.4)$$

4.3 Demanda energética

A demanda energética, bem como a população, está evoluindo exponencialmente com o tempo. Sua razão de crescimento é maior do que a razão de crescimento populacional devido aos desejos das pessoas em elevar seus padrões de vida. Desta forma, o tempo de dobramento da demanda energética será menor do que o tempo de dobramento para a população. A expressão que descreve esta relação entre os tempos de dobramentos é

$$\frac{1}{\theta_{et}} = \frac{1}{\theta_e} + \frac{1}{\theta_q} \quad (4.5)$$

onde θ_{et} é o tempo para dobrar a demanda energética, este que possui duas componentes: θ_e que é a parcela do tempo de dobramento da demanda energética devido ao aumento da qualidade de vida dos habitantes da região e θ_q que é a parcela relacionada com o tempo de dobramento da população. O tempo de dobramento inicial da população do estado do Ceará foi estimado em 40 anos, para o mundo 59 anos. O tempo de dobramento inicial da demanda energética total do estado do Ceará é de 12 anos [6], sendo que para o mundo é de 36 anos [38]. De posse dos dados anteriormente descritos, calcula-se o valor inicial para o tempo de dobramento da demanda energética devido ao aumento da qualidade de vida dos habitantes da região pela utilização da equação 4.5, encontrando-se o valor de 17 anos para o estado do Ceará e 92 anos para o mundo.

O modificador do crescimento populacional W exerce uma forte influência na evolução da demanda energética da região. Assim, a equação que descreve o comportamento da demanda energética com o tempo será dada por

$$E_n = E_{n-1} \exp \left[(\ln 2) (\Delta t_n) (W_n) \left(\frac{1}{\theta_{q0} V_{qn}} + \frac{1}{\theta_{e0} V_{en}} \right) \right] \quad (4.6)$$

onde E_n e E_{n-1} são as demandas energéticas totais para os anos n e $n-1$ respectivamente. As variáveis V_{qn} e V_{en} são os modificadores adimensionais para os tempos de dobramentos θ_q e θ_e respectivamente. É válido ressaltar que os valores

iniciais para as variáveis trabalhadas na equação 4.6 são correspondentes ao ano de 2000.

Os valores considerados para devida inserção no modelo matemático são: a demanda energética do Ceará no ano 2000 foi de 0,17 EJ, sendo que, parte desta referente à execução de atividades que necessitam de energia fóssil fluida, tendo valor de 0,0505 EJ; e a demanda de energia fóssil mundial em 208,068 EJ [38].

A parcela da energia necessária ao incremento da população evolui de uma maneira mais suave devido ao decréscimo dos volumes de residências e escritórios por pessoas. Isto faz com que a energia requerida decresça proporcionalmente. Conseqüentemente o modificador para o tempo de dobramento da população, V_q , tem sido assumido como tendo uma fraca influência da razão de crescimento. Assim, tem-se que

$$V_{qn} = (Q_m)^x \quad (4.7)$$

onde o valor do expoente x assumido é $x \leq 0,1$.

A componente θ_e tenderia a diminuir com o decréscimo das fontes de combustíveis fósseis, pois mais energia seria requerida para a extração destes recursos energéticos. Ela tenderia também a ter seu valor reduzido com o acréscimo no consumo de energia per capita. O aumento nos preços dos combustíveis fósseis mundiais resultaria em maiores tempos de dobramentos. Conseqüentemente, o modificador V_e pode ser expresso pela relação seguinte:

$$V_{en} = \frac{C_m^y R_m^z}{E_{rqn}^v} \quad (4.8)$$

onde C_m é a razão entre os preços de combustíveis fósseis e hidrogênio, $R_m \left(= \frac{R_n}{R_0} \right)$ é

a razão entre recursos fósseis e $E_{rqn} \left(= \frac{E_n Q_0}{E_0 Q_n} \right)$ é a demanda energética normalizada em

relação ao seu valor inicial. Os expoentes y, z e v possuem valores menores ou iguais a 0,1 ($\leq 0,1$).

4.4 Produto Interno Bruto

A avaliação do bem-estar da população de uma determinada região tem sido uma ferramenta importantíssima de análise do progresso em relação a melhorias das condições humanas. Um dos parâmetros utilizados nestas análises é o valor do PIB per capita da região. O PIB é o valor dos bens e serviços produzidos numa região ou país durante o ano. Na contagem do PIB, considera-se apenas bens e serviços finais, excluindo da conta todos os bens de consumo de intermediário (insumos). Isso é feito com o intuito de evitar o problema da dupla contagem, quando valores gerados na cadeia de produção aparecem contados duas vezes na soma do PIB. O PIB possui, em geral, uma razão de crescimento maior do que a razão de crescimento para o consumo de energia fóssil. Em outras palavras, o crescimento de seu tempo de dobramento é levemente menor do que o tempo de dobramento para a demanda de energia fóssil. Esta diferença pode ser atribuída ao contínuo progresso tecnológico no melhoramento das eficiências de conversão de energia e também à produtividade humana. A relação exponencial entre o PIB no ano n e no ano $n-1$ é dada por:

$$G_n = G_{n-1} \exp \left[(\ln 2) (\Delta t_n) W_n \left(\frac{1}{\theta_{q0} V_{qn}} + \frac{1}{\theta_{e0} V_{en}} + \frac{1}{\theta_{g0} V_{gn}} \right) \right] \quad (4.9)$$

sendo G_n e G_{n-1} os valores do PIB nos anos n e $n-1$ respectivamente. A variável θ_{g0} é a componente inicial para o tempo de dobramento do PIB devido aos avanços tecnológicos, e está relacionado com os tempos de dobramentos da população, demanda energética e PIB pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{\theta_{gt}} = \frac{1}{\theta_e} + \frac{1}{\theta_q} + \frac{1}{\theta_g} \quad (4.10)$$

onde θ_{gt} é o tempo de dobramento do PIB. A variável θ_g tende a decrescer com o aumento do PIB per capita, desde que este último decorra em investimentos em atividades de pesquisas e de desenvolvimento. Consequentemente, o modificador V_g poderia ser expresso por

$$V_{gn} = \frac{1}{(G_{rgn})^u} \quad (4.11)$$

onde u é assumido com valores menores ou iguais a 0,1 ($u \leq 0,1$).

Os valores assumidos para o estado do Ceará numa devida inserção no modelo matemático foram os seguintes:

- US\$ 11,5 bilhões para o PIB, ou seja, $G_0 = 11,5$ bilhões de dólares [36];
- 10 anos para o tempo de dobramento do PIB (θ_{gt0});
- 57 anos para o tempo de dobramento do PIB devido aos avanços tecnológicos;

Os valores assumidos para o mundo numa devida inserção no modelo matemático foram os seguintes [91]:

- US\$ 45 trilhões para o PIB, ou seja, $G_{w0} = 45$ trilhões de dólares;
- 22 anos para o tempo de dobramento do PIB mundial;
- 57 anos para o tempo de dobramento do PIB devido aos avanços tecnológicos.

4.5 Produção de Hidrogênio

A matriz energética do Ceará é fortemente dependente de eletricidade produzida em hidroelétricas e de combustíveis fósseis, tendo estes últimos larga utilização, juntamente com o álcool etílico, no setor de transportes.

O estado do Ceará participa do PROINFA, Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica, cujo objetivo do mesmo é a diversificação da matriz energética nacional, garantindo maior confiabilidade e segurança ao abastecimento. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) prevê a instalação de 3.300 MW de capacidade, que serão incorporados ao Sistema Elétrico Integrado Nacional (SIN). Desse montante, 1.100 MW serão de fontes eólicas, 1.100 MW de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 1.100 MW de projetos de biomassa. A energia produzida pelas unidades geradoras selecionadas será adquirida pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás). Os contratos dos geradores com a Eletrobrás terão duração de 20 anos, contados a partir da entrada em operação.

O hidrogênio eventualmente será introduzido gradualmente na matriz energética

do Ceará, como no mundo, com o objetivo de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e conseqüentemente reduzir a quantidade de poluentes adicionados a atmosfera diariamente, estendendo o tempo de vida das reservas de combustíveis fósseis. A taxa exponencial com que o hidrogênio seria produzido é expresso por

$$H_n = H_{n-1} \left\{ \exp \left[\frac{(\ln 2) \Delta t_n}{\theta_{hm}} \right] \right\} \quad (4.12)$$

onde H_n e H_{n-1} representam a produção de hidrogênio nos anos n e $n-1$ respectivamente, e θ_{hm} representa o tempo de dobramento para produção de hidrogênio. Este último será expresso por

$$\theta_{hm} = C_1 + C_2(n-1) \quad (4.13)$$

onde C_1 e C_2 serão constantes independentes. Os valores para estas constantes influenciam diretamente na velocidade com que o hidrogênio substituirá os combustíveis fósseis. Serão criados dois cenários a partir de valores supostos para estas constantes, um representando a introdução lenta e outro representando a introdução rápida de hidrogênio na matriz energética do estado do Ceará, em substituição às fontes de combustíveis fósseis. Foram consideradas três relações para o tempo de dobramento para produção de hidrogênio:

- $\theta_{hm} = 2.0 + 0,25(n-1)$, como sendo a equação que representa a introdução lenta de hidrogênio na matriz energética da região estudada;
- $\theta_{hm} = 2.0 + 0,20(n-1)$, como sendo a equação que representa a introdução rápida de hidrogênio na matriz energética da região estudada;
- $\theta_{hm} = \infty$, representando o cenário-base, em que não há introdução de hidrogênio na matriz energética do estado.

O hidrogênio produzido será consumido localmente, isto é, no Ceará, contribuindo diretamente para a redução do consumo de combustíveis fósseis e eventualmente sua importação. Quando comparadas as eficiências de utilização de combustíveis fósseis e de hidrogênio, percebe-se que uma unidade de energia do hidrogênio tem uma maior eficiência de utilização do que uma unidade de energia fóssil. Em outras palavras, há

necessidade de uma menor quantidade de energia de hidrogênio do que de energia de combustíveis fósseis para realização do mesmo trabalho. Isto será visualizado nas relações seguintes:

$$F = \eta H \quad (4.14)$$

ou

$$H = \frac{F}{\eta} \quad (4.15)$$

onde η é a razão de eficiências $\left(\frac{\eta_h}{\eta_f}\right)$, onde η_h é a eficiência de utilização de hidrogênio e η_f é a eficiência de utilização de combustíveis fósseis.

O hidrogênio produzido poderá ser maior ou menor do que a demanda de combustíveis fósseis da região. Caso essa produção seja menor ou igual a demanda local, as seguintes relações serão válidas:

$$\eta H_n \leq EE_n \quad (4.16)$$

Então o consumo de combustíveis fósseis local F_{dn} , o consumo de hidrogênio local e os combustíveis fósseis locais disponíveis para exportação podem relacionar-se por:

$$F_{dn} = EE_n - \eta H_{pn} \quad (4.17)$$

com

$$H_{dn} = H_{pn} \quad (4.18)$$

e

$$F_{xn} = F_{dn} - F_{pn} \quad (4.19)$$

onde:

- H_n = produção de hidrogênio no ano n ;

- H_{dn} = demanda de hidrogênio no ano n ;
- F_{dn} = demanda de combustíveis fósseis no ano n ;
- F_{pn} = produção de combustíveis fósseis no ano n ;
- F_{xn} = importação de combustíveis fósseis no ano n .

Sendo EE_n é a demanda energética em atividades que necessitam de energia fóssil do Ceará no ano n . Caso a produção de hidrogênio seja maior do que a demanda local, tem-se que

$$\eta H_{pn} > EE_n \quad (4.20)$$

Tendo as seguintes relações

$$F_{dn} = 0 \quad (4.21)$$

$$H_{dn} = \frac{1}{\eta} EE_n \quad (4.22)$$

$$F_{xn} = F_{pn} \quad (4.23)$$

e

$$H_{xn} = H_{pn} - H_{dn} \quad (4.24)$$

Os valores para a demanda inicial de combustíveis fósseis e para a produção inicial de combustíveis fósseis para o Ceará são dados por [6]

$$F_{d0} = 50,5 \text{ PJ}$$

$$F_{p0} = 3,6 \text{ PJ}$$

estes valores para o ano 2000.

Aplicando-se a equação 4.8 encontra-se o valor inicial da importação de combustíveis fósseis para o ano 2000. Então

$$F_{wn} = 46,90 \text{ PJ}$$

O consumo mundial de combustíveis fósseis fluidos para o ano 2000 é de 151 EJ, ou seja, $F_{dw0} = 151 \text{ EJ}$. O valor para a razão de eficiências η é assumido como 1,3587 [46]. Fora assumido que o hidrogênio será introduzido na matriz energética do estado do Ceará no ano 2015. Assim teríamos que:

se $2000 \leq t < 2015$, então $H_n = 0$; para $t = 2015$, $H_n = 1,7 \text{ PJ/ano}$.

A produção inicial de hidrogênio para o mundo é de $H_{w0} = 3,2 \text{ EJ/ano}$.

4.6 Preços de Energia

Os preços finais de energia dependem diretamente de alguns fatores, quais sejam:

- Demanda energética;
- A oferta de energia por fontes geradoras;
- A eficiência de conversão das fontes energéticas;
- Os custos de produção da energia.

Assim, uma investigação de dados históricos revela uma certa dependência dos preços de combustíveis fósseis fluidos com os parâmetros mencionados anteriormente:

$$C_{rfn} = 0,33 + \frac{0,67(G_{rwn})^{0,2}(F_{rqwn})^{0,5}}{(R_{rwn})^{0,5}} \quad (4.25)$$

onde $C_{rfn} = \frac{C_{fn}}{C_0}$ é a razão entre os valores dos preços de combustíveis fósseis,

$G_{rwn} = \frac{G_{wn}}{G_{w0}}$ é a razão entre valores para o Produto Interno Bruto(PIB) mundial,

$F_{rqwn} = \frac{F_{wn}Q_{w0}}{F_{w0}Q_{wn}}$ é a razão entre os valores do consumo mundial de combustíveis fósseis

per capita e $R_{rwn} = \frac{R_{wn}}{R_{w0}}$ é a razão entre as reservas de combustíveis fósseis mundiais.

Ressaltando que, as variáveis com índices subscritos contendo n , são para um dado ano e outras com índices contendo 0 são para valores iniciais no modelo.

Similarmente a seguinte relação é obtida para representar a evolução temporal dos preços mundiais de energia à base de hidrogênio:

$$C_{rhn} = 0,2 + \frac{0,8(G_{rwn})^{0,2} (F_{rqwn})^{0,4}}{(H_{rwn})^{0,43}} \quad (4.26)$$

onde $C_{rhn} = \frac{C_{hn}}{C_0}$ é a razão entre os valores de preços do hidrogênio e H_{rwn} a razão de produção mundial de hidrogênio.

Com o objetivo de mostrar uma média de preços de energia, para o caso da utilização dos combustíveis fósseis e hidrogênio, foi definida a seguinte razão composta de preço de energia:

$$C_{ren} = \gamma_{fn} C_{rfn} + \gamma_{hn} C_{rhn} \quad (4.27)$$

onde tem-se que $\gamma_{fn} = \frac{F_{wn}}{E_{wn}}$ é a fração do consumo mundial de combustíveis fósseis e

$\gamma_{hn} = \frac{H_{wn}}{E_{wn}}$ a fração do consumo mundial de hidrogênio.

Os valores das reservas estimadas no ano 2000 a serem inseridos no programa são os seguintes:

- $R_0 = 110,24$ PJ para o estado do Ceará [6] ;
- $R_{w0} = 5,99 \cdot 10^3$ EJ para o mundo [1].

4.7 Poluição

A poluição causada pelo consumo de combustíveis fósseis está representada por uma variável, P_n , dada por

$$P_n = U \cdot (F_{dn} + \varepsilon H_{pn}) \quad (4.28)$$

onde P_n é a poluição causada pela utilização de combustíveis fósseis e hidrogênio, medida em kg de poluentes emitidos; U é uma constante de proporcionalidade dada pela

poluição por unidade de energia fóssil consumida, é a razão adimensional entre a poluição produzida pela utilização do hidrogênio por unidade de energia e a poluição produzida pela utilização de combustíveis fósseis por unidade de energia. Os valores de U e ε são os seguintes:

- $U = 73,28 \text{ kg/GJ}$;
- $\varepsilon = 0,117$.

A quantidade de poluição emitida no ano 2000 é um parâmetro de entrada do programa. Assim, o valor deste parâmetro será calculado por:

$$P_0 = U \cdot F_{dn} = 73,28 \cdot 0,0505 \cdot 10^9 = 3,7 \text{ bilhões de kg de poluentes.}$$

4.8 Qualidade de Vida

Este não é um fator fácil de ser definido ou medido. Há muitas definições e cálculos para medição da qualidade de vida em vários lugares no mundo. Para este trabalho em particular, somente três indicadores foram considerados para se ter efeitos claros e diretos na qualidade de vida humana, que são o produto interno bruto (PIB), população e danos ambientais (poluição). Assim, a qualidade de vida será expressa por

$$L_n = \frac{(G_m)}{(P_m)(Q_m)} \quad (4.29)$$

onde $G_m = \frac{G_n}{G_0}$ é a razão entre valores do produto interno bruto(PIB), $Q_m = \frac{Q_n}{Q_0}$ a

razão entre valores da população e $P_m = \frac{P_n}{P_0}$ a razão entre valores de poluição.

4.9 Área de Célula Fotovoltaica Requerida e Área Total do Terreno Utilizado

A área total requerida para instalação de células fotovoltaica será dada por

$$A_{cn} = A_{hm} \quad (4.30)$$

onde A_{cn} é a área total de células fotovoltaicas requerida e A_{hm} é a área de células fotovoltaicas requerida para produção de hidrogênio.

A fim de evitar eventuais sombreamentos e para facilitar as atividades de manutenção dos painéis fotovoltaicos, um determinado espaçamento entre estes é requerida. Assim, a área total do terreno onde o projeto será desenvolvido será determinada por

$$A_{pn} = \frac{A_{cn}}{\beta} \quad (4.31)$$

onde A_{pn} é a área total do terreno e β é uma constante que nos dá o percentual da área total do terreno utilizada para instalação das células fotovoltaicas, tendo valor de 0,667.

4.10 Área Total de Células Fotovoltaicas para Produção de Hidrogênio

A área total de células fotovoltaicas necessária para produzir hidrogênio (A_{hm}) de forma a suprir toda a demanda deste insumo energético será determinada pela seguinte relação:

$$A_{hm} = \frac{H_n}{\eta_{pv}\eta_{el}S_{av}} \quad (4.32)$$

onde H_n é a produção de hidrogênio no ano t_n , η_{pv} a eficiência de conversão do módulo fotovoltaico (células fotovoltaicas mais controladores de cargas), η_{el} a eficiência do eletrolisador e S_{av} a irradiância anual média local.

Os valores para os parâmetros trabalhados na equação 9.1 são:

$\eta_{pv} = 0,12$ - utilização de um sistema de placas planas sem concentradores;

$\eta_{el} = 0,75$ - eficiência do eletrolisador até o ano 2040. Do ano 2041 em diante a

eficiência aumentaria para 0,90 ;

$$S_{av} = 6,7 \text{ GJ/m}^2/\text{ano} [12].$$

4.11 Capacidade da Usina de Dessanilização da água

A relação que representa a demanda de água (W_{dn}) no ano t_n será dada por:

$$W_{dn} = W_{hn} \quad (4.34)$$

onde W_{hn} é a demanda de água para a produção de hidrogênio. Sendo

$$W_{hn} = W_1 \cdot H_n \quad (4.35)$$

onde W_1 representa o consumo do eletrolisador por GJ de hidrogênio produzido.

O consumo de água por GJ de hidrogênio gerado será dado por $W_1 = 90 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ [54] de água por GJ de hidrogênio.

4.12 Benefícios Ambientais

A utilização de sistemas a base de hidrogênio, em substituição à utilização de combustíveis fósseis, gera algumas conseqüências positivas ao meio ambiente.

A não utilização de sistemas a hidrogênio gera danos ambientais calculados por

$$D_{en} = EE_n \cdot C_p \quad (4.36)$$

onde D_{en} representa o custo total dos danos ambientais no ano t_n , EE_n o consumo de energia em atividades que necessitam de energia fóssil no ano t_n e C_p o custo dos danos ambientais por unidade de energia fóssil consumida.

Com a utilização do hidrogênio em substituição aos combustíveis fósseis os custos por danos ambientais decresce em

$$D_{hn} = (F_{dn} + \varepsilon H_n) \cdot C_p \quad (4.37)$$

onde D_{hn} representa o custo causado pelo hidrogênio e pelos combustíveis fósseis, F_{dn} a demanda de combustível fóssil no ano t_n e ε uma razão definida pela poluição

produzida pelo hidrogênio dividida pela poluição causada pela utilização de combustíveis fósseis. Uma expressão descreve a economia pela mitigação da poluição, dada por

$$S_{en} = D_{en} - D_{hm} = \eta_r \cdot H_n \cdot C_p - \varepsilon \cdot H_n \cdot C_p \quad (4.38)$$

O valor calculado para os custos ambientais por unidade de energia fóssil foi $C_p = \text{US\$ } 12,52/\text{GJ}$ [85].

4.13 Economia Devido a Maior Eficiência Obtida com a Utilização de Hidrogênio

A utilização de hidrogênio em substituição aos combustíveis fósseis gera uma majoração na eficiência de conversão de combustíveis, já que esta é maior em sistemas a base de hidrogênio. Assim, um equacionamento para devida representação deste aumento da eficiência é dada por

$$S_{un} = EE_n \cdot C_{fn} + (H_n \cdot C_{hm} - F_{dn} \cdot C_{fn}) \quad (4.39)$$

onde C_{fn} representa o preço do combustível fóssil no ano t_n e C_{hm} o preço do hidrogênio no ano t_n .

Os valores dos parâmetros de entrada do modelo matemático são:

- $C_{f0} = \text{US\$ } 14,51/\text{GJ}$ o custo do litro de gasolina no mercado internacional no ano 2000;
- $C_{h0} = \text{US\$ } 41,80/\text{GJ}$ preço inicial de hidrogênio comprimido para transporte em superfície [26].

4.14 Crédito para o Oxigênio

O processo de eletrólise da água gera dois produtos: hidrogênio e oxigênio. Desta forma, oxigênio poderia fornecer ganhos e retorno de capitais ao projeto. Estes ganhos serão representados por S_{on} na seguinte equação:

$$S_{on} = C_o \cdot H_n \quad (4.40)$$

onde C_o representa o crédito para o oxigênio por GJ de hidrogênio produzido. O valor deste parâmetro de entrada do modelo será $C_o = \text{US\$ } 3,50/\text{GJ}$ [85].

4.15 Ganho na Venda de Hidrogênio

O ganho total anual devido à venda do hidrogênio será representado por:

$$I_{hm} = C_{hm} \cdot H_n \quad (4.41)$$

onde I_{hm} representa a renda anual obtida com a venda do hidrogênio produzido e C_{hm} o preço do hidrogênio no ano t_n .

4.16 Células Fotovoltaicas

Dois tecnologias que oferecem melhores caminhos para intensificação no mercado de vendas de módulos planos são a silício cristalino(c-Si) e filmes finos(thin films). As eficiências para características destas tecnologias são:

- Tecnologia C-Si – 12% a 17% de eficiências, sendo que módulos tendem a ter uma redução em suas eficiências em torno de 0,5% a 2%, tempo de vida de 30 anos, com custos em torno de US\$ 75/m²;
- Filmes finos – 5% a 11% de eficiências, tempo de vida de 30 anos, com custos em torno de US\$ 50/m².

Do ano 2015 até o ano 2045 estima-se uma queda anual de 2% para o custo das células fotovoltaicas devido aos avanços tecnológicos. Após 2045 estima-se uma estabilidade dos preços dos painéis fotovoltaicos. CC será o custo de células fotovoltaicas por unidade de área no ano t_n . Seu valor para o ano 2015 será de US\$ 75/m² [82].

Logo,

se $2015 < t_n < 2045$,

$$\text{então } CC(I) = 0.98 * CC(I-1) \quad (4.42)$$

Para $t_n > 2045$,

$$CC(I) = CC(I-1). \quad (4.43)$$

Como visto anteriormente neste mesmo tópico, o tempo de vida estimado para um painel fotovoltaico é de 30 anos. Assim, a lógica a ser inserida no programa será:

Se $t_n < 2045$,

$$\text{então } TCPV = \Delta A_{cn} \cdot CC(I). \quad (4.44)$$

$$\text{Senão } TCPV = \Delta A_{cn} \cdot CC(I) + \Delta A_{c(n-45)} \cdot CC(I). \quad (4.45)$$

4.17 Eletrolisador

O eletrolisador é o coração do sistema. Nele ocorrerá a eletrólise para devida produção de hidrogênio. Algumas características são assumidas quando da devida análise de algumas variáveis a este equipamento inerentes, que são:

- Tempo de vida estimada em 20 anos;
- Custo do eletrolisador = US\$ 3,40/GJ de hidrogênio por ano [54].

Assim, tem-se que:

C_2 - custo do eletrolisador por GJ de hidrogênio produzido;

$\Delta H_n = H_n - H_{n-1}$ - variação anual da produção de hidrogênio. Se $t_n < 2035$

$$\text{Então } C_{eln} = C_2 \cdot \Delta H. \quad (4.46)$$

$$\text{Senão } C_{eln} = C_2 \cdot \Delta H_n + C_2 \cdot \Delta H_{n-35} \quad (4.47)$$

onde C_{eln} representa o capital requerido para o eletrolisador no ano t_n .

4.18 Armazenamento e Transmissão de Hidrogênio

Os custos de armazenamento de hidrogênio são [34]:

Tabela 4.1 - Custos de armazenamento e distribuição de hidrogênio.

Tipo	Custo(US\$/GJ)	Quantidade armazenada(GJ)
Cavernas, aquíferos e minas	1-5,00	valor constante
Gás comprimido - curto período	1,84	20.300
	1,53	130.600
Gás comprimido - longo período	12,34	391.900
	7,35	3.919.000
Hidrogênio liquefeito - curto período	5,13	20.300
	5,26	130.600
Hidrogênio liquefeito - longo período	8,09	391.900
	5,93	3.9 milhões

Fonte: Hydrogen delivery technology roadmap, 2005.

Onde curto período = 1-3 dias e longo período = 1 mês.

O tempo de vida de um sistema de armazenamento e transmissão de hidrogênio é de 20 anos. Assim, se C_3 representa o custo de armazenamento e transmissão por GJ de hidrogênio, caso $t_n < 2030$,

$$\text{então } C_{sn} = C_3 \cdot \Delta H, \quad (4.48)$$

$$\text{senão } C_{sn} = C_3 \cdot \Delta H_n + C_3 \cdot \Delta H_{n-36}, \quad (4.49)$$

onde C_{sn} representa o capital total requerido para armazenamento e transmissão de hidrogênio no ano t_n .

O sistema de armazenamento de hidrogênio proposto neste trabalho será do tipo gás comprimido curto período para maiores quantidades de energia armazenada, supondo uma infra-estrutura de comercialização e utilização que absorva toda a produção em até 3 dias.

4.19 Usina de Dessanilização

A usina de dessanilização terá uma vida útil estimada em 25 anos. Assim, se C_4 representar o capital gasto com a usina de dessanilização por m³ de água, e

$$\Delta W_{dn} = W_{dn} - W_{d(n-1)} \quad (4.50)$$

caso $t_n < 2040$,

$$\text{então } C_{dn} = C_4 \cdot \Delta W_{dn}, \quad (4.51)$$

$$\text{senão } C_{dn} = C_4 \cdot \Delta W_{dn} + C_4 \cdot \Delta W_{d(n-41)} \quad (4.52)$$

O custo inicial da usina de dessanilização será de US\$ 0,617/m³ [62] de água utilizada.

4.20 Custos de Operação e Manutenção(O & M):

4.20.1 Células Fotovoltaicas

Se C_5 for o custo de O & M por m² de área de célula fotovoltaica, então

$$O_{pvn} = C_5 \cdot A_{cn} \quad (4.53)$$

onde O_{pvn} representa o custo total de O & M de células fotovoltaicas no ano t_n .

O valor do custo anual de O & M será de:

$$C_5 = \text{US\$ } 1,1/\text{m}^2 \text{ [82] de área de célula fotovoltaica.}$$

4.20.2 Armazenamento e Distribuição

Se C_7 representar o custo de O&M para armazenamento e distribuição por GJ de hidrogênio, então

$$O_{sn} = C_7 \cdot H_n \quad (4.54)$$

onde O_{sm} representa o custo total de O&M para armazenamento e distribuição de hidrogênio. O valor de C_7 é US\$ 0,4/GJ de hidrogênio produzido [34].

4.20.3 Eletrolisadores

Se C_6 representar os custos de O & M por GJ de hidrogênio produzido, então

$$O_{eln} = C_6 \cdot H_n \quad (4.55)$$

Onde O_{eln} representa o custo total de O & M do eletrolisador no ano t_n . O valor de C_6 será US\$ 0,68/GJ de hidrogênio obtido [54].

4.20.4 Usina de Dessalinização:

Se C_8 representa o custo de O & M por m³ para a usina de dessalinização, então

$$O_{dn} = C_8 \cdot W_{dn} \quad (4.56)$$

onde O_{dn} representa o custo total de O & M na usina de dessalinização no ano t_n . O valor de C_8 é US\$ 0,3/m³ [62].

4.21 Número de Geradores Eólicos Necessários à Dessalinização da água para Alimentar o Processo de Eletrólise e seus custos

A água utilizada no projeto é retirada do mar. Desta forma, seria necessária sua dessalinização pelo processo de osmose reversa. Este é um processo em que se aplica uma pressão na porção mais concentrada da solução, revertendo-se a tendência natural de ocorrência da osmose. Assim, a água da solução salina é direcionada à parte onde a concentração de soluto é menor, fazendo com que os íons dos sais sejam retidos na membrana utilizada no processo. A energia requerida pelo processo de dessalinização da água do mar por osmose reversa (E_1) é de aproximadamente 6,9 kWh/m³ de água utilizada [12]. O processo descrito no parágrafo anterior necessita, evidentemente, de

energia para sua ocorrência. Desta forma, uma dada quantidade de geradores eólicos seria necessária para devida alimentação deste processo. O modelo de gerador eólico que tem sua utilização proposta neste trabalho é o E-70 da empresa ENERCON, cujo tempo de vida é estimado em 20 anos. Sua curva de potência é levantada a partir dos dados contidos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados relativos ao funcionamento do gerador elétrico E-70 da empresa ENERCON.

Velocidade do Vento (m/s)	Potência (kW)	Coefficiente de Potência (C_p)
1	0,0	0,0
2	2,0	0,10
3	18,0	0,27
4	56,0	0,36
5	127,0	0,42
6	240,0	0,46
7	400,0	0,48
8	626,0	0,50
9	892,0	0,50
10	1223,0	0,50
11	1590,0	0,49
12	1900,0	0,45
13	2090,0	0,39
14	2230,0	0,34
15	2300,0	0,29
16	2310,0	0,23
17	2310,0	0,19
18	2310,0	0,16
19	2310,0	0,14
20	2310,0	0,12
21	2310,0	0,10
22	2310,0	0,09
23	2310,0	0,08
24	2310,0	0,07
25	2310,0	0,06

Fonte: *Catálogos da ENERCON* (www.enercon.de).

A energia total gerada por este modelo foi estimada utilizando dados da tabela 4.2 e a equação

$$E_{ger} = \sum f_i P_i T \quad (4.57)$$

onde T representa o período total de tempo considerado na avaliação, P_i a potência fornecida pela curva de potencia do aerogerador para a classe de velocidade do vento v_i e f_i a frequência relativa de cada classe de velocidade de vento v_i , sendo esta frequência fornecida por [14]

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (4.58)$$

onde t_i representa o período de tempo no qual foi registrada a classe de velocidade do vento v_i . Assim, o número de geradores necessários à dessalinização da água será dado por

$$GER(n) = \frac{B_{wn}}{E_{ger}} \quad (4.59)$$

onde $B_{wn} = E_1 \cdot W_{dn}$ é a energia elétrica requerida no processo de dessalinização da água do mar no ano n .

Os custos pela instalação de geradores eólicos são de US\$ 2.000.000/2MW de potência gerada, para cada gerador. Assim, a equação que determina estes custos é dada por

$$CAER(J) = GER(n) \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \quad (4.60)$$

onde $CAER(J)$ é o valor anual gasto com a instalação de aerogeradores, valor gerado em bilhões de U.S.\$.

O valor de O&M gasto com os geradores elétricos é cerca de 10% de seu custo. Assim, tem-se que

$$COMA(J) = 0,1 \cdot CAER(J) \quad (4.61)$$

onde $COMA(J)$ é o custo total anual de operação e manutenção dos geradores eólicos.

Capítulo 5

Energia do Hidrogênio e a Atmosfera

5.1 A Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é uma camada que se estende desde a superfície terrestre até elevados níveis de altitude, as quais envolvem a Terra. Nela estão contidos alguns gases e materiais particulados, líquidos e sólidos, denominados aerossóis. Sua composição apresenta uma predominância do gás nitrogênio, seguido pelo oxigênio e por outros gases constituintes, inclusive o hidrogênio, o dióxido de carbono, o ozônio e o vapor d'água; estes que possuem papéis importantíssimos na ocorrência de fenômenos meteorológicos e, conseqüentemente, na manutenção dos processos que dão origem à vida neste planeta. A atmosfera é uma região oxidante, ou seja, muitas substâncias liberadas a esta são oxidadas devida à alta concentração de O_2 . A figura 5.1 mostra o perfil vertical da atmosfera e suas divisões em camadas, estas organizadas de forma a facilitar os estudos dos processos físico-químicos ocorrentes na mesma.

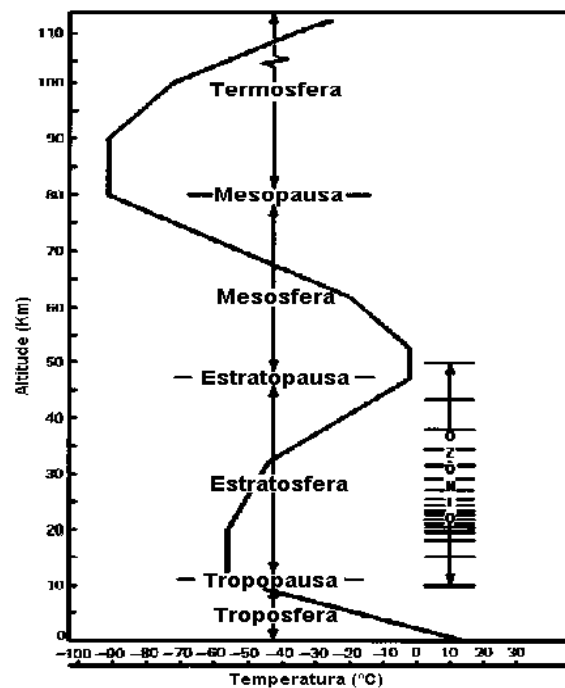


Fig. 5.1 - Perfil vertical médio de temperatura na atmosfera (Grimm).

Podem ser considerados poluentes do ar aqueles componentes adicionados ao mesmo, em sua grande parte por ações antropogênicas, que causam efeitos nocivos ao

meio ambiente. Estes podem ser encontrados sob a forma de particulados ou gasosa. Os poluentes emitidos em maiores quantidades por ações humanas são o monóxido de carbono, óxidos de enxofre, material particulado, óxidos de enxofre e alguns hidrocarbonetos. Os níveis de poluição do ar em uma determinada região dependem da quantidade e do tipo de poluente emitido pela fonte, da forma como os poluentes são liberados e das condições meteorológicas que levam à dispersão desses poluentes [33].

As fontes emissoras dos poluentes podem ser estacionárias, como termelétricas e indústrias, ou móveis, como veículos do setor de transportes. Causam impactos ao meio ambiente não apenas a emissão de poluentes primários, como o CO_2 e o SO_x , mas também as interações dos mesmos com outros constituintes da atmosfera, resultando em agentes poluidores como o smog fotoquímico.

Para facilitar o estudo dos efeitos devido às variações nas emissões de alguns gases na atmosfera foram criadas duas categorias para os mesmos, que são poluentes primários e secundários, sendo estes últimos obtidos a partir das reações químicas entre alguns constituintes naturais da atmosfera e os poluentes primários, que são liberados diretamente pelas fontes poluidoras.

Alguns gases que compõem a atmosfera possuem características que aumentam as suas relevâncias quando de análises de fenômenos físicos ocorrentes nesta região.

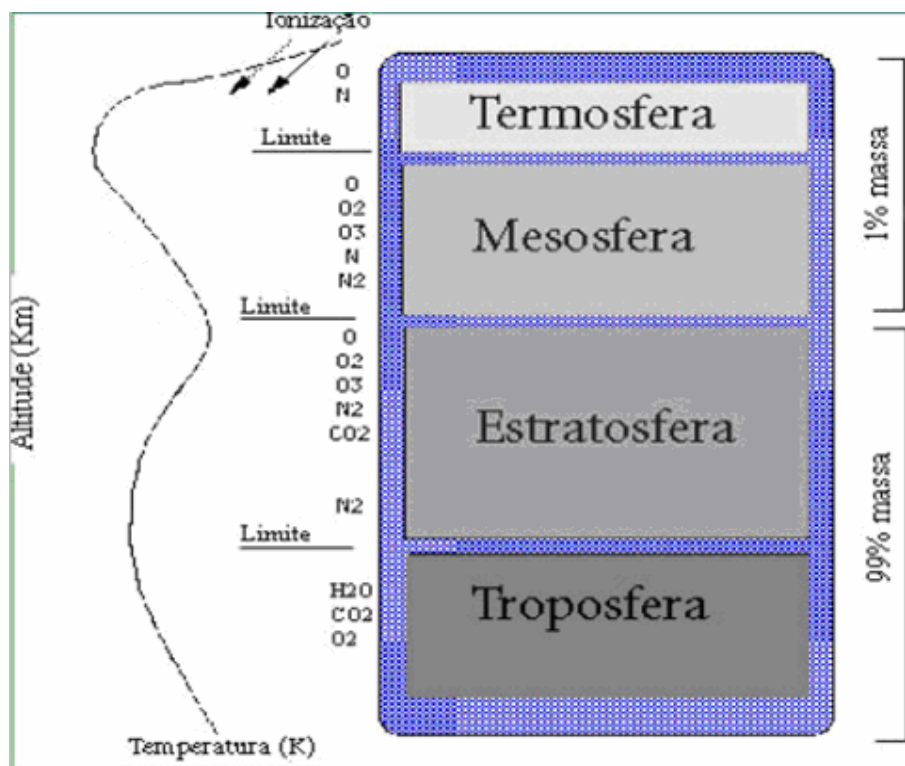


Fig. 5.2 - As camadas atmosféricas e seus constituintes (Varejão-Silva, 2005).

5.1.1 O Ozônio

O ozônio, presente principalmente na estratosfera, tem a capacidade de absorver radiação solar na faixa do ultravioleta, recebendo esta energia numa faixa de $2,3 \times 10^{-4}$ cm a $2,9 \times 10^{-9}$ cm para formação posterior de uma molécula e um átomo de oxigênio [84]. Sua concentração varia com a latitude, estações do ano, horário e padrões de tempo [32]. Sem a presença deste componente na atmosfera, formando o que se conhece por camada de ozônio, as condições ambientais terrestres seriam bastante nocivas à sobrevivência dos seres vivos, pois parte da radiação solar na faixa do ultravioleta não seria absorvida na atmosfera, causando sérios danos aos seres vivos.

5.1.2 O Gás Carbônico

O dióxido de carbono, CO_2 , é um constituinte permanente da atmosfera terrestre e sua concentração varia como resultado de emissões antropogênicas devido à utilização de combustíveis fósseis em máquinas de combustão interna, absorção e liberação pelo oceano e o processo de fotossíntese das plantas [45]. Porém, a principal fonte do aumento na concentração de dióxido de carbono na atmosfera é a utilização de combustíveis fósseis [58]. O impacto na temperatura atmosférica e as mudanças climáticas no sistema Terra-Atmosfera estão diretamente ligados às emissões deste gás. O CO_2 é um forte absorvedor na faixa de 12 à $18 \mu\text{m}$ do espectro da radiação solar [44]. Desta forma, um incremento no conteúdo deste componente na atmosfera contribuiria para o aumento da temperatura da superfície terrestre, pois o mesmo reemite a energia absorvida por ele de volta à esta superfície. Baseado num modelo radiativo de equilíbrio convectivo, Manabe e Wetherald(1967) concluíram que, um incremento de 10% na concentração de CO_2 conduziria a um aquecimento global de $0,3^\circ\text{C}$. Ao considerarem um dobramento na concentração de CO_2 na atmosfera, haveria um aquecimento de $2,36^\circ\text{C}$. A concentração de CO_2 variou de 280 ppm na era pré-industrial para 379 ppm em 2005 [58].

5.1.3 O Óxido de Nitrogênio

O NO_x é um dos componentes que intensificam o efeito estufa. Este é um dos constituintes dos produtos da queima de combustíveis fósseis. Em situações em que os

motores de combustão interna de ignição por centelha operam com misturas pobres em oxigênio, tomando-se como referência sua quantidade estequiométrica, as emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos são mais elevadas, mas os níveis de óxidos de nitrogênio serão menos elevados, em consequência da queima incompleta da gasolina; o teor de óxido de nitrogênio será reduzido porque a temperatura adiabática de chama será reduzida. Porém, quando o motor opera em misturas ricas em oxigênio, tem-se uma combustão completa e as quantidades de monóxidos de carbono e outros hidrocarbonetos seriam menores, com um aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio, pois a temperatura de operação será mais baixa. Na situação estequiométrica, a produção de óxidos de nitrogênio será máxima, pois a temperatura de operação será elevada. A quantidade de poluentes emitidos por um motor de combustão interna depende de suas condições operacionais e, principalmente, da razão ar/combustível [64].

O óxido de nitrogênio liberado à atmosfera pode formar o smog fotoquímico, o qual constitui em uma combinação de elementos gasosos e particulados. Sua formação ocorre em decorrência da absorção de energia radiante por parte do NO_2 , dissociando-se em NO e O . Este oxigênio livre combina-se com uma molécula de oxigênio, formando uma molécula de ozônio. Os hidrocarbonetos presentes na atmosfera reagem com a molécula de oxigênio livre, o NO e com o NO_2 , causando uma série de condições nocivas à saúde humana. O NO_2 ao absorver a radiação solar apresenta uma coloração marrom, uma das características do smog.

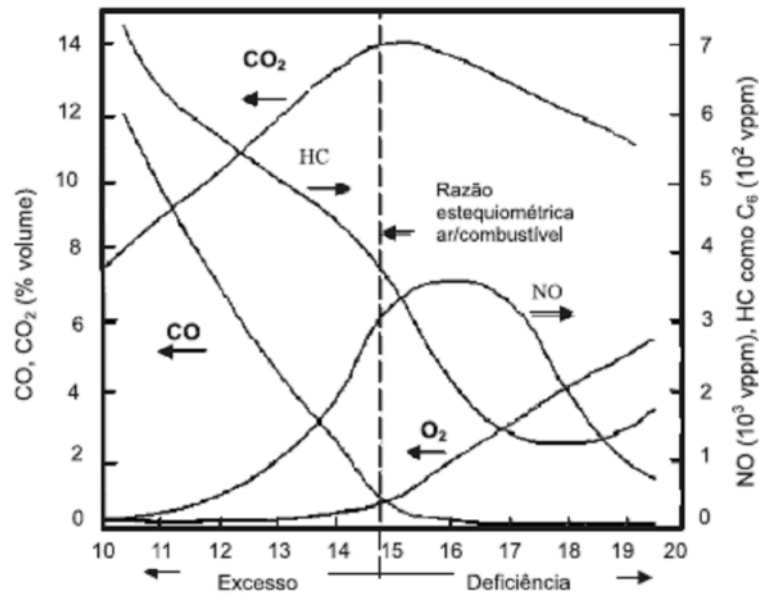


Fig. 5.3 - Emissão de poluentes por um motor de combustão interna em função da razão ar/combustível (Rangel, 2003).

A concentração atmosférica global de óxido nitroso aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 270 ppb (parte por bilhão) para 319 ppb em 2005. A taxa de aumento foi praticamente constante desde 1980. Mais de um terço de todas as emissões de óxido nitroso é antrópica, devendo-se principalmente as queimadas florestais [58].

5.1.4 O Vapor d'água

O vapor d'água troposférico é o maior contribuinte para o efeito estufa. Porém, sua concentração não depende tanto de atividades antropogênicas, estando sua formação diretamente ligada a processos naturais.

O conteúdo deste constituinte na atmosfera é variável tanto espacial quanto temporalmente, possuindo maiores concentrações nas regiões próximas ao equador, sobre florestas tropicais úmidas e sobre os oceanos. As principais funções do vapor d'água atmosférico são a redistribuição de energia via calor latente, condensação e precipitação, para devido fornecimento de água doce para sobrevivência da vida na Terra, e sua contribuição para o aquecimento natural da atmosfera terrestre através do efeito estufa [87]. Pela devida análise da figura 5.4 verifica-se que o vapor d'água é responsável pela absorção de grande parte de energia na faixa do infravermelho.

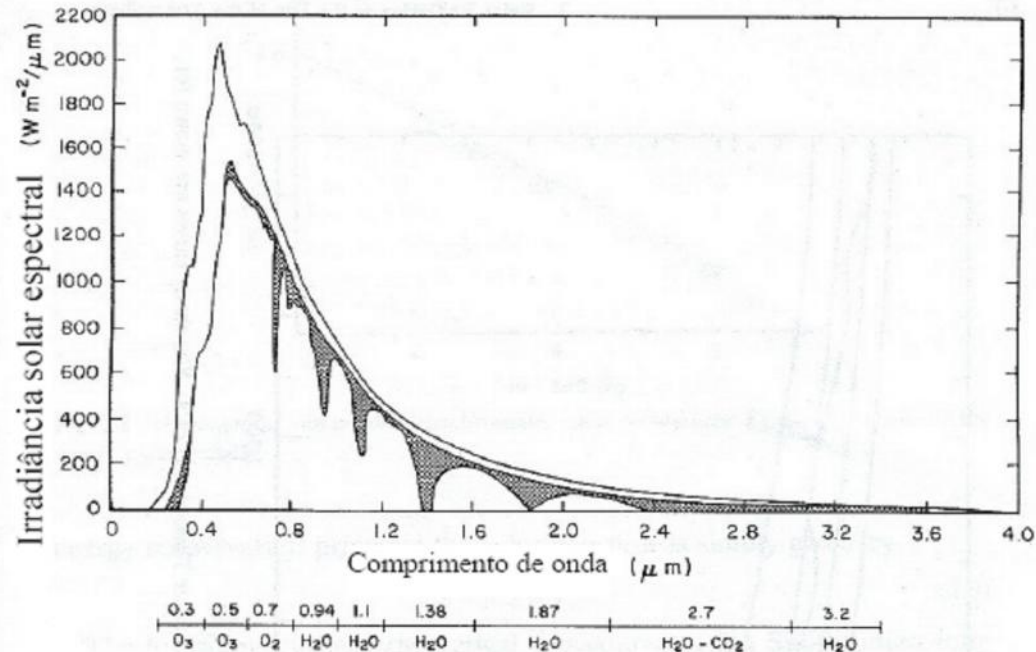


Fig.5.4 - Curvas de distribuição espectral da irradiância solar, sendo a irradiância observada no topo da atmosfera e irradiância observada ao nível do mar. A área sombreada indica a quantidade de energia absorvida por alguns gases atmosféricos, como o O_2 , O_3 , H_2O e o CO_2 (Yamasoe, 2006).

5.1.5 Óxido de Enxofre

A concentração em excesso de óxido de enxofre na atmosfera gera uma condição bastante favorável à ocorrência de chuvas ácidas. Sob certas condições, o SO_2 pode transformar-se em SO_3 , reagir com o vapor d'água na atmosfera, originando ácido sulfúrico, o agente causador das chuvas ácidas. Estas podem causar uma série de efeitos nocivos ao meio ambiente, tais como a acidificação de lagos, danos à vegetação e florestas, corrosão de construções e danos diretos à saúde humana [33]. Outra fonte de geração de chuvas ácidas são os óxidos de nitrogênio, pois elevadas emissões destes à atmosfera pode causar a formação de ácidos nítricos, HNO_3 . Os efeitos da precipitação deste fenômeno podem ocorrer em regiões distantes das fontes poluentes, pois os ácidos são gerados durante o transporte de massa de ar que contém os óxidos.

A emissão de sulfeto de hidrogênio a partir da decomposição de matéria orgânica e a liberação de sulfatos SO_4^{2-} por parte da maresia representam o dobro das emissões de enxofre à atmosfera a partir de atividades antropogênicas [33].

5.1.6 Monóxido de Carbono

Este é adicionado à atmosfera como consequência da combustão de combustíveis fósseis, principalmente em motores de automóveis. Ele possui características venenosas, além de ser incolor e inodoro.

O monóxido de carbono absorve radiação na faixa do infravermelho, reemitindo a mesma de volta à superfície terrestre, intensificando assim o efeito estufa.

5.1.7 Metano

O metano é um gás incolor, possui uma molécula tetraédrica e apolar. Este é o segundo maior contribuinte ao efeito estufa, sendo produzido a partir da utilização dos motores de combustão interna, bactérias encontradas nas plantações de arroz, decomposição de resíduos orgânicos (aterros sanitários e sistemas de tratamentos de esgotos), digestão de alguns animais, extração de combustíveis minerais (gás natural), terras pantanosas. Possui uma vida média atmosférica bem menor do que a do carbono, como consta na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Alguns gases de efeito estufa e suas vidas médias na atmosfera.

Gás	Vida Média Atmosférica (anos)
CO ₂	100
CH ₄	10
NO _x	170

Fonte: Hinrics, 2003.

Este é muito utilizado como fluido de combustão em processos de obtenção de calor, principalmente para geração de energia elétrica em termelétricas.

5.2 O Efeito Estufa

O efeito estufa é o termo utilizado para caracterizar a reemissão de radiação de ondas longas ascendentes por moléculas de gases e materiais particulados suspensos na atmosfera terrestre, agindo como uma estufa para o planeta. Grande parte da energia irradiada pelo Sol à Terra que atinge a atmosfera é absorvida por nuvens e partículas em

suspensão ou reirradiada de volta para o espaço. A outra parte é absorvida pela superfície terrestre. Esta última reirradia esta parcela de energia sob a forma de radiação de ondas longas de volta à atmosfera. Alguns constituintes da atmosfera, principalmente o vapor d'água e o CO₂ absorvem esta radiação em determinados comprimentos de onda, reirradiando de volta à superfície esta energia absorvida. Este fenômeno de reemissão ocorre através da emissão de radiação de ondas longas descendentes à superfície terrestre. Caso não existisse este efeito, o planeta seria resfriado em pelo menos 30°C, pois a superfície da Terra emitiria de volta ao espaço toda a energia solar por ela absorvida. A quantidade de energia, em unidade de potência por unidade de área, emitida sob a forma de radiação de ondas longas pela superfície terrestre em direção à sua atmosfera é da ordem de 390W/m². Deste total, 240W/m² serão emitidos ao espaço, enquanto que 150W/m² são reemitidos de volta à superfície da Terra sob a forma de radiação infravermelha. As emissões antropogênicas de gás carbônico, em decorrência da combustão de combustíveis fósseis, somados com o processo de desmatamento por queimadas, compõem um fator de forte influência na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera, conseqüentemente um forçante às mudanças climáticas. A figura 5.5 mostra o esquema do efeito estufa.



Fig. 5.5 - Esquematização do Efeito Estufa (www.rudzerhost.com).

5.3 Mudanças Climáticas

As reações em decorrência das alterações do equilíbrio energético Terra-atmosfera, geradas pelas mudanças nas quantidades de gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera, têm conduzido à uma série de eventos ligados ao estudo destes efeitos. Um deles é a reunião anual denominada Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas(IPCC), estabelecida pela Organização Meteorológica Mundial(WMO) e pelo Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente(Unep), onde um relatório sobre as condições climáticas e sua evolução temporal é preparado como um parâmetro para futuras tomadas de decisões por parte dos líderes de governos mundiais.

Um termo, chamado mudanças climáticas, foi criado para melhor trabalhar estas questões ambientais e refere-se a quaisquer mudanças climáticas ocorridas ao longo do tempo, quer se deva à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana [58].

Algumas observações do comportamento climático global têm atraído atenções de vários profissionais da área de meteorologia. Estas são o aumento do teor médio de vapor d'água na atmosfera, onze dos últimos doze anos estão entre os doze anos mais quentes desde o início do registro instrumental da temperatura de superfície global, observações desde 1961 mostram que a temperatura média do oceano global foi elevada em profundidades de até 3000 m, resultando numa expansão da água dos oceanos, elevando o nível do mar em várias regiões; o derretimento de geleiras e as coberturas de neve em algumas montanhas, contribuindo para a elevação do nível do mar [58].

As modificações climáticas em nosso planeta podem causar uma série de situações indesejáveis, como transformação de áreas férteis em desertos e o desaparecimento de áreas costeiras em decorrência da elevação do nível do mar.

Um índice, denominado Poder de Aquecimento Global, foi criado pelo IPCC como forma de melhor caracterizar a ação de um poluente na atmosfera terrestre. Este é definido como a razão entre a integração no tempo do forçante radiativo de uma emissão instantânea de 1kg de um dado gás traço relativo a 1kg de um gás tomado como referência(normalmente o dióxido de carbono). Assim, tem-se a seguinte expressão:

$$PAG(x) = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot [x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [r(t)] dt} \quad (5.1)$$

Onde TH é o tempo no qual o cálculo será considerado, a_x o forçante radiativo relacionado às mudanças climáticas do incremento de uma unidade do gás em questão na concentração atmosférica, $x(t)$ é o decaimento da concentração ao longo do tempo de um pulso de gás injetado na atmosfera, a_r é o forçante radiativo relacionado às mudanças climáticas do incremento de uma unidade do gás de referência (normalmente o CO_2) e $r(t)$ o decaimento da concentração ao longo do tempo do gás de referência. Portanto, no cálculo do PAG, são considerados o tempo de permanência médio na atmosfera e o efeito de aquecimento cumulativo de cada gás.

Os mesmos conceitos serão aplicados aos termos no denominador da relação para o dióxido de carbono. Assim, uma ponderação do tempo de permanência médio do gás na atmosfera e de seu peso molecular contribuem para uma melhor caracterização da atuação destes poluentes ao meio ambiente. De acordo com o relatório do IPCC de 1995, foram obtidos os valores para o Poder de Aquecimento Global de alguns elementos listados na tabela .

Tabela 5.2 – Poder de Aquecimento Global para o CO_2 , CH_4 e o NO_x .

Gás de Efeito Estufa	Fórmula Química	Concentração pré-industrial (ppbv)	Concentração em 1994(ppbv)	Poder de Aquecimento Global (PAG)
Dióxido de Carbono	CO_2	278.000	358.000	1
Metano	CH_4	700	1721	21
Óxido de Nitrogênio	NO_x	275	311	310

Fonte: IPCC, 2007.

Um conceito bastante utilizado para determinar os impactos ambientais causados por alguns gases liberados à atmosfera é o de fator de emissão. Este representa a taxa média da emissão de um dado poluente para uma dada fonte, relativo às unidades de atividade. Sendo assim, foram estimados pelo IPCC, os valores encontrados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Fatores de emissão a gases de efeito estufa

Combustível	Tipo de veículo	CO ₂ (kg/GJ)	CH ₄ (kg/GJ)	NO _x (kg/GJ)
Gasolina	Veículos de serviços leves	68,6	0,0114	0,0054
Diesel	Caminhões de serviços leves	73,4	0,0019	0,0054
	Caminhões de serviços pesados	73,4	0,0035	0,0021
	Fora de estrada	73,4	0,0038	0,0295
	Transporte por via férrea	73,4	0,0040	0,0295
	Marítimo	73,4	0,0040	0,0269
Óleo Combustível	Marítimo	76,6	0,0080	0,0021

Fonte :ICF CONSULTING.

Neste trabalho foram utilizados valores obtidos a partir de médias aritméticas para devida representação dos níveis de emissão dos combustíveis fósseis fluidos considerados, gasolina, diesel, óleo combustível e gás liquefeito de petróleo. Desta forma foram obtidos os valores mostrados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores médios para os fatores de emissão do CO₂, CH₄, SO_x e NO_x.

	CO ₂ (kg/GJ)	CH ₄ (kg/GJ)	SO _x (kg/GJ)	NO _x (kg/GJ)
Fatores de emissão médios(kg/GJ)	72,86	0,0054	0,4	0,0132

5.4 Protocolo de Kyoto

Este consiste num documento assinado por 141 países do mundo todo. Tem como foco a redução nas emissões de gases intensificadores do efeito estufa. Ele estipula que seus países-membros têm que atingir uma meta de redução entre os anos de 2002 e 2012 em 5,2% em relação aos níveis de 1990, o que equivale à redução em 42% dos níveis atuais de emissão [15].

Os Estados Unidos, juntamente com a Austrália, não aderiram a esta corrente. Lobbies de empresas ligadas ao setor de hidrocarbonetos estimam que, se os Estados Unidos aderissem ao protocolo, sofreriam perdas entre 200 a 300 bilhões de dólares ao ano. Os cortes nos gastos de produção elevariam os preços de alguns produtos, o que certamente resultaria numa situação politicamente incômoda para a presidência daquele país [15].

Os dois países que não aderiram ao Protocolo, Estados Unidos e Austrália, iniciaram uma corrida em favor do seqüestro de carbono. Este termo representa algumas

medidas tomadas por estes países, sendo o seqüestro de carbono em depósitos subterrâneos, plantações de árvores com o intuito da captura do CO₂ atmosférico, a inserção do dióxido de carbono em águas oceânicas pela fertilização do fitoplâncton ou a geração de depósitos a mais de 1000 metros de profundidade nos oceanos.

5.5 Economia do Hidrogênio e Emissão de Poluentes

O termo economia do hidrogênio está associado à estruturação necessária à produção, armazenamento, transporte e utilização do hidrogênio como uma alternativa substitutiva aos combustíveis fósseis. Mudanças extremas serão esperadas, visto que a matriz energética mundial é fortemente influenciada pelo petróleo.

O hidrogênio, elemento simples e abundante, de baixíssimo impacto ambiental, torna-se cada vez mais uma alternativa energética atraente. A inserção deste insumo na estrutura energética mundial proporcionará um prolongamento da utilização das reservas fósseis, mitigação da poluição, maiores potencialidades para devido aproveitamento energético, segurança no fornecimento energético, inclusão energética em comunidades de difíceis acessos à rede elétrica convencional, redução da dependência energética em regiões importadoras de energia e retornos econômicos bastante favoráveis, pois novos produtos gerados, como o próprio hidrogênio e oxigênio, este último para o caso da ocorrência da eletrólise da água, teriam poder de troca.

Uma busca por novas fontes geradoras de energia faz-se necessária, pois com a crescente população mundial e a busca incessante pelo crescimento econômico por parte de países em desenvolvimento resulta em céleres incrementos na demanda energética mundial. Uma alternativa para devido abastecimento de energia seria uma intensificação do aproveitamento dos recursos renováveis, como as energias eólica e solar. Estas são fontes intermitentes, pois há variações sazonais nas saídas de potências de seus sistemas.

Os maiores emissores de gases que danificam a camada de ozônio são os derivados do clorofluorcarbono(CFC). Porém, segundo Tromp et al [84], o hidrogênio liberado em seus processos de armazenamento e transmissão, estimados em cerca de 10% do volume total envolvido, moveria livremente troposfera acima e misturaria com o ar estratosférico. Sabe-se que a oxidação do hidrogênio estratosférico é uma fonte de H₂O [78] . Assim, uma emissão acentuada de hidrogênio à atmosfera devido à economia

do hidrogênio causaria um umedecimento da estratosfera. Isto resultaria num resfriamento da baixa estratosfera e, conseqüentemente, em temperaturas mais baixas nesta região. Estas temperaturas mais frias criariam mais nuvens polares estratosféricas, que geram várias reações fotoquímicas em cadeia as quais são responsáveis pela destruição da camada de ozônio, e retardariam o fim dos vórtices polares, estes que são ventos que se estendem até a mesosfera e agem como uma barreira para o transporte de ar e, conseqüentemente, energia do pólo para regiões em médias latitudes.

5.6 Resultados e Análises

O modelo matemático proposto neste trabalho sugere que o hidrogênio produzido substitua os combustíveis fósseis fluidos em vários processos no estado do Ceará. Gráficos foram construídos utilizando-se dados da tabela 5.4, onde a multiplicação dos valores de consumo de combustíveis fósseis esperados no modelo pela emissão individual de cada poluente, em quilogramas por gigajoule de energia fóssil consumida, revela a quantidade total liberada à atmosfera.

Os gráficos nas figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram potenciais reduções nas emissões de dióxido de carbono, metano, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio à atmosfera pela utilização de hidrogênio em substituição aos combustíveis fósseis fluidos.

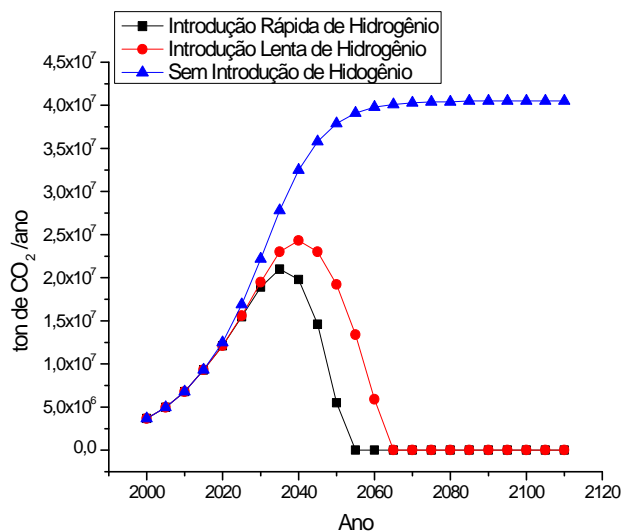


Fig. 5.6 - Emissões de dióxido de carbono no estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.

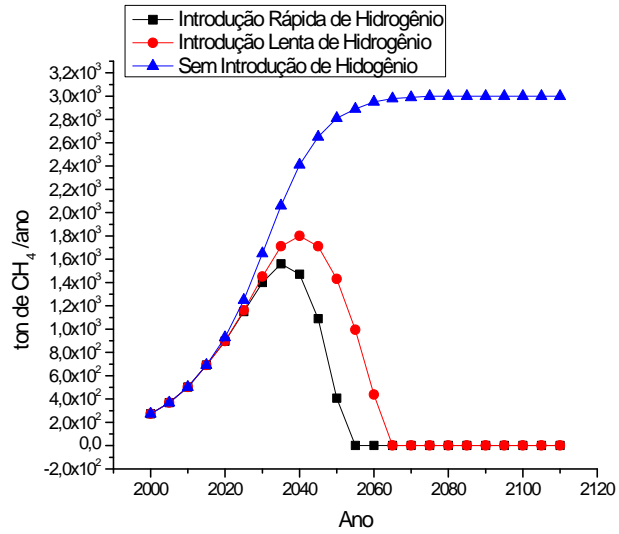


Fig. 5.7 - Emissões de metano no estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.

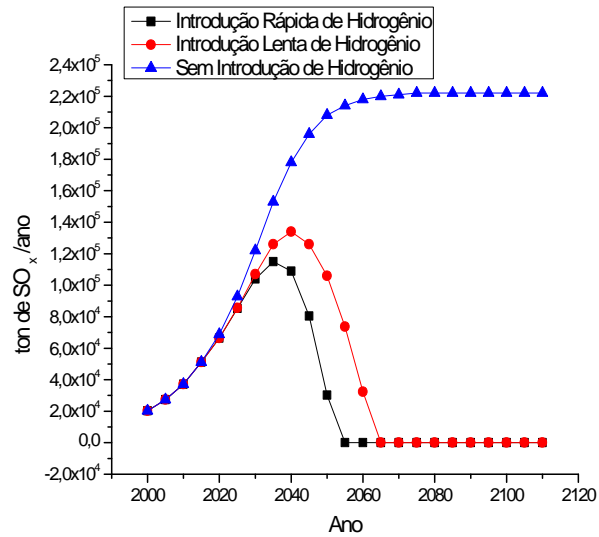


Fig. 5.8 - Emissões de óxido de enxofre no estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.

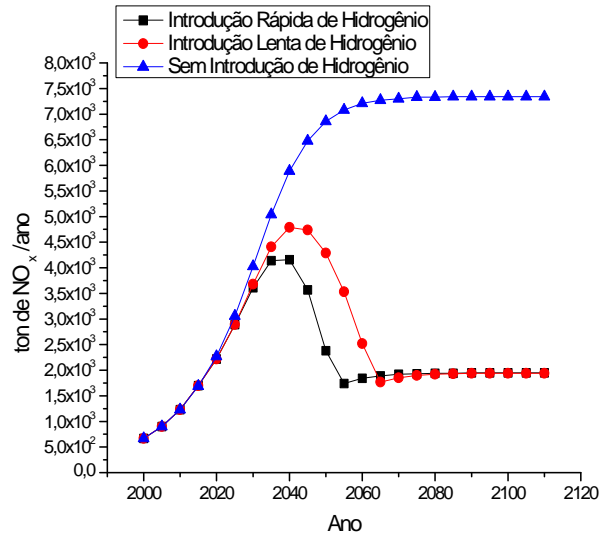


Fig. 5.9 - Emissões de óxido de nitrogênio no estado do Ceará entre 2000 e 2110 para três cenários.

Os três cenários considerados no modelo matemático, cenário 1 em que há introdução de hidrogênio na matriz energética do estado do Ceará numa taxa mais acentuada, cenário 2 em que há introdução de hidrogênio numa taxa mais lenta e um terceiro cenário onde não será considerada a introdução de hidrogênio, são utilizados para devidas análises comparativas nos níveis de emissões dos quatro elementos poluentes citados.

Os gráficos revelam um comportamento bem similar aos três cenários do ano 2000 até o ano 2020, quando inicia uma diferenciação perceptível nas quantidades de CO₂, CH₄, SO_x e NO_x emitidas. Isto justifica-se pelo fato de o modelo prevê a inserção de hidrogênio somente a partir de 2015, quando gradualmente pequenas quantidades de combustíveis fósseis serão substituídas. A queima de hidrogênio em máquinas de combustão interna gera emissão de apenas um desses poluentes, o óxido de nitrogênio. Segundo Veziroglu [85], a relação entre as emissões de NO_x por um sistema a base combustível fóssil e por um sistema a base hidrogênio-solar-eólico é da ordem de 3,4. Assim, para se encontrar o montante de NO_x emitido para a atmosfera deve-se também considerar esta pequena parcela produzida pelo hidrogênio.

Pela figura 5.6 observa-se que o estado do Ceará seria responsável pela liberação anual de 40 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera a partir do ano 2070. Entretanto

este cenário seria revertido com a introdução do hidrogênio em sua matriz energética, ou seja, a liberação seria reduzida para o máximo de 25 milhões de toneladas de CO₂ anuais, por volta do ano 2035, tendendo para zero a partir do ano 2055.

De acordo com a figura 5.7, o estado do Ceará será responsável pela colocação anual de 30 mil toneladas de gás metano na atmosfera da terra, a partir do ano 2075, e isto só devido à utilização de combustíveis fósseis fluidos. Com a introdução do hidrogênio este valor iria se reduzir para 18 mil toneladas anuais por volta do ano 2040, quando atinge o pico de emissão, convergindo para emissão zero de metano a partir do ano 2055.

Pela figura 5.8, observa-se que o estado do Ceará será responsável pela emissão anual de 220 mil toneladas de óxidos de enxofre a partir do ano 2070. Esta iria ser reduzida para o máximo 140 mil toneladas por volta do ano 2040 com a introdução do hidrogênio e a partir do ano 2055 não haveria mais emissões de óxidos de enxofre por parte do estado do Ceará.

No caso das emissões de óxidos de nitrogênio, mostradas na figura 5.9, observa-se que as emissões anuais do estado do Ceará será da ordem 75 mil toneladas a partir do ano 2070. Com a introdução do hidrogênio esta cifra cairá para 45 ou 50 mil toneladas por volta do ano 2040, entretanto, mesmo para o caso do hidrogênio, esta cifra nunca chegará a zero, pois na combustão de hidrogênio sempre haverá óxidos de nitrogênio.

Porém, caso a utilização do hidrogênio for através de células combustíveis, não haverá emissão de óxidos de nitrogênio.

Capítulo 6

Resultados e Análises

O modelo matemático desenvolvido gera resultados que caracterizam o Estado do Ceará nos três cenários trabalhados, sendo um com uma razão de introdução de hidrogênio mais acelerada, outra mais lenta e um terceiro em que não haverá introdução de hidrogênio na matriz energética desta região, entre os anos de 2000 e 2110. Serão descritos através de gráficos, os comportamentos das variáveis população, demanda total de energia, produção de energias fóssil e do hidrogênio, produto interno bruto(PIB), importação de energia fóssil, preços mundiais do petróleo e do hidrogênio, economia ambiental devido a introdução do hidrogênio, crédito pela venda de oxigênio gerado, área total destinada a instalação de módulos fotovoltaicos, capacidade da planta de dessalinização, quantidade de geradores eólicos necessários ao processo de dessalinização da água do mar, capital total investido, ganho bruto, impacto ambiental, qualidade de vida e economia devido à maior eficiência de utilização do hidrogênio.

A figura 6.1 mostra as modificações do tempo de dobramento da produção de hidrogênio. Este é um parâmetro de fundamental importância, pois à medida que seu valor é elevado, a taxa de introdução deste vetor energético é reduzida. Para o cenário que representa a introdução rápida de hidrogênio os valores para este tempo variam de 0 a 21 anos, enquanto que no outro de 0 a 26 anos.

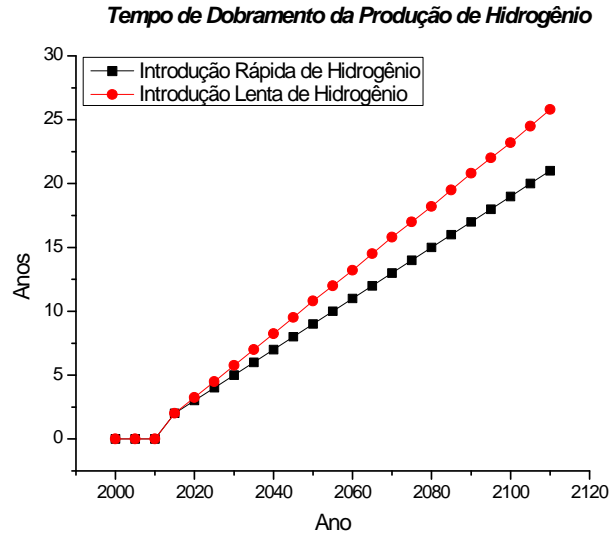


Fig. 6.1 - Tempo de dobramento da produção de hidrogênio.

A figura 6.2 mostra a projeção da população cearense para o intervalo de tempo simulado, de 2000 a 2110. A população deste estado evoluirá temporalmente de maneira similar nos três cenários entre os anos 2000 e 2050, tendo neste último o valor de 13,6 milhões de habitantes, ocorrendo, a partir de então, uma diferenciação nas taxas de crescimento da população.

Para o caso em que não há introdução de hidrogênio ocorrerá uma estabilização por volta de 2060, atingindo o valor de 13,8 milhões de habitantes. Isto ocorrerá em decorrência da larga dependência energética aos combustíveis fósseis, gerando uma escassez na oferta desses e intensas emissões de poluentes a atmosfera. Como resultado, problemas ambientais serão esperados, como a intensificação do efeito estufa, fato gerador no aumento de áreas desabitadas no Estado do Ceará, pois resulta em péssimas condições climáticas para sobrevivência humana; poluição direta dos ecossistemas aquáticos e terrestres, resultando no aumento da proliferação de doenças, principalmente as de natureza respiratórias. Todos estes fatores resultam numa queda na qualidade de vida, gerando um quadro insalubre ao desenvolvimento dos habitantes da região em questão, conduzindo a estabilização do crescimento populacional.

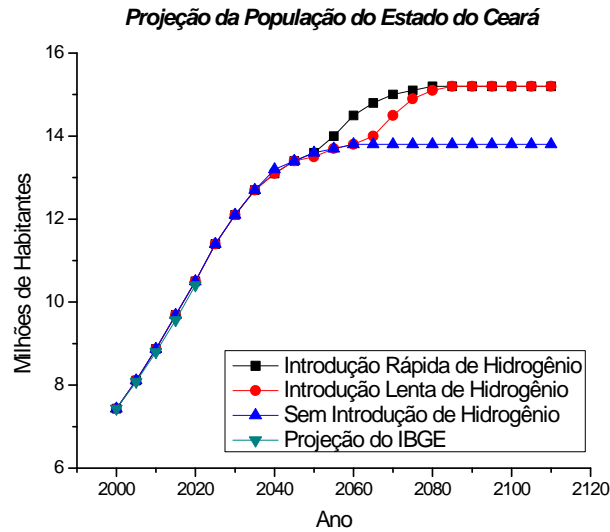


Fig. 6.2 - Projeção da população do estado do Ceará.

A introdução rápida de hidrogênio prevê um aumento do crescimento populacional por volta de 2055, quando a população atingirá o valor de 14 milhões de habitantes. Esta modificação na tendência da taxa de crescimento populacional ocorre pelo fato da queima do hidrogênio não gerar os inconvenientes causados pela utilização dos combustíveis fósseis, pois ele é um vetor energético ambientalmente limpo, já que sua combustão gera apenas vapor d'água e reduzidos teores de óxidos de nitrogênio. Outro fator contribuinte é a abundância numa das matérias-primas para produção de hidrogênio, a água, já que poderia ser utilizado o processo da dessalinização de água do mar, o que aumentaria sobremaneira a disponibilidade deste recurso natural.

Em relação a introdução lenta de hidrogênio ocorrerá uma suave elevação na tendência de crescimento populacional em relação ao cenário da não introdução de hidrogênio, isto em decorrência da lenta substituição dos combustíveis fósseis por hidrogênio, resultando num aumento mais lento da qualidade de vida. Os dois cenários de introdução de hidrogênio prevêem uma estabilização do crescimento populacional por volta de 2085, com uma população de 15,2 milhões de habitantes, devido à inserção de políticas de controle de natalidade, como ocorre em regiões desenvolvidas.

Na figura 6.2 é mostrada uma curva de tendências construída por dados obtidos através de análises de profissionais do IBGE [67]. É bem perceptível as proximidades entre os valores diagnosticados pelo IBGE e aqueles gerados pelo modelo matemático.

A figura 6.3 mostra a projeção da demanda de energia total do Estado do Ceará entre os anos 2000 e 2110. É observada uma mesma taxa de crescimento da demanda total de energia para os três cenários entre os anos de 2000 e 2020, neste último a demanda energética totalizando em 0,592 EJ. Após este ano ocorrerá uma diferenciação na evolução do consumo energético para cada cenário, sendo maiores taxas de crescimento dessa demanda para aquele em que ocorre uma introdução mais célere de hidrogênio na matriz energética da região.

No cenário que trata da não introdução de hidrogênio ocorrerá um crescimento na demanda de energia até o ano 2075, quando é observada uma estabilização nos níveis de consumo, com valor de 1,88 EJ. Percebe-se, através da análise do gráfico da figura 6.3, que as demandas de energia total para os outros dois cenários serão maiores, pois o uso do hidrogênio proporciona um incremento no crescimento populacional e na qualidade de vida, aumentando assim o consumo energético. Quando o hidrogênio é introduzido na matriz energética da região, sua demanda energética atinge os 2,33 EJ, cerca de 24% maior do que a demanda para o cenário sem introdução de hidrogênio. Acompanhando a evolução do crescimento populacional, as curvas de demanda de energia tendem a estabilização, o que ocorre em 2095.

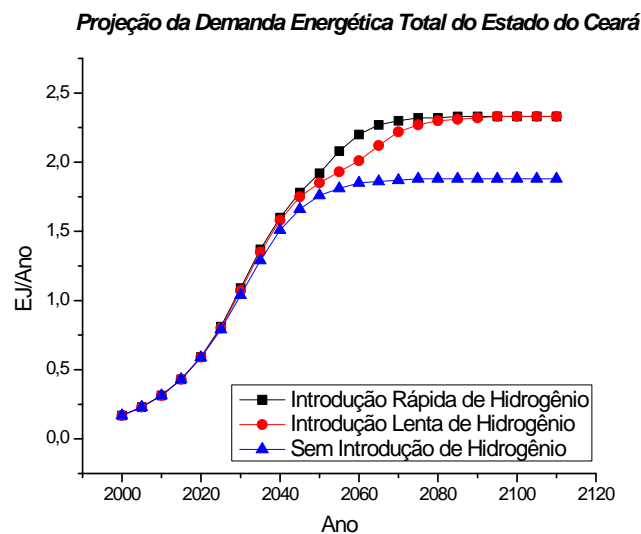


Fig. 6.3 - Projeção da demanda energética do estado do Ceará.

A figura 6.4 mostra a projeção do Produto Interno Bruto(PIB) do Estado do Ceará. Os três cenários evoluem similarmente até o ano 2015, atingindo o valor de US\$ 3.760 per capita, aquilatados em 2000 U.S.\$. Após este ano, ocorre uma diferenciação na evolução dos valores do PIB. Para o caso de introdução rápida de hidrogênio, haverá uma taxa de crescimento mais intensa, estabilizando-se em 2085, com o valor de US\$ 18.600. O outro caso de introdução de hidrogênio, lento, estabilizará em 2090, com o valor de US\$ 18.500, bem próximo ao do cenário anterior. O terceiro caso analisado, sem introdução de hidrogênio na matriz energética da região, estabilizará em 2080 com o valor de US\$ 15.000, cerca de 19% menor do que os valores atingidos com a utilização de hidrogênio. Isto se deve aos elevados prejuízos ambientais proporcionados pela utilização de combustíveis fósseis em larga escala e pelos aumentos nos preços destes, resultando numa queda de disponibilidade dos mesmos, o que forçaria uma redução no consumo energético e na qualidade de vida da população.

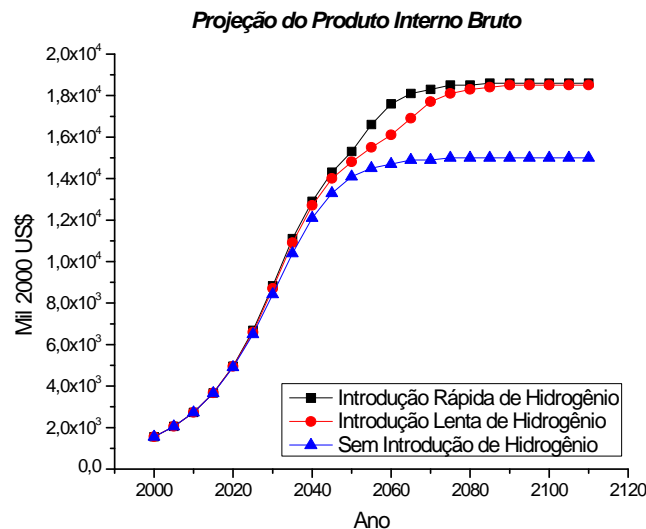


Fig. 6.4 - Projeção do PIB do estado do Ceará.

As figuras 6.5 e 6.6 mostram a evolução temporal de três variáveis para cada cenário de introdução de hidrogênio, quais sejam a produção de energia do hidrogênio, demanda de energia fóssil e a demanda total de energia. Para o ano inicial, a demanda total de energia possui o valor de 0,17 EJ, enquanto que a demanda de energia fóssil fluida é de 0,0505 EJ. Na contabilidade da demanda total de energia, são somados os consumos disponibilizados no Balanço Energético do Estado do Ceará 2000 para várias

fontes, como álcool, carvão-vapor, gás natural, querosene, eletricidade, dentre outras, enquanto que na da demanda de energia fóssil fluida são somados os consumos das fontes óleo diesel, óleo combustível, gasolina e GLP. Como pode ser visto na figura 6.5, cenário introdução lenta de hidrogênio, a demanda de energia fóssil cresce até o ano 2040, onde atingirá o valor de 0,334 EJ, quando iniciará uma queda até atingir o valor zero no ano 2065, pois a partir deste a energia do hidrogênio substituirá toda a necessidade por combustíveis fósseis fluidos. O hidrogênio será introduzido a partir de 2000, quando o mesmo substituirá gradualmente as necessidades por combustíveis fósseis fluidos, atingindo o pico de produção no ano 2095, com o valor de 0,501 EJ, correspondendo a cerca de 21,5% da demanda energética total neste ano. A introdução rápida de hidrogênio, representada na figura 6.6, revela um pico de demanda de energia fóssil fluida em 2035, quando a partir deste decresce até atingir o valor zero no ano 2055, com o valor de 0,288 EJ, cerca de 13,77% menor do que para o cenário descrito na figura 6.5, alcançando a independência aos combustíveis fósseis fluidos 10 anos mais rapidamente.

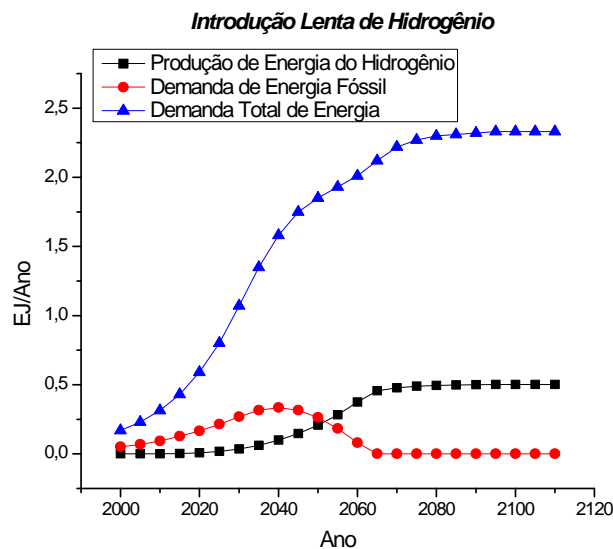


Fig. 6.5 - Projeções da produção de energia do hidrogênio, demanda de energia fóssil fluida e demanda total de energia para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.

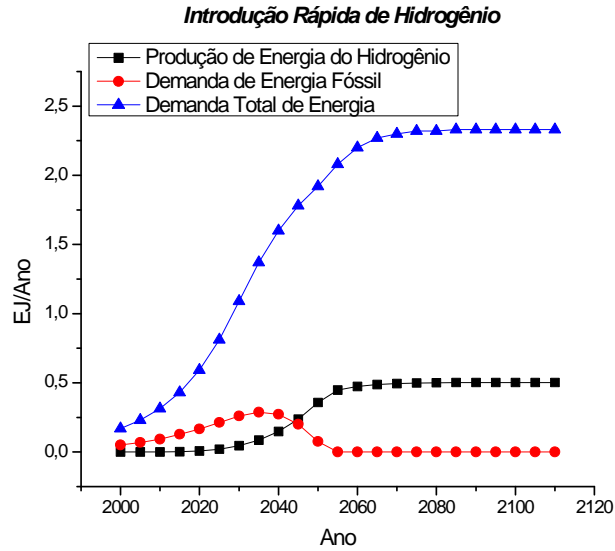


Fig. 6.6 - Projeções da produção de energia do hidrogênio, demanda de energia fóssil fluida e demanda total de energia para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.

A figura 6.7 mostra o efeito da introdução de hidrogênio na demanda de energia fóssil fluida. Até o ano 2015 os comportamentos das curvas são semelhantes, pois somente ocorrerá introdução de hidrogênio a partir deste ano. Para o cenário em que ocorre introdução mais célere a curva de demanda apresentará um pico em 2035, com o valor de 0,288 EJ, atingindo o valor zero em 2055, ano em que a região atingiria sua independência total aos combustíveis fósseis fluidos. No cenário de introdução mais lenta de hidrogênio a demanda de energia fóssil fluida atingirá seu pico em 2040, com o valor de 0,334 EJ, atingindo o valor zero no ano 2065. Para o cenário de não introdução de hidrogênio a demanda de energia fóssil fluida evoluirá positivamente até atingir seu pico em 2085, onde terá seu valor estabilizado em 0,556 EJ.

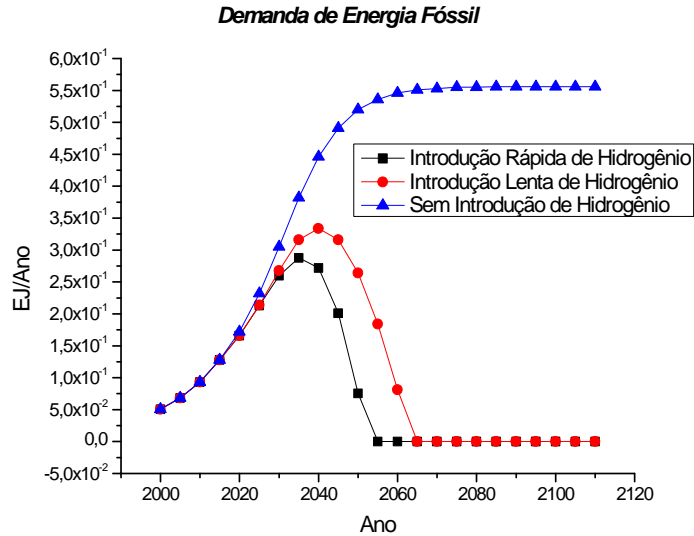


Fig. 6.7 - Projeção da demanda de energia fóssil fluida.

A figura 6.8 mostra as curvas de importação de energia fóssil, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o caso da não inserção do hidrogênio na matriz energética do Estado do Ceará. A curva de importação evolui até atingir seu valor máximo de $0,556$ EJ em 2085, quando iniciará uma estabilização, como consequência dos elevados preços destes insumos energéticos, pois tenderiam a valorizar-se cada vez mais, dificultando sobremaneira suas importações. A curva de produção de energia fóssil mantém-se constante do ano inicial da simulação, 2000, até o ano 2025, pois esta região produz em pequenas quantidades, à razão anual constante de $0,0036$ EJ, estes insumos energéticos [6]. Desta forma, para atender a demanda cada vez mais crescente, ocorre uma intensificação na importação de energia fóssil, o que caracteriza o estado como um importador deste tipo de energia.

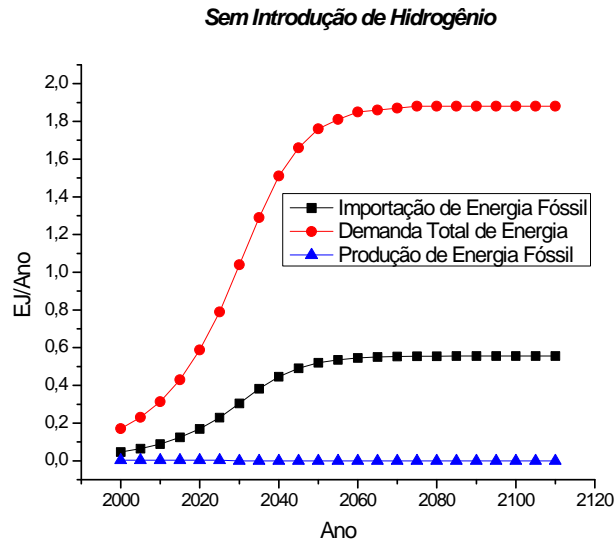


Fig. 6.8 - Importação de energia fóssil fluida, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o cenário sem introdução de hidrogênio.

As figuras 6.9 e 6.10 revelam que, quando da introdução de hidrogênio, a produção de energia fóssil permanece a mesma do cenário de não introdução de hidrogênio. Isto se deve ao fato de as reservas de insumos fósseis estarem exaurindo-se em 2030 e a região ser uma importadora deste tipo de energia. Porém a demanda energética sofrerá algumas alterações, como observado anteriormente. Desta forma, as importações sofrerão alterações significativas, pois acompanharão o crescimento da demanda total de energia, juntamente com os volumes de introdução de hidrogênio. As importações de energia fóssil fluida atingirão o valor máximo de 0,334 EJ no ano 2040, sofrendo um decréscimo em seguida, atingindo o valor zero no ano 2065, para o cenário de introdução lenta de hidrogênio. Para o outro caso, introdução rápida de hidrogênio, as importações atingem ao pico de 0,288 EJ no ano 2035, decrescendo em seguida, alcançando o valor zero no ano 2065.

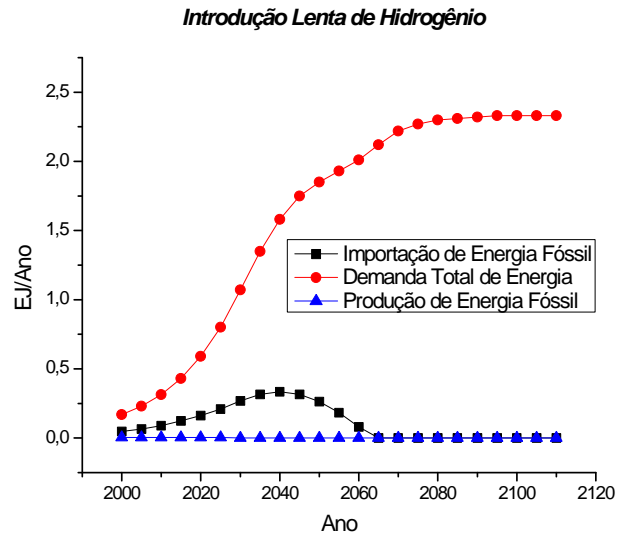


Fig. 6.9 - Importação de energia fóssil, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.

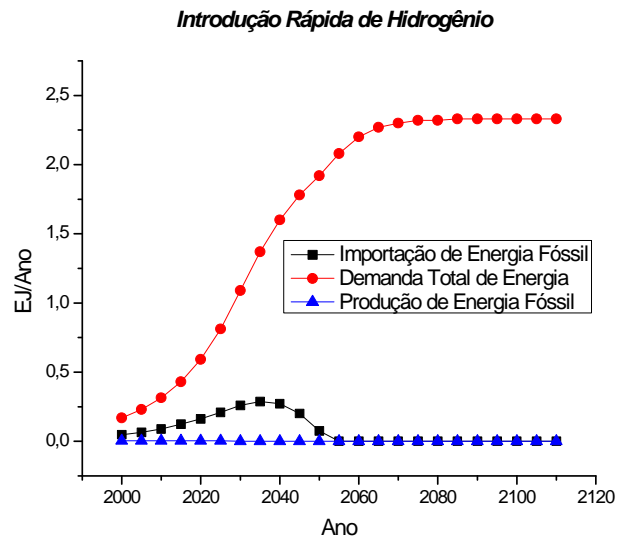


Fig. 6.10 - Importação de energia fóssil, demanda total de energia e produção de energia fóssil para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.

A figura 6.11 mostra a curva da economia ambiental, esta que representa a redução de gastos ambientais gerados pela substituição dos combustíveis fósseis fluidos por hidrogênio obtido a partir das fontes renováveis eólica e solar. No primeiro ano de introdução de hidrogênio, 2015, a economia gerada é de 27,6 milhões de U.S.\$ para os dois cenários. A partir do ano 2020 ocorrerá uma diferenciação nas evoluções das curvas para os dois cenários. O que representa a introdução lenta de hidrogênio atingirá o valor máximo de 7,92 bilhões de U.S.\$ em 2095, quando manter-se-á neste valor devido a substituição total do consumo de combustíveis fósseis fluidos por hidrogênio e na estabilização da produção de hidrogênio. O outro cenário, introdução rápida de hidrogênio, atingirá o valor máximo de 7,94 bilhões de U.S.\$ em 2095, estabilizando-se neste patamar pelas mesmas razões citadas no cenário anterior. A cada GJ de energia fóssil substituída por energia do hidrogênio resulta numa economia com gastos ambientais.

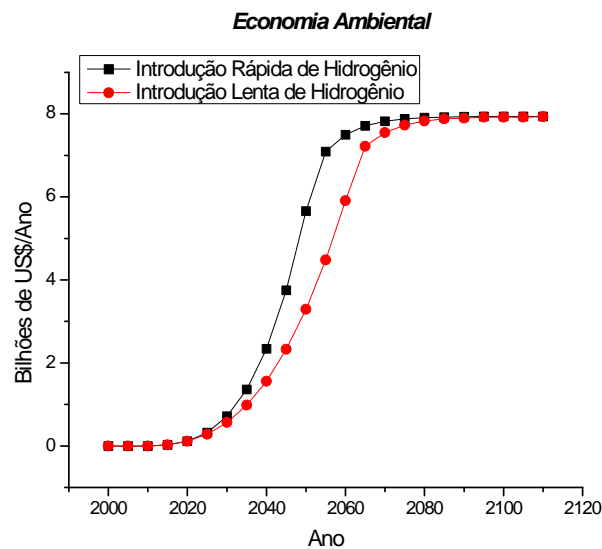


Fig. 6.11 - Projeção da economia ambiental gerada

A figura 6.12 apresenta as curvas com créditos gerados pela venda de oxigênio a empresas ou indústrias que o utilizem em seus processos produtivos. Este seria um subproduto da eletrólise da água dessalinizada do mar. No primeiro ano de introdução de hidrogênio é esperado o crédito de 5,95 milhões de U.S.\$. As duas curvas estabilizarão em 1,75 bilhões de U.S.\$ em 2090, devido a estabilização na produção de hidrogênio.

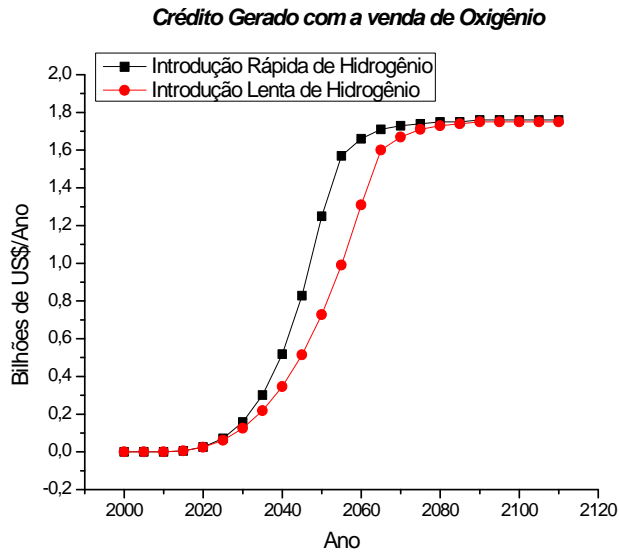


Fig. 6.12 - Projeção para o crédito gerado com a venda de oxigênio.

O hidrogênio produzido será vendido para abastecimento do mercado interno, substituindo os combustíveis fósseis fluidos, e, seu excedente, deverá ser exportado. A figura 6.13 apresenta as curvas dos montantes obtidos com a negociação do produto hidrogênio. Para o primeiro ano de introdução de hidrogênio seriam gerados 36 milhões de U.S.\$. Seriam previstos ganhos de 3,92 bilhões de U.S.\$ por volta de 2105 para os dois cenários em questão.

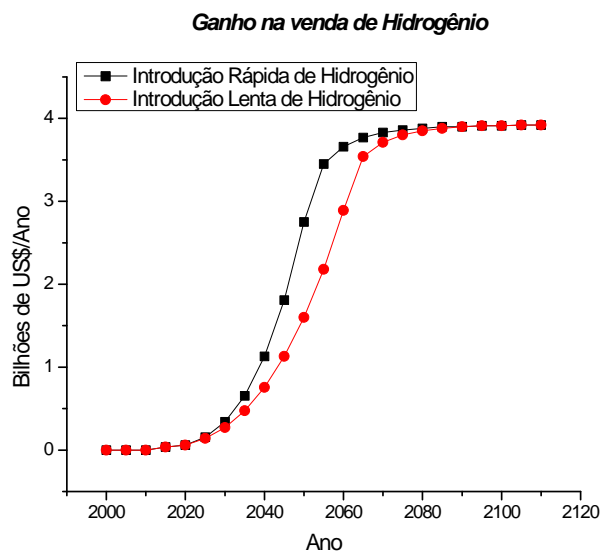


Fig. 6.13 - Ganho na venda de hidrogênio.

O modelo foi idealizado para geração de hidrogênio a partir de água dessalinizada do mar. A figura 6.14 mostra as curvas de demanda de água para realização de eletrólise. É prevista a construção de uma usina de dessalinização para atender a esta demanda, sendo sua capacidade expressa em milhões de metros cúbicos de água necessária ao processo por ano. No primeiro ano de produção de hidrogênio seriam necessárias 153 mil metros cúbicos de água do mar, alcançando a demanda de 45,2 bilhões de metros cúbicos em 2095.

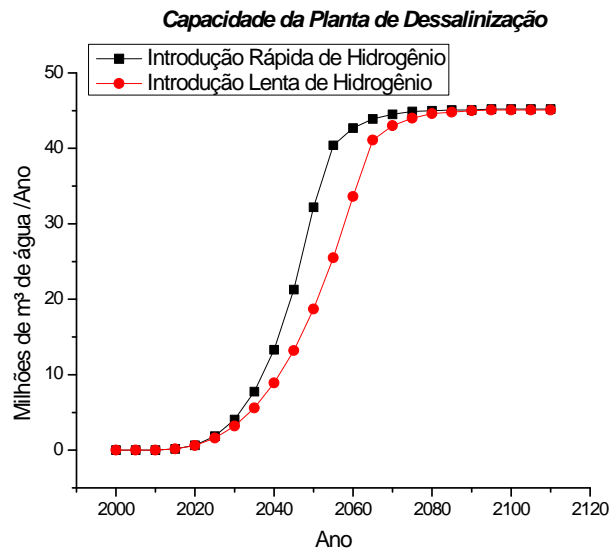


Fig. 6.14 - Demanda de água para usina de dessalinização.

A usina de dessalinização teria sua instalação prevista no litoral da região em análise, sendo alimentada eletricamente por geradores eólicos instalados nesta localidade para devido aproveitamento do excelente regime de ventos para este fim. A figura 6.15 mostra a evolução temporal da quantidade de geradores requeridos num parque eólico a ser construído para geração de energia elétrica para dessalinização da água. Para o primeiro ano de produção de hidrogênio seria necessário 1 gerador para atender a demanda neste ano, 2015. Em 2080 seria atingida a estabilização da quantidade requerida, sendo 32 geradores elétricos do modelo E-70 da empresa Enercon, cada um com potência nominal de 2.300 kW.

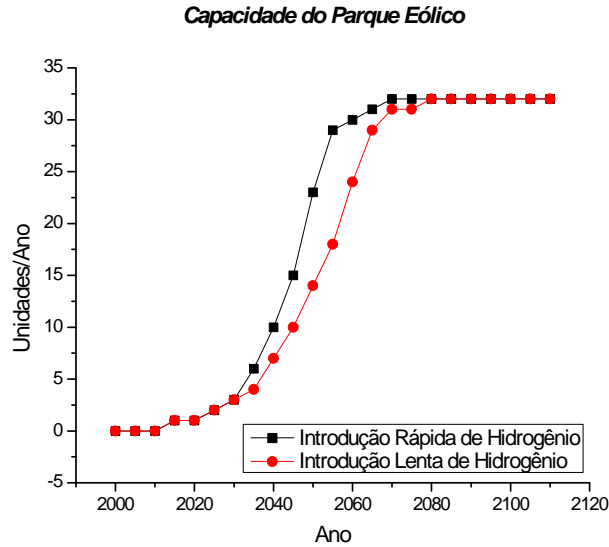


Fig. 6.15 - Quantidade de geradores eólicos requeridos para dessalinização da água do mar.

A energia elétrica necessária para devida alimentação do processo de eletrólise é obtida a partir de módulos fotovoltaicos instalados no interior do estado, sendo a energia elétrica produzida transmitida por meio da rede de transmissão da concessionária de energia elétrica já existente. A figura 6.16 mostra a projeção da área ocupada por esses módulos. É previsto que esta área total será 50% maior do que a área dos módulos para evitar sombreamentos indesejáveis e facilitar as atividades de manutenção necessárias. O valor inicial para a área ocupada pelos módulos fotovoltaicos, em 2015, será de 8,25 km². No ano 2055 seriam necessários 586 km² de módulos fotovoltaicos, no cenário de introdução lenta de hidrogênio, para atender a demanda de energia elétrica para o processo de eletrólise, enquanto que o outro cenário, introdução rápida, necessitaria de 928 km² de módulos. Para os dois cenários de introdução de hidrogênio seria necessária uma área de 1040 km², 0,69% da área total do estado, em 2095, quando, a partir deste ano, ocorreria uma estabilização da área ocupada pelos módulos para os dois cenários de introdução de hidrogênio. Como a quantidade de módulos fotovoltaicos depende diretamente da demanda de hidrogênio, consequentemente da produção deste produto, então ocorrerá uma tendência a estabilização das curvas mostradas na figura 6.16, pois há uma estabilização na produção de hidrogênio.

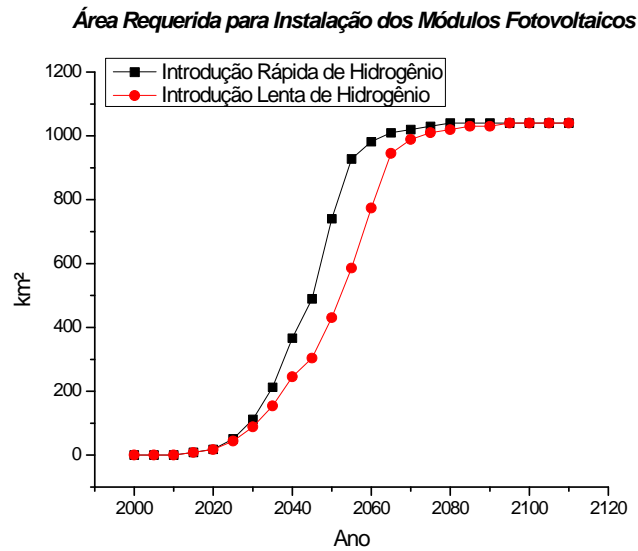


Fig. 6.16 - Área requerida para instalação dos módulos solares.

A figura 6.17 mostra o capital anual requerido para instalação dos módulos fotovoltaicos. De acordo com o DOE (Department of Energy of USA) [82] o custo dos módulos fotovoltaicos atingirão US\$ 75,00/m² em 2015. Logo este valor estimado foi utilizado em cálculos para custos de obtenção e instalação desses módulos no projeto, tendo uma queda anual de 2% em seu preço, estabilizando-se por volta de 2045, devido aos avanços tecnológicos. Como pode ser visto, para o caso de inserção rápida de hidrogênio há dois picos, um em 2050, atingindo o valor de 1,63 bilhões de US\$ e outro em 2080, no valor de 1,54 bilhões de US\$, pois nestes anos são previstas substituições de alguns módulos que atingiram o tempo limite de 30 anos de vida útil. Para o caso de inserção lenta, há dois picos, um em 2060, atingindo a cifra de 1,34 bilhões de US\$ e outro em 2090, com valor de 1,09 bilhões de US\$, pelas mesmas razões. A tendência, como observado na figura 6.17, é a queda do capital investido na compra de módulos fotovoltaicos, elevando-se a cada trinta anos, devido à vida útil desses.

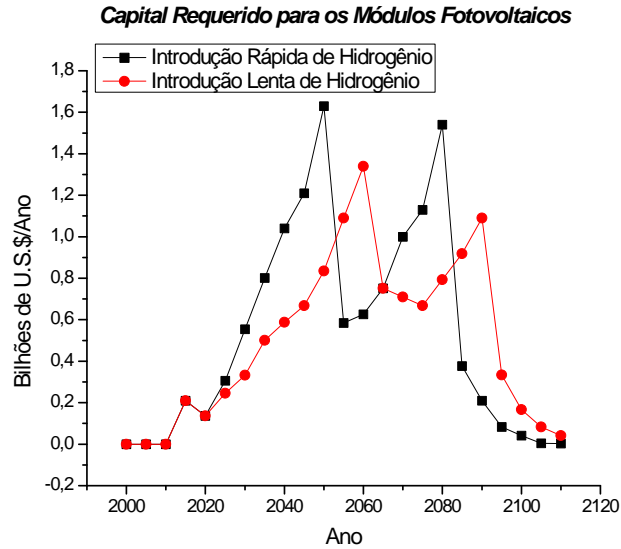


Fig. 6.17 - Capital requerido para instalação dos módulos fotovoltaicos.

A figura 6.18 mostra a evolução temporal dos custos com a implementação da usina de dessalinização. Para o caso de introdução rápida de hidrogênio na matriz energética do estado do Ceará são apresentados dois picos, um em 2050, atingindo o valor de 1,7 milhões de US\$, e outro em 2075, com valor de 1,54 milhões de US\$, devido à vida útil dos equipamentos da usina, considerados em 25 anos. No caso de introdução lenta de hidrogênio os picos são apresentados nos anos 2060, atingindo a cifra de 1,41 milhões de US\$, e 2085, com valor de 1,1 milhões de US\$.

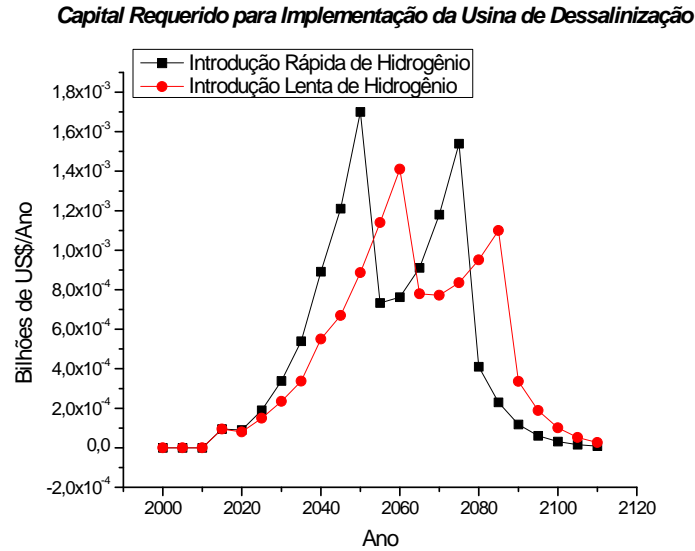


Fig. 6.18 - Capital requerido para implementação da usina de dessalinização da água do mar.

A figura 6.19 apresenta as curvas de custos para implementação do sistema de eletrólise da água, mais especificamente, com a quantidade de eletrolisadores instalados. Notam-se dois picos em cada cenário, nos anos 2050, atingindo a cifra de 113 milhões de US\$, e 2070, com valor de 95,8 milhões de US\$, para aquele que prevê uma introdução mais célere, e nos anos 2060, atingindo o valor de 93,9 milhões de US\$, e 2080, com valor de 69,1 milhões de US\$, para o outro que representa a introdução lenta de hidrogênio. Estes picos ocorrem devido às substituições previstas dos eletrolisadores que atingem 25 anos de operação, pois esta é a sua vida útil considerada.

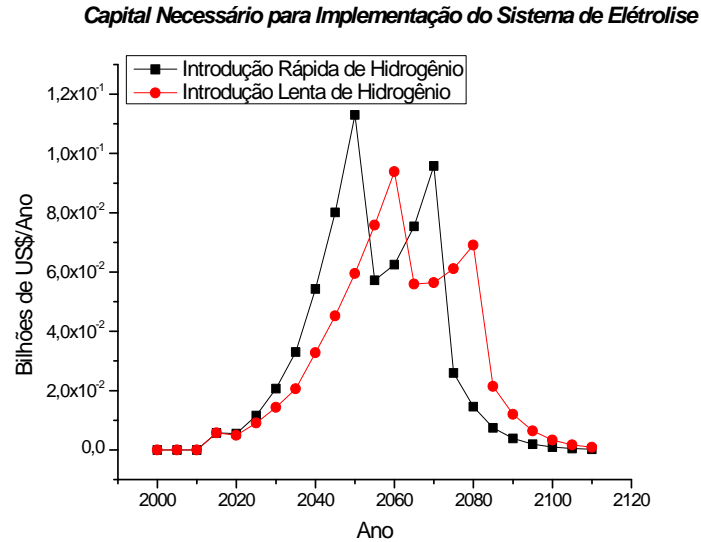


Fig. 6.19 - Capital requerido para implementação do sistema de eletrólise da água.

A figura 6.20 mostra a evolução temporal dos custos com o sistema de estoque e distribuição do hidrogênio produzido. Notam-se dois picos de capital requerido, um em 2050 com 61,1 milhões de U.S.\$ e outro em 2070 com 51,8 milhões de U.S.\$ para o caso de inserção rápida de hidrogênio. Estes ocorrem devido à substituição dos equipamentos deste sistema a cada 20 anos, pois esta é a vida útil considerada para os mesmos. No caso de introdução mais lenta os picos ocorrem em 2060 com 50,8 milhões de U.S.\$ e em 2080 com 37,4 milhões de U.S.\$.

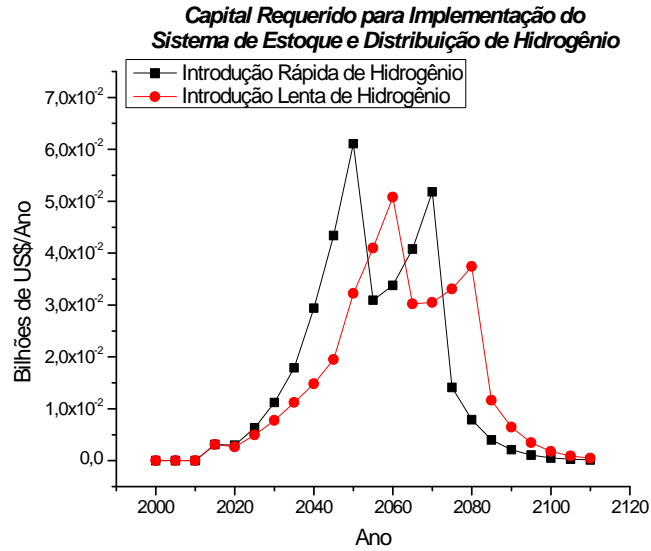


Fig. 6.20 - Capital requerido para implementação do sistema de armazenamento e distribuição de hidrogênio.

A figura 6.21 mostra as curvas que representam os custos de operação e manutenção (O&M) para o sistema fotovoltaico. Estes terão seus valores incrementados até o ano 2090, quando iniciarão uma estabilização em 201 milhões de U.S.\$, como consequência da estabilização da produção de hidrogênio.

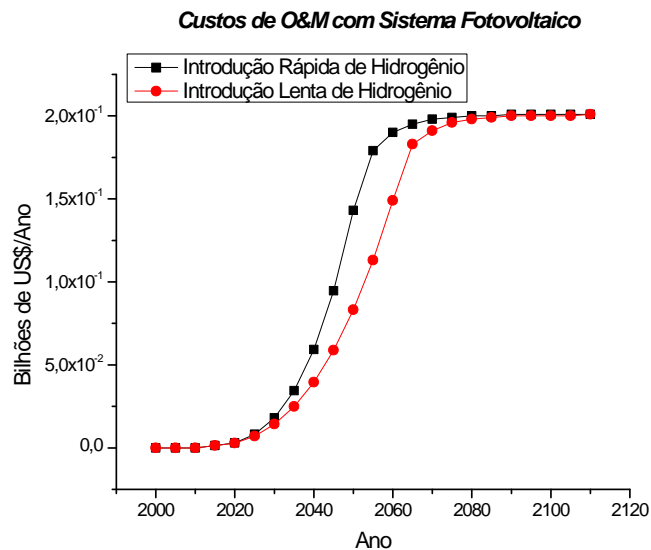


Fig. 6.21 - Custos de O&M com os módulos fotovoltaicos.

A figura 6.22 mostra a evolução temporal dos custos de operação e manutenção com os geradores eólicos. Para o caso de introdução rápida de hidrogênio o valor de 6,32 bilhões de U.S.\$ é atingido em 2090, enquanto que para o outro cenário, ocorre em 2110, valor este de estabilização das duas curvas. Este fato é resultado de uma inserção mais célere de hidrogênio no primeiro cenário, o que gera a instalação de uma quantidade maior de geradores eólicos, para o mesmo ano, do que no cenário de inserção lenta de hidrogênio.

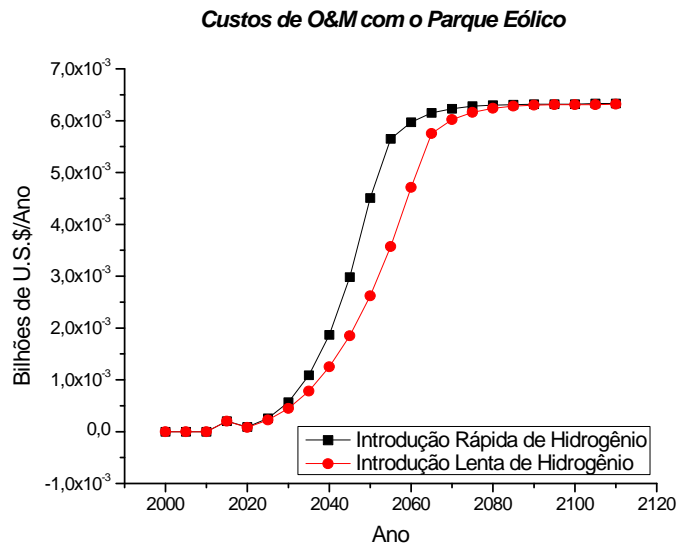


Fig. 6.22 - Custos de O&M com os geradores eólicos.

A figura 6.23 mostra a evolução temporal dos custos de O&M com os o sistema de estoque e distribuição do hidrogênio produzido. Estes aumentam até alcançarem sua estabilização em 2090, no valor de 201 milhões de U.S.\$.

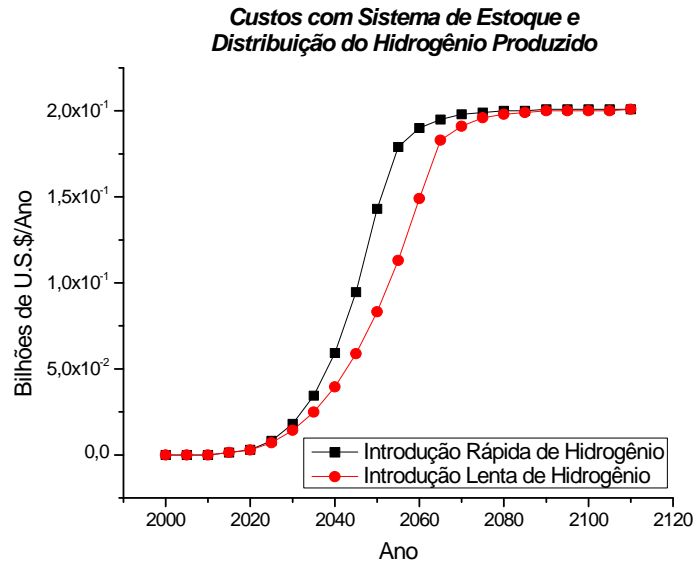


Fig. 6.23 - Custos de O&M com o sistema de armazenamento e distribuição do hidrogênio produzido.

A figura 6.24 mostra as curvas de custos de O&M com os eletrolisadores. Nos dois cenários de introdução de hidrogênio percebe-se um incremento destes custos até alcançarem sua estabilização em 2100, com valor de 341 milhões de U.S.\$.

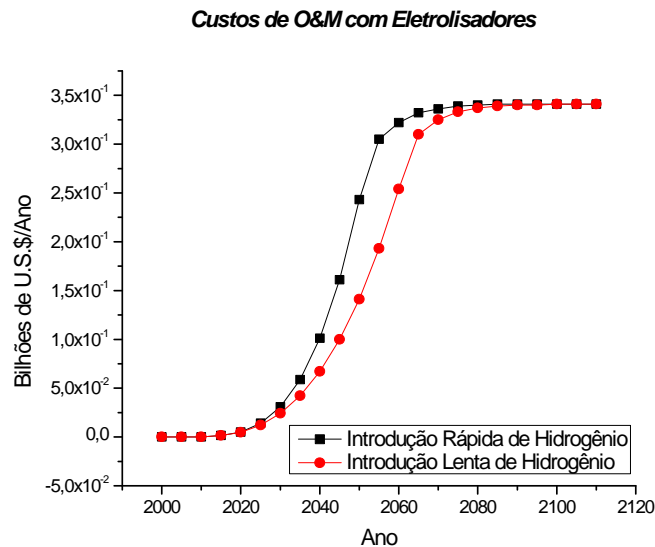


Fig. 6.24 - Custos de O&M com os eletrolisadores requeridos.

A fig. 6.25 mostra as curvas para a variável razão de poluição nos três cenários considerados. As curvas apresentam os mesmos valores até o ano 2010, pois o

hidrogênio é introduzido a partir de 2015. No caso de não inserção de hidrogênio na matriz energética da região a razão de poluição teria um valor 11 em 2070, bem superior ao do valor inicial considerado, 1. Isto se deve à larga utilização dos combustíveis fósseis. Este valor estabilizaria neste mesmo ano, pois a disponibilidade destes combustíveis é reduzida, causando um impacto em sua utilização. No cenário de introdução lenta de hidrogênio sua curva alcançará seu valor máximo de 6,84 em 2040, quando inicia sua queda até 1,16 no ano 2090, estabilizando-se neste valor. No cenário de introdução rápida seu valor máximo é 5,9 em 2035, quando iniciará uma queda até 1,16 em 2080, permanecendo estável a partir deste último ano. Este característica de estabilização nos valores desta variável se deve pela redução da demanda de combustíveis fósseis em detrimento da inserção do hidrogênio na matriz energética do estado do Ceará.

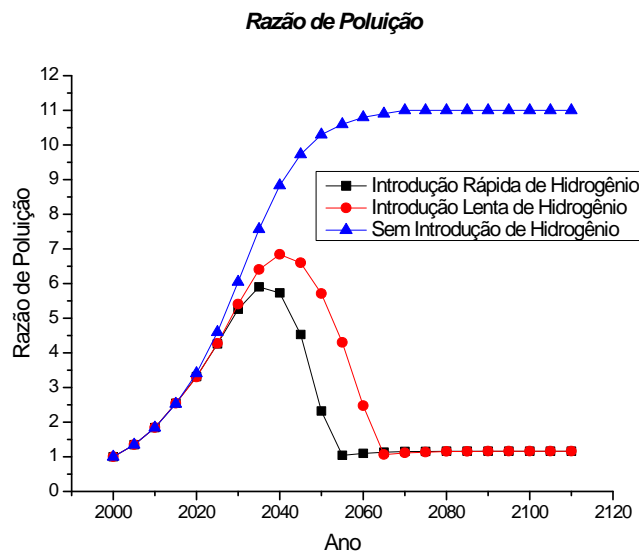


Fig. 6.25 - Razão de poluição.

A figura 6.26 apresenta o comportamento do índice de qualidade de vida. No caso de não inserção de hidrogênio este índice cairá de 1 para 0,876, representando numericamente a queda na qualidade de vida dos habitantes da região em análise. No caso de introdução lenta de hidrogênio a qualidade de vida tende a aumentar de 1 para 10,3 em 2065, quando estabilizará. No outro caso de inserção de hidrogênio, rápida, ocorrerá um aumento mais célere da qualidade de vida, atingindo o valor de 10,3 em 2055. Estes aumentos ocorrem em virtude da introdução do hidrogênio na matriz

energética da região em análise em substituição aos combustíveis fósseis fluidos (óleo diesel, óleo combustível, gasolina e GLP), pois sua queima não emite quantidades consideráveis de poluentes a atmosfera.

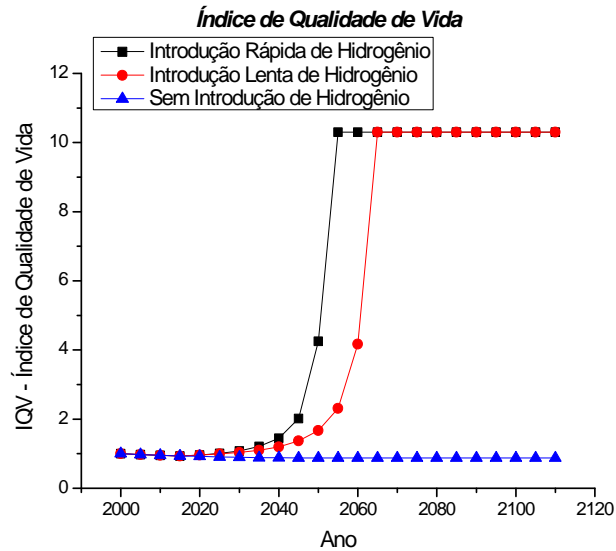


Fig. 6.26 - Índice de qualidade de vida.

A figura 6.27 mostra as curvas que representam o custo total e o ganho bruto do empreendimento para o cenário de introdução rápida de hidrogênio. O custo total corresponde a soma do capital gasto com a instalação de módulos fotovoltaicos, eletrolisadores, usina de dessalinização, sistema de estoque e distribuição de hidrogênio com os custos de operação e manutenção. O ganho bruto equivale a soma do capital obtido com as vendas do oxigênio e do hidrogênio. O ganho líquido do projeto corresponde à subtração entre o ganho bruto e o custo total. Verifica-se, através da análise da figura 6.27, que entre os anos 2020 e 2035 o ganho líquido será negativo. A partir deste último haverá ganho líquido positivo. Em 2015, ano inicial de introdução de hidrogênio, tem-se um ganho líquido de 43,4 milhões de U.S.\$. Em 2110 são previstos ganhos líquidos de 4,36 bilhões de U.S.\$.

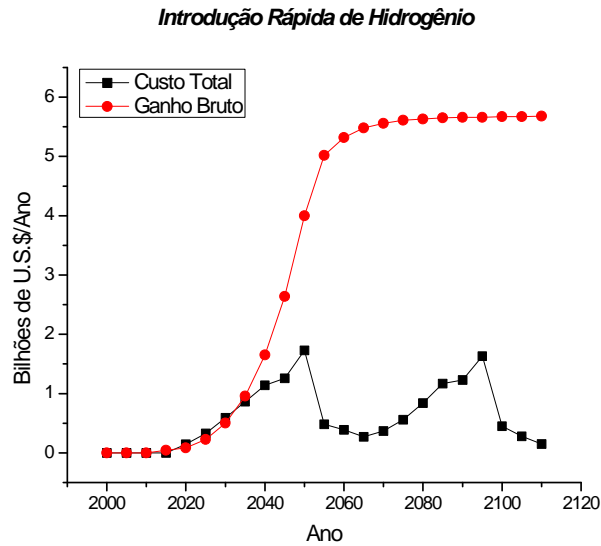


Fig. 6.27 - Custo total do projeto e seu ganho bruto para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.

A figura 6.28 apresenta as curvas do custo total e ganho bruto para o cenário de introdução lenta de hidrogênio. Percebe-se que, entre os anos 2020 e 2030 os ganhos líquidos serão negativos. O gráfico desta figura apresenta ganhos líquidos de 4,24 bilhões de U.S.\$ em 2110, menores do que aqueles outros para o cenário de introdução rápida. O ganho bruto alcançado no caso de introdução lenta é de 5,67 bilhões de U.S.\$ em 2110, resultando num ganho líquido de 4,30 bilhões de US\$.

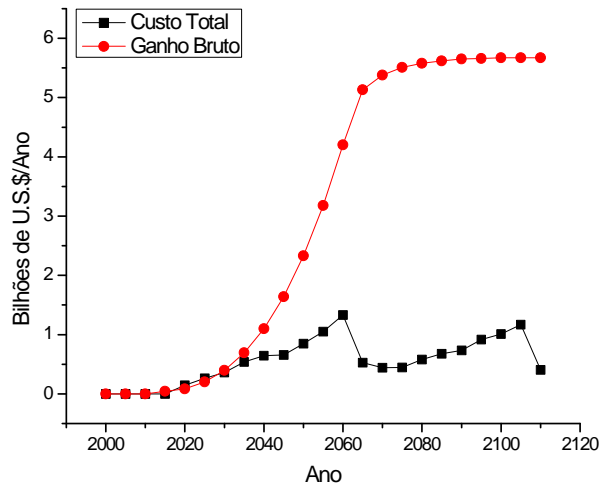
Introdução Lenta de Hidrogênio

Fig. 6.28 - Custo total do projeto e seu ganho bruto para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.

As figuras 6.29 e 6.30 são mostradas as evoluções temporais dos preços mundiais de hidrogênio e petróleo para os dois casos de introdução de hidrogênio. Os preços dos combustíveis fósseis fluidos, no ano 2000, atingem o valor de US\$ 14,50/GJ [18], enquanto que o preço do hidrogênio-solar-eólico alcança o US\$ 41,8/GJ [26]. A figura 6.29 mostra que os preços do hidrogênio e do petróleo serão equivalentes por volta do ano 2015, tendo o hidrogênio-solar-eólico maiores viabilidades a partir deste ano. É bem evidente a queda do preço do hidrogênio e o aumento do preço do petróleo, este último alcançando US\$ 28,9/GJ em 2110, enquanto que o preço do hidrogênio seria US\$ 15,2/GJ. A figura 6.30 apresenta uma igualdade nos preços de hidrogênio e petróleo em 2017, alcançando os valores de US\$ 15,3/GJ para o hidrogênio e US\$ 30,0/GJ em 2110.

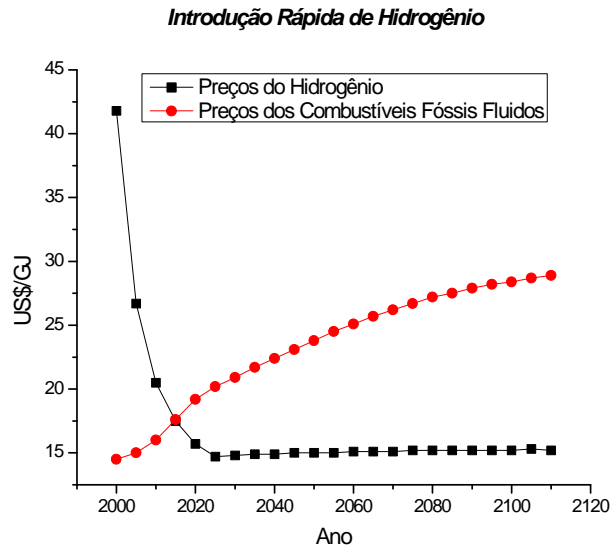


Fig. 6.29 - Evolução temporal dos preços da gasolina e do hidrogênio para o cenário de introdução rápida de hidrogênio.

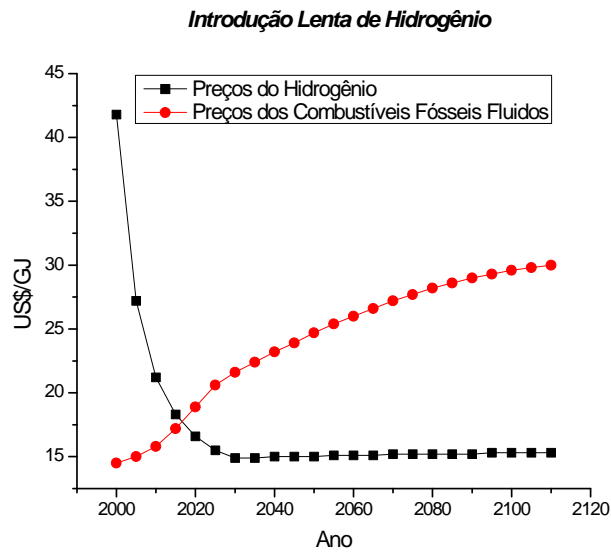


Fig. 6.30 - Evolução temporal dos preços da gasolina e do hidrogênio para o cenário de introdução lenta de hidrogênio.

A figura 6.31 mostra a economia devido à maior eficiência de conversão do hidrogênio em comparação aos combustíveis fósseis fluidos. Análises das curvas desta figura revelam que, entre os anos 2025 e 2060 os ganhos serão maiores para o cenário de introdução rápida de hidrogênio, sendo que a partir deste ano os ganhos do cenário

de introdução lenta superam aqueles para o cenário anterior. Isto se deve ao fato de que no primeiro cenário o hidrogênio substitui mais rapidamente os combustíveis fósseis, elevando esses ganhos no início do tempo de simulação considerado. Para o ano 2110, o caso de inserção rápida prevê uma economia em torno de 2,18 bilhões de U.S.\$, enquanto que para o outro cenário de introdução de hidrogênio, lenta, seriam 2,41 bilhões de U.S.\$.

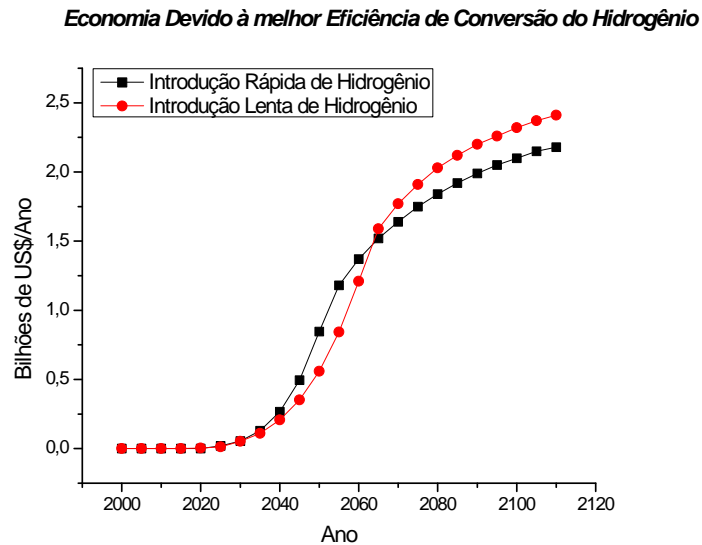


Fig. 6.31 - Economia devido à melhor eficiência de conversão do hidrogênio.

Capítulo 7

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

O sistema a hidrogênio-solar-eólico apresentado neste trabalho mostrou resultados que demonstram os benefícios da introdução do hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis de energia na matriz energética do estado do Ceará, como substitutivo a utilização de combustíveis fósseis fluidos. Este poderia ser visto como um vetor energético econômica e ecologicamente viável devido às características de radiação e intensidade de ventos nessa região.

A implantação do sistema proposto contribuiria para diversificação da matriz energética da região, proporcionando oportunidades para devido planejamento da evolução da utilização das várias fontes de energia disponíveis, evitando os erros cometidos em regiões desenvolvidas em que suas economias são baseadas nos combustíveis fósseis.

O hidrogênio obtido a partir da eletrólise da água dessalinizada do mar, utilizando estas duas fontes de energia eólica e solar, contribuiria intensamente para mitigação de emissões de poluentes a atmosfera, principalmente os gases que intensificam o efeito estufa. Estas reduções nas emissões de poluentes implicariam numa economia com gastos públicos para preservação do meio ambiente, como também àqueles investidos em políticas de saúde pública.

O estado do Ceará reduziria consideravelmente sua dependência energética, pois o mesmo importa elevadas quantidades de energéticos para suprir às necessidades internas. Isto proporcionaria ao mesmo transformar-se num pólo gerador de um vetor energético com valor de mercado, causando impactos positivos na economia local.

O avanço tecnológico, principalmente na área de conversão eólica, está ocasionando a redução nos custos da oferta de energia elétrica obtida a partir desta fonte alternativa, proporcionando uma maior competitividade com o sistema convencional de geração de energia elétrica. O aumento nas eficiências nos sistemas fotovoltaicos contribui para o aumento da competitividade destes sistemas para fornecimento de energia elétrica.

O estado do Ceará possui um regime de ventos bastante propício para geração eólica, pois possuem regularidades em suas intensidades e direções, proporcionando a dessalinização da água do mar nos horários de baixa demanda.

O hidrogênio, quando utilizado em máquinas de combustão interna, oferece maiores eficiências de conversão de combustível do que a gasolina. Isto resulta numa economia, pois menores quantidades de insumo energético seriam demandadas para realização do mesmo trabalho.

O aumento na disponibilidade energética, a elevação do PIB local, juntamente com a redução da poluição do meio ambiente gerado proporcionam a elevação na qualidade de vida da população.

A partir da elaboração deste trabalho, poderiam ser analisadas outras diversificações da matriz energética do estado do Ceará. É prevista a construção de uma siderúrgica na localidade de Pecém, onde seria gerado um pólo industrial que demandaria elevados volumes de gás natural. O modelo matemático proposto neste trabalho poderia sofrer alterações que o adaptaria para descrever as condições de uma suposta substituição desse gás natural demandado por hidrogênio.

O modelo matemático utilizado poderia sofrer adaptações para verificar o desenvolvimento das variáveis tratadas neste trabalho num sistema hidrogênio-eólico, onde poderiam ser construídos cenários baseados no sucesso do PROINFA, aproveitando o horário de baixa demanda de energia elétrica para produção de hidrogênio.

É importante ressaltar a limitação no modelo matemático, pois o mesmo restringe-se apenas às interações dinâmicas entre população e as outras variáveis, não considerando, detalhadamente, informações desconexas às médias estatísticas. Isso proporciona estabilizações nos comportamentos de várias variáveis no fim do tempo simulado.

Um modelo atmosférico poderia ser utilizado para devido estudo da relação direta entre uma economia do hidrogênio e a emissão de poluentes a atmosfera local.

Um estudo mais aprofundado dos impactos estruturais na região em análise devido a economia do hidrogênio seria bastante interessante, visto que uma cadeia produtiva resultante seria necessária para dar suporte ao escoamento do produto hidrogênio gerado.

Referências Bibliográficas

- [1] ABDALLAH, M. A. H.; ASFOUR, S. S.; VEZIROGLU, T. N. **Solar-hydrogen energy system for Egipt.** International Journal of Hydrogen Energy, vol.24, pp. 505-517, 1999.
- [2] ALMOGREN, S.; VEZIROGLU, T. N. **Solar-hydrogen energy system for Saudi Arabia.** International Journal of Hydrogen Energy, vol.29, pp. 1181-1190, 2004.
- [3] ATLAS EÓLICO DO ESTADO DO CEARÁ, Governo do Estado do Ceará. Disponível em: < <http://www.seinfra.ce.gov.br> >.
- [4] AZUAGA, Denise. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil.** Outubro de 2000. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [5] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, ano-base 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/frontSide/site/view.do?viewPublicationId=1589&viewPublicationTypeId=9&queryUrl=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fsite%2Fsearch.do%3Fquery%3Dben> > .
- [6] BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DO CEARÁ (BENCE), Governo do Estado do Ceará, Fortaleza, 103 p., 2000.
- [7] BARBIR, F., 1999. **Review of Hydrogen Conversion technologies.** Disponível em: <http://www.senternovem.nl/mmfiles/34657_tcm24-124263.pdf >.
- [8] BARBIR, F., 2001. **Safety issues of hydrogen in vehicles.** Disponível em: < http://www.senternovem.nl/mmfiles/34660_tcm24-124264.pdf >.
- [9] BENEMANN, J. R., 2000. **Feasibility Analysis of Photobiological Hydrogen Production.** International Journal of Hydrogen Energy, vol.22, p. 979-987,1997.
- [10] BENEMANN, J. R., 2000. **Hydrogen Production by microalgae.** Journal of Applied Phycology, vol. 12, p. 291-300;
- [11] BOLTON, J. R., 1996. **Solar Photoproduction of Hydrogen.** Disponível em: < http://www.ieahia.org/pdfs/solar_photoproduction.pdf >.
- [12] CAPAZ, Rafael; MARVULLE, Valdecir. **A arte da tecnologia do hidrogênio.** UNICAMP, 2006.
- [13] CARVALHO, P.C.M. et al. **Estudo estatístico de radiação solar visando o projeto de unidades de dessalinização acionadas por painéis fotovoltaicos sem baterias.** Disponível em: <www.dee.ufc.br/~carvalho >.
- [14] CARVALHO, P.C.M. **Geração Eólica.** Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.146p.

- [15] CARVALHO, P.C.M.; CRAVEIRO, P.M.A. **Introdução ao Planejamento Energético**. Fortaleza, 2006.
- [16] CARVÃO Vegetal no Brasil. Disponível em:
< http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_carvao.asp >.
- [17] CONTRERAS, A. ; CARPIO, J.; Molero, M.; VEZIROGLU, T. N. **Solar-hydrogen: an energy system for sustainable development in Spain**. International Journal of Hydrogen Energy, vol.24, p. 1041-1052,1999.
- [18] _____.**Como funcionam os preços da gasolina nos Estados Unidos**. 2007. Disponível em: < <http://hsw.uol.com.br/precos-da-gasolina.htm> >.
- [19] DA SILVA, E. P. **Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio**. Campinas: Editora da UNICAMP.1991.
- [20] DA SILVA et al. **Analysis of hydrogen production from combined photovoltaics, wind energy and secondary hydroelectricity supply in Brazil**. Solar Energy, 2005.
- [21] DE LIMA, L. C.; DUARTE, João Batista Furlan; VEZIROGLU, T. N. A **proposal of an alternative route for the reduction of iron ore in the eastern Amazonia**. International Journal of Hydrogen Energy, vol.29, p. 659-661,2004.
- [22] DE LIMA, L. C.; VEZIROGLU, T. N. **Long-term environmental and socio-economic impact of a hydrogen energy program in Brazil**. International Journal of Hydrogen Energy, vol.26, p. 39-45,2001.
- [23] DOCTOR, R. D.; MOLBURG, J. C. **CO₂ Capture, Reuse and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change**. Disponível em:
< <http://sequestration.mit.edu/pdf/WhitePaper.pdf> >.
- [24] DILLON, A.C. et al. **Carbon nanotube materials for hydrogen storage**. Disponível em:
<<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/28890kkk.pdf>>.
- [25] DILLON, A.C.et al. **Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes**, Nature, vol. 386, p. 377–379, 1997.
- [26] DUTTON, A.G. **A review of potential hydrogen production and delivery costs**. Energy Research Unit, CLRC Rutherford Appleton Laboratory, 2002.
- [27] ECONOMIA & TECNOLOGIA. Curitiba: Centro de Pesquisas Econômicas(CEPEC), Universidade Federal do Paraná, ano 02, vol. 06, Jul./Set.2006. 172 p. ISSN 1809-080X.

- [28] ELJRUSHI, G.S.; VEZIROGLU, T.N. **Solar-hydrogen energy system for Libya**. Clean Energy Research Institute, Universidade de Miami, Coral Gables, Florida, U.S.A.
- [29] FORSBERG, Charles W. **Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems**. International Journal of Hydrogen Energy.
- [30] GREEN, M.A. **Recent developments in photovoltaics**. Solar Energy, vol. 76, pp. 3-8, 2004.
- [31] GRIGORIEV, S.A.; POREMBSKY, V.I.; FATEEV, V.N. **Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy**. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 31, pp. 171-175, 2006.
- [32] GRIMM, Alice Marlene. **Meteorologia Básica**. Disponível em: < <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/> >.
- [33] HINRICH, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. **Energia e meio ambiente**. Tradução da 3ª Edição. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 543 p.
- [34] _____. Hydrogen delivery technology roadmap. 2005. Disponível em: <ww1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/delivery_tech_team_roadmap.pdf >.
- [35] ICF CONSULTING. **Protocolos Para Medição e Geração de Dados Relativos a Gases de Efeito Estufa**.
- [36] IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Disponível em: <www.ipece.ce.gov.br>.
- [37] INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ(TECPAR). **Serviço brasileiro de respostas técnicas**. Paraná, 2006.
- [38] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2002**. Disponível em: <www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/weo2002.pdf>.
- [39] JACOBSON, M.Z.; COLELLA, W.G.; GOLDEN, D.M. **Cleaning the air and improving health with hydrogen fuel-cell vehicles**. Science, vol. 308, pp.1901-1905, 2005.
- [40] JOSELIM Herbert, G.M. et al. **A review of wind energy technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007.
- [41] KAZIM, A.; VEZIROGLU, T. N. **Utilization of solar-hydrogen energy in the UAE to maintain its share in the world energy market for the 21st century**. Renewable Energy, vol. 24, p. 259-274,2001.
- [42] KORONEOS, C. et al. **Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes**. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 29, pp. 1443-1450, 2004.
- [43] LEVENE, J.I. **Economic analysis of hydrogen production from wind**. In: Wind Power 2005 Conference.2005, Denver, Colorado.

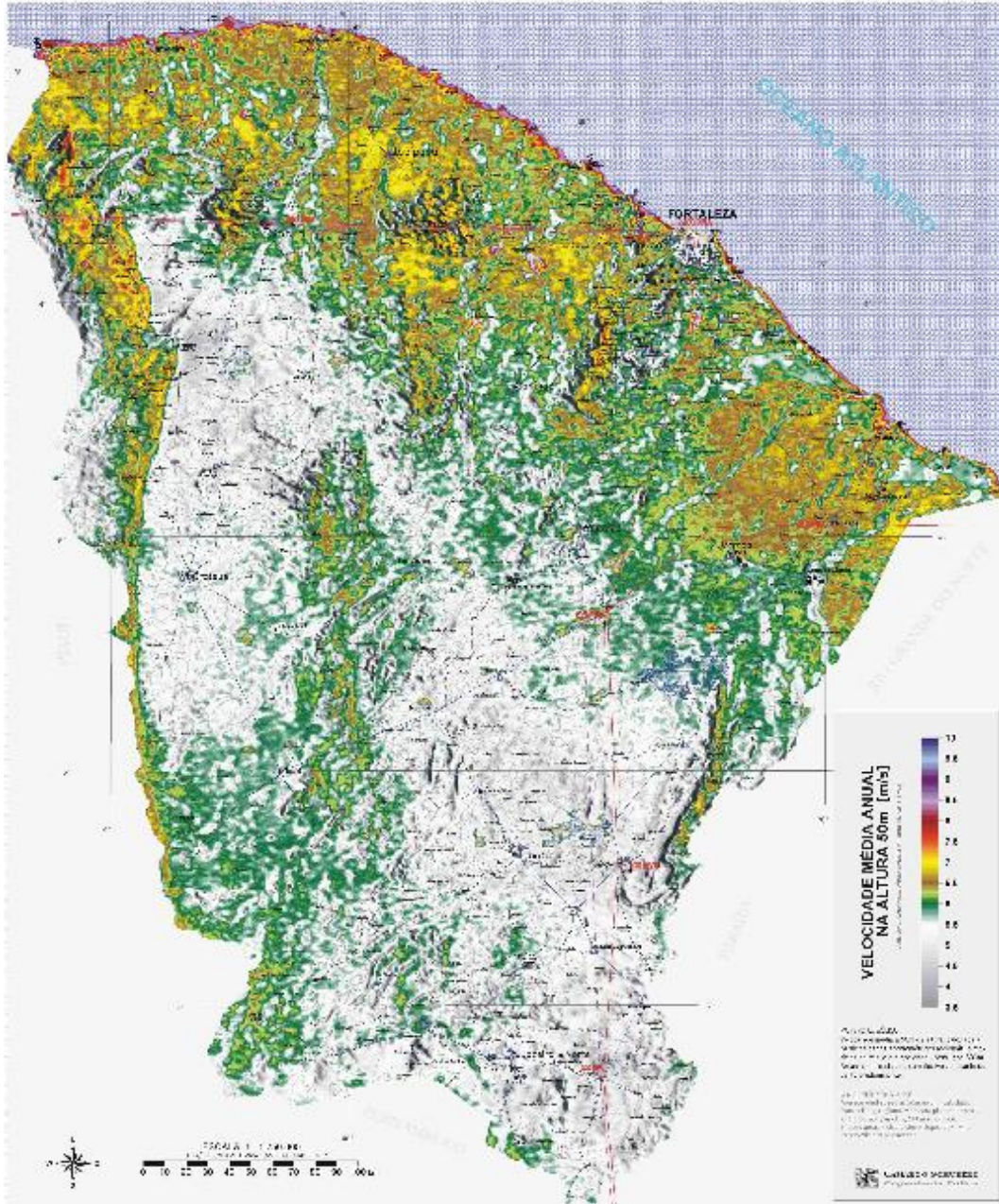
- [44] LIOU, Kuo-Nan. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. California: Academic Press, 1980. 392 p.
- [45] LOPEZ, R.A., **Célula combustível a hidrogênio, a necessidade de novas fontes de energia**. Disponível em: <<http://abesco.com.br/pdf/artigo2.pdf>>.
- [46] LUTFI, N.; VEZIROGLU, T.N. **A clean and permanent energy infrastructure for Pakistan: solar-hydrogen energy system**. *International Journal of hydrogen Energy*, vol. 16, pp. 169-200, 1991.
- [47] MARBÁN, Gregório; VALDÉS-SOLÍS, Teresa. **Towards the hydrogen economy?** *International of Hydrogen Energy*, 2007.
- [48] MASON, James E. **World energy analysis: H₂ now or later?** *Energy Policy*, vol. 35, pp. 1315-1329, 2007.
- [49] MANZINI, F. **Reduction of greenhouse gases using renewable energies in Mexico 2025**. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 26, pp. 145-149, 2001.
- [50] MIRABAL, Samantha T. **An economic analysis of hydrogen production technologies using renewable energy resources**. 2003. 43 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade da Flórida.
- [51] MOMIRLAN, M.; VEZIROGLU, T.N. **Current status of hydrogen energy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, pp. 141-179, 2002.
- [52] MURADOV, N.Z.; VEZIROGLU, T.N. **From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy**. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 225-237, 2005.
- [53] MURRAY, S. **The Hydrogen Hurdle. The Status of and Pathways to a Safe, Feasible, and Sustainable Fuel Infrastructure for the Hydrogen Fuel Cell Vehicle via Public Policy and Codes and Standards**. 2003. Disponível em: <<http://www.wise-intern.org/journal/2003/SMurray.pdf>>.
- [54] MYERS, Duane B. et al. **Hydrogen from renewable energy sources: pathway to 10 quads for transportation uses in 2030 to 2050**. The hydrogen program office, U.S. Department of Energy, 2003.
- [55] OGDEN, Joan M. **Cost and performance sensitivity studies for solar photovoltaic/electrolytic hydrogen systems**. *Solar Cells*, vol. 30, pp. 515-523, 1991.
- [56] OGDEN, J.M.; WILLIAMS, R.H. **Electrolytic hydrogen from thin-film solar cells**. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.15, pp. 155-169, 1990.
- [57] PADRÓ, C.E.G.; PUTSCHE, V. **Survey of the economics of hydrogen technologies**. National Renewable Energy Laboratory, 1999. 57 p.

- [58] PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Mudança do Clima 2007: a base das Ciências Físicas**. Paris, 2007.
- [59] Portal BR. Disponível em: < <http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf> >.
- [60] Portal IPECE. Disponível em: < www.ipece.ce.gov.br >.
- [61] PRINCE-RICHARD, S. **A techno-economic analysis of decentralized electrolytic hydrogen production for fuel cell vehicles**. Disponível em: < www.iesvic.uvic.ca/publications/journals.htm >.
- [62] _____ . **Projeto de integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – Consolidação dos Estudos Ambientais**. Disponível em: < www.ana.gov.br/ProjIntegrSF/EstudoImpactoAmbiental/EIA%20Consolidado%20Item%201%20Apresenta%E7%E3o.pdf >.
- [63] RAMAGE, Michael. **The hydrogen economy: opportunities, costs, barriers and R&D needs**. Disponível em: < <http://www.nap.edu> >
- [64] RANGEL, Maria do Carmo; CARVALHO, Marly Fernandes Araújo. **Impacto dos catalisadores automotivos no controle da qualidade do ar**. Química Nova, vol. 26, No. 2, pp. 265-277, 2003.
- [65] ROPPA, Bruna Fontes. **Evolução do consumo de gasolina no Brasil e suas elasticidades: 1973 a 2003**. 2005. 64 f. Monografia (Bacharelado em Economia) – Instituto de economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [66] RYDÉN, M.; LYNGFELT, A. **Using steam reforming to produce hydrogen with carbon dioxide capture by chemical-looping combustion**, International Journal of Hydrogen Energy, vol.31, p. 1271-1283, 2006.
- [67] RUSCHMANN CONSULTORES. **Análise da dinâmica social do estado do Ceará**. 2002.
- [68] SACRAMENTO, E.M.; DE LIMA, L.C.; CARVALHO, P.C.M. **Estado da arte da tecnologia em um sistema hidrogênio-solar-eólico**. Revista Tecnologia, vol. 27, p.150-162, 2006.
- [69] SANTOS, Marco Aurélio. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas**. 2000.147 p. Tese(Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [70] EN, Zekai. **Solar energy in progress and future research trends**. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, pp. 367-416, 2004.

- [71] SHAKYA, B. D.; AYE, L.; MUSGRAVE, P. **Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind-photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma**, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 30, pp. 9-20, 2005.
- [72] SHERIF, S. A.; BARBIR, F.; VEZIROGLU, T. N. **Wind energy and the hydrogen economy-review of the technology**, Solar Energy, vol.78, pp. 647-660, 2005.
- [73] SIMBECK, Dale R.; CHANG, Elaine. **Hydrogen supply: cost estimate for hydrogen pathways – scoping analysis**. National Renewable Energy Laboratory, 2002. 71 p.
- [74] STEINFELD, Aldo. **Solar thermochemical production of hydrogen – a review**. Solar Energy, vol. 78, pp. 603-615, 2005.
- [75] STRÖBEL, R. et al. **Hydrogen adsorption on carbon materials**, Journal Power Systems, vol. 84, p. 221-224,1999;
- [76] SWAIN, M.R.; SWAIN, M.N. **A comparison of H₂, CH₄, and C₃H₈ fuel leakage in residential settings**. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 17, pp. 807–815,1992.
- [77] THE WORLD BANK GROUP – ENERGY UNIT, ENERGY TRANSPORT & WATER DEPARTMENT. **Technical and economic assessment of off-grid, mini-grid and grid electrification technologies**. United States of America, 2006.
- [78] TROMP, Tracey K. et al. **Potential environmental impact of a hydrogen economy on the stratosphere**. Science, vol. 300, pp. 1740-1742, 2003.
- [79] TSENG, Phillip; LEE, John; FRILEY, Paul. **A hydrogen economy: opportunities and challenges**. Energy, vol. 30, pp. 2703-2720, 2005.
- [80] ULLEBERG, O. **Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy systems**. Disponível em: <http://www.hydrogems.no/references/Ulleberg_Abstract_PhD_1998.pdf>.
- [81] ULTRAGAZ. Disponível em < <http://www.ultragaz.com.br> >.
- [82] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Solar energy technologies program**. United States of America, 2007.
- [83] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values. 2002.
- [84] VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. 2005.
- [85] VEZIROGLU, T.N. **Hydrogen Energy System: A Permanent Solution To Global Problems**. Disponível em: < <http://www.iahe.org>>.

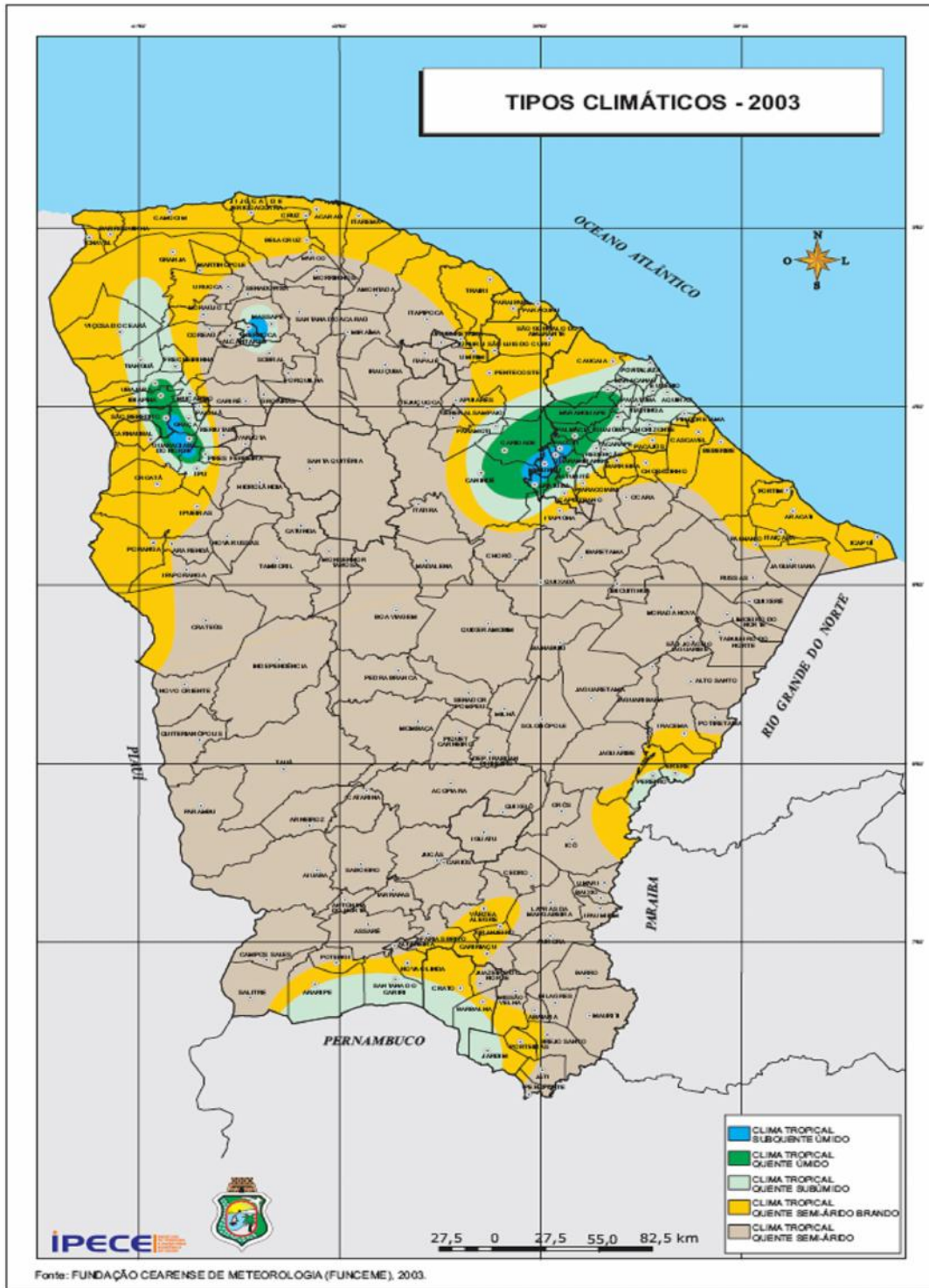
- [86] VEZIROGLU, T.N. Hydrogen Energy and Transportation. Disponível em: <<http://www.iahe.org>>.
- [87] YAMASOE, Márcia Akemi. Apostila da disciplina de Meteorologia física II. 2006. Disponível em: < <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicall/> >.
- [88] YÜZÜGÜLLÜ, E., 2005. **Hydrogen Production Alternatives: Resolving Disparities and Examining the Stability of Decision Making Amongst Divergent Stakeholders**. Disponível em:
<
<http://www.ihec2005.org/abstract/MANUSPDF/Yuzgullu%20E.USA.pdf> >.
- [89] WENGER, Howard et al. **Photovoltaics economics and markets: The Sacramento municipal utility district as a case study**. U.S. department of Energy's PV Compact Program, 1996.
- [90] WIETSCHER, Martin; HASENAUER, Ulrike; DE GROOT, Arend. **Development of european hydrogen infrastructure scenarios – CO₂ reduction potential and infrastructure investment**. Energy Policy , vol. 34, pp. 1284 -1298, 2006.
- [91] WWI – Worldwatch Institute. **Estado do Mundo 2005**. Disponível em:
< www.wwi.org.br >.
- [92] ZÜTTEL, A., 2004. **Hydrogen storage methods and Materials**. Disponível em:
< <http://www.ifres.ch/Homepage/DB/Hydrogen.pdf> >. Acesso em 16 jun. 2006.

Anexo 1 - Mapa Eólico do Estado do Ceará a 50m de altitude



Fonte: <http://www.seinfra.ce.gov.br>

Anexo 2 - Mapa Climático do Estado do Ceará



Fonte: <http://www.ipece.ce.gov.br/estatistica/tematicos/>

Anexo 3 - Modelo Computacional de um Sistema de Energia a Hidrogênio-Solar-Eólico para o Estado do Ceará

```

!      MODELO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DE ENERGIA A HIDROGENIO-SOLAR-EOLICO
!      PARA O MUNDO E ESTADO DO CEARÁ
!      *****
!      VARIÁVEIS DO MUNDO USADAS NO PROGRAMA
!      REAL SR, LRW
!      INTEGER T, K
!      DIMENSION QW(112), EW(112), GW(112), PW(112), HW(112), T(112),
1 ERQW(112), RW(112), QRW(112), GRW(112), RRW(112), PRW(112),
2 AW(112), BW(112), RRW(112), LRW(112), CRE(112), FW(112), CRH(112),
3 CH(112), CF(112), VQW(112), VCW(112), VEW(112), GAME(112), SW(112),
4 CE(112), WW(112), XRW(112), HRPW(112), CRF(112), RRW(112), TC(112),
5 TRW(112), GROW(112), GAME(112), RSW(112), TOC(112), PVC(112)
!      *****
!      VARIÁVEIS DO CEARÁ INCLUIDAS NO MODELO
!      *****
!      DIMENSION Q(112), C(112), ER(112), PR(112), HO(112), GEL(112),
1 HX(112), OR(112), RR(112), RRQ(112), HR(112), E(112), FRWL(112),
2 HE(112), W(112), S(112), F(112), FE(112), GPT(112), CR(112), CH(112),
3 FP(112), VE(112), VC(112), HM(112), RWL(112), VQ(112), GAG(112),
4 QRW(112), GRQNL(112), P(112), RT(112), A(112), TE(112), CRAC(112),
5 GT(112), R(112), H(112), NS(112), GRQ(112), LR(112), HRF(112), AGR(112),
6 B(112), GRV(112), GATG(112), THVH(112), PI(112), GP(112), APV(112),
7 ABVP(112), HC(112), APH(112), APA(112), APR(112), GP(112), OH(112),
8 SE(112), SU(112), SO(112), ST(112), AIA(112), AIB(112), ADHS(112),
9 ABHB(112), ADI(112), ADIS(112), TPV(112), RQ(112), GQ(112), TG(112),
1 TGR(112), TGRQ(112), TGRQ(112), SEH(112), NH(112), NHE(112), SEMN(112),
2 NRE(112), PIC(112), NRP(112), CP(112), EE(112), NP(112), AC(112),
3 WI(112), CW(112), TCBV(112), NPV(112), WD(112), WDH(112), WOI(112),
4 CRH(112), CRH(112), CAT(112), CI(112), ELC(112), OPE(112), SOTC(112),
5 SOTO(112), FVO(112), ELO(112), WDC(112), WDO(112), XWD(112), CC(112),
6 GRK(112), CARR(112), COMA(112), TAM(112)
!      OPMN('unit-22', file "RapidSenPostes.txt", status="unknown")
!      DT=1.0
!      X=0.1
!      Y=0.1
!      Z=0.1
!      V=0.1
!      A1=12.52
!      A2=3.50
!      B3=11.2R5
!      C1=2.0
!      C2=0.20
!      C3=60.0E6
!      W1=0.1
!      U=73.28
!      DEL=0.035
!      DELTA=0.60
!      APS=0.117
!      MTF=0.736
!      ETH=1.38
!      GAMA=0.3CE+06
!      T(1)=2000
!      DADOS INICIAIS PARA O MUNDO
!      *****
!      THYQW=59.0
!      THYEW=92.0
!      THYCW=57.0
!      QW(1)=-6.1K19
!      EW(1)=208.068E+09
!      CW(1)=45.0E+12
!      RW(1)=-5.99E+12
!      FW(1)=-151.0E+09
!      HW(1)=3.2E+09
!      PW(1)=-11.16E+12
!      QRW(1)=-1.0
!      PRW(1)=-1.0
!      GRW(1)=1.0
!      CROW(1)=-1.0
!      W(1)=-1.0
!      RSW(1)=-1.0
!      RW(1)=1.0
!      RRW(1)=1.0
!      ERQW(1)=-1.0
!      RRW(1)=-1.0
!      LRW(1)=1.0
!      CF(1)=14.51
!      CH(1)=41.80
!      CE(1)=-1.869

```

```

CRF(1)=1.0
CRH(1)=1.0
CRE(1)=0.38
GAMF(1)=0.372
GAMH(1)=0.007
HRW(1)=1.0
VEW(1)=0.907
VOW(1)=1.0
VOW(1)=1.0
I
DADOS INICIAIS PARA O GRAMA
*****
BETA=1.0
THYQ=40.0
THYE=17.0
THYG=57.0
Q(1)=7.430E+6
E(1)=0.17E+09
EQ(1)=22.88
ED(1)=0.0305E+09
EE(1)=0.0305E+09
ET(1)=0.0469E+09
EP(1)=0.0036E+09
C(1)=11.55E+9
GQ(1)=1554.50
I
C      TGO(1)=-2.3E+03
C      AC(1)=-8.10E+8
C      ACR(1)=1.0
C      TGR(1)=1.0
C      TGRQ(1)=1.0
C      GH(1)=0.0
C      CFI(1)=1.37E+9
C      GT(1)=-51.11E+9
R(1)=110.24E+06
H(1)=0.0
HE(1)=0.0
HC(1)=0.0
HX(1)=0.0
I
I      APV(1)=0.0
I      APVP(1)=0.0
I      ADIS(1)=0.0
I      TPV(1)=0.0
I      AVA(1)=0.0
C      NM(1)=-1.0E+11
C      P(1)=3.7E+09
C      AT(1)=-6.0E+7
C      AR(1)=-1.0
QP(1)=-1.0
QRWL(1)=3.88
PR(1)=-1.0
PRW(1)=1.0
C      GRT(1)=-1.0
GR(1)=-1.0
GRQWL(1)=-1.9
GRQ(1)=-1.0
RR(1)=1.0
RWL(1)=0.26
W(1)=0.995
WR(1)=-1.0
C      CRAC(1)=1.0
C      CAC(1)=-11.4
ERQ(1)=-1.0
ER(1)=1.0
VE(1)=0.907
VC(1)=1.0
VQ(1)=1.0
HRF(1)=0.0
HR(1)=-1.0
GRTQ(1)=1.0
N=0
WRITE(22,19)
19  FORMAT(/,2X,"ANO",3X,"PROD. DE HIDROGENIO - HELENTO "/)
I  WRITE(22,20)
20  FORMAT(/,2X,"ANO",6X,"TESTE"/)
WRITE(22,22)
22  FORMAT(/,2X,"TEMPO PARA DOBRAR =  "/)
WRITE(22,999)
999  FORMAT(1X,"ANO",6X,"CF",7X,"CH",7X,"CE" /)
WRITE(22,350)
2

```

```

350 FORMAT(1X,"ANO",6X,"APA",7X,"TPV",7X,"NDI",7X,"TCEV",8X,"CB",
1 8X,"EJC"/)
WRITE(22,310)
310 FORMAT(1X,"ANO",6X,"Q",7X,"EQ",7X,"ED",8X,"PH",8X,"LR"/)
WRITE(22,320)
320 FORMAT(1X,"ANO",6X,"SU",7X,"SE",7X,"E",7X,"FI",8X,"FP"/)
WRITE(22,330)
330 FORMAT(1X,"YEAR",6X,"SCTO",7X,"WDO",7X,"PVO",7X,"ELO",8X,"SCTC",
2 8X,"WDC"/)
WRITE(22,340)
340 FORMAT(1X,"YEAR",6X,"SU",7X,"HE",7X,"TE",8X,"TI",8X,
3 "PIC"/)
DO 100 I=2,112
T(I)=T(I-1)+1
BW(I-1)=0.6931*DT*HW(I-1)
K=T(I)/5
QW(I)=QW(I-1)*EXP(DW(I-1)/THYQW)
QRW(I)=QW(I)/QW(I)
AW(I-1)=(1/(THYQW*VQW(I-1))+1/(THYEW*VEW(I-1)))
EW(I)=EW(I-1)*EXP(HW(I-1)*AW(I-1))
SW(I-1)=1/(THYEW*VEW(I-1))
GW(I)=GW(I-1)*EXP(HW(I-1)*(AW(I-1)+SW(I-1)))
SRW(I)=GW(I)/GW(I)
GRQW(I)=CRW(I)/QRW(I)
RW(I)=RW(I-1)-FW(I-1)
FW(I)=DEL*RW(I)
TWH(I-1)=2.0+0.20*(I-1)
HW(I)=HW(I-1)*EXP(0.6931*DT/THW(I-1))
HRW(I)=HW(I)/HW(I)
LZ(EW(I).LT.(FW(I)+ETH*HW(I))) THEN
EW(I)=EW(I-1)*EXP(BW(I-1)*AW(I-1))
ELSE
EW(I)=FW(I)+ETH*HW(I)
ENDIF
IF(ETH*HW(I).LE.EW(I)) THEN
HW(I)=HW(I)
FW(I)=EW(I)-ETH*HW(I)
ELSE
HW(I)=EW(I)/ETH
FW(I)=0.0
ENDIF
ERW(I)=RW(I)/EW(I)
ERQW(I)=ERW(I)/QRW(I)
PW(I)=0*{(RW(I-1)-RW(I))/DT+APS*HW(I)}
PRW(I)=PW(I)/PW(I)
KSW(I)=(GRQW(I)**1.0)*(PRW(I)**0.1)*(QRW(I)**0.5)
WV(I)=(1.3-0.22*RSW(I)-0.08/RSW(I))
VQW(I)=(QRW(I)**X
RRW(I)=RW(I)/RW(I)
EW(I)=ETH*HW(I)+FW(I)
GAMP(I)=PW(I)/EW(I)
GAMH(I)=ETH*HW(I)/EW(I)
CRF(I)=0.33+(0.67)*{(GRW(I)**0.2)*(ERQW(I)**0.5)}/(RRW(I)**0.5)
CF(I)=CF(I)*CRF(I)
HRPW(I)=ETH*(HW(I)/EW(I))
CRS(I)=0.2+(0.8)*{(CRW(I)**0.2)*(ERQW(I)**0.4)}/(HRW(I)**0.43)
CH(I)=CH(I)*CRS(I)
IF(CF(I).LT.CH(I)) THEN
CRF(I)=GAMP(I)*CRF(I)+GAMH(I)*CRS(I)
CF(I)=(PW(I)/EW(I))*CF(I)+ETH*(HW(I)/EW(I))*CH(I)
ELSE
CRF(I)=GAMP(I)*{(CRF(I)**2.0)*(CRS(I))**0.33+GAMH(I)*
1 {(CRS(I)**2.0)*(CRF(I))**0.33}
CF(I)=CF(I)*{(PW(I)/EW(I))*{(CRF(I)**2.0)*(CRS(I))**0.33}
2 +ETH*(HW(I)/EW(I))*{(CRS(I)**2.0)*(CRF(I))**0.33}}
ENDIF
VEW(I)=(RRW(I)**Y)*(CRF(I)**2)/ERQW(I)**V)
VQW(I)=(1/GRQW(I)**W1)
LRW(I)=(CRW(I)*RRW(I))/(PRW(I)*QRW(I))
! CALCULO DA POPULACAO DO BRASIL
! *****
B(I-1)=0.6931*DT*W(I-1)
Q(I)=Q(I-1)*EXP(B(I-1)/THYQ)
QR(I)=Q(I)/Q(I)
QRWL(I)=(3.88)*QR(I)
! CALCULO DA DEMANDA DE ENERGIA
! *****
A(I-1)=1/(THYQ*VQ(I-1))+1/(THYEW*VEW(I-1))

```

```

E(I)=E(I-1)*EXP(B(I-1)*A(I-1))
EE(I)=EE(I-1)*EXP(B(I-1)*A(I-1))
ER(I)=E(I)/E(I)
EQ(I)=E(I)/Q(I)
ERQ(I)=(ER(I)/QR(I))
!
! CALCULO DO PRODUTO NACIONAL BRUTO
! *****
S(I-1)=1/(THYS*VG(I-1))
G(I)=G(I-1)*EXP(B(I-1)*(A(I-1)+S(I-1)))
GR(I)=G(I)/G(I)
GQ(I)=G(I)/Q(I)
GRQ(I)=GR(I)/QR(I)
GRQWL(I)=0.123*GRQ(I)
!
! CALCULO DA PRODUCAO DE HIDROGENIO
! *****
IF (I.E.T.17) THEN
H(I)=0.0
HR(I)=0.0
HX(I)=0.0
HE(I)=0.0
APH(I)=0.0
APA(I)=0.0
APB(I)=0.0
ADHS(I)=0.0
ADHB(I)=0.0
ADI(I)=0.0
PVC(I)=0.0
ADIS(I)=0.0
TFV(I)=0.0
CC(I)=0
N=N+1
ELSE
H(16)=1.7E+06
HE(16)=2.3E+06
HR(16)=1.0
HRF(16)=HE(16)/EE(16)
APH(16)=2.605
APA(16)=8.2467
!
! ADHS(16)=4.165E-3
! ADIS(16)=9.14E-2
TFV(16)=2.905
PVO(16)=3.0855E-3
NPV(16)=2.605
CP(16)=0.0307
!
! ATR(16)=1.4994E-3
SO(16)=5.96E-3
SE(16)=0.0276
CHT(16)=0.036
ET(16)=0.04344
WDH(16)=153.1E3
!
! WDT(16)=33.56E5
! WD(16)=153.1E3
XWD(16)=153.0E3
WDC(16)=94.401E-6
WDO(16)=45.9E-6
TCPV(16)=210.375E-3
BLC(16)=5.78E-3
RIO(16)=1.42E-3
CPE(16)=46.65E-3
SCTC(16)=3.128E-3
SCTO(16)=1.37E-3
CC(16)=75.0E+6
GER(16)=1.0
TAM(16)=1.0
CABR(16)=2.0E-3
COMA(16)=2.0E-4
N=N+1
THYS(I-1)=C1+C2*(N-1)
H(I)=H(I-1)*EXP(0.6931*DT/THYS(I-1))
HR(I)=H(I)/H(16)
HE(I)=EEH*H(I)
ENDIF
HRF(I)=HE(I)/EE(I)
IF (HE(I).GE.EE(I)) THEN
H(I)=EE(I)/ETH
HR(I)=H(I)/H(16)
HE(I)=ETH*H(I)
ENDIF
ENDIF

```

```

NH(I)=H(I)-II(I-1)
NHE(I)=ETH*NH(I)
! *****
! CALCULO DA DEMANDA DE ENERGIA FOSSIL E PRODUCAO DE HIDROGENIO
! *****
IF(HE(I).LE.EE(I)) THEN
PD(I)=EE(I)-HE(I)
ELSE
PD(I)=0.0
ENDIF
FP(I)=1.000*FP(I-1)
R(I)=R(I-1)-FP(I)
IF(R(I).LE.FP(I)) THEN
PF(I)=0.0
ENDIF
! CALCULO DA IMPORTACAO DE ENERGIA FOSSIL
! *****
PI(I)=FD(I)-FP(I)
! CALCULO DAS RESERVAS DE COMBUSTIVEIS FOSSEIS
! *****
R(I)=R(I-1)-FP(I)
RR(I)=R(I)/R(1)
! CALCULO DA AREA FOTOVOLTAICA PARA PRODUCAO DE HIDROGENIO
! *****
IF(I.LE.41) THEN
APH(I)=1.65E-06*H(I)
ELSE
APH(I)=1.38E-06*H(I)
ENDIF
! CALCULO DA AREA DE FV PARA DESSALINIZACAO P/ ELETROLISE
! *****
ADHS(I)=2.45E-09*H(I)
! AREA DE FV REQUERIDA PARA DESSALINIZAR AGUA PARA IRRIGACAO
! *****
ADIS(I)=1.83E-02*APA(I-1)
! AREA TOTAL DE FV E AREA TOTAL DE TERRA
! *****
TPV(I)=APH(I)
APA(I)=1.50*TPV(I)
! CALCULO PARA ENERGIA EOLICA
! *****
AEROGERADORES PARA DESSALINIZACAO DE AGUA PARA ELETROLISE
! *****
GER(I)=6.30E-8*H(I)
TAM(I)=GER(I)-GER(I-1)
! CAPITAL NECESSARIO E CUSTO DE O & M
! *****
CELULAS FV
IF(I.LE.46) THEN
CC(I)=0.99*CC(I-1)
ELSE
CC(I)=CC(I-1)
ENDIF
NPV(I)=TPV(I)-TPV(I-1)
IF(I.LE.31) THEN
TCPV(I)=CC(I)*NPV(I)/1.0E9
ELSE
TCPV(I)=(CC(I)*NPV(I))/1.0E9+(CC(I)*NPV(I-30))/1.0E9
ENDIF
PVO(I)=(1.10E6*TPV(I))/1.0E9
! ELETROLISADOR
! *****
IF(I.LE.21) THEN
ELC(I)=(3.40*NH(I))/1.0E9
ELSE
ELC(I)=(3.40*NH(I))/1.0E9+(3.40*NH(I-20))/1.0E9
ENDIF
ELO(I)=(0.66*H(I))/1.0E9
! ESTOQUE COMPRESSAO E TRANSMISSAO
! *****
IF(I.LE.21) THEN
SCTC(I)=(1.84*NH(I))/1.0E9
ELSE
SCTC(I)=(1.84*NH(I))/1.0E9+(1.84*NH(I-20))/1.0E9
ENDIF
SCTO(I)=(0.4*H(I))/1.0E9
! USINA DE DESSALINIZACAO
! *****

```

```

WDE(I)=90.0E-3*H(I)
! WDI(I)=6.72E5*APA(I)
! WD(I)=WDH(I)
! XWD(I)=WDH(I)-WDH(I-1)
! IF(I.LT.26) THEN
! WDC(I)=(0.617*XWD(I))/1.0E9
! ELSE
! WDC(I)=(0.617*XWD(I))/1.0E9+(0.617*XWC(I-25))/1.0E9
! ENDIF
! WDG(I)=(0.3*WDH(I))/1.0E9
! POSTES DE CONCRETO
! *****
! TNP(I)=TPV(I)/48.0E-6
! NP(I)=TNP(I)-TNP(I-1)
! CP(I)=(527.0*NP(I))/1.0E9
! CPE(I)=CP(I)+ELC(I)
! AEROGERADORES
! *****
! IF(I.LT.21) THEN
! CAER(I)=2.0E6*TAM(I)/1.0E9
! ELSE
! CAER(I)=2.0E6*TAM(I)/1.0E9+(2.0E6*TAM(I-20))/1.0E9
! ENDIF
! COMA(I)=0.1*2.0E6*GER(I)/1.0E9
! CAPITAL TOTAL REQUERIDO
! *****
! TC(I)=TCPV(I)+FIC(I)+SCFC(I)+WDC(I)+CAER(I)
! GASTO TOTAL COM OPERACAO E MANUTENCAO
! *****
! TOC(I)=PVC(I)+ELO(I)+SCFO(I)+WDC(I)+COMA(I)
! CALCULO DA POLUICAO
! *****
! P(I)=U*((FD(I))/DT+APS*(H(I)-HX(I)))
! PR(I)=P(I)/P(I)
! PRW(I)=2.05*PR(I)
! CALCULO DO MODIFICADOR DE CRESCIMENTO POPULACIONAL
! *****
! RWL(I)=0.35*GRQ(I)*(PR(I)**0.1)*(QR(I)**0.5)
! W(I)=(1.30-0.22*RWL(I)-0.08/RWL(I))*BETA
! VQ(I)=(QR(I))**X
! RR(I)=R(I)/R(I)
! VE(I)=(RR(I)**Y)*(CHE(I)**Z)/(ERO(I)**V)
! VG(I)=(1/GRQ(I))**W
! INDICADOR DE QUALIDADE DE VIDA
! *****
! LR(I)=GR(I)/(PR(I)*QR(I))
! ECONOMIA GERADA PELA SISTEMA A HIDROGENIO SOLAR
! *****
! ECONOMIA AMBIENTAL
! *****
! DE(I)=A1*E(I)
! DH(I)=(FD(I)+APS*H(I))*A1
! SE(I)=HE(I)*A1-APS*H(I)*A1
! SE(I)-SE(I)/1.0E9
! ECONOMIA DEVIDO A EFICIENCIA DE UTILIZACAO DE HIDROGENIO
! *****
! SD(I)=(EE(I)*CF(I)-(H(I)*CH(I)+FD(I)*CF(I)))/1.0E9
! CREDITO DE OXIGENIO
! *****
! SO(I)=A2*H(I)/1.0E9
! GANHO NA VENDA DE HIDROGENIO
! *****
! CH(I)=CH(I)*H(I)/1.0E9
! GANHO BRUTO
! *****
! TI(I)=CH(I)+SO(I)
! CUSTO TOTAL (TE)
! *****
! TE(I)=TC(I)+TOC(I)
! CUSTO DE IMPORTACAO DE COMBUSTIVEL FOSSIL
! *****
! FIC(I)=FI(I)*CF(I)/1.0E9
! J=J-1
! IF(K*5.EQ.T(J)) THEN
! WRITE(22,160) T(J), PT(J), RR(J), HK(J), TAM(J), CAER(J), COMA(J)
160 FORMAT(1X,14.6(E10.3)/)
! WRITE(22,180) T(J), CH(J), Q(J), CRE(J), H(J), FD(J), NEV(I)
180 FORMAT(1X,14,2X,E10.3,2X,E10.3,2X,E10.3,2X,E10.3,2X,E10.3,2X,E10.3)

```

```

WRITE(22,200) T(J),CRH(J),Q(J),GQ(J),E(J),H(J),FP(J)
200  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,250) T(J),Q(J),GQ(J),FR(J),LR(J),THYH(J),WDR(J)
250  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,300) T(J),SU(J),H(J),GQ(J),Q(J),BE(J),PIC(J)
300  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,500) T(J),APA(J),TPV(J),WD(J),TCPV(J),CP(J),ELC(J)
500  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,650) T(J),SCTO(J),WDO(J),PVO(J),ELO(J),SCTC(J),WDC(J)
650  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,630) T(J),AIA(J),CHT(J),SO(J),SE(J),LR(J),FR(J)
630  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,700) T(J),TOC(J),TC(J),TE(J),TI(J),CF(J),CH(J)
700  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
WRITE(22,800) T(J),AC(J),FP(J),HE(J),FD(J),E(J),FT(J)
800  FORMAT(1X,I4,6(E10.3)/)
ENDIF
T=T+1
160  CONTINUE
STOP
END

```


Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)