

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

PEDRO DE LACERDA NETO

**POR UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: UMA ANÁLISE
TÉCNICA, ECONÔMICA E SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO SUDESTE BRASILEIRO**

**VOLTA REDONDA
2020**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**POR UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: UMA ANÁLISE
TÉCNICA, ECONÔMICA E SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO DE
HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO SUDESTE BRASILEIRO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aluno:

Pedro de Lacerda Neto

Orientador:

Prof. Adilson Gustavo do Espírito Santo

VOLTA REDONDA

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno:

Título de monografia:

Orientador:

Banca Examinadora:

Prof.

Prof.

Prof.

Dedico este trabalho aos meus pais,
grandes incentivadores em minha vida.

A Deus.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho representa o final de uma trajetória de cinco anos e nesse sentido, os agradecimentos se estendem para todos que colaboraram e fizeram parte desse percurso. É praticamente impossível mencionar todos aqueles que fizeram parte desse caminho, mesmo assim, gostaria de demonstrar aqui minha profunda gratidão.

Gostaria de agradecer à Deus e à minha família, em especial meus pais Aline Martins e Eunides Custódio pelo constante apoio aos estudos e suporte ao longo de toda a graduação. Eles sempre foram meus pilares.

RESUMO

A matriz energética global é sustentada no consumo de fontes não renováveis, caracterizado pelo baixo custo e um grande impacto ambiental. Nesse contexto, a busca de alternativas para a geração de energia de forma limpa e sustentável se mostra importante, tanto para a natureza como para a economia global. Em meio a esse cenário, o Brasil se apresenta como sendo um país com uma matriz energética relativamente limpa e com um alto potencial de produção de energia eólica, solar e proveniente de resíduos (biomassa). Considerado um vetor energético de alta capacidade, o hidrogênio surge como sendo uma alternativa sustentável para o grande desafio do meio técnico-científico-informacional: industrializar sem prejudicar o meio ambiente. A produção de hidrogênio aliada ao uso de fontes alternativas desperta expectativas otimistas no panorama mundial. Sobre essa lógica, o presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica, econômica e sustentável da produção de hidrogênio aliada a fontes alternativas de energias no sudeste brasileiro. A análise baseia-se na utilização de energia sustentável para a produção de hidrogênio de forma a analisar individualmente os limites e as potencialidades da produção de hidrogênio sustentável alimentado por resíduos (biomassa), energia eólica e energia solar.

Palavras chave: Hidrogênio; Matriz Energética; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The global energy matrix is based on the consumption of non-renewable sources, lowered by the low cost and a great environmental impact. In this context, the search for alternatives for generating energy in a clean and sustainable way is important, both for nature and for the global economy. In the midst of this scenario, Brazil presents itself as a country with a relatively clean energy matrix and with a high potential for producing wind, solar and waste energy (biomass). Considered a high capacity energy vector, the increase in hydrogen as a sustainable alternative to the great challenge of the technical-scientific-informational environment: industrialize without harming the environment. Hydrogen production combined with the use of alternative sources arouses optimistic expectations on the world stage. On this logic, the present work aims to analyze the technical, economic and sustainable feasibility of hydrogen production combined with alternative energy sources in southeastern Brazil. The analysis based on the use of sustainable energy for the production of hydrogen in order to analyze the limits and potential of sustainable hydrogen production powered by waste (biomass), wind energy and solar energy.

Keywords: Hydrogen; Energy Matrix; Sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVO GERAL.....	19
1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	19
1.3. METODOLOGIA.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA ANÁLISE DA QUESTÃO ENERGÉTICA NO BRASIL	22
2.1.1.AS CRISES E A COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	23
2.1.2.A NECESSIDADE DE MUDANÇA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	28
2.1.3.AS FONTES RENOVÁVEIS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL.....	30
2.2. O COMBUSTÍVEL DO FUTURO: OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO	47
2.2.1.FORMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO.....	50
2.2.2.CÉLULAS A COMBUSTÍVEL.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
3.1. ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DA BIOMASSA NO SUDESTE BRASILEIRO	64
3.2. ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DA ENERGIA EÓLICA	74
3.3. ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DA ENEGIA SOLAR.....	80
3.4. POR UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: A PRODUÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL	84

4.	CONCLUSÃO	88
5.	REFERÊNCIAS.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Energética Brasileira 2019.....	27
Figura 2: Regime de Chuvas x Demanda Energética.....	31
Figura 3: Componentes básicos dos aerogeradores de eixo horizontal.....	35
Figura 4: Configuração do processo de eletrólise.....	50
Figura 5: Princípio de operação da eletrólise do tipo PEM.....	52
Figura 6: Esquema de gaseificador contracorrente.....	56
Figura 7: Esquema de gaseificador concorrente.....	57
Figura 8: Funcionamento de uma célula a combustível do tipo PEM.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Impactos típicos e relevantes das fases de planejamento, construção e operação de usinas fotovoltaica.....	41
Tabela 2: Métodos de produção de hidrogênio a partir das três principais matérias-primas utilizadas.....	49
Tabela 3: Principais investimentos brasileiros em célula a combustível.....	61
Tabela 4: Área territorial, estabelecimentos agropecuários no Brasil e no Sudeste brasileiro.....	65
Tabela 5: Ocupação do solo nas propriedades agropecuárias da região Sudeste.....	65
Tabela 6: Produtos e produção agrícola (em Toneladas) do Sudeste brasileiro.....	66
Tabela 7: Tipos de resíduos gerado nas principais produções agrícolas e industriais do Sudeste brasileiro.....	68
Tabela 8: Fator de geração de resíduo por produto agrícola específicos da região Sudeste.....	69
Tabela 9: Produção de resíduos agrícolas em Minas Gerais.....	69
Tabela 10: Produção de resíduos agrícolas no Espírito Santo.....	70
Tabela 11: Produção de resíduos agrícolas no Rio de Janeiro.....	71
Tabela 12: Produção de resíduos agrícolas em São Paulo.....	71
Tabela 13: Produção agrícola e produção de resíduos das culturas específicas da região Sudeste.....	72
Tabela 14: Produção de hidrogênio nos estados do Sudeste através da biomassa....	73
Tabela 15: Produção de hidrogênio em m ³ /h na região Sudeste através da biomassa.....	74
Tabela 16: Potencial de geração eólica em Minas Gerais.....	77
Tabela 17: Potencial de geração eólica no Espírito Santo.....	78

Tabela 18: Potencial de geração eólica no Rio de Janeiro.....	78
Tabela 19: Potencial de geração eólica em São Paulo.....	79
Tabela 20: Energia necessária para produção de hidrogênio sustentável por eletrolisador.....	79
Tabela 21: Produção de hidrogênio sustentável através da fonte eólica na região Sudeste.....	80
Tabela 22: Potencial de geração solar fotovoltaica em Minas Gerais.....	82
Tabela 23: Potencial de geração solar fotovoltaica no Espírito Santo.....	83
Tabela 24: Potencial de geração solar fotovoltaica no Rio de Janeiro.....	83
Tabela 25: Potencial de geração solar fotovoltaica em São Paulo.....	83
Tabela 26: Produção de hidrogênio sustentável através da fonte solar fotovoltaica na região Sudeste.....	84
Tabela 27: Produção de hidrogênio sustentável (m ³ /ano) por fonte na região Sudeste.....	84
Tabela 28: Produção energia elétrica a partir de hidrogênio sustentável (biomassa) na região Sudeste.....	85
Tabela 29: Produção energia elétrica a partir de hidrogênio sustentável (energia eólica) na região Sudeste.....	85
Tabela 30: Produção energia elétrica a partir de hidrogênio sustentável (solar fotovoltaica) na região Sudeste.....	86
Tabela 31: Produção energia elétrica total a partir de hidrogênio sustentável nas Unidades da Federação da região Sudeste.....	86

LISTA DE GRAFÍCOS

Gráfico 1: Participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira.....	29
Gráfico 2: Consumo final de biodiesel no Brasil.....	46
Gráfico 3: Potencial de produção total de energia elétrica sustentável na região Sudeste.....	87

LISTA DE SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas

CMMAD – Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO – Monóxido de Carbono

OPEP – Organização dos Países Exportadores do Petróleo

PROÁLCOOL – Programa Nacional do Álcool

IEA – International Energy Agency

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

PROEÓLICA – Programa Emergencial de Energia Eólica

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

UHE – Usina Hidrelétrica

PNPB – Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel

GWP-100 – Global Warming Potential

Mtep – Megateps

TWh – Terawatt-hora

GWh – Gigawatt-hora

KWh – Quilowatt-hora

MtCO₂ – Equivalência em Dióxido de Carbono

PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas

GW – Gigawatt

MMA – Ministério do Meio Ambiente

GE – General Electric

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

SIN – Sistema Interligado Nacional

PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

GIZ – Agência de Cooperação Internacional da Alemanha

SIG – Sistema de Informação Geográfica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

EUA – Estados Unidos da América

PEM – Eletrólise com Membrana de Eletrólito de Polímero

H₂ – Hidrogênio

CH₄ – Metano

N₂ – Nitrogênio

OH⁻ – Hidroxila

Mwt – Mega Wat Térmico

CaC – Células a Combustível

PEMFC – Polymer Electrode Membrane Fuel Cell

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

PAM – Produção Agrícola Municipal

ABIB – Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável

ha – hectares

m³/h – Metro Cúbico Por Hora

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

ASPE – Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios do mundo contemporâneo é fazer com que os países se tornem cada vez mais competitivos sem proporcionar danos ao meio ambiente. O conceito de desenvolvimento sustentável foi apresentado pela primeira vez na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas¹ por meio do Relatório de Brundtland². Na ocasião, o relatório definiu o termo desenvolvimento sustentável como sendo “[...] aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (MILLER JR, 2014).

A corrida para suprir a demanda energética dos países desenvolvidos trouxe consigo uma degradação ambiental sem precedentes, abrindo caminho para que o mundo registrasse índices preocupantes de poluição ambiental. Os grandes índices de gases poluentes lançados na atmosfera terrestre fizeram com que em meados do século passado os países sentissem a necessidade de encontrar alternativas que tornassem sua matriz energética mais limpa e sustentável” (MILLER JR, 2014).

No mundo contemporâneo, o sucesso da economia dos países, isso inclui a brasileira, está diretamente condicionado ao suprimento energético. Para que haja crescimento econômico é preciso que o país tenha uma infraestrutura adequada que atenda a demanda energética do país sem que necessite da importação de recursos energéticos de outros países (MATTOS *et al.*, 2008).

Atualmente a matriz energética mundial é sustentada nos combustíveis fósseis e nos motores de combustão, caracterizados pelo baixo custo e um grande impacto ambiental (EPE, 2020). Considerando que os combustíveis fósseis são recursos finitos, muitos são os debates relacionados à intermitência desses recursos e à

¹ A Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) foi criada em 1983 pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU). A comissão foi presidida por Gro Harlem Brundtland, na época primeira-ministra da Noruega, que tinha por objetivo avaliar e propor soluções realistas para a questão do meio ambiente e o desenvolvimento global. Uma das incumbências da Comissão era firmar acordos de cooperação internacional que guiassem o mundo em políticas e planos que promovessem as mudanças necessárias (WCED, 1987, p. 5).

² Lançado em 1987 com o título de “Nosso Futuro Comum”, o Relatório Brundtland buscou propor ao mundo um novo modelo de desenvolvimento que pudesse alinhar a questão ambiental e o progresso dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. O relatório apontava que o modelo de progresso vigente à época era insustentável e esgotariam rapidamente os recursos naturais (TAYRA, 2007).

necessidade de se encontrar maneiras para descarbonizar a atual matriz energética, diminuindo as emissões de CO₂ e fornecendo energia limpa para as mais diversas aplicações.

No Brasil, foram as crises e os conflitos que forçaram o país a diversificar sua matriz energética. A primeira crise se deu nos primeiros anos da década de 1970 seguindo uma tendência internacional de queda na oferta de petróleo por parte dos países membros da Organização dos Países Exportadores do Petróleo (OPEP). Com o aumento desenfreado no preço desta commodity³, Moraes e Bacchi (2014) aponta que a inauguração do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) em 1975 foi a primeira iniciativa brasileira para a diversificação da matriz energética, introduzindo o uso de combustíveis oriundos da biomassa em veículos automotores (CASTRO, 2011).

Já a segunda crise se deu em 2001, quando o setor elétrico do país entrou em colapso fazendo com que o racionamento de energia fosse cada vez mais frequente no cenário nacional. A crise se deu pela situação econômica da época, pela matriz energética pouco diversificada e pela ausência de um modelo regulatório. Assim, devido a essa crise o país se viu na missão de elaborar estudos e pesquisas que buscassem prever a demanda energética no país nos próximos anos, bem como quais as alternativas energéticas supririam essa demanda (CASTRO, 2011).

A partir de 2016 o mundo vivenciou a grande oscilada no preço internacional do petróleo. Nesse cenário, a terceira crise que reforça a necessidade de diversificação da matriz energética brasileira está em curso. O aumento na demanda de recursos energéticos, sobretudo os combustíveis fósseis, em todo o mundo reforçam a necessidade de se viabilizar outras fontes de energia em todos os países do mundo, não só no Brasil.

Silveira (2017) apontou que da maneira como está hoje, a matriz energética brasileira não é capaz de se sustentar. O principal motivo seria o fato das fontes não renováveis representar a maior provedora de energia dentre as demais fontes analisadas. Para Pinheiro (2020), a hipótese de que “oscilações imprevisíveis nos

³ Commodity representa um determinado produto que é considerado matéria prima. Produzidos em larga escala ao longo do mundo são divididos em grupos específicos como agrícolas, ambientais, minerais ou financeiras.

preços do barril irão comprometer a produção interna das principais fontes de energia” aponta para a necessidade de se diversificar as fontes renováveis de energia para o Brasil.

A produção de hidrogênio aliada ao uso de fontes alternativas desperta expectativas otimistas no panorama global. Considerado o elemento mais abundante da atmosfera, o hidrogênio vem ganhando espaço dentre as fontes energéticas, sendo considerado um ótimo substituto para os combustíveis fósseis como a gasolina, diesel, gás natural e o carvão mineral (SILVA, 2013).

Assim como a eletricidade, o hidrogênio não é considerado uma fonte de energia primária já que para ser obtido é necessário gastar energia na dissociação de uma fonte primária. Considerado um vetor energético, o hidrogênio pode ser obtido por meio de diversos processos. Promover estudos sobre o tema é de fundamental importância para que seja possível encontrar a melhor aplicação dessa tecnologia.

1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo propor uma análise da potencial produção de hidrogênio sustentável a partir de fontes renováveis de energia (eólica, solar e biomassa), analisando as especificidades técnica, econômica e sustentável de cada uma, dando foco na análise dos limites e potencialidades da região sudeste como produtora de hidrogênio sustentável em território nacional.

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- Analisar individualmente os limites e as potencialidades da produção de hidrogênio sustentável alimentado por resíduos (biomassa), energia eólica e energia solar;
- Apresentar uma análise por estado da região sudeste apresentando as suas características específicas;
- Avaliar a necessidade de diversificação da matriz energética brasileira através da produção de hidrogênio sustentável.

1.3. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se metodologicamente como sendo uma pesquisa documental de forma a propor uma análise documental para fundamentar os levantamentos apontados ao longo do texto (GIL, 2008). Na revisão bibliográfica, será feito em um primeiro momento uma compreensão do estudo da matriz energética brasileira e como se deu sua composição de 1970 até 2018, através dos dados obtidos da International Energy Agency⁴ (IEA) e da Empresa de Pesquisa Energética⁵ (EPE). Assim, será realizado uma análise da Matriz Energética Brasileira apontando a necessidade de uma diversificação na sua composição, bem como, fundamentados na obra de Pinheiro (2020), sendo que também será apontado as previsões na produção de fontes renováveis e não renováveis no período de 2019 a 2030.

Na segunda parte será realizado uma análise da economia do hidrogênio, apresentando-o como o combustível do futuro (ALMEIDA *et al.*, 2019). Para isso utilizou-se obra de Braga (2014) para compreender os aspectos técnicos, econômicos e ecológicos na produção de hidrogênio no mundo contemporâneo, bem como os processos de produção de hidrogênio que apresentam uma maior eficiência energética, um menor custo de produção e índices altos de eficiência ecológica. Similar a isso, Bernardi Junior (2009) permitiu compreender melhor os diferentes tipos de processo para obtenção de hidrogênio no mundo.

Por fim, será apresentado uma análise em que se evidencia as possibilidades de produção de hidrogênio sustentável na região sudeste do Brasil utilizando as tecnologias disponíveis no mercado internacional levando em consideração os investimentos estatais na geração de hidrogênio no Brasil proposto por Raffi (2012). Assim, será apresentado as alternativas de sistemas de produção de hidrogênio sustentável no sudeste brasileiro, analisando individualmente os limites e as

⁴ “Criada em 1974 para garantir a segurança do abastecimento de petróleo, a Agência Internacional de Energia evoluiu ao longo dos anos. Embora a segurança energética continue a ser uma missão central, a IEA hoje está no centro do debate global sobre energia, concentrando-se em uma ampla variedade de questões, desde segurança elétrica a investimentos, mudança climática e poluição do ar, acesso e eficiência energética e muito mais” (IEA, 2020).

⁵ Empresa vinculada ao Ministério de Minas e Energia que busca realizar estudos e desenvolver pesquisas relacionadas ao setor energético brasileiro. Foi criada no início dos anos 2000 com objetivo de tornar mais eficiente o planejamento do setor energético do país.

potencialidades dessa produção assistida por energia eólica, energia solar e energia proveniente de resíduos do agronegócio (biomassa).

O presente trabalho é fruto de sucessivos projetos de iniciação científica, financiados pelo Núcleo de Pesquisa (NUPE) através do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) e que arcabouçaram grande parte dos resultados aqui apresentados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA ANÁLISE DA QUESTÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

Com um aumento desenfreado na utilização dos combustíveis fósseis no último século e uma maior preocupação com as questões ambientais relacionadas ao futuro do planeta, a busca por fontes alternativas na geração de energia apresenta-se como sendo um desafio a ser enfrentado nos próximos anos.

O panorama mundial está mudando rapidamente, por motivos ligados a três das grandes preocupações da humanidade nesse início de século: meio ambiente, energia e economia global. Embora à primeira vista possam parecer distintas, estas três áreas estão, na realidade, completamente interligadas. As duas primeiras estão já há mais tempo na percepção do cidadão comum, devido ao efeito estufa e ao aquecimento global associado ao uso de combustíveis fósseis. Quanto à economia, só o tempo dirá quais os efeitos permanentes que esta crise no sistema financeiro internacional terá sobre o setor energético e, mais difícil de se prever, sobre o meio ambiente. A única coisa certa é de que os três setores serão permanentemente afetados (VICHI e MANSOR, 2009, p.757).

É preciso analisar a viabilidade da utilização de algumas alternativas energéticas de modo que se alcance um progresso sustentável. Para isso, se faz necessário antes compreender alguns conceitos que serão fundamentais na análise da matriz energética brasileira.

De acordo com Fonseca (2012), o termo recursos naturais engloba recursos biológicos (fauna e flora), recursos minerais, recursos ambientais (solo, ar, água) e ainda os recursos incidentais (correntes marítimas, massas de ar e raios solares). Esses recursos naturais são classificados ainda de acordo com a sua intermitência, ou seja, sua capacidade de esgotamento na natureza. Dessa maneira, podem ser classificados em recursos naturais não renováveis e recursos naturais renováveis.

Os recursos naturais renováveis representam os recursos disponíveis na natureza que mesmo depois de sofrerem ação humana por meio de sua utilização, têm a capacidade de se renovar por meio de um processo natural. Nessa perspectiva, quando se fala de energia pode-se apontar o ar, a água e as árvores como recursos naturais renováveis para algumas fontes de produção de energia.

Os recursos naturais não renováveis são aqueles que não têm a capacidade de renovação condicionada pela própria natureza após sua utilização. Os minerais como ferro e carvão mineral ou até mesmo o petróleo, muito utilizado no mundo contemporâneo, são alguns exemplos.

Os recursos naturais renováveis ou não renováveis influenciam diretamente no fornecimento de energia no mundo. Esse fornecimento de energia é essencial para que os países desenvolvam um crescimento econômico sustentável uma vez que se apresentam como elemento fundamental da indústria, dos serviços, do comércio, dentre diversos outros setores da economia. Isso reforça o fato de que para o desenvolvimento de uma nação, o consumo de energia se apresenta como uma característica fundamental (DRANKA E FERREIRA, 2018).

2.1.1. AS CRISES E A COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Quando é feita uma análise dos recursos naturais disponíveis no território brasileiro compreende-se que o país é dotado de distintas matérias-primas necessárias na produção e geração de energia. Assim como ao redor do mundo, a composição inicial da matriz energética brasileira se deu pela necessidade do homem de transportar recursos e de se locomover. Dessa forma, com a industrialização brasileira surgindo nos primeiros anos da Era Vargas fica evidente que a composição da matriz energética nesse momento era composta principalmente pela utilização da lenha como recurso natural (TOLMASQUIM, 2000).

Os primeiros investimentos que culminaram para a diversificação da matriz energética do país se deu a partir de 1940. Segundo Pinheiro (2020),

no período compreendido entre as décadas de 1940 e 1960 a produção energética brasileira era predominantemente estatal. Por esta razão, foram criadas grandes empresas como a Petrobrás e Eletrobrás com a finalidade de garantir o abastecimento interno. O monopólio energético brasileiro, juntamente com as regulamentações de custos de serviços operou de forma eficiente por longos anos, isto concorreu para a expansão da capacidade energética do país (PINHEIRO, 2020, p.23).

Nos anos seguintes à 1960, os investimentos na área energética do país aumentaram consideravelmente. O motivo era o progresso nacional e o plano de expansão energética viabilizado pelos governos militares a partir de 1964. O ideal nacionalista difundido no país durante os governos militares foi o motor para expansão

do consumo energético no país em diversos setores da economia, isso por sua vez apontou a necessidade para um maior investimento na construção de novas fontes de energia (CASTRO, 2011). Nesse momento, grandes parques hidrelétricos foram construídos no país, como exemplo a UHE de Ilha Solteira, a UHE de Tucuruí e a Usina Hidrelétrica de Itaipu, além do país investir na área de energia nuclear com a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto por meio do planejamento de construção das usinas de Angra 1, 2 e 3 (BEZERRA, 2016).

Nesse mesmo cenário de diversificação da matriz energética do país, o petróleo havia se tornado a principal fonte energética no mundo e no Brasil respondia por 34% do consumo energético do país (BRASIL, 2018). Com os países membros da OPEP (Arábia Saudita, Kuwait, Irã, Iraque e Venezuela) diminuindo significativamente a produção e aumentando drasticamente o preço de venda do produto, instalou-se a primeira crise do petróleo acarretando consequências drásticas no cenário internacional (SANTIAGO, 2011).

Tal fato fez com que o Brasil buscasse alternativas para driblar a crise do petróleo que ganhou mais força em 1979 com a guerra do Irã, segundo maior produtor de óleo do mundo. O Plano Nacional do Álcool (Proálcool) foi idealizado com o objetivo de incentivar pesquisas e desenvolvimento de projetos que substituísse derivados do petróleo por álcool.

a consequência deste investimento foi um desenvolvimento no setor açucareiro que a partir da produção de etanol atingiu um crescimento em mais de 28 vezes em 20 anos, e um aumento na frota de veículos abastecidos que alcançou a marca de 4,6 milhões. Finalmente o setor açucareiro passou a incorporar a Matriz Energética Brasileira em 10% do total de energia produzida pela matriz (PINHEIRO, 2020, p.24).

Dessa forma, o Brasil foi caminhando para uma diversificação da matriz energética brasileira devido as diversas crises e conflitos que foram existindo ao longo dos anos. Em 2001 a realidade se repetiu no país que estava sucumbido na redução do crescimento econômico, aumento do desemprego, déficit comercial e aumento de impostos.

A partir dos anos 2000 o país vivenciou a realidade da privação de energia através de sucessivos apagões que ocorriam em escala nacional. O fato se devia ao

país ter estagnado nos investimentos no setor energético do país nos anos que antecederam a crise energética (TOLMASQUIM, 2000).

Em meio a esse cenário de ausência nos investimentos públicos e privados no setor de geração de energias, o país tinha ainda um crescente aumento na demanda por energia. Tolmasquim (2000) aponta que “entre 1990 e 2000 o consumo cresceu 49% enquanto a capacidade instalada foi expandida em apenas 35%”. O autor aponta que a saída para a crise nesse momento se daria pela construção de usinas termelétricas, resultado de investimentos estatais e de iniciativas privadas, além também da geração de energia através das reservas de água do país. Vale ressaltar que nesse momento o país optou pela construção de usinas termelétricas uma vez que elas poderiam ser instaladas próximos aos grandes centros consumidores de energia e isso evitaria as perdas com a distribuição da energia. Bezerra *et al*, 2019 aponta que durante esse período de crise

algumas medidas foram tomadas para evitar que esse problema tivesse continuidade. Uma delas foi a implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), em 2004, que incentivou o aumento da capacidade instalada do país, por meio da inserção da produção de energia eólica e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), bem como a construção de termelétricas, no intuito de suprir a demanda por energia em períodos que os níveis dos reservatórios estão abaixo da média, devido à falta de chuvas; porém produzem uma energia suja, que usa carvão mineral, óleo e gás. E são também caras: a produção de energia térmica custa cinco vezes mais que a de energia hidrelétrica (BEZERRA *et al.*, 2019, p. 60)

O investimento realizado não garantia estabilidade no setor energético do país e continuava apontando ainda para a necessidade de uma nova diversificação da matriz energética. Assim, novos investimentos, iniciativas e pesquisas se fizeram necessários para que o país tivesse uma certa segurança energética⁶. Dessa vez, os esforços vieram novamente no sentido de inserir novos componentes na Matriz Energética Brasileiro, diminuindo o peso do petróleo. Segundo Castro (2011)

em 2 de julho de 2003, a Presidência da República instituiu por meio de decreto um grupo de trabalho interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de biodiesel como

⁶ O conceito de segurança energética é um conceito recente que remete a capacidade de uma nação em suprir os recursos energéticos necessários para garantir a manutenção do desenvolvimento econômico e da soberania nacional. Para que exista segurança energética é preciso que haja a garantia da proteção econômica mundial, bem como a estabilidade dos preços no cenário internacional.

fonte alternativa de energia. Como resultado foi elaborado um relatório que deu embasamento ao presidente da República para estabelecer o PNPB como ação estratégica e prioritária para o Brasil. Concomitantemente a estes estudos iniciais sobre o biodiesel, começou a ser elaborado o marco regulatório do setor de biocombustíveis no Brasil. Esse marco regulatório considera a diversidade de oleaginosas disponíveis no país a garantia do suprimento e da qualidade, a competitividade frente aos demais combustíveis e uma política de inclusão social e desenvolvimento regional. As regras permitem a produção a partir de diferentes oleaginosas e rotas tecnológicas, possibilitando a participação do agronegócio e da agricultura familiar (CASTRO, 2011, p. 7).

Segundo Branzatti e Netto (2008), no ano de 2006 o país inverteu a balança de importação de petróleo fazendo com que abrisse caminho para o país se tornar um grande produtor de petróleo e gás natural de forte relevância internacional. Esse fato, abriu caminho para uma nova era no país, somado aos incentivos do PNPB que incluiu em 2004 o biodiesel na matriz energética nacional.

Atualmente, o país possui uma matriz energética com diversas fontes de energia renováveis e não renováveis que é fruto das sucessivas crises e conflitos que se deram ao longo dos anos. Com o passar dos anos, o Brasil foi introduzindo alguns vetores energéticos ou fontes de energia de diferentes origens (VICHI e MANSOR, 2009). Segundo a métrica Global Warming Potential (GWP-100), o que guia a diversificação da matriz energética brasileira nos dias atuais são as medidas a serem tomadas para que o Brasil alcance uma redução na emissão de gases poluentes de 37% ⁷ no ano de 2025 tendo como base o ano de 2005 (PINHO, 2017).

É importante ressaltar que a composição da atual matriz energética brasileira, conforme é apontado na Figura 1, só foi possível devido as fortes iniciativas por parte do Governo Federal e de empresas privadas como forma de superar os conflitos e crises energéticas que se instalaram no país desde a industrialização do governo de Getúlio Vargas, bem como da forte pressão internacional da ONU e de entidades e órgãos de preservação ambiental e climática para que os países estabelecessem metas e firmassem acordos para reduzir o aquecimento global (PINHEIRO, 2020).

⁷Os dados e as medidas a serem tomadas é de domínio público e estão disponíveis em http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf. É valido ressaltar que esse representa o mais atual acordo de grande relevância internacional feito pelo Brasil para redução na emissão de gases causadores do efeito estufa.

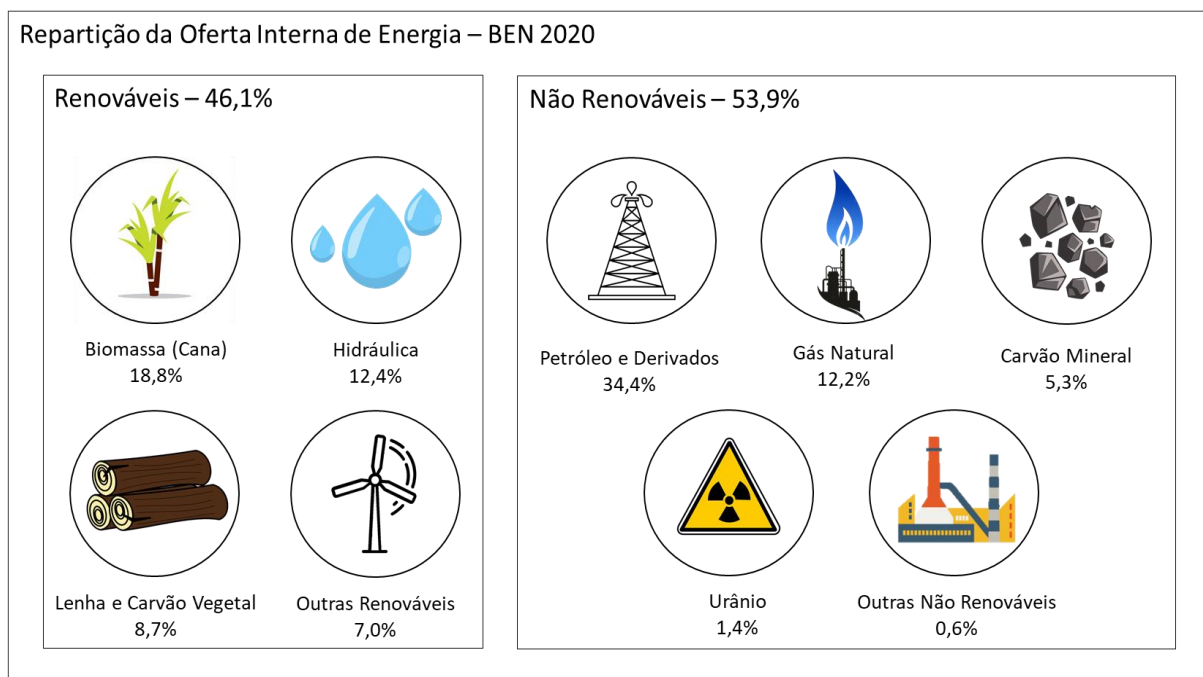


Figura 1: Matriz Energética Brasileira 2019.
Fonte: Autor, EPE (2020).

Considerado um país emergente, o Brasil apresenta uma economia em desenvolvimento com uma matriz energética que não garante esse desenvolvimento para os próximos anos (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007). O Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional de 2020, que tem o ano base 2019, apresentou um acréscimo de 1,4% para o ano de 2018 no total de energia disponibilizado no país (oferta interna de energia). Com esse acréscimo, o valor em número da oferta interna de energia no Brasil foi de 294,0 Mtep (Megateps). Entretanto os dados referente a oferta de energia elétrica ficou 2,3% maior em relação ao ano de 2018, representando um valor de 14,9 TWh (Terawatt-hora) de aumento (EPE, 2020).

Essa tendência de aumento observada nos dias atuais se comporta de forma diferente ao longo dos próximos anos. Ao projetar o consumo de energia e a expansão da oferta energética para os próximos 10 ou 20 anos o que se observa é uma capacidade de oferta energética duas vezes maior que a atual e uma demanda por consumo crescendo muito mais que nos dias atuais. Mesmo que a matriz energética brasileira apresente uma boa parcela de fontes naturais renováveis, isso não significa que o país manterá os mesmos índices nos próximos anos. Pinho (2017) aponta que é preciso evidenciar agora os desafios a serem enfrentados para que sejam definidas as ações para manter a matriz energética balanceada e alcançar uma economia de baixo carbono.

2.1.2. A NECESSIDADE DE MUDANÇA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Em um cenário internacional, economias que garantem recursos energéticos com baixo custo e menor impacto ambiental está caminhando para um cenário econômico com diminuição nos gases poluentes (PINHEIRO, 2020). Segundo dados do Balanço Energético Nacional 2020, o Brasil no ano de 2019 amentou em relação ao ano anterior, a quantidade de emissões antrópicas associada à matriz energética brasileira, no qual o valor foi de 419,9 MtCO₂ (equivalência em dióxido de carbono) com o setor de transporte e indústrias representando as maiores altas de emissões.

O balanço projeta ainda que no ano de 2029 o país alcançará 514,0 MtCO₂ (equivalência em dióxido de carbono) sendo lançado na atmosfera. Isso mostra um crescimento de 2,0% para cada ano até 2029. Esses dados são preocupantes que apontam para uma necessidade de mudança na matriz energética do país. Pinho (2017) analisa essa questão das emissões e aponta que essa questão se apresenta para o país não somente como um desafio para lidar com a segurança energética frente a alta demanda, mas também como uma oportunidade de explorar novos recursos e riquezas naturais por meio de novas técnicas que sejam capazes de aumentar a utilização principalmente dos recursos energéticos renováveis disponíveis em território nacional.

Nessa perspectiva, serão apontadas as principais contribuições que norteiem as decisões para os próximos 10 ou 20 anos, bem como os dados de origem secundária com fonte em pesquisas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) ao longo dos anos que possam apresentar um diagnóstico do quadro energético brasileiro de forma a guiar investimentos por parte do setor público e ainda pesquisas que viabilize novas alternativas.

Conforme apontado Castro (2011), as diversas crises e conflitos guiaram a diversificação da matriz energética do país. Grande parte dessa evolução seguiu os passos da tendência mundial de evolução e também foi impactado pelos diversos agentes externos. Inicialmente a matriz energética do país era considerada renovável com uma participação de mais de 58% de fontes renováveis em virtude de a lenha estar presente. Ao longo dos anos essa participação foi caindo consideravelmente chegando a 53% em 2000 e fechou o ano de 2014 com 39,4% de participação. Essa

forte queda se deu devido a inserção de recursos energéticos mais eficiente e seguiu por vários anos (CASTRO, 2011).

Esse cenário de queda começa a mudar a partir de 2014 conforme representado no Gráfico 1.

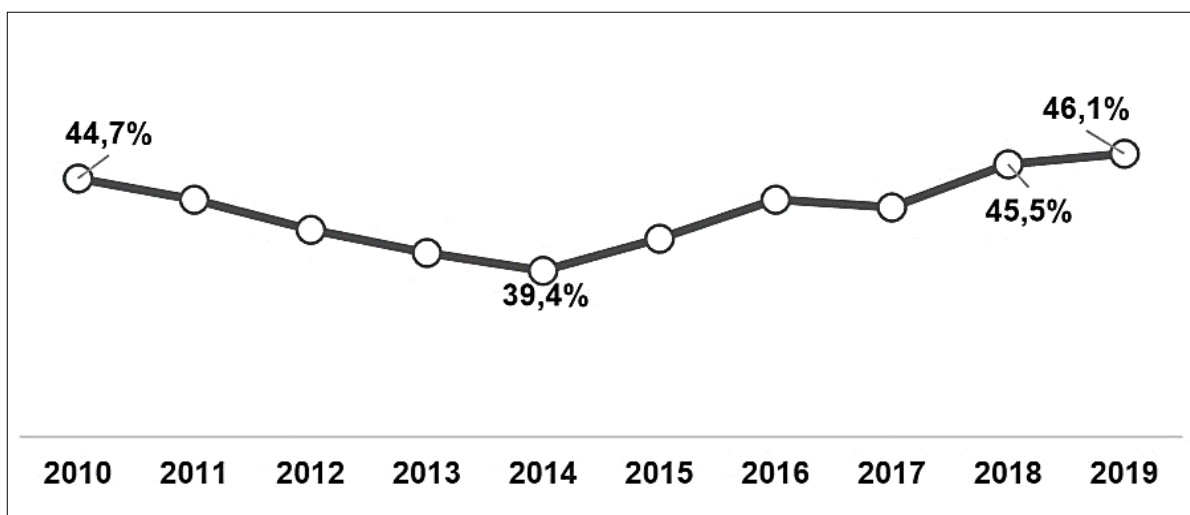


Gráfico 1: Participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira.
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

Dados do EPE (2020), apontam que essa mudança se deve em partes aos incentivos do governo federal em novas fontes renováveis, sobretudo pelo aumento da oferta de biomassa da cana de açúcar, mas também pela diminuição da oferta de carvão mineral, abrindo um espaço maior para as fontes renováveis. Mesmo que se observe uma reversão da tendência de redução da participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira a partir de 2014, o que se observa nos dois últimos anos é uma tendência de estagnação nesses valores.

Segundo Pinheiro (2020), ao se realizar uma previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis da matriz energética brasileira é possível observar que a maior parte das fontes de energia são sensíveis a oscilação do preço do petróleo.

Em um mundo em que o preço do barril do petróleo varia constantemente ao longo dos anos, é fundamental garantir uma matriz energética que seja menos suscetível a esse tipo de variação. Levando em consideração a cana de açúcar, o gás natural, o petróleo, a lenha e a hidrelétrica como principais fontes renováveis e não renováveis da matriz energética brasileira é preciso garantir a utilização de novos elementos que não sejam tão suscetíveis ao preço do petróleo (NADALETI *et al.*, 2020).

2.1.3. AS FONTES RENOVÁVEIS COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL

O Brasil é um país dotado de recursos naturais, o que permite que o país caminhe para uma diversificação da sua matriz energética sem depender fortemente dos derivados do petróleo. No cenário nacional, a energia hidroelétrica é a fonte geradora de energia elétrica mais expressiva no país. As usinas hidrelétricas (UHEs) e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) são consideradas a principal fonte de produção de energia elétrica do país. Segundo a EPE (2017) 81,7% da energia elétrica produzida no Brasil no ano de 2016 foi de origem renovável, sendo que 68,1% provinham das usinas hidrelétricas.

2.1.3.1. ENERGIA HIDRELÉTRICA

Um estudo intitulado Calculadora 2050, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética, aponta que no cenário realista, ou seja, com o país mantendo oferta atual e não realizando esforço para redução da demanda o país chegará em 2050 com uma capacidade de geração de energia hidrelétrica de 521 TWh / ano e uma potências instalada de 105 GW, bem acima dos 86 GW instalados em 2013. Em um cenário mais ousado, em que todo o potencial hidrelétrico inventariado fosse utilizado, essa capacidade seria de 851 TWh / ano com uma potência de 172 GW (EPE, 2017).

Analisando fisicamente a estrutura de produção de uma usina hidroelétrica é notável que alguns elementos são fundamentais na composição da sua estrutura básica: barragem, vertedouro, captação e transporte do fluido (água), central elétrica ou central de força. Mesmo sendo considerada uma fonte de energia relativamente limpa, a geração de energia através da água tem chamado atenção por alguns fatores nos últimos anos (PAZ, 2000).

O primeiro dele é relacionado às fortes secas que o país tem enfrentado de 2010 pra frente o que tem limitado um pouco a utilização desse recurso como fonte de geração de energia. O segundo fator se diz a sustentabilidade da mesma. O ponto negativo é evidenciado no processo de geração de energia que promove a liberação de gás metano, gás carbônico e oxido nitroso, além do fato de que se perde uma grande área de fauna e flora para ter o reservatório em condições ideais de funcionamento da usina. Com relação aos gases liberados na atmosfera eles podem ser fruto da decomposição da vegetação que existia antes da construção da usina e do reservatório, ser fruto de algas que emitem dióxido de carbono (CO₂) nos lagos, ou

ainda do acúmulo de nutrientes e compostos orgânicos que ficam retido nas barragens das usinas (TOLMASQUIM, 2016).

Mesmo com essas limitações e impactos ambientais, mais de 80% da energia elétrica do país provem das usinas hidroelétricas espalhadas por todo o país, fato que se dá devido ao país possuir 19% de toda a reserva superficial de água do mundo. Todavia, mesmo com toda essa abundância de água, o regime de chuvas, conforme apontando, varia ao longo do ano e influencia diretamente a oferta de energia elétrica no Brasil (OLIVEIRA e PINHEIRO, 2020).

O gráfico mostrado na Figura 2 aponta a variação da oferta de água nos reservatórios brasileiro de acordo com o regime de chuvas. O que está evidenciado é que o regime de chuvas ao longo do ano varia nos períodos de seca e nos períodos úmidos. Assim, além da instabilidade de produção provocada pela oscilação internacional do preço do petróleo, o comportamento da matriz elétrica e da matriz energética do país está sujeito ao comportamento do regime de chuvas em todo o território brasileiro.

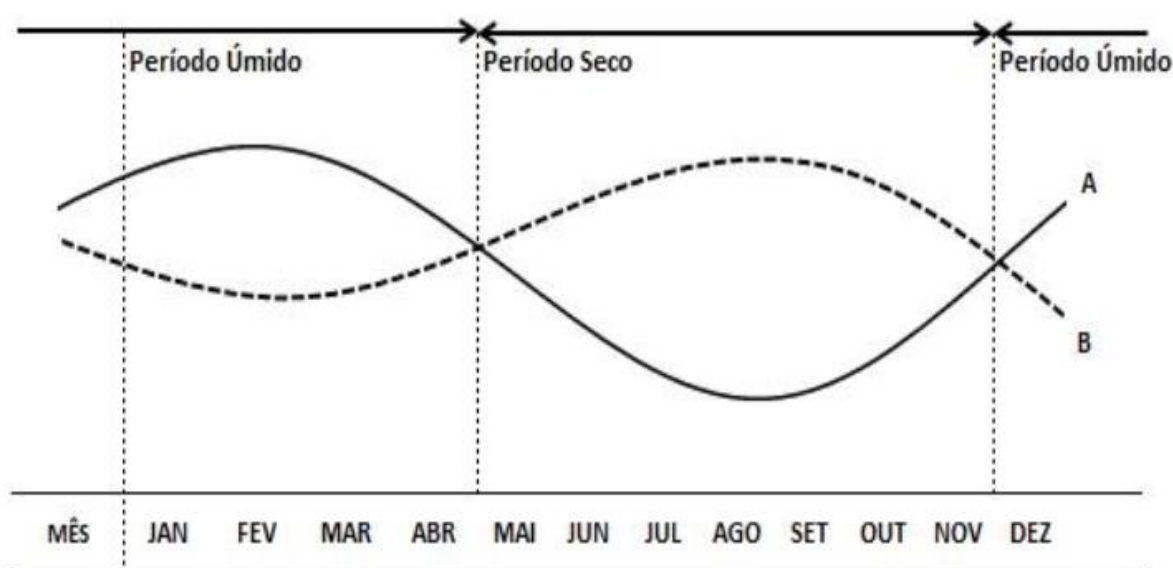


Figura 2: Regime de Chuvas x Demanda Energética.
Fonte: Revista Light, 2018.

Essa variação na disponibilidade no volume de água nos reservatórios das usinas e parques hidrelétricas é representado pela curva A. Em uma análise geral, essa curva aponta ainda a potencial capacidade de geração de energia que as usinas possuem. Por sua vez, a curva B representa a demanda do mercado brasileiro de energia elétrica, tendo o seu pico exatamente no período das secas onde a quantidade

de água disponível nos reservatórios das usinas são as menores do ano (OLIVEIRA e PINHEIRO, 2020).

Tolmasquim (2016) aponta que essa questão aponta para a forma com que o país supre a demanda do mercado interno de energia elétrica, que por sua vez reflete na matriz energética do país, durante o período de seca. Esse período que vai do mês de maio até o mês de novembro as usinas hidroelétricas funcionam com a quantidade de água que conseguem estocar em seus reservatórios durante o período úmido e a outra parte é suprida através de usinas térmicas alimentadas por derivados do petróleo.

Essa questão hídrica, bem como o fato das usinas térmicas serem grandes emissoras de gases poluentes fizeram com que o país encontrasse novas fontes alternativas de energia para além das usinas hidroelétricas. Grande parte desse aumento de participação das fontes renováveis na matriz energética do país que o mundo tem observado a partir de 2014 se deve pelo aumento na participação de novas fontes alternativas de energia na matriz elétrica e energética do país (PINHEIRO, 2020).

2.1.3.2. ENERGIA EÓLICA

Aumentando sua capacidade instalada a uma média de 30% ao ano, a energia eólica se apresenta com a maior parcela de geração de eletricidade de fontes renováveis nos últimos anos, representando o maior crescimento dentre as tecnologias de energias renováveis (CHU et al., 2007). No Brasil, os esforços pela introdução da energia eólica no país vêm desde 2001 com a criação do Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) que acabou fracassando na missão de promover e estimular a contratação de empresas para a produção de energia eólica no país. Em 2002 foi criada a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) com o objetivo de promover e divulgar a eficiência energética da energia eólica e apresentando a mesma como uma fonte de energia limpa de forte potencial no território nacional. A questão só começou a ganhar destaque nacional e receber uma maior quantidade de investimentos públicos e privado partir do ano de 2009 em que o governo federal começou a promover leilões na região Nordeste do país.

Energia que tem por objetivo converter o vento em energia elétrica, se apresenta tendo baixo custo, nenhuma geração de resíduo, sem emissão de gases

poluentes e inesgotável. A utilização de ventos para geração de eletricidade tomou maior proporção no mundo a partir de 1990 com a meta de diminuir as emissões de gases que promovem o efeito estufa e de proporcionar aos países uma maior independência energética. Ainda assim,

vale lembrar que, mesmo sendo considerada comparativamente uma fonte de baixo impacto ambiental, as usinas eólicas passam pelo processo de licenciamento ambiental e devem realizar estudos para avaliar os impactos socioambientais e as medidas de mitigação ou compensação necessárias para que o projeto possa ser considerado viável. Dependendo do local e do porte do empreendimento as usinas podem passar por processos de licenciamento simplificados. Há, entretanto, normas que obrigam que usinas planejadas em locais como formações dunares ou locais importantes para reprodução de aves, entre outros locais sensíveis, passem pelo processo mais rigoroso de licenciamento, exigindo-se a elaboração de EIA/Rima (TOLMASQUIM, 2016, p.289).

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) do Brasil aponta em sua literatura os impactos na paisagem local, riscos a fauna local, ruído e utilização do solo (erosão e drenagem) como possíveis impactos dos empreendimentos de geração eólica. Em dados, a pesquisa de 2009 do Ministério do Meio Ambiente (MMA) aponta que 25% dos impactos são sobre a fauna, 21% são relativos a paisagem local, 18% com a implantação dos empreendimentos eólicos, também 18% com o uso do solo para realização de drenagens ou por processos de erosão, 11% com ruído e os demais 8% estão divididos em interferência eletromagnética e fatores socioeconômicos.

Apresentando uma demanda crescente no Brasil e no cenário internacional, a energia eólica apresenta alguns desafios na questão de gestão sustentável que precisam ser superados de forma a mitigar ainda mais os impactos dessa fonte energética no meio ambiente. Essa rápida expansão dos parques eólicos ao longo dos últimos anos no Brasil deve ser acompanhada de uma otimização das ações que tratem a sustentabilidade na geração eólica (BRONZATTI e NETO, 2008).

Sistematizar e consolidar as informações sociais ambientais sobre os licenciamentos de cada projeto se faz fundamental para diminuir os impactos apresentados pelo MMA no ano de 2009. Um ponto que ainda cabe destaque nessa questão é a desatualização de dados dos atlas eólicos dos estados. Esses mapeamentos precisam ser atualizados constantemente pelos órgãos estaduais, federais ou municipais competente de forma a incluir sempre os possíveis impactos

de cada região. Dessa maneira, estudos de mitigação dos impactos podem ser elaborados pensando na característica física, ambiental e social de cada estado (TOLMASQUIM, 2016).

Existem hoje dois tipos de geração eólica que variam de acordo com a localização da instalação, *onshore* (em terra) ou *offshore* (marítima). A instalação chamada de *onshore* pode ser dividida em centralizada ou distribuída. A subcategoria centralizada é aquela caracterizada por um grande conjunto de instalações que formam os parques eólicos⁸ ligados ao sistemas de distribuição elétrico nacional. Por outro lado, a subcategoria distribuída são aquelas instalações que alimentam apenas determinadas casa, fazendas, escolas, pequenas indústrias de forma a diminuir a quantidade de energia que as mesmas usam da rede de eletricidade. Agora, as instalações chamadas de *offshore* são aquelas instalações mais comum nos países do mundo que não possuem disponibilidade de instalação desses equipamentos em terra, ou ainda a quantidade de ventos disponível no mar é relativamente maior que os disponíveis em terra (TOLMASQUIM, 2016).

Para que seja gerada energia elétrica através dos ventos, é preciso que sejam utilizadas turbinas eólicas. Dessa forma, a força do vento quando em contato com as pás dessas turbinas gera a energia mecânica, através da movimentação, capaz de acionar os rotores do aerogerador de forma a gerar assim energia elétrica. Os aerogeradores são compostos basicamente de três elementos principais: rotor, eixo e gerador. O rotor é representado pelas pás e o núcleo (também chamado de cubo) que captam a energia proveniente do vento, já o eixo é responsável pelo transporte da energia do rotor para o gerador e por fim, o gerador é aquele que converte a energia mecânica em energia elétrica (Wiser *et al.*, 2014).

Na imagem representada na Figura 3 é possível ver as partes que constituem os componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal. É válido ressaltar aqui que ao longo das diversas aplicações que existem no mundo, os aerogeradores com

⁸ Os parques eólicos representam um conjunto de aerogeradores que possuem um centro integrado de controle e comando. Os aerogeradores presentes nesses parques são espaçados um dos outros por meio de bases de sustentação das torres fixadas no chão do terreno. Mesmo com essa separação física de uma torre da outra, existe uma interligação entre os aerogeradores por meio de cabos de média tensão para que a energia possa ser convertida.

eixo horizontal compostos por três pás e tendo o seu rotor posicionado em direção oposta ao vento é apontado como a melhor opção pelo mercado.

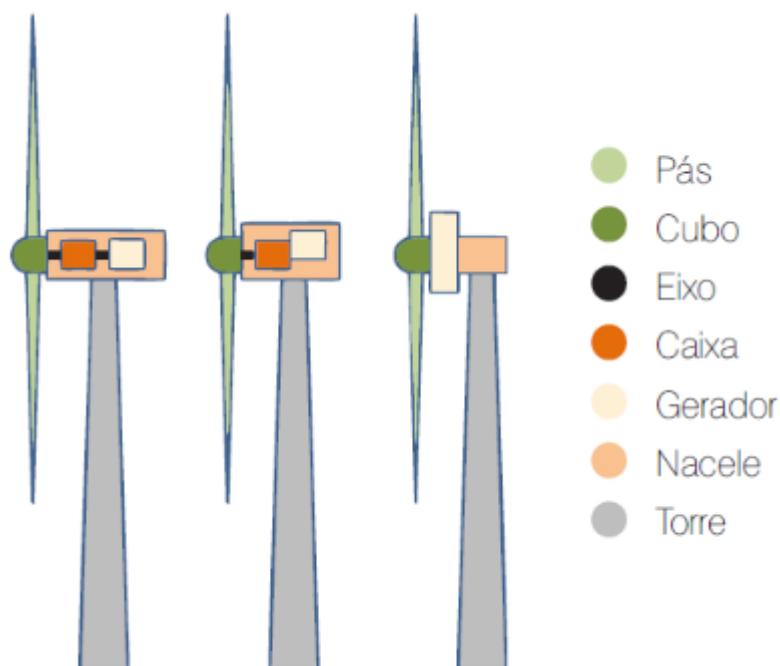


Figura 3: Componentes básicos dos aerogeradores de eixo horizontal.
Fonte: ABDI, 2014.

Dados do Balanço Energético Nacional 2020 apontam que em 2019, 10% de toda a energia consumida no Brasil foi fruto da força dos ventos. Esse dado coloca a energia eólica em segundo lugar, ocupando uma posição importante na composição da matriz brasileira. Os dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) apontam que nesse mesmo ano o setor de energia eólica possuía distribuído em todo o território nacional um total de 613 parques eólicos e 7.536 aerogeradores em pleno funcionamento. Isso representa um total de 15,4G gigawatt (GW) de potência instalada. O Governo Federal estima que nos próximos 10 anos essa capacidade alcance um patamar de 40GW, fazendo com que seja o maior crescimento absoluto de uma fonte de energia alternativa nesse recorte temporal.

A evolução no setor eólico traz dados animadores para a matriz energética do país quando se olha para o curto prazo. A ABEEólica estima que já em 2023 o país já possuirá cerca de 21,5GW de capacidade instalada, sendo que para os próximos 4 anos, os leilões realizados até aqui, garantem uma expansão de 20% em usinas eólicas com relação ao que temos nos dias atuais. Esse crescimento está baseado tanto em usinas *onshore* quanto em usinas eólica *offshore*. Os equipamentos e maquinário para garantir essa alta expansão. Segundo Azevedo (2020), em outubro

de 2019 a GE (General Electric) divulgou o Brasil como sede da maior turbina eólica do mundo para a geração de energia em terra. A potência divulgada foi de 5,3 Megawatt (MW). No total serão 25 turbinas desse modelo para atender uma usina eólica da EDF Renewables⁹ no estado da Bahia.

Os leilões vem sendo os grandes incentivadores da propagação dessa fonte alternativa no país. E seu estudo sobre esse tema, Bayer (2018) aponta que das oito rodadas iniciais de leilões no país, apenas 14% foram concluídos respeitando o cronograma estabelecido no início das obras. Dentre os motivos estão principalmente os atrasos nas licenças ambientais, os atrasos nas conexões da rede e os atrasos no repasse dos financiamentos por parte do Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). O estudo aponta ainda que mesmo que tenha havido atrasos na conclusão das obras, a taxa de conclusão pode chegar em 98% uma vez que a desistência do empreendimento é muito baixa. A participação de diferentes atores no mercado aumentou, fazendo com que a participação dos maiores proprietários desse mercado diminuísse de 60% para um valor de 37%, de forma a promover uma livre formação de preços desse segmento.

Nessa perspectiva de crescimento e novos incentivos por parte do Governo Federal, Bronzatti e Neto (2008) aponta que os investimentos se fazem necessário no sentido de garantir a correta inserção dessa fonte no Sistema Interligado Nacional (SIN) de forma a garantir uma certa confiabilidade do sistema. Ainda assim, existem uma série de outras possibilidades que possam ajudar nessa inserção como a flexibilização da carga, armazenamento de energia, gestão da carga, mudança na operação das atuais plantas eólicas, entre outras.

É preciso enxergar e considerar os limites e as potencialidades de cada característica, especificidade técnica, econômica, social, bem como a limitação de cada tecnologia e por último a importância do planejamento estratégico do setor.

⁹ É considerada uma das principais empresas de energia renovável do Reino Unido e da Irlanda, sendo especializada em tecnologias solares, eólica e baterias. Busca ainda promover um futuro sustentável através da energia eólica e outras fontes renováveis, fazendo acordos e parcerias com comunidades locais.

2.1.3.3. ENERGIA SOLAR

Outra fonte de energia em destaque no cenário nacional é a energia proveniente do sol. Atualmente existem duas tecnologias de geração usando a energia solar: a fotovoltaica, que representa a conversão da luz em energia elétrica; e a heliotérmica, resultado do aquecimento de um fluido a partir da energia solar com o objetivo de gerar vapor. No presente trabalho será detalhado apenas da tecnologia de produção através da geração fotovoltaica, que vem dominando o mercado ao longo dos anos e representou em 2014 um total de 98% da capacidade instalada quando colocada junta com a heliotérmica (REN21, 2015).

O princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica é baseado na obtenção da energia convertendo diretamente a luz em energia elétrica por meio do chamado efeito fotovoltaico. Esse efeito representa uma diferença de potencial em duas extremidades de um material semicondutor, sendo essa diferença de potencial produzida pela absorção de luz. Esse efeito que foi constatado pela primeira vez por Edmond Becquerel, leva em consideração que esses materiais semicondutores são definidos assim pela presença de elétrons de um lado, também chamado de bandas de energia, e por um lado sem a presença dos elétrons, também chamado de *gap* ou banda proibida. Em uma condição de temperatura ambiente, os elétrons transitam de um lado para o outro, porém numa quantidade muito pequena, sendo necessário um processo de dopagem para se utilizar um semicondutor e obter assim energia elétrica (PINHO, 2017).

o semicondutor mais usado é o silício, abundante na crosta terrestre. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao se adicionar átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso, que não poderá ser emparelhado e ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto permite que, com pouca energia, este elétron seja liberado, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um "dopante" doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n. Se, por outro lado, são introduzidos átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, "faltará" um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta é denominada "buraco" ou "lacuna". Da mesma forma, é demandada pouca energia para que um elétron de um sítio vizinho possa ocupar esta posição, fazendo com que o "buraco" se desloque. Diz-se, assim, que o boro é um "aceitador de elétrons" ou um dopante p (TOLMASQUIM, 2016, p.332).

Dessa forma, o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas está exatamente no deslocamento de cargas que provocam a diferença de potencial, conhecida também como efeito fotovoltaico. Para que haja essa diferença de potencial é preciso que haja uma corrente elétrica fluindo através da junção *pn*, caso essa seja exposta a fótons capaz de romper a banda proibida ou *gap*. Após esse entendimento, se faz necessário apontar o panorama nacional do uso da energia solar, bem como os limites e potencialidades do uso dessa tecnologia (LANA, 2016).

No Brasil, as primeiras pesquisas iniciaram no ano de 1950, mas foi somente na década de 1990 que a energia fotovoltaica passou a estar cada vez mais presente no cenário nacional. O Governo Federal, por meio do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), buscou no ano de 1994 estudar viabilidades para implementação da energia fotovoltaica como solução para atender locais afastados dos grandes centros urbanos, a política que buscava realizar a eletrificação rural, ficou conhecida anos mais tarde como Programa Luz para Todos instalando nesses locais Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (PINHO; GALDINO, 2014).

A regulamentação dessa modalidade de produção por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) só veio em 2012 por meio da Resolução Normativa nº 482/2012 e posteriormente revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015. Essa regulamentação permite que sistemas de microgeração e minigeração acessem o sistema de distribuição e compensação de energia elétrica. Nos últimos anos, o número de empreendimentos que têm adotado esse tipo de medida vem crescendo exponencialmente devido as grandes vantagens econômicas do projeto e com isso uma série de debates vem sendo feito no entorno de uma nova regulamentação para evitar possíveis prejuízos às empresas de energia do país e ao próprio Governo Federal. Lana (2016) aponta que todo esse debate e discussão, somados aos fortes incentivos nos últimos anos nesse setor, bem como a sua expansão se devem ao fato do Brasil possuir um abundante recurso solar em grande parte de sua extensão territorial.

Quanto ao recurso solar no Brasil, é preciso levar em consideração que o país está localizado entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio¹⁰ e com uma grande proximidade à Linha do Equador¹¹, o que favorece no país a elevada incidência de radiação solar. Essa condição, permite que toda a extensão territorial do país receba raios solares em quase todos os períodos do ano, inclusive nas estações mais frias (LANA, 2016).

Estudos da Empresa de Pesquisa Energética (2012) apontam que diferentemente das fontes de geração eólica e hidrelétrica, a inserção de fontes que utilizam o recurso solar disponível no Brasil é mais segura, quando comparada com as fontes apontada, e proporciona uma certa estabilidade no sistema elétrico do país de forma a reduzir os picos de demanda e aliviar o carregamento da rede. Essa segurança na integração dessa alternativa sustentável ao Sistema Interligado Nacional (SIN) se faz mais segura pelo fato de que a variabilidade anual da radiação solar no Brasil é muito baixa, especialmente pelas características apontadas acima. Todavia, é preciso ressaltar que

em razão da característica de seu ciclo diário, limitado ao período diurno, a geração fotovoltaica não substitui investimentos na ampliação da capacidade instalada do sistema elétrico, mas pode ser vista como uma fonte “economizadora” de combustíveis de maior valor econômico (EPE, 2012).

Ainda assim existem regiões do país que garantem essa estabilidade até certo ponto. Esse fato está representado de forma mais clara através da análise dos dados da EPE (2012) sobre a irradiação solar direta normal por dia, bem como a irradiação global. O oeste da Bahia é apontado como um dos lugares mais favoráveis à aplicação dessa tecnologia, tal fato se deve exclusivamente a uma maior incidência nos raios solares. O Vale do São Francisco, o leste do Estado de Goiás, o Estado de Mato Grosso do Sul, o Estado do Piauí e o oeste do Estado de São Paulo (EPE, 2012). Exatamente esses estados e localidades que apresentam os maiores investimentos na área de energia solar fotovoltaica. No entanto, mesmo com essa segregação

¹⁰ Representam linhas imaginárias criadas com o objetivo de representar os pontos onde o sol incide perpendicularmente ao longo dos solstícios. O Trópico de Câncer está localizada no Hemisfério Norte, na latitude 23,270 e o Trópico de Capricórnio está localizada no Hemisfério Sul, na latitude -23,270.

¹¹ Linha imaginária responsável por dividir o planeta em Hemisfério Norte e Hemisfério Sul a 0º de latitude. Na teoria essa linha encontra-se no meio do planeta, estando a meio caminho do Polo Norte Geográfico e o Polo Sul Geográfico.

espacial feita pelo EPE em sua nota técnica, isso não significa que o país não tenha potencial de produção em outras localidades. Pereira *et al.* (2006), inovou ao apresentar um estudo em que evidenciava que quase a totalidade do território do Brasil está elegível à utilização de fontes renováveis solares.

O levantamento feito pela EPE em conjunto com a Agência de Cooperação Internacional da Alemanha (GIZ) e também com uma estimativa do EPE utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que foi apresentado por Tolmasquim (2016). Mesmo que o país apresente limitações (técnicas, econômicas e sustentáveis) para a introdução dessa fonte em larga escala, é preciso evidenciar aqui esses dados que mostram mais de perto o potencial físico do Brasil na produção e geração fotovoltaica.

Tolmasquim (2016) apresenta esse potencial ao fazer uma análise da possibilidade de instalação de centrais fotovoltaicas no Brasil. Para que tal dado fosse estimado, a pesquisa não considerou os biomas Pantanal e Amazônia, bem como considerou a faixa de 6,0 a 6,2 kWh/m² como sendo a melhor faixa de irradiação solar, bem como definiu as áreas aptas descontando-se os 20%¹² que diz respeito às limitações que são impostas pelo código florestal. Após esses apontamentos, a pesquisa chegou a um valor estimado de 307 GWp como possibilidade de instalação de centrais fotovoltaicas em áreas antropizadas¹³ no Brasil.

É importante analisar ainda o potencial técnico da geração distribuída dentro da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL. A pesquisa feita pela EPE (2014) em conjunto com a Agência de Cooperação Internacional da Alemanha usou dados do Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e cruzou dados de satélite para se chegar ao total de telhados residenciais capazes de produzir energia solar. O estudo comprovou, segundo Tolmasquim (2016, p.395), que “a área não é fator limitante para a massiva inserção de sistemas fotovoltaicos em residências no país”. Dessa forma, a região sudeste, com grande densidade populacional apresentou um alto potencial fotovoltaico residencial, com os seguintes valores: Rio de Janeiro com 23.521 GWh/ano, São Paulo com 62.196

¹² Referente a áreas de reserva legal (RL) e também as áreas de preservação permanente (APP), ambas impostas pelo código florestal brasileiro.

¹³ São áreas que não possuem suas características originais. Geralmente usa-se o termo para referir a áreas naturais que já sofreram a ação humana.

GWh/ano, Minas Gerais com 32.193 GWh/ano e o Espírito Santo com um potencial de geração no valor de 5.212 GWh/ano.

Com relação aos impactos da geração de energia elétrica associada às fontes fotovoltaicas é importante ressaltar os mais importantes, bem como as ações mitigadoras para os mesmos. Esses estão divididos em quatro categorias diferentes e que estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Impactos típicos e relevantes das fases de planejamento, construção e operação de usinas fotovoltaica

Tema	Impactos	Medidas mitigadoras
Utilização e ocupação do solo	Alteração da paisagem; Alteração no uso do solo; Interferência na fauna e flora.	Busca pela melhor alternativa locacional; Implantação de sistemas de drenagem; Manutenção das vias de acesso; Programas de Educação Ambiental; Criação de Reserva Legal; Programa de monitoramento e resgate de fauna
População	Geração de expectativas na população; Interferência na infraestrutura local (estradas, habitação, saneamento, transporte, saúde, outros); Interferência / perturbação da população (modo de vida, serviços etc.).	Programa de comunicação; Programa de Articulação Institucional; Adequação da infraestrutura local e redimensionamento dos equipamentos e serviços sociais.
Empregos	Geração de empregos temporários durante as obras (positivo); Geração de empregos permanentes durante a operação da usina (positivo); Perda dos postos de trabalho temporários após as obras.	Programas de capacitação da mão-de-obra local; Programas de realocação de trabalhadores.
Receitas	Aumento na arrecadação de tributos (positivo); Incremento na economia local (positivo)	Ações para capacitação da gestão pública e privada; Fomento das atividades econômicas locais.

Fonte: Autor, adaptado de TOLMASQUIM (2016).

Assim, para cada impacto apresentado na Tabela 1, é apontado uma ação mitigadora à ser colocado em prática por parte dos órgãos competentes, bem como por parte do Governo Federal. Trajano (2010) aponta que é preciso olhar para além desses impactos, fazer uma análise e chegar à conclusão de todos os dados de potencial de geração fotovoltaica foram estudos técnicos e para que possa ser colocado em prática alguns fatores precisam ser levados em consideração. No mesmo sentido, Vellutini, Silva e Marques (2019) apontam que é preciso focar na redução de custo, sendo apontado como um dos maiores impeditivos para o desenvolvimento dessa tecnologia, lidar com a questão da intermitência, criar políticas públicas que facilite o acesso ao financiamento, adequar a regulamentação de forma a superar desafios e por fim garantir uma qualidade nas instalações. Nessa lógica, somente dessa maneira que o país poderá aproveitar todo o seu potencial fotovoltaico disponível.

2.1.3.4. BIOMASSA

Sendo considerada uma das fontes mais antigas da humanidade, o uso da biomassa como fonte de energia com potencial aproveitamento energético teve início com a utilização da lenha transformando a vida das pessoas e sendo responsável por grandes revoluções nos modos de produção. No Brasil é o bagaço da cana de açúcar o responsável pela geração de um alto potencial elétrico (SILVA, 2011; DIOLA e SANTOS, 2010). Silva e Chandel (2014) apontam a biomassa com um enorme potencial de produção de energia, especialmente quando se analisa os combustíveis voltados para o setor de transporte, que em 2019 pelo segundo ano consecutivo superou a indústria no consumo de energia no Brasil. Em números o setor de transporte é responsável por 32,7% de todo o consumo de energia, tendo registrado uma alta de 3,3%¹⁴ no comparativo de 2018 com 2019 (EPE, 2020).

O maior impacto para os biocombustíveis no Brasil veio em 14 de novembro de 1975, pelo decreto 76.593, com a criação do Programa Nacional de Álcool (Proálcool). O programa buscou consolidar a indústria sucroenergética de modo a ampliar a produção de um combustível alternativo de relevância internacional. Por sua vez, a geração de energia elétrica através da biomassa, também chamada de

¹⁴ Vale ressaltar que essa variação percentual do consumo é representada em base energética, e não volumétrica.

bioeletricidade, ganhou destaque no cenário nacional a partir do ano 2000 com o crescente aumento do aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar. Somando as condições climáticas, terras férteis, abundância em chuva e sol a esse cenário faz do Brasil o quarto maior país de todo o mundo em produção de biomassa, sendo apontado como referência internacional na produção do etanol e de bioenergia, devido especialmente ao bagaço da cana-de-açúcar. Tolmasquim (2016) aponta que

a biomassa de cana-de-açúcar se destaca, devido à quantidade e economicidade, pois sua disponibilidade é decorrente da produção de açúcar e etanol, produtos com enormes mercados doméstico e internacional (especialmente no caso do açúcar, que é commodity). Em relação ao ano de 1975 (início do Proálcool), a produção de cana-de-açúcar no Brasil cresceu quase 9 vezes (TOLMASQUIM, 2016, p.139)

Diversos esforços vêm sendo tomados para que o Brasil mantenha essa posição de destaque no cenário internacional. Lima *et al.* (2018) e Simioni *et al.* (2018) apontam que esses esforços parte de iniciativas como a substituição da lenha oriunda de floresta nativa que é usada como combustível em muitas indústrias, como por exemplo de laticínios, por lenha de florestas ou bosques cultivados. Segundo os autores, as empresas do ramo de laticínio com sede no Brasil abrem espaço para novas fontes, como a biomassa, uma vez que a utilização de fontes alternativas de energia ligadas ao processo, especialmente por energia térmica, está limitada à apenas 9,5% quando comparada com os demais casos do mesmo tipo de geração de energia.

Mesmo que o país ainda não use todo o seu potencial, existe uma enorme possibilidade de desenvolvimento da biomassa como possível substituta das fontes não renováveis na matriz brasileira (VELLUTINI, SILVA E MARQUES, 2019). Welfle (2017) aponta o Brasil como um grande exportador de recursos da biomassa pelo fato do país ser de dimensões continentais, com forte atuação no ramo do agronegócio e ainda por possuir uma grande quantidade de recursos de biomassa. Para o autor, com os investimentos corretos o país poderia deixar de exportar 25,8% a menos de biomassa em relação ao que exporta hoje só para poder atender a demanda interna. Atualmente os diversos estudos e pesquisas ao redor do mundo estão focado em analisar o potencial e o aproveitamento da biomassa das lenhas de florestas energéticas, da biomassa da cana-de-açúcar, e nos resíduos.

Na questão da biomassa brasileira é válido destacar dois cenários: a produção e geração de energia elétrica por meio da biomassa, chamada bioeletricidade e ainda a produção de combustíveis, especialmente o biodiesel, por meio do aproveitamento da biomassa, esses chamados de biocombustíveis. Quanto a bioeletricidade, a Agência Internacional de Energia (2014) publicou um estudo em que analisa a introdução de novas políticas na oferta de energia com origem na biomassa. O estudo vai além ao analisar como ficaria o cenário de oferta de energia proveniente da biomassa caso o mundo limitasse os gases do efeito estufa em 450 partes por 1 milhão (ppm)¹⁵ fazendo com que os países assumissem o compromisso de evitar um aquecimento maior que 2°C na temperatura média do planeta.

Esses dados, mostra que caso o mundo se comprometa com a inserção de novas políticas de incentivo a utilização de fontes alternativas que usem a biomassa, em 2040 o mundo alcançaria 1.600 TWh de energia gerada. Com um comprometimento maior das políticas sustentáveis o mundo alcançaria em 2040 um total de 2.261 TWh de geração elétrica por biomassa em todo o mundo. Nesse cenário internacional a China se apresentou como o país que mais cresceu no horizonte de 2040, com 15% de sua energia renovável sendo da biomassa (IEA, 2014). Já quando o recorte da análise leva em consideração o panorama nacional, Tolmasquim (2016) aponta que

o Governo Federal vem praticando uma série de incentivos, com vistas ao aumento da participação da bioeletricidade no panorama energético nacional, com destaque para os leilões de energia dedicados às fontes alternativas. Desde 2004, com a reestruturação ocorrida no setor elétrico nacional, a participação da biomassa tem aumentado neste segmento, uma vez que as políticas nacionais formuladas fomentaram a diversificação da geração elétrica, a adoção de um mercado competitivo descentralizado e a necessidade do uso mais racional da energia (diminuindo os impactos ambientais das fontes energéticas nacionais) (TOLMASQUIM, 2016, p.147).

Esses investimentos estão relacionados não somente na área de geração de energia, mas também na área de combustíveis com o bioetanol e biodiesel. A produção de bioetanol está interligada com a oferta de cana-de-açúcar, grãos de milho e em alguns casos de mandioca. O mercado de biocombustíveis, especialmente do

¹⁵ Cabe aqui ressaltar que em abril de 2020 essa concentração média de CO₂ na atmosfera estava em 416,21 partes por 1 milhão (ppm).

bioetanol está relacionado com o mercado de *commodities* como o açúcar e o álcool uma vez que possuem a cana-de-açúcar como matéria prima em comum (EPE, 2020).

Dados da ANP (2016) apontam que no ano de 2015 o Brasil possuía uma área de 9 milhões de hectares com plantação de cana-de-açúcar, correspondendo à uma produção de 658,4 milhões de toneladas ¹⁶. Desse total, a ANP (2016) aponta que a produção de etanol no ano de 2015 foi de 31,8 bilhões de litros. Esses dados, quando projetados para os próximos anos apontam para um cenário de crescimento na produção de cana-de-açúcar e de etanol. Tolmasquim (2016) confirma esse cenário ao apontar que no ano de 2050 a produção de cana-de-açúcar alcançara aproximadamente 1.050 milhões de toneladas e a produção de etanol chegará em 65 bilhões de litros.

Com relação ao biodiesel a matéria prima principal utilizada é o óleo de soja com forte consumo na região Sul e Sudeste do Brasil. A soja se faz competitiva pelo fato de apresentar duas vantagens: suprir a demanda interna por biodiesel; e preços competitivos quando comparados com outras matérias-primas (ABIB, 2015).

O surgimento do biodiesel no Brasil se deu através do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) com o objetivo de assegurar a produção e o consumo de biodiesel, promover a inclusão social e o desenvolvimento regional, diversificar as fontes de matéria-prima para a produção do biodiesel além de gerar renda e emprego no campo e nas cidades (SILVA CÉSAR et al., 2018). O sucesso do programa é tanto que o consumo interno de biodiesel vem crescendo a cada ano, especialmente de 2016 pra frente (EPE, 2020). O aumento desse consumo também se deve à adição deste combustível no diesel fóssil por meio de uma série de leis e resoluções de nível federal.

O Gráfico 2 aponta o crescente aumento no consumo final de biodiesel no Brasil, chegando a $5.762 \times 10^3 \text{ m}^3$ no ano de 2019 e fazendo do país o segundo maior fabricante de biodiesel do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos da América (EUA), marco esse que o país mantém desde 2010 quando atingiu inéditos $2,4 \times 10^3 \text{ m}^3$ (EPE, 2020).

¹⁶ Uma tonelada de cana-de-açúcar equivale a uma quantia aproximada de 1,2 barril de petróleo (DE HOLANDA & ERBER, S/D).

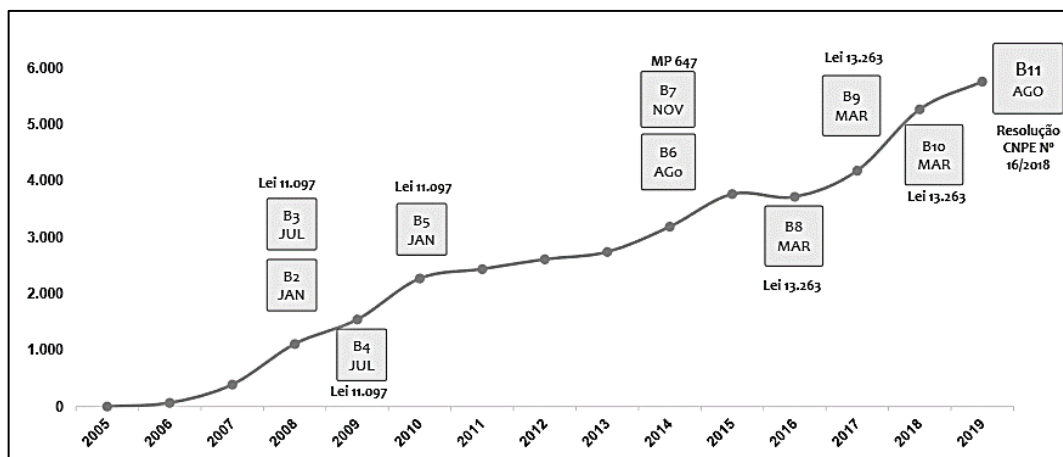


Gráfico 2: Consumo final de biodiesel no Brasil.
Fonte: EPE, 2020

O consumo e a produção vêm crescendo a cada ano inclusive para os biocombustíveis de origem 100% sustentável. Bondarik, Pilatti e Horst (2018) aponta que

em 2016 o montante de B100 (biodiesel puro) produzido atingiu 3.801.339 m³ contra 3.937.269 m³ do 2015, um recuo de 3,5% no biodiesel disponibilizado no mercado interno. O percentual de B100 adicionado compulsoriamente ao diesel mineral manteve-se em 7%. A principal matéria prima foi óleo de soja (72%) seguida por sebo bovino com 14%. Vale destacar que nos últimos dez anos [2007-2017], a produção brasileira de biodiesel aumentou de 736 m³ para 3.419.838 m³ (BONDARIK, PILATTI E HORST, 2018, p. 684).

Dessa forma, De Oliveira (2011) aponta que é expressiva capacidade da biomassa, se apresentando como fonte renovável, em desempenhar um papel expressivo na Matriz Energética e Elétrica Brasileira. Utilizando-se da biomassa da forma correta e buscando minimizar os poucos impactos de sua aplicação, é possível apontar essa fonte como possível substituta para os combustíveis fósseis na matriz energética atual, de forma a aproveitar matérias primas de grande relevância nacional, bem como resíduos da agropecuária, do agronegócio, das indústrias e das cidades (resíduos urbanos).

Nessa perspectiva, a biomassa se soma à outras fontes renováveis de forte relevância no Brasil (eólica e a solar) e aponta para um futuro promissor dessa aplicação. Segundo Marques, Silva e Vellutini (2019) aponta em números esse cenário promissor das fontes renováveis no Brasil ao apontar que

a acelerada expansão das fontes renováveis alternativas, que são intrinsecamente fontes variáveis, na matriz elétrica brasileira promove

mudanças nas características operacionais da mesma. Em 2017 essas fontes correspondiam a 11% da geração devendo chegar a 18% em 2027. Esse aumento pode parecer pequeno, mas corresponde a um aumento de 142% na geração eólica, 1700% na geração solar concentrada e 52% na geração térmica a biomassa (MARQUES, SILVA e VELLUTINI, 2019, p. 55).

Assim, ao analisar todas as fontes renováveis brasileiras como uma alternativa sustentável para a descarbonização da Matriz Energética Brasileira, Braga (2014) aponta que se faz necessária a busca por novos recursos para a geração de energia, sempre apoiado nas fontes alternativas já existente no país e na certeza de que os recursos naturais e artificiais têm a capacidade de produção de energia direta ou de forma indireta para alimentar e suprir as demandas do setor de transporte, indústrias, serviços, agricultura e outros. É assim que o país caminhará para uma economia de baixo carbono: incentivando pesquisas com recursos naturais renováveis e que atendam a demanda nacional.

2.2. O COMBUSTÍVEL DO FUTURO: OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

É preciso assegurar a geração de energia buscando fontes de energia renováveis e menos poluentes (BRAGA, 2014). Segundo, Miranda (2017, p.4), vivemos atualmente “uma transição energética em nível global, que levará à descarbonização do sistema energético mundial”. É exatamente nesse cenário que o hidrogênio se apresenta como sendo o combustível do futuro e um dos possíveis caminhos para que os países alcancem uma economia de baixo carbono e uma matriz energética mais limpa e sustentável (ALMEIDA *et al.*, 2019).

Pinho (2017) aponta que o mundo globalizado está em um cenário onde a intensidade das emissões de CO₂ são preocupações fundamentais em diversos debates e fóruns internacionais de recurso energético, desenvolver pesquisas e projetos que buscam reduzir os problemas ambientais por meio da produção de hidrogênio associada as fontes renováveis é um caminho que norteará o país na busca de uma economia de baixo carbono e na descarbonização da matriz energética global. Nessa lógica, Braga (2014) aponta que aliar a produção de hidrogênio às fontes alternativas de energia aponta uma saída para esse problema da intermitência dos combustíveis fósseis e os inúmeros problemas ambientais relacionados ao uso dos mesmos.

Capaz de produzir eletricidade, gerar potência e calor, o hidrogênio serve de insumo para os mais diversos complexos industriais no país, tendo participação de mais de 50% das aplicações relacionadas a fabricação de fertilizantes em indústrias químicas e petroquímicas, bem como cerca de 40% de participação na tratativa do petróleo em sua forma bruta ao redor do mundo (TOLMASQUIM, 2003). Desenvolver e intensificar a produção de hidrogênio sustentável se faz necessário na medida em que a maior parte dos 60 milhões de toneladas de hidrogênio consumidos anualmente no mundo é proveniente de combustíveis fósseis (MIRANDA, 2017). A grande quantidade de energia gerada na combustão do hidrogênio faz com que o hidrogênio apresente uma alta densidade energética e que segundo Balat e Kirtay (2010) é aproximadamente três vezes mais quando comparadas aos combustíveis proveniente de hidrocarbonetos.

Segundo Tolmasquim (2003), 78% do hidrogênio produzido no mundo estão associados ao petróleo e 18% ao carvão, sendo que o gás natural é, nos dias atuais, a fonte principal da produção de hidrogênio no mundo. Dados do Department of Energy dos Estados Unidos apontam que só nos EUA 95% da produção de hidrogênio provém do Gás Natural derivado do petróleo. Apenas 4% são relacionados à produção por eletrólise, porém deve-se considerar que parte da produção por eletrólise utiliza energia elétrica de origem fóssil, apontando que menos de 4% do hidrogênio produzido é de origem renovável (DECOURT *et al.*, 2014). Tais fatores apontam para uma necessidade dos países de adequar a produção de hidrogênio à matriz energética de forma a torná-lo um vetor energético sustentável.

Mesmo estando em grande quantidade na natureza, o hidrogênio não se encontra pronto para o uso imediato, ou seja, na forma pura, sendo necessário um processo anterior de produção para que assim possa ser possível sua aplicação. Braga (2014) aponta os diversos processos pelos quais podemos obter hidrogênio e as tecnologias atreladas a isso ao apontar que

os processos eletrolíticos para produção de hidrogênio envolvem a utilização de energia elétrica ou térmica para promover a reação química de decomposição da molécula de água em hidrogênio e oxigênio. Os principais exemplos de processos eletrolíticos são a eletrólise da água (processo convencional) e a termólise (eletrólise a vapor). Os processos fotolíticos envolvem tecnologias que utilizam a energia da luz e seus principais exemplos são os sistemas fotobiológicos e fotoeletroquímicos. A produção de hidrogênio através de processos termoquímicos envolve basicamente a matéria-prima, de

origem fóssil ou renovável, calor e catalisadores para promover as reações químicas de transformação da matéria-prima (por exemplo, etanol, gás natural, metanol, gasolina etc.) em hidrogênio. Os principais processos termoquímicos para produção de hidrogênio são: gaseificação de biomassa e pirólise, reforma a vapor, oxidação parcial, reforma autotérmica e reforma oxidativa (BRAGA, 2014, p. 29).

Em um levantamento similar, Sa, Cammarota e Ferreira-Leitao (2014) aponta que dentre os diferentes modos de produção e obtenção de hidrogênio atualmente, os que mais se destacam estão divididos em função das principais matérias-primas utilizadas: biomassa, água e combustíveis fósseis.

A Tabela 2 apresenta os principais métodos de obtenção de hidrogênio considerando as três matérias-primas apontada. Dentre os métodos apresentado, os autores apontam ainda que o gás natural representa 40% da produção de hidrogênio, a oxidação de hidrocarbonetos representa 30%, a gaseificação do carvão 18% e a eletrólise da água representa somente 5% dessa parcela de produção de hidrogênio ao redor do mundo.

Tabela 2: Métodos de produção de hidrogênio a partir das três principais matérias-primas utilizadas

Matérias-primas	Métodos
Combustíveis fósseis	Reforma a vapor do gás natural;
	Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados;
	Gaseificação do carvão.
Água	Eletrólise da água;
	Processos foto-eletróquímicos;
	Processos termoquímicos.
Biomassa	Processos biológicos (biofotólise da água, foto-fermentação e fermentação anaeróbia);
	Gaseificação da biomassa;
	Reforma a vapor do etanol;
	Reforma em fase líquida.

Fonte: Autor, adaptado de SA, CAMMAROTA e FERREIRA-LEITAO (2014).

Assim, dentre as várias tecnologias disponíveis para a produção de hidrogênio, será apresentado a seguir dois métodos de obtenção de hidrogênio mais comuns: eletrólise e gaseificação da biomassa.

2.2.1. FORMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

A eletrólise é um dos caminhos de maior viabilidade e mais comum quando se trata de produção de hidrogênio. O processo consiste na dissociação das moléculas que constituem a água (hidrogênio e oxigênio) por meio de uma reação química desencadeada pela aplicação de uma força eletromotriz promovendo a circulação de corrente elétrica entre dois eletrodos submersos no líquido. O processo ocorre através de reações químicas que acontecem nos eletrodos e em presença de condutores de energia, também chamados de eletrólito. A imagem representada na Figura 4 ilustra a configuração simples de um processo de eletrólise, onde estão representados os eletrodos (ânodo e cátodo), a fonte de eletricidade em corrente contínua e o eletrólito responsável pela condução de corrente.

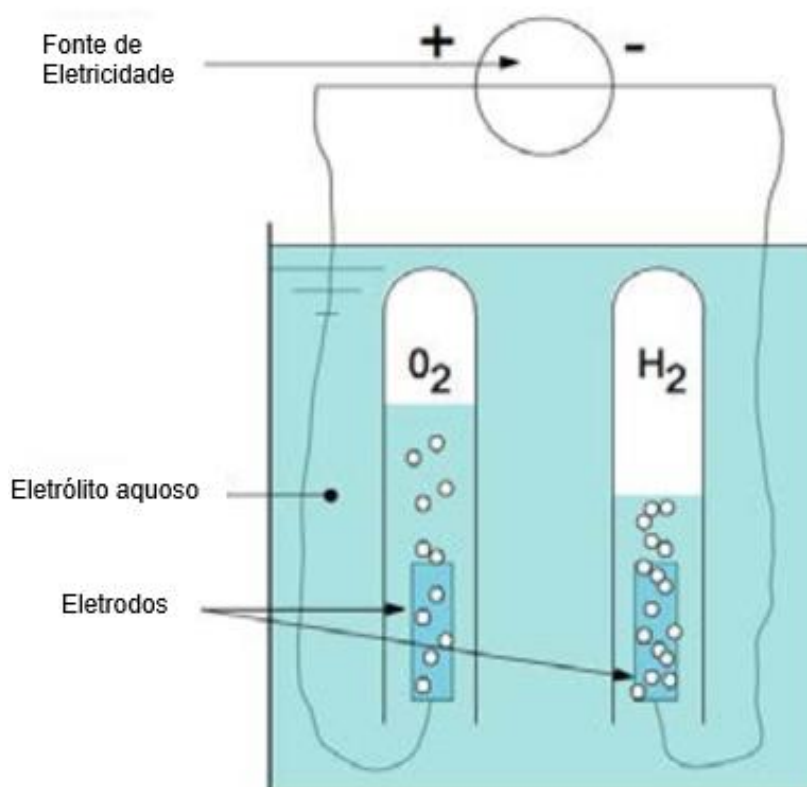


Figura 4: Configuração do processo de eletrólise.
Fonte: HY GENERATION, 2014.

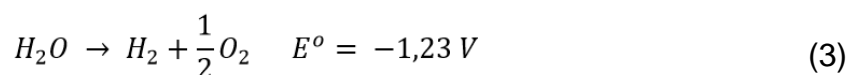
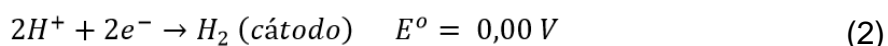
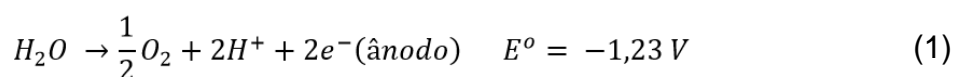
Esses eletrodos consistem em um ânodo e um cátodo separados por um eletrólito. Tais reações acontecem dentro de eletrolisadores, que variam tanto em

questão de tamanho como em composição do material, o que faz com que se tenha diferentes processos e funcionalidades. Mesmo com diferentes processos, temos algumas limitações importantes a levar em consideração nesse momento. Braga (2014) aponta algumas limitações quanto ao esse processo ao apontar que

o processo de eletrólise esbarra em algumas dificuldades. Uma delas é o fato da alta energia térmica necessária para quebrar a molécula de água. Estima-se que a energia necessária para realizar a eletrólise seja a mesma que a energia fornecida pelo hidrogênio. Assim, considerando-se as dissipações da energia, gasta-se mais para realizar a eletrólise do que ela pode produzir (BRAGA, 2014, p.38).

Nessa perspectiva, a viabilidade desse processo está na medida em que a produção de hidrogênio esteja associada às fontes renováveis de energia. Dessa forma, quanto aos processos de produção por eletrólise será apontado aqueles que os mais comuns são o da eletrólise com membrana de eletrólito de polímero (PEM) e o da eletrólise alcalina.

Na PEM (eletrólise com membrana de eletrólito de polímero) o eletrodo está separado por finas distâncias e não se faz necessário a utilização de eletrólitos líquidos, o que faz com que torne esse tipo de aplicação mais compacta. Nesse processo, a água reage com o ânodo formando assim o oxigênio e íons de hidrogênio. Esses íons, quando em contato com o cátodo formam, em contato com os elétrons do processo, gás oxigênio (DOE, 2018). O princípio de funcionamento químico é mostrado nas Eq. 1 e Eq. 2 e representa a eletrólise por célula PEM que acontece em eletrolisadores que não requerem eletrólito líquido, de forma a torná-lo mais simples no que diz respeito a sua forma. Para facilitar o entendimento, a Figura 5 aponta ainda a representação esquemática do princípio de operação da eletrólise do tipo PEM.



Para facilitar o entendimento, a imagem mostrada na Figura 5 aponta ainda a representação esquemática do princípio de operação da eletrólise do tipo PEM. A figura aponta exatamente a reação descritas na Eq. 1 e 2, de forma que demonstra a reação

evolutiva do oxigênio ocorrendo no ânodo, imerso em água desionizada e influenciado por uma corrente contínua. Assim, os íons de hidrogênio (H^+) fluem por meio da membrana condutora e se deslocam até o cátodo, confirmando assim a produção de hidrogênio. Essa segunda parte do processo é evidenciado pela Eq. 2 e comprova assim o princípio de funcionamento do eletrolisador do tipo PEM. Vale ressaltar que essa é a tecnologia mais recente dentre os demais processos de eletrólise e um dos maiores desafios se apresenta como sendo o tempo de vida da membrana de troca de prótons.

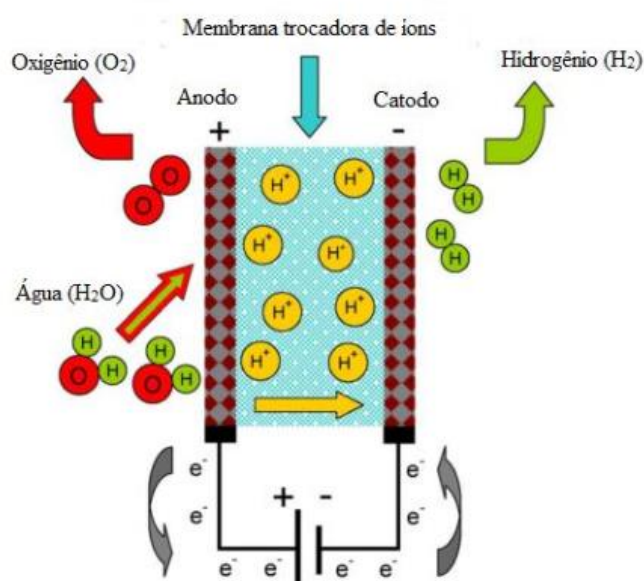


Figura 5: Princípio de operação da eletrólise do tipo PEM.
Fonte: Ursula *et al.* (2012, *apud* PINHO, 2017, p.44).

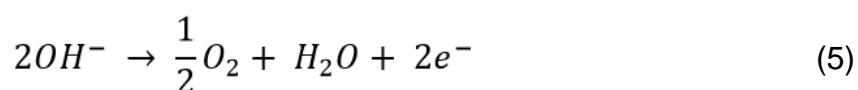
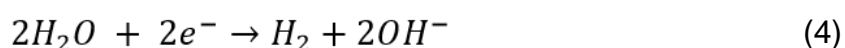
Na teoria, a eficiência máxima dos eletrizadores é de 85%, todavia quando são avaliados os sistemas disponíveis no mercado, o que se verifica é uma eficiência que varia de 40 a 50% (PRINCE-RICHARD, 2004). Analisando a performance desse processo, Pinho (2017) aponta que

em questões de performance, eletrolisadores PEM são capazes de operar em patamares bem superiores de densidade de corrente em relação à eletrólise alcalina, uma vez que a presença de eletrodos porosos em contato direto com a membrana reduz o fenômeno de formação de bolhas. A pureza do hidrogênio é tipicamente superior a 99,99% sem a utilização de etapa de purificação a posteriori. A temperatura de operação é limitada a 80-100°C devido à instabilidade térmica da membrana, além de apresentar maior condutividade protônica quando hidratadas (PINHO, 2017, p.43).

Em contrapartida dos demais processos de produção, a eletrólise alcalina apresenta-se como sendo o processo mais desenvolvido na produção de eletrólise da água (PINHO, 2017). Tal processo de produção se dá do ânodo para o cátodo, sendo o hidrogênio sendo gerado do lado do cátodo. Segundo Silva (2011),

os eletrolisadores alcalinos usam solução de KOH como um eletrólito que normalmente circulam através das células eletrolíticas. São adequados para aplicações estacionárias e podem operar a pressões de até 25 bar. A tecnologia já está bem estabelecida e tem um registro significativo de operações em aplicações industriais (SILVA, 2011, p.7).

Pelo fato do processo de eletrólise alcalina ser mais desenvolvido em laboratório que os demais, isso torna-o mais competitivo, uma vez que o mesmo tem distintas formas de maximizar o ganho do processo, gerando assim uma maior quantidade de hidrogênio. Todavia, o processo pode ter um custo muito mais elevado na medida em que se faz necessário, segundo Pinho (2017), a “regeneração do eletrólito líquido, culminando em módulos eletrolíticos maiores”. As equações químicas que representam o processo estão apontadas abaixo nas Eq. 4 e Eq. 5. A água reduzida na Eq. 4 faz com que o hidrogênio seja produzido no cátodo e a circulação de ânions de hidroxila (OH^-) no diafragma faz com que sofram reação de oxidação e produzam assim oxigênio, conforme apontado na Eq. 5. Todo esse princípio de funcionamento da eletrolise alcalina pode ser compreendido melhor por meio da Figura 4 apontada no início dessa seção.



Outra forma de produção de hidrogênio além dos dois tipos de eletrólise apresentados é através da gaseificação da biomassa. Esse processo é definido como aquele em que a matéria orgânica, seja ela proveniente de resíduos da cana-de-açúcar, serragem ou casca de arroz, é transformado em gás combustível por meio da sua combustão. Em uma definição mais técnica Bridgwater (1995) define o processo de gaseificação da biomassa como sendo a conversão de um elemento carbônico, por meio da oxidação parcial em altas temperaturas, em um gás combustível, sendo o ar, o vapor ou o oxigênio os agentes oxidantes mais comuns de ser utilizado.

Historicamente o surgimento da conversão de matéria orgânica em gás combustível surgiu no século XVII por meio da chamada destilação seca (MCKENDRY, 2002). Foi somente a partir de 1850 que as aplicações comerciais do gás começaram a surgir, especialmente na Inglaterra para iluminação das casas e ruas. Essa expansão seguiu pelos anos seguintes até o crescimento exponencial durante a Segunda Guerra Mundial para alimentar os motores de mais de um milhão de carros ao redor do mundo. Já nos dias atuais é o seguimento dos combustíveis fósseis que vem dominando a produção ao redor do mundo, sendo os combustíveis derivado do petróleo como sendo o principal motivo pela diminuição da produção de gás (CORTEZ E LORA, 1997).

Em comparação com outras regiões do mundo, o Brasil e a América Latina possuem um baixo aproveitamento da gaseificação da biomassa. Muitos países do mundo já aproveitam quase todos os resíduos proveniente da agricultura ou outras atividades para a geração de energia elétrica ou para outra atividade no ramo energético (TOLMASQUIM, 2016).

Mundialmente, essa diferença é histórica e apresenta forte diferença desde 2007 onde África e Oriente Médio eram responsáveis por 15.173 Mega Wat térmico (Mwt) no processo de gaseificação para geração de energia, Ásia e Austrália com 18.864 Mwt, Europa com 13.763 Mwt, América do Norte com 7.722 Mwt e a América do Sul, Central e Caribe ficaram com apenas 716 Mwt da geração de energia por meio da gaseificação da biomassa (GWB, 2007). Nos dias atuais essa proporção se mantém a mesma e reforça a necessidade de se considerar melhores investimentos e projetos para garantir e viabilizar a geração de energia por meio de recursos agrícolas (EPE, 2020).

O resultado da gaseificação da biomassa, conforme já apontado, é um gás combustível com um poder calorífero, segundo Dasappa *et al.* (2004), de 10 a 18 MJ/Nm³ para o agente oxidante oxigênio ou vapor, e de 4 a 7 MJ/Nm³ para o agente oxidante ar. Esse poder calorífero é considerado relativamente baixo e por isso o gás oriundo da gaseificação da biomassa é considerado um gás pobre. Todo esse processo se dá em equipamentos conhecidos como gaseificadores, no qual está dividido em vários processos como redução, pirólise, oxidação e secagem.

De uma forma mais simples, o processo pode ser compreendido dividindo-o em duas partes: na primeira parte, os componentes da biomassa (resíduos) são aquecidos até a volatilização. Esse processo é chamado de pirólise e representa ainda a decomposição térmica da biomassa por meio da ausência de oxigênio. Já a segunda parte se dá por meio de novas reações com o vapor d'água do dióxido de carbono e do monóxido de carbono (DASAPPA *et al.*, 2004). No que diz respeito ao gás de síntese, Lora *et al.* (2012) aponta que o

gás de síntese é o nome dado a uma mistura de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) que pode ser produzido a partir de gás natural, carvão, petróleo, biomassa e até mesmo a partir de resíduos orgânicos. A disponibilidade e flexibilidade da base de recursos são as chaves para os usos atuais e futuros do gás de síntese e de seus componentes em separado. O gás de síntese representa uma fonte potencialmente crescente de combustíveis limpos e também para a síntese de produtos químicos, sendo um combustível importante para a produção de eletricidade isenta de poluentes atmosféricos, tais como óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (LORA *et al.*, 2012).

Para Cortez e Lora (1997) é exatamente as características da operação do gaseificador que altera a composição do gás combustível, sendo essas pressão, temperatura, qualidade e composição do material, umidade e ainda a quantidade de oxigênio. Essas características fazem com que a gaseificação possua algumas vantagens e desvantagens.

Dentre as vantagens da gaseificação da biomassa é evidenciado o fato de o gás ser queimado com menores emissões de gases causadores do efeito estufa, além do fato de ter uma queima controlada e se mostrar melhor do que a queima direta em muitos aspectos. Por outro lado, como desvantagem o processo apresenta muitas das vezes uma menor eficiência quando comparado com a queima direta. É válido ressaltar que na composição do chamado gás combustível ou gás síntese estão presentes CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ e muitos outros elementos (CORTEZ E LORA, 1997).

Em nível global temos os gaseificadores de leito fixo como sendo a tecnologia mais antiga e difundida, apresentando uma complexidade relativamente baixa (PINTO, 2014). Esses gaseificadores possuem características específicas para que possam funcionar e assim se apresentam dois sistemas de maior destaque na gaseificação da biomassa: o gaseificador contracorrente (up draft) e o gaseificador concorrente (down draft).

O gaseificador de leito fixo contracorrente, representado na Figura 6, possui alta eficiência térmica, uma vez que os gases da combustão pré-aquecem o combustível a ser utilizado. Nesse processo a alimentação de resíduos da biomassa pé feito pela parte superior e em sentido contrário ao fluxo de gás. Mesmo com essa alta eficiência térmica, esse processo é desaconselhado pelo fato de produzir um gás impuro com elevado teor de voláteis e alcatrão, sendo a queima direta melhor indicada para esse tipo de gaseificador (ANDRADE, 2007).

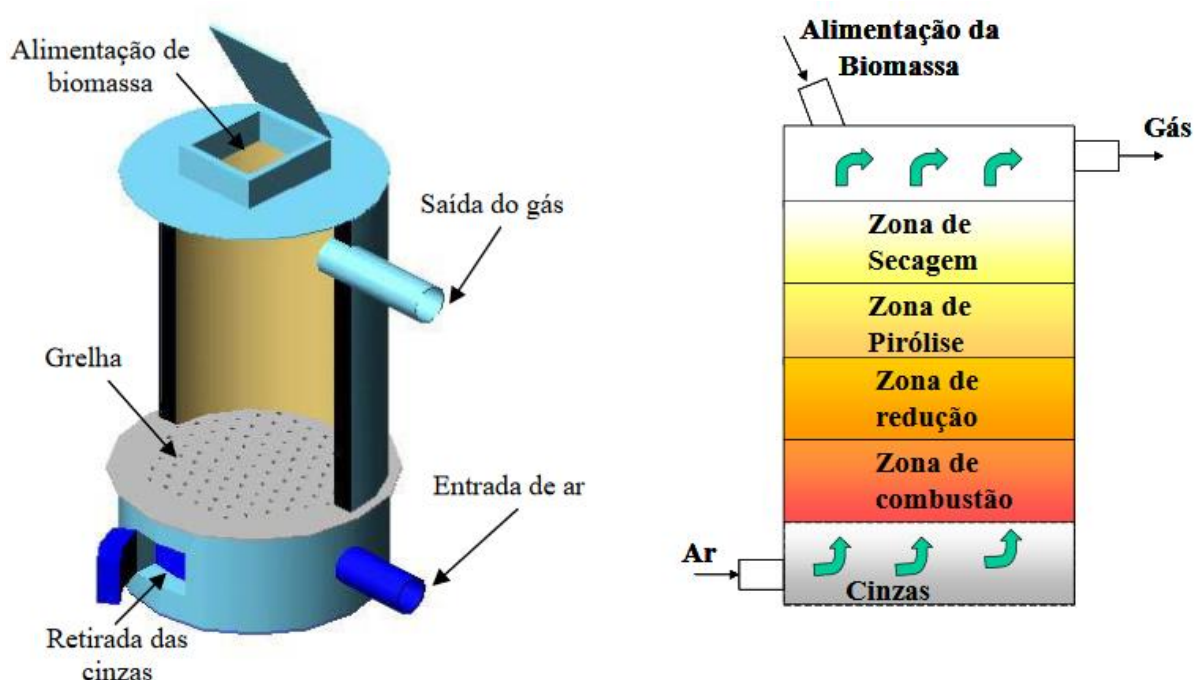


Figura 6: Esquema de gaseificador contracorrente.
Fonte: Andrade (2007).

Por fim, os gaseificadores de leito fixo concorrente representam aqueles mais difundidos e são amplamente usados em veículos. Diferentemente dos gaseificadores contracorrente, os concorrente (down draft) possuem uma produção de gás livre de alcatrão. É válido mostrar o esquema de funcionamento desse gaseificador aqui, representado na Figura 7, uma vez que a biomassa entra em contato com o ar ou oxigênio antes da pirólise, fazendo com que os elementos da mistura desçam dentro do sistema por ação gravitacional. No último estágio desse processo, a reação do carvão, proveniente da zona de pirólise, juntamente com o dióxido de carbono e a água, vindos da zona de combustão formam o hidrogênio (ANDRADE, 2007). Pra Bowen *et al.* (2003), o volume de hidrogênio produzido com a utilização dos sistemas de gaseificação representa em média 6,5% do resíduo total de biomassa utilizado

durante o processo. Por outro lado, Gao, Li e Quant (2009) apontam que esse valor é de 12%.

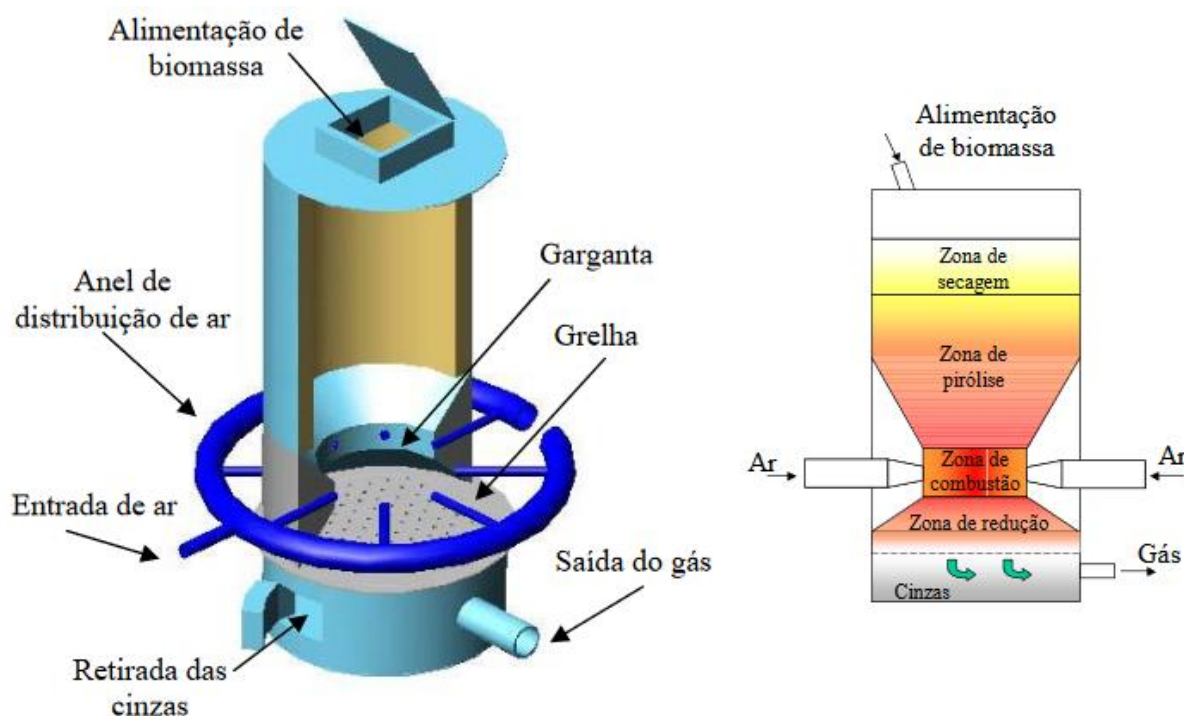


Figura 7: Esquema de gaseificador concorrente.
Fonte: Andrade (2007).

Quanto às vantagens e desvantagens desse processo, Bernardi Junior (2009) aponta que dentre as principais vantagens estão o consumo quase total de alcatrão durante esse processo, comprovação da eficácia do sistema e o baixo risco de explosão. Com relação as desvantagens, o autor aponta a necessidade de uma biomassa com características de tamanho específicas, bem como uma umidade limitada em 20%.

Nesse cenário, a produção de energia elétrica tendo o hidrogênio como fonte, seja por eletrólise (na sua forma pura) ou ainda relacionados a outros elementos (gás combustível), só se faz possível por meio de células a combustível. Assim, segundo Bernardi Junior (2009), para viabilizar a utilização de hidrogênio como fonte de energia é preciso que o seu uso seja viabilizado por uma célula a combustível.

2.2.2. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

As células a combustível representam uma tecnologia capaz de realizar a conversão energética de forma limpa e com alta eficiência através de um vetor energético ou ainda um combustível de origem primária. Essa alta eficiência

energética se deve ao fato do calor e a energia elétrica serem produzidos por meio de uma inserção de combustível externo, fazendo com que os componentes e materiais internos não interfiram muito no processo (LINARDI, 2010).

Também conhecida como pilha a combustível, as células a combustível (CaC) representam sistemas que convertem energia química de alguns combustíveis específicos em energia elétrica, fazendo com que durante esse processo haja uma menor emissão dos gases do efeito estufa. Segundo o MCT (2012) as células a combustível, o hidrogênio é na grande parte dos casos escolhido como o vetor energético a ser usado nas aplicações, uma vez que sua produção pode ser feita por meio de diversas fontes limpas, como por exemplo: solar, eólica, hidráulica, biomassa; além também de fontes fósseis, como por exemplo: petróleo, gás natural e carvão mineral.

O fato de ter uma alta reatividade e uma grande facilidade de obtenção também é apontado como principal motivo para escolha do hidrogênio nas aplicações das células a combustível. Já o agente oxidante usado na maioria das aplicações é o ar atmosférico. Dessa forma, alimentada por oxigênio e hidrogênio as células a combustível fazem com que esses elementos se combinem para formar água, não produzindo gases causadores do efeito estufa como o monóxido de carbono por exemplo. No geral, sua composição é feita por meio de dois eletrodos porosos (cátodo e ânodo) e por cristalizadores localizados nas membranas de troca iônica (PINTO, 2014).

Dentre as diversas células a combustível disponíveis atualmente no mercado, as células a combustível de membrana polimérica condutora de prótons (PEMFC – Polymer Electrode Membrane Fuel Cell) se destacam pela sua fácil construção, pela rapidez nos processos de inicialização e desligamento, bem como pela alta densidade de potência. Todos esses fatores, apontam para a PEMFC como possível substituta dos combustíveis fósseis no setor de automóveis.

A Figura 8 apresenta um esquema simplificado de uma célula a combustível do tipo PEM, onde o seu funcionamento é iniciado a partir da alimentação externa e contínua de um combustível, no nosso caso é apontado o hidrogênio, e um elemento oxidante, geralmente o ar. O processo ocorre quando os elétrons são transportados do ânodo, onde ocorre a reação de oxidação, para o cátodo e ao mesmo tempo ocorre

um transporte dos prótons para o cátodo por meio do eletrólito. É exatamente após esse transporte que acontece a redução de oxigênio de forma que água, calor residual e energia elétrica são gerados (APPLEBY e FOULKES, 1989).

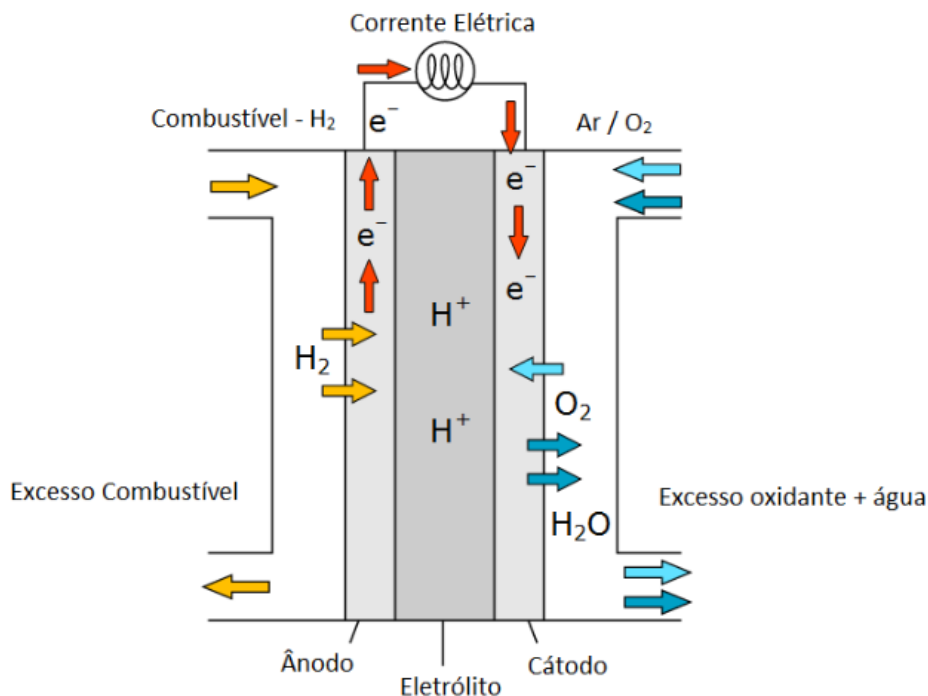


Figura 8: Funcionamento de uma célula a combustível do tipo PEM.
Fonte: Doubek (2013).

Atualmente existem vários tipos de células a combustível e diversas tecnologias associadas estão em diferentes estágios de desenvolvimento. Será apresentado aqui a que mais se destaca no cenário internacional, tendo como vantagens correntes elevadas, densidade de potência, durabilidade na operação, fácil operação e capacidade cíclica (BERNARDI JUNIOR, 2009). Todavia existem outras tecnologias em desenvolvimento como o caso da célula alcalina (AFC) que já está disponível no mercado comercial com materiais com baixo custo, alta eficiência além de permitir somente hidrogênio e oxigênio puro.

Conforme apontado anteriormente por Pinto (2014), o Brasil se apresenta como sendo um país abundante em raios solares, vento, água e resíduos agrícolas. Tudo isso torna o país um potencial enorme para criação de uma infraestrutura para suportar a economia do hidrogênio, seja na produção de hidrogênio ou ainda na geração de energia por meio de células a combustível (MCT, 2012).

Atualmente, o país conta com células a combustível nacionais e importadas em pleno funcionamento em muitos locais como por exemplo nos hospitais. Projetos protótipos de ônibus e automóveis estão entre algumas aplicações da célula a combustível no país.

Para Pinto (2014), pelo fato da tecnologia ser nova e com um custo alto, não temos no Brasil iniciativas por parte do Governo Federal ou de empresas nacionais no desenvolvimento de projetos de carros movidos por células a combustível. Tal fato se dá pois grandes multinacionais do ramo automobilístico já estão em estágio bem avançado em pesquisas e desenvolvimento de testes. Mesmo assim, isso não isenta o país de buscar incentivos para a economia do hidrogênio. É preciso toda uma estrutura para que o país possa suportar esses veículos no futuro, como postos de combustíveis, centrais elétricas e eletrolisadores (PINTO, 2014).

Como o mundo, as células a combustível do tipo PEMFC (membrana de troca de prótons) está entre as mais avançadas em pesquisas nacionais, principalmente para obtenção de hidrogênio por meio da reforma do bagaço da cana-de-açúcar. O Ministério de Minas e Energia, bem como o Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações vêm investindo em pesquisas que contribuam para a economia do hidrogênio no último ano. Segundo Neto (2007), em apenas 4 anos o governo federal foi capaz de investir R\$29 milhões apenas em programas de inovação e tecnologia voltado exclusivamente para o hidrogênio. Pinto (2014) aponta os principais investimentos de células a combustíveis no Brasil, os dados são apresentados na Tabela 3.

Com relação aos financiamentos, o maior financiador em projetos relacionados às pesquisas de células a combustível e também de hidrogênio até o momento é a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Esses dados atuais se refletem de anos de investimentos em pesquisas no Brasil que já possui mais de 290 projetos com financiamento público somando um total de R\$133 milhões, além de iniciativas de projetos de universidades federais de ônibus movidos a hidrogênio. Só a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) foi responsável por apoiar no Brasil 21 projetos no valor de mais de R\$40 milhões, já a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) apoia mais de 199 projetos de pesquisas em hidrogênio e células a combustível no valor chegando a R\$26 milhões (MATOS, 2009).

Matos (2009) aponta que esses investimentos reforçam o país caminhando para um mercado do hidrogênio conforme o resto do mundo. Muitos autores apontam que o deslançar da economia do hidrogênio se dará similar ao do Gás Natural em muitos países, ou seja, com a chegada dos veículos movidos a hidrogênio que as tecnologias começarão a avançar de forma mais rápida (PINTO, 2014; MATOS, 2009). De modo geral, quando é analisado essas tecnologias, fica evidente que muitas já são as aplicações como hospitais, centros de telecomunicação, laboratórios, etc.

Tabela 3 – Principais investimentos brasileiros em célula a combustível

Projetos	Tipo de Investimento
Programa Brasileiro de Células a Combustível (PROCaC)	Projeto de Formação das Redes Cooperativas; Projeto Reformador de Etanol desenvolvido pela - INT/IPEN/CEPEL/ COPPE; Projeto de apoio à infraestrutura de laboratórios; Formação de Recursos Humanos (Bolsas de Mestrado e Doutorado);
Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) / Companhia hidroelétrica do São Francisco (CHESF)	Célula a combustível de 5kW-PEM fabricada pela empresa nacional ElectroCell, com reformador de gás natural (USA);
AES.Eletropaulo	Célula a combustível de 50 kW tipo PEM fabricada pela ElectroCell
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento(LACTEC) e Companhia Paranaense de Energia (COPEL)	3 Unidades de célula a combustível tipo PAFC de 200 kW cada fabricada pela empresa norte americana UTC, alimentadas com gás natural.
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) -Universidade Federal do Rio de Janeiro (Petrobrás)	1 Unidade de célula a combustível tipo PAFC de 200kW fabricada pela empresa UTC, alimentada com gás natural

Fonte: Autor, adaptado de PINTO (2014).

Para Braga (2014), muitas são as tecnologias disponíveis para produção de hidrogênio, bem como para a geração de eletricidade através do mesmo. Alinhar essas tecnologias ao uso das fontes renováveis faz com que tenhamos zero emissões de gases poluentes. Nessa lógica, tanto o hidrogênio produzido por fontes renováveis,

quanto a eletricidade gerada por meio de células a combustão se fazem de grande relevância haja vista que a maior parte do setor siderúrgico, químico e metalúrgico demanda hidrogênio em seu processo produtivo. O grande desafio é adequar tal produção de forma que possa atender as demandas nacionais, assim como manter o desenvolvimento sustentável e descarbonizar a matriz elétrica e energética nacional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os processos de produção e obtenção do hidrogênio estão divididos em três grandes áreas: eletrolítica, fotolítica e termoquímica. Devido ao grande potencial de aproveitamento de resíduos da biomassa, bem como da alta incidência de raios solares e da elevada disponibilidade de ventos em diversas áreas do país, a produção de hidrogênio por meio de processos eletrolíticos e de processos termoquímicos se torna extremamente viável no território brasileiro, sobretudo na região Sudeste.

Para analisar a produção de hidrogênio no sudeste brasileiro através das fontes de energia apontadas, utilizou-se dos processos eletrolíticos, por meio do uso de energia elétrica na reação de decomposição das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio, para as fontes eólicas e solares. Todavia, no que se refere aos processos termoquímicos, utilizou-se da análise de produção de hidrogênio por meio da gaseificação a biomassa, tendo como matéria-prima recursos de origem, em grande parte dos casos, renováveis.

No que se refere a produção de hidrogênio por meio do aproveitamento dos resíduos agrícolas, foi adotado o processo gaseificação da biomassa. Esses resíduos são oriundos exclusivamente de atividade extrativistas, como a extração de madeira por exemplo, bem como de plantações agrícolas no território do Sudeste brasileiro. É importante destacar que no que tange a utilização desses resíduos agrícolas, esses ajudam a ecologia local e não representam nenhum impacto na questão alimentar do país.

A alta incidência de radiação solar no Brasil fez com que a segunda fonte a ser considerada para viabilizar a produção de hidrogênio sustentável foi a fotovoltaica. No Brasil, a região Sudeste se localiza quase por completa inserida entre o Trópico de Capricórnio e a Linha do Equador, fazendo com que seja um local privilegiado pela incidência de raios solares quase todo o ano. Além desse fator, a região apresenta índices elevados de desmatamento da Mata Atlântica, abrindo caminho para inserção das fontes fotovoltaicas em áreas desmatadas e degradadas.

Por fim, a terceira fonte a ser considerada nessa análise foi a energia eólica. Mesmo que as maiores disponibilidades de vento estejam inseridas na região Nordeste do Brasil, a região Sudeste apresenta um potencial de produção de energia

através dos ventos que merece destaque. Assim, o forte incentivo do Governo Federal em viabilizar investimentos, buscar novas tecnologias e baratear o custo de instalação e manutenção, fizeram com que a energia proveniente dos ventos representasse a terceira fonte a ser analisada para viabilizar a produção de hidrogênio no Brasil.

3.1. ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DA BIOMASSA NO SUDESTE BRASILEIRO

O desenvolvimento econômico da região Sudeste, assim como em outras regiões de colonização, esteve condicionado às atividades agrícolas. No passado, juntamente com o Nordeste brasileiro, a região Sudeste ocupava posição de forte relevância nacional no que tange à produção agrícola, especialmente pelas enormes lavouras de café. Na medida em que se avançaram as Revoluções Industriais, especialmente os avanços que se referem ao meio técnico-científico-informacional ¹⁷, o Sudeste abriu espaço para o desenvolvimento da agricultura em outras regiões do país e hoje, segundo o Censo Agropecuário de 2017, ocupa o 4º lugar dentre as cinco regiões do país quando se analisa as atividades agropecuárias.

Quando analisa-se os dados do Censo Agropecuário de 2017, o mais recente realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no que tange às propriedades agropecuárias distribuídas no Brasil, esses estão consolidados de forma que levam em consideração o uso dessas áreas para o desenvolvimento de três atividades básicas: lavouras, pastagens e matas. Assim, para que uma análise centrada apenas na produção agrícola fez-se necessário realizar um levantamento da aplicação do uso do solo nos estabelecimentos agropecuários da região Sudeste.

A Tabela 4 apresenta os dados da área, em hectare (ha), dos estabelecimentos no Brasil que desenvolvem atividades agropecuárias, evidenciando a posição de 4º lugar no ranking entre as grandes regiões do Brasil. Por outro lado, a Tabela 5 apresenta de forma consolidada os dados da utilização do solo nas propriedades agropecuárias dos quatro estados da região Sudeste, dando destaque para a produção agrícola nesses estados.

¹⁷ Representa a fase atual do sistema capitalista e que se apresentou no mundo a partir da década de 1970. Expressão desenvolvida pelo geógrafo Milton Santos e representa a produção e reprodução do meio geográfico.

Tabela 4 – Área territorial, estabelecimentos agropecuários no Brasil e no Sudeste brasileiro

<i>Regiões e Unidades da Federação (Sudeste)</i>	<i>Área territorial (ha)</i>	<i>Estabelecimentos agropecuários (ha)</i>
Norte	385.332.720	65.213.349
Nordeste	155.425.696	70.893.864
Sudeste	92.451.127	60.302.969
Minas Gerais	58.652.829	38.168.688
Espírito Santo	4.607.751	3.246.763
Rio de Janeiro	4.369.605	2.375.373
São Paulo	24.820.942	16.512.145
Sul	57.640.956	42.875.310
Centro-Oeste	160.637.148	112.004.321

Fonte: Autor, adaptado de Censo Agropecuário 2017.

O levantamento feito pelo Censo Agropecuário de 2017 considera para o levantamento das informações de ocupação do uso do solo, lavouras estando divididas em permanentes e temporárias; pastagens divididas em naturais e plantadas; matas separadas em naturais e plantadas.

Tabela 5 – Ocupação do solo nas propriedades agropecuárias da região Sudeste

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Lavouras (%)</i>	<i>Pastagens (%)</i>	<i>Mata (%)</i>
Minas Gerais	15,2	50,8	29,7
Espírito Santo	22,0	45,4	25,1
Rio de Janeiro	8,0	65,7	21,9
São Paulo	49,0	28,9	17,9

Fonte: Autor, adaptado de Censo Agropecuário 2017.

Com relação ao valor de produção (VP) agrícola nacional, a região Sudeste, especialmente o estado de São Paulo, dominava o cenário nacional até o

levantamento da Produção Agrícola Municipal (PAM) de 2017. Nos anos seguintes o Sudeste abriu caminho para que a região Centro-Oeste obtivesse a maior produção agrícola nacional. Em números, o levantamento da PAM de 2019 realizado pelo IBGE apontou que a região Sudeste foi responsável por R\$ 97,6 bilhões de produção agrícola, uma alta de 2,1% com relação ao ano anterior.

Esse valor só foi capaz por meio do aumento na produção de alguns produtos agropecuários. No que se refere à agricultura, cana-de-açúcar, café arábica, mandioca, mamão, laranja, soja e milho são os principais responsáveis pelo Sudeste ocupar a segunda colocação no ranking nacional de valor de produção agrícola nacional.

A Tabela 6 apresenta os principais produtos de cada estado do Sudeste brasileiro, bem como a sua produção de acordo com o último levantamento nacional feito pelo IBGE através da Censo Agrícola de 2017.

Tabela 6 – Produtos e produção agrícola (em Toneladas) do Sudeste brasileiro

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produtos agrícolas</i>	<i>Produção (Ton)</i>
Minas Gerais	Cana-de-açúcar	65.984.683
	Café	1.435.587
	Laranja	918.014
	Mandioca	283.634
	Milho	5.953.820
	Soja	4.666.585
	Trigo	187.345
	Feijão	430.729
Espírito Santo	Cana-de-açúcar	2.098.740
	Café	467.264
	Mandioca	71.771
	Milho	37.832
	Mamão	221.997
	Feijão	11.651

Rio de Janeiro	Cana-de-açúcar	1.702.827
	Laranja	26.502
	Mandioca	125.358
	Milho	7.876
	Feijão	2.382
	Café	9.694
São Paulo	Cana-de-açúcar	347.684.180
	Café	209.598
	Laranja	13.168.179
	Mandioca	487.765
	Milho	3.557.371
	Soja	2.761.916
	Trigo	330.396
Feijão	208.897	

Fonte: Autor, adaptado da Produção Agrícola Municipal (PAM) de 2019 e Censo Agrícola de 2017.

O clima diversificado da região Sudeste permite que alguns estados dominem determinadas lavouras, como é o caso do Espírito Santo que tem destaque na produção nacional de mamão. Essas especialidades específicas se devem à posição latitudinal da região Sudeste, à topografia acidentada e também aos sistemas de transição entre climas frios e climas quentes. São os fatores climáticos, juntamente com a hidrografia e vegetação natural do Sudeste do país que proporcionam elementos fundamentais para a produção agrícola na região.

Essa produção agrícola, a depender do tipo de cultivo aplicado, bem como do aproveitamento correto da produção total, geram uma variação enorme de resíduos que precisam passar por um processo de destinação específica ou descarte na maior parte das vezes. A classificação desses resíduos é realizada pela divisão em resíduos da colheita e cultivo e resíduos do beneficiamento da industrialização dos produtos analisados.

A Tabela 7 aponta os tipos de resíduos que podem ser gerados a partir da produção de alguns cultivos. Esses resíduos são de origem variada, sendo observado

na coleta, na manutenção da lavoura, no plantio e em muitos casos na transformação de um produto (matéria-prima) em outro de valor econômico superior, como por exemplo a transformação da cana-de-açúcar no açúcar e também no combustível etanol.

Tabela 7 – Tipos de resíduos gerado nas principais produções agrícolas e industriais do Sudeste brasileiro

Produto	Resíduo do cultivo e colheita	Resíduo da industrialização
Cana-de-açúcar	Palha e ponteira	Álcool: bagaço; Açúcar: vinhaça
Mandioca	Folhas, caule e cepa	Casca, crueira, bagaço, manipueira
Milho	Folhas e caule	Sabugo
Feijão	Talos e vagem	-
Soja	Hastes, folhas e vagens	-
Laranja	-	Casca e bagaço

Fonte: Autor, adaptado de SILVA *et al.* (2019).

A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB) realizou um levantamento da estimativa de geração de resíduos agrícolas que podem ser utilizados para a geração de energia. Para que esse levantamento pudesse ser realizado, a ABIB apontou um fator residual com relação a produção total dos produtos no território nacional, levando em consideração as perdas e a aplicação de 30% dos resíduos no tratamento do solo das lavouras. Os dados levantados pela ABIB com relação aos fatores de geração de resíduos agrícolas estão dispostos na Tabela 8. Para esse estudo, foram apresentados somente os fatores dos principais produtos da região Sudeste.

Para elaboração do memorial de cálculo dos resíduos agrícolas da produção específica da região Sudeste, foram utilizados os dados da Tabela 8, Tabela 7 e Tabela 6, levando em consideração a especificidade de cada Unidade da Federação escolhida, bem como a cultura apontada como de forte relevância naquele estado específico. Para chegar a produção de resíduo de cada estado, multiplicou-se os

dados da Tabela 8 pela produção em tonelada de cada cultura específica de cada estado.

Tabela 8 – Fator de geração de resíduo por produto agrícola específicos da região Sudeste

Produto	Resíduo	Índice de Resíduos (FR)
Cana-de-açúcar	Palha, ponteira e bagaço	0,280
Mandioca	Rama	0,186
Milho	Palha, sabugo e resíduos	1,420
Feijão	Palha e resíduos	3,670
Soja	Palha e resíduos	1,400
Laranja	Farelo de bagaço	0,110
Mamão	Resíduos	0,390
Café	Casca e resíduos	0,280
Trigo	Palhas e resíduos	1,400

Fonte: Autor, adaptado de SILVA *et al.* (2019).

Com 607,6 mil estabelecimentos agropecuários ocupando uma área de 38,2 milhões de hectares (ha), o Censo Agropecuário de 2017 aponta cana-de-açúcar, café, laranja, mandioca, milho, soja, trigo e feijão como as principais culturas do estado de Minas Gerais. A Tabela 9 aponta os resíduos agrícolas com base na produção de cada cultura no estado.

Tabela 9 – Produção de resíduos agrícolas em Minas Gerais

Produto	Resíduo	Índice de Resíduos	Qnt. de Resíduos (Ton)
Cana-de-açúcar	65.984.683	0,280	18.475.711
Mandioca	283.634	0,186	52.756

Milho	5.953.820	1,420	8.454.424
Feijão	430.729	3,670	1.580.775
Soja	4.666.585	1,400	6.533.219
Laranja	918.014	0,110	100.981
Café	1.435.587	0,280	401.964
Trigo	187.345	1,400	262.283

Fonte: Autor.

Com 108 mil estabelecimentos agropecuários ocupando uma área de 3,25 milhões de hectares (ha), o Censo Agropecuário de 2017 aponta cana-de-açúcar, café, mandioca, milho, mamão e feijão como as principais culturas do estado do Espírito Santo. A Tabela 10 aponta os resíduos agrícolas com base na produção de cada cultura no estado.

Tabela 10 – Produção de resíduos agrícolas no Espírito Santo

Produto	Resíduo	Índice de Resíduos	Qnt. de Resíduos (Ton)
Cana-de-açúcar	2.098.740	0,280	587.647
Mandioca	71.771	0,186	1.334
Milho	37.832	1,420	53.721
Feijão	11.651	3,670	42.759
Mamão	221.997	0,390	86.578
Café	467.264	0,280	130.833

Fonte: Autor.

Com 65,2 mil estabelecimentos agropecuários ocupando uma área de 2,4 milhões de hectares (ha), o Censo Agropecuário de 2017 aponta cana-de-açúcar,

mandioca, café, milho, laranja e feijão como as principais culturas do estado do Rio de Janeiro. A Tabela 11 aponta os resíduos agrícolas com base na produção de cada cultura no estado.

Tabela 11 – Produção de resíduos agrícolas no Rio de Janeiro

Produto	Resíduo	Índice de Resíduos	Qnt. de Resíduos (Ton)
Cana-de-açúcar	1.702.827	0,280	476.791
Mandioca	125.358	0,186	23.316
Milho	7.876	1,420	11.183
Feijão	2.382	3,670	8.741
Laranja	26.502	0,110	2.915
Café	9.694	0,280	2.714

Fonte: Autor.

Com 188,6 mil estabelecimentos agropecuários ocupando uma área de 16,5 milhões de hectares (ha), o Censo Agropecuário de 2017 aponta cana-de-açúcar, mandioca, café, milho, laranja, soja, trigo e feijão como as principais culturas do estado de São Paulo. A Tabela 12 aponta os resíduos agrícolas com base na produção de cada cultura no estado.

Tabela 12 – Produção de resíduos agrícolas em São Paulo

Produto	Resíduo	Índice de Resíduos	Qnt. de Resíduos (Ton)
Cana-de-açúcar	347.684.180	0,280	97.351.570
Mandioca	487.765	0,186	90.724
Milho	3.557.371	1,420	5.051.466
Feijão	208.897	3,670	766.651
Soja	2.761.916	1,400	3.866.682

Laranja	13.168.179	0,110	1.448.499
Café	209.598	0,280	58.687
Trigo	330.396	1,400	462.554

Fonte: Autor.

A Tabela 13 mostra a valor total das produções agrícolas escolhidas, bem como a quantidade de resíduos gerados nessas culturas por estado (Unidade da Federação) da região Sudeste do Brasil.

Tabela 13 – Produção agrícola e produção de resíduos das culturas específicas da região Sudeste

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produção (Ton)</i>	<i>Resíduos (Ton)</i>
Minas Gerais	79.860.397	35.862.113
Espírito Santo	2.909.255	902.872
Rio de Janeiro	1.874.639	525.660
São Paulo	368.408.302	109.096.833
Total	453.052.593	146.387.478

Fonte: Autor.

Para avaliação do potencial de produção de hidrogênio nos estados da região Sudeste, os cálculos foram realizados levando em consideração a quantidade de resíduos produzidos por meio da produção agrícola dos estados e o valor percentual médio de hidrogênio produzido por meio da gaseificação da biomassa após a reforma dos gases envolvidos nesse processo. Assim, a Eq. 6 representa a fórmula desenvolvida para alcançar esses valores.

$$qnt. H^2(ton) = \text{resíduos de biomassa (ton por ano)} \times 12\% \quad (6)$$

No cenário internacional e nas aplicações industriais, o hidrogênio é representado através de metro cúbico por hora (m³/h), nesse sentido fez-se a conversão dos resultados obtidos em toneladas para m³/h por meio da fórmula apresentada na Eq. 7. O valor de 0,00008988 representa a quantidade de hidrogênio por m³ em toneladas. Para calcular a quantidade de horas converteu-se o valor de produção anual para horas, levando em consideração 8.760 (horas em 365 dias).

$$qnt. H^2 (m^3/h) = \frac{Eq. 6 / 0,00008988}{8.760} \quad (7)$$

Nesse sentido, as Tabelas 14 representa a potencial de produção de hidrogênio por meio da gaseificação da biomassa nos estados da região Sudeste com base nos produtos agrícolas escolhidos e considerando as fórmulas apontadas na Eq. 6 e as informações de conversão apontadas.

Tabela 14 – Produção de hidrogênio nos estados do Sudeste através da biomassa

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produção (Ton)</i>	<i>Resíduos (Ton)</i>	<i>% de Hidrogênio¹⁸</i>	<i>H² produzido (ton/ano)</i>
Minas Gerais	79.860.397	35.862.113	12,0	4.303.453
Espírito Santo	2.909.255	902.872	12,0	108.344
Rio de Janeiro	1.874.639	525.660	12,0	63.079
São Paulo	368.408.302	109.096.833	12,0	13.091.613
Total	453.052.593	146.387.478	-	17.566.497

Fonte: Autor.

A Tabela 15 apresenta a conversão dos valores de produção de hidrogênio de tonelada por ano (ton/ano) para metro cúbico por hora (m³/h) levando em consideração a conversão apresentada por meio da Eq. 7.

¹⁸ GAO, LI E QUANT (2009).

Tabela 15 – Produção de hidrogênio em m³/h na região Sudeste através da biomassa

<i>Unidades da Federação</i>	<i>H² produzido (ton/ano)</i>	<i>H² produzido (m³/h)</i>
Minas Gerais	4.303.453	5.465.752
Espírito Santo	108.344	137.606
Rio de Janeiro	63.079	80.115
São Paulo	13.091.613	16.627.471
Total	17.566.497	22.310.947

Fonte: Autor.

3.2. ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DA ENERGIA EÓLICA

Atualmente, o Brasil vive uma expansão da energia eólica, tendo a fonte eólica assumindo o segundo lugar na matriz elétrica do país. Nos últimos anos o Governo Federal tem discutido alternativas para viabilizar a modernização do setor eólico no país por meio de novas políticas e novas soluções tecnológicas, sobretudo na região Nordeste. O Boletim Anual De Geração Eólica de 2019 da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) apontou que 38 novos parques eólicos foram instalados só no ano de 2019, em números isso representa um aumento 744,95 MW na capacidade instalada da fonte eólica no território brasileiro.

A representatividade da fonte eólica no Brasil está exclusivamente centralizada na região Nordeste. A ABEEólica aponta que em 2019 o Nordeste foi responsável por 86,7% da geração de energia eólica no Brasil, representando 47,13 TWh (Terawatt-hora) de energia produzida. Por outro lado, a região Sudeste possui 0,01% de representatividade, a menor dentre todas as regiões do Brasil. Em números, a produção de energia eólica em 2019 foi de 0,06 TWh (Terawatt-hora) de energia produzida.

O Balanço Energético Nacional de 2020 apontou que em 2019 o único estado da região Sudeste com produção de energia elétrica através da fonte eólica foi o Rio de Janeiro, sendo responsável pelos 0,06 TWh (Terawatt-hora) de energia produzida

em todo o Sudeste brasileiro, bem como por um crescimento de 17% quando comparado com 2018 na região (EPE, 2020).

Mesmo que as demais Unidades da Federação da região Sudeste possuam, características climáticas e territoriais similares ao Rio de Janeiro, a ausência de leilões entre o final de 2015 e 2017 refletem no não desenvolvimento da tecnologia eólica na região Sudeste. É preciso, assim como na região Nordeste, assegurar investimentos em novas tecnologias e desenvolvimentos de políticas que garantam por completo o aproveitamento do potencial eólico dos estados do Sudeste do país, fazendo com que a região chegue até um ponto de inflexão no que se refere a produção eólica na região.

Assim, considerando as condições climáticas, topográficas e territoriais de cada estado da região Sudeste, os governos estaduais desenvolveram ao longo da última década um levantamento do potencial eólico de cada estado e publicaram na forma de um Atlas Eólico, seguindo os moldes do Atlas Eólico Nacional¹⁹, os resultados das pesquisas.

O potencial eólico dos estados da região Sudeste será indicado no presente trabalho como a capacidade total possível de ser instalada nas diferentes Unidades da Federação do sudeste brasileiro, bem como a produção de energia por ano estimada, de acordo com o Atlas Eólico de cada estado. Esse potencial é fruto de uma análise conservadora, buscando dados intermediários que considerem a realidade política, econômica e ambiental que o país vive nos dias atuais. Nessa perspectiva, neste trabalho a apresentação do potencial eólico do Sudeste do Brasil leva em consideração os seguintes pontos elencados abaixo:

1-Foram considerados velocidades dos ventos com valores médios anuais acima de 7,0 m/s, uma vez que esses valores são considerados relevantes para projetos de parques eólicos. Mesmo que velocidades menores aumentem a capacidade de geração, é a partir desses valores médios anuais de 7,0 m/s que alcançamos fatores de capacidade superiores a 30%.

¹⁹ Elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro foi publicado em 2001 e é considerado um marco no levantamento eólico do país. O levantamento abriu caminho para que outros estados elaborassem, nos anos seguintes, o levantamento detalhado de cada estado.

2- Foi considerada uma taxa de ocupação média de terreno que representa de 15% a 20% do realizável por usinas eólicas ao redor do mundo.

3-Reservas indígenas, reservas naturais, parques ecológicos e áreas com recurso hídrico (lagoas, mares, mangues e rios) não foram levados em consideração para o levantamento apontado.

4-O tipo de turbina utilizado buscou um levantamento intermediário considerando turbinas de 75m com uma potência nominal de 1,5 MW e diâmetro do rotor de 80 m para os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo e 77 m de diâmetro de rotor para o estado do Rio de Janeiro.

5-Os valores apresentados estão com os fatores de capacidade corrigidos para efeito da densidade local do ar, de acordo com o levantamento feito pelo Atlas Eólico de cada estado.

Nesse sentido, para avaliar o potencial de produção de hidrogênio sustentável por meio da energia eólica, foi realizado um levantamento completo das características climáticas, topográficas e territoriais de cada Unidade da Federação do Sudeste brasileiro, bem como o potencial de produção eólica, em condições específicas, por área.

Minas Gerais é formado predominantemente por planaltos possuindo uma característica física de mares e morros e planaltos sedimentares. Esse relevo acidentado faz com que o estado possua abundância em recursos hídricos, tendo o terceiro maior potencial hídrico do país. O clima de Minas Gerais varia constantemente ao longo do território, apresentando clima quente semiárido, no vale do rio São Francisco, no vale do rio Jequitinhonha e no norte do estado, até o clima mesotérmico úmido, na região sul e também na serra da Mantiqueira. Os demais locais do estado representam um clima intermediário de transição entre o quente semiárido e o mesotérmico úmido (AMARANTE *et al.*, 2010).

No que se refere ao regime dos ventos no território mineiro, o levantamento realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e publicado no Atlas Eólico de Minas Gerais apontou que sazonalmente, em grande parte do território de Minas Gerais os ventos mais fortes são verificados na primavera e no inverno, tendo

as serras do Espinhaço (região central) e do Cipó (norte da cidade de Belo Horizonte) como as regiões com melhores aproveitamentos eólicos.

A Tabela 16 apresenta o potencial eólico do estado de Minas Gerais, bem como a área total capaz de gerar energia eólica no estado e a potência instalável em Megawatt (MW).

Tabela 16 – Potencial de geração eólica em Minas Gerais

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Potência instalável (MW)	Energia anual (GWh)
Minas Gerais	586.528	16.495	24.742	57.812

Fonte: Autor, adaptado do Atlas Eólico de Minas Gerais

O Espírito Santo está dividido geograficamente em duas regiões: região serrana e região dos tabuleiros. A região serrana contém vales profundos e altas montanhas, abrigando o terceiro ponto mais alto do Brasil. Por outro lado, a região dos tabuleiros representa a parte baixa que vai de encontro com o litoral e abriga a maior parte da população do estado (AMARANTE, 2009). O clima do Espírito Santo é quente e bastante úmido na parte litorânea no norte do estado, mesotérmico brando na região serrana e tropical quente nas demais partes do território capixaba (IBGE, 2002).

No que se refere ao regime dos ventos no território do Espírito Santo, o levantamento realizado pela Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE) e publicado no Atlas Eólico do estado apontou que os ventos médios mais intensos se localizam nos litorais sul e centro-norte. Uma característica única do estado, quando se compara com o regime dos ventos dos demais estados da região sudeste, é que as variações médias diurnas do estado são maiores devido às brisas terrestres e marinhas.

O Atlas Eólico do Espírito Santo apontou que na região serrana, a velocidade dos ventos apresenta resultados mais satisfatórios em pontos mais elevados. No estado como um todo, a sazonalidade levantada pelo Atlas Eólico do estado aponta que os ventos são mais intensos na primavera e mais brandos no início do inverno e final do mês de outubro.

A Tabela 17 apresenta o potencial eólico do estado do Espírito Santo, bem como a área total capaz de gerar energia eólica no estado e a potência instalável em Megawatt (MW).

Tabela 17 – Potencial de geração eólica no Espírito Santo

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Potência instalável (MW)	Energia anual (GWh)
Espírito Santo	46.095	299	448	1.073

Fonte: Autor, adaptado do Atlas Eólico do Espírito Santo.

Assim como os demais estados da região Sudeste, o Rio de Janeiro apresenta um relevo variado ao longo do seu território. O estado apresenta pontos elevados por onde corta a Serra da Mantiqueira e pontos de planalto na parte oeste do estado. O clima no território fluminense varia conforme o relevo, assim no planalto e na baixada fluminense predomina o clima tropical de altitude e nos locais mais planos e litorâneos o clima predominante é o tropical semiúmido. Todas essas características geográficas tornam a circulação dos ventos potencializada em determinadas áreas do estado do Rio de Janeiro (BRAGA, 2003).

Quanto ao regime dos ventos, o litoral norte fluminense, a região dos lagos (Cabo Frio e Búzios) e a região serrana (Piraí-Vassouras-Petrópolis) apresentam os melhores potenciais de geração de energia eólica. As regiões montanhosas e as longas faixas litorâneas no estado também apresentam bons resultados para a média diárias de ventos no estado (AMARANTE, SILVA e RIOS FILHO, 2002).

A Tabela 18 apresenta o potencial eólico do estado do Rio de Janeiro, bem como a área total capaz de gerar energia eólica no estado e a potência instalável em Megawatt (MW).

Tabela 18 – Potencial de geração eólica no Rio de Janeiro

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Potência instalável (MW)	Energia anual (GWh)
Rio de Janeiro	43.696	1.016	1.524	4.835

Fonte: Autor, adaptado do Atlas Eólico do Rio de Janeiro.

O estado de São Paulo possui uma distribuição climática variando conforme as diferentes regiões. Na região central o clima predominante é o subtropical úmido e quente, por outro lado, na região sudoeste observa-se a predominância do clima superúmido. No que tange a região nordeste, o clima predominante é quente e úmido. Bem como nos demais estados do Sudeste, o relevo elevado em alguns pontos como na Serra do Mar e Serra da Mantiqueira faz com que o regime de ventos no estado seja favorecido nesses pontos em específico (SESP, 2012).

A Tabela 19 apresenta o potencial eólico do estado de São Paulo, bem como a área total capaz de gerar energia eólica no estado e a potência instalável em Megawatt (MW).

Tabela 19 – Potencial de geração eólica em São Paulo

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Potência instalável (MW)	Energia anual (GWh)
São Paulo	248.209	4	15	48

Fonte: Autor, adaptado do Atlas Eólico de São Paulo.

Assim, após o levantamento do potencial eólico dos estados da região Sudeste foi calculado a potencialidade de produção de hidrogênio sustentável assistido pela energia eólica. Para que esse valor fosse apontado, foi realizado um levantamento do consumo dos eletrolisadores disponíveis no mercado internacional para a produção de 1m³ de hidrogênio por hora. Os resultados levantados estão apontados na Tabela 20.

Tabela 20 – Energia necessária para produção de hidrogênio sustentável por eletrolisador

Tecnologia	Status	Energia necessária (kWh)
Eletrolisador convencional	Utilizada em larga escala no mundo contemporâneo	4,3 - 5,1
Eletrolisador tipo PEM	Aplicações comerciais e protótipos em desenvolvimento	3,6 – 4,0
Eletrolisador alcalino	Aplicações comerciais e protótipos em desenvolvimento	3,8 – 4,3

Fonte: Autor, adaptado de PRINCE-RICHARD (2004).

Considerando essa análise, foi definido o valor máximo de 5,1 kWh utilizando-se eletrolisadores convencionais e com larga aplicação no mercado internacional. Para o cálculo da produção de hidrogênio sustentável foi utilizado a Eq. 8 através dos dados apresentados na Tabela 20, bem como os dados do potencial de produção de energia eólica em todas as Unidades da Federação da região Sudeste.

$$qnt. H^2(m^3/h) = \frac{Prod. Eólica por ano}{Energia necessária (kWh)} \quad (8)$$

Os dados obtidos nessa análise estão dispostos na Tabela 21 considerando a produção de cada estado do Sudeste, bem como o total de produção na região Sudeste.

Tabela 21 – Produção de hidrogênio sustentável através da fonte eólica na região Sudeste

Unidades da Federação	Área disponível (km²)	Energia anual (kWh)	Produção de H2 sustentável (m3/ano)
Minas Gerais	16.495	57.812.000.000	11.335.686.270
Espírito Santo	299	1.073.000.000	210.392.157
Rio de Janeiro	1.016	4.835.000.000	948.039.216
São Paulo	4	48.000.000	9.411.765
Total	17.814	63.768.000.000	12.503.529.408

Fonte: Autor.

3.3. ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR MEIO DA ENERGIA SOLAR

A produção de energia elétrica por meio da geração fotovoltaica apresenta um enorme potencial no Brasil. Dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar apontam que o local menos ensolarado do território brasileiro, é capaz de gerar mais eletricidade proveniente do sol do que no local mais ensolarado da Alemanha (PEREIRA *et al.*,

2017). Esse fato abre caminho para a geração solar fotovoltaica centralizada, por meio de usinas de grande porte, nas regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil.

As condições climáticas impactam diretamente a variação e disponibilidade do recurso energético solar nas diferentes regiões do Brasil. Pereira *et al.* (2017) apontam que o Sudeste do país, caracteriza-se pela transição entre os climas quentes, localizados em baixas latitudes, e o clima subtropical, localizado em médias latitudes, contribuindo assim, para que a região alcance temperaturas médias entre 18 e 29°C. Essa variabilidade espacial oriunda das características climáticas, meteorológicas e atmosféricas somada à fatores astronômicos (rotação da Terra e movimentos orbitais) fazem com que a fonte de energia solar se torne intermitente.

Conhecer e mapear o potencial de energia solar incidente na superfície terrestre se faz fundamental para o impulsionamento dessa fonte de energia, bem como ao desenvolvimento de novos projetos de produção de energia limpa usando a fonte solar. Essas incertezas dificultam a elaboração de um estudo mais detalhado acerca do potencial solar fotovoltaico de uma determinada região. O Atlas Brasileiro de Energia Solar aponta que a distribuição espacial, a variabilidade temporal e as incertezas associadas às duas primeiras componentes são de extrema importância para analisar o potencial de recursos solares em uma determinada região.

Nesse sentido, para avaliar o potencial de produção de hidrogênio sustentável por meio da energia solar, foi realizado um levantamento do potencial de incidência solar nas diferentes Unidades da Federação da região Sudeste com objetivo de apresentar o potencial de cada estado frente ao panorama global e posteriormente foi aplicado a metodologia proposta por Bernardi Junior (2009) para calcular o potencial de produção de energia fotovoltaica em cada estado da região Sudeste, bem como a produção de hidrogênio.

O potencial fotovoltaico dos estados da região Sudeste será indicado no presente trabalho como a capacidade total possível de ser instalada nas diferentes Unidades da Federação do sudeste brasileiro, bem como a produção de energia por ano estimada, de acordo com a metodologia proposta por Bernardi Junior (2009) e dos dados obtidos por meio do Atlas Solar de cada estado. Esse potencial é fruto de uma análise conservadora, buscando dados intermediários que considerem a realidade política, econômica e ambiental que o país vive nos dias atuais. Nessa

perspectiva, neste trabalho a apresentação do potencial fotovoltaico do Sudeste do Brasil leva em consideração os seguintes pontos elencados abaixo:

1-Para o cálculo da área disponível para instalação de painéis fotovoltaico foi considerado o valor de 0,07% do território de cada estado. O valor apontado é fruto de um levantamento elaborado por Bernardi Junior (2009) com base no índice norte americano e adaptado para a realidade econômica do Brasil.

2- Foi considerado o valor de irradiação direta normal de 1.733 kWh/m².ano apontado pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar como o rendimento médio do sistema fotovoltaico levando-se em consideração o índice de incidência de radiação nas região Sudeste.

3- Foi convertido a quantidade de metros quadrados aptos para produção em 1 km² para o cálculo do potencial fotovoltaico de cada Unidade da Federação do Sudeste brasileiro.

O estado de Minas Gerais possui uma radiação solar global diária média anual entre 5,5 e 6,5 kWh/m².dia, sendo a região oeste do estado a mais propícia para a geração solar fotovoltaica (CEMIG, 2012). A Tabela 22 apresenta o potencial solar fotovoltaico do estado de Minas Gerais, bem como a área total capaz de gerar energia solar fotovoltaica no estado.

Tabela 22 – Potencial de geração solar fotovoltaica em Minas Gerais

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Energia anual (GWh)
Minas Gerais	586.528	411	712,3

Fonte: Autor.

O estado do Espírito Santo possui uma radiação solar global diária média anual do total diário, variando entre 4,76 e 5,25 kWh/m².dia, sendo a região sul do estado e uma pequena parcela do norte, sobretudo no verão e primavera, a mais propícia para a geração solar fotovoltaica em todo o estado (SCARPATTI, *et al.*, 2014). A Tabela 23 apresenta o potencial solar fotovoltaico do estado do Espírito Santo, bem como a área total capaz de gerar energia solar fotovoltaica no estado.

Tabela 23 – Potencial de geração solar fotovoltaica no Espírito Santo

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Energia anual (GWh)
Espírito Santo	46.095	32	55,5

Fonte: Autor.

A irradiação solar sobre o estado do Rio de Janeiro varia de 4,0 a 5,5 kWh/m².dia, sendo que os valores máximos ocorrem na região nordeste e os mínimos na região central do território fluminense (SOLAR, 2016). Tabela 24 apresenta o potencial solar fotovoltaico do estado do Rio de Janeiro, bem como a área total capaz de gerar energia solar fotovoltaica no estado.

Tabela 24 – Potencial de geração solar fotovoltaica no Rio de Janeiro

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Energia anual (GWh)
Rio de Janeiro	43.696	31	53,7

Fonte: Autor.

A quantidade de energia incidente global no estado de São Paulo está dividida em faixas que vão de 4,2 a 5,7 kWh/m².dia, sendo a parte norte do estado a com maior potencial (PEREIRA *et al.*, 2017). Tabela 25 apresenta o potencial solar fotovoltaico do estado de São Paulo, bem como a área total capaz de gerar energia solar fotovoltaica no estado.

Tabela 25 – Potencial de geração solar fotovoltaica em São Paulo

Unidade da Federação	Área total do estado (km²)	Área disponível (km²)	Energia anual (GWh)
São Paulo	248.209	174	301,5

Fonte: Autor.

Nesse cenário, após o levantamento do potencial fotovoltaico dos estados da região Sudeste foi calculado a potencialidade de produção de hidrogênio sustentável assistido pela energia solar fotovoltaica. Foi considerado a análise apontada na

Tabela 20, sendo definido o valor máximo de 5,1 kWh utilizando-se eletrolisadores convencionais e com larga aplicação no mercado internacional.

Os dados obtidos nessa análise estão dispostos na Tabela 26 considerando a produção de cada estado do Sudeste, bem como o total de produção na região Sudeste.

Tabela 26 – Produção de hidrogênio sustentável através da fonte solar fotovoltaica na região Sudeste

Unidades da Federação	Área disponível (km²)	Energia anual (kWh)	Produção de H2 sustentável (m³/ano)
Minas Gerais	411	712.300.000	139.666.667
Espírito Santo	32	55.500.000	10.882.352
Rio de Janeiro	31	53.700.000	10.529.411
São Paulo	174	301.500.000	59.117.647
Total	648	1.123.000.000	220.196.078

Fonte: Autor.

3.4. POR UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: A PRODUÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL

Para se calcular o potencial de geração de energia elétrica produzida nas diferentes tecnologias avaliadas foi necessário sistematizar a quantidade total de hidrogênio sustentável em cada Unidade da Federação da região Sudeste para realização dos cálculos. A Tabela 27 apresenta a quantidade de hidrogênio produzida em m³/ano por meio de diferentes tecnologias nos estados do Sudeste brasileiro.

Tabela 27 – Produção de hidrogênio sustentável (m³/ano) por fonte na região Sudeste

Unidades da Federação	Biomassa	Eólica	Solar Fotovoltaica
Minas Gerais	47.879.987.520	11.335.686.270	139.666.667
Espírito Santo	1.205.428.560	210.392.157	10.882.352

Rio de Janeiro	701.807.400	948.039.216	10.529.411
São Paulo	145.656.645.960	9.411.765	59.117.647
Total	195.443.869.440	12.503.529.408	220.196.078

Fonte: Autor.

Para realização dos cálculos foi considerado 0,63 como o consumo médio de hidrogênio em m³/h de uma célula a combustível para poder realizar a geração de 1 kW/h de energia (BERNARDI JUNIOR, 2009). Ainda foi considerado uma eficiência elétrica de 50% para a célula a combustível. As Tabelas 28, 29 e 30 apresentam os dados do potencial de produção de energia elétrica por fonte nos estados do Sudeste a partir de hidrogênio sustentável em células a combustível.

Tabela 28 – Produção energia elétrica a partir de hidrogênio sustentável (biomassa) na região Sudeste

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produção de H2 sustentável (m3/ano)</i>	<i>Consumo médio de m³ na geração de 1kWh</i>	<i>Produção de energia (GWh/ano)</i>
Minas Gerais	47.879.987.520	0,63	37.999
Espírito Santo	1.205.428.560	0,63	956
Rio de Janeiro	701.807.400	0,63	556
São Paulo	145.656.645.960	0,63	115.600
Total	195.443.869.440	-	155.111

Fonte: Autor.

Tabela 29 – Produção energia elétrica a partir de hidrogênio sustentável (energia eólica) na região Sudeste

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produção de H2 sustentável (m3/ano)</i>	<i>Consumo médio de m³ na geração de 1kWh</i>	<i>Produção de energia (GWh/ano)</i>
Minas Gerais	11.335.686.270	0,63	8.996
Espírito Santo	210.392.157	0,63	166

Rio de Janeiro	948.039.216	0,63	752
São Paulo	9.411.765	0,63	7
Total	12.503.529.408	-	9.921

Fonte: Autor.

Tabela 30 – Produção energia elétrica a partir de hidrogênio sustentável (sola fotovoltaica) na região Sudeste

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produção de H2 sustentável (m3/ano)</i>	<i>Consumo médio de m³ na geração de 1kWh</i>	<i>Produção de energia (GWh/ano)</i>
Minas Gerais	139.666.667	0,63	110
Espírito Santo	10.882.352	0,63	8
Rio de Janeiro	10.529.411	0,63	8
São Paulo	59.117.647	0,63	46
Total	220.196.078	-	172

Fonte: Autor.

A sistematização dos dados da possibilidade de produção de energia elétrica através de células a combustível movidas a hidrogênio sustentável em cada Unidade da Federação da região Sudeste está apresentado na Tabela 31. Esses dados representam a quantidade de eletricidade gerada em GWh por ano consolidando as fontes solar, eólica e biomassa.

Tabela 31 – Produção energia elétrica total a partir de hidrogênio sustentável nas Unidades da Federação da região Sudeste

<i>Unidades da Federação</i>	<i>Produção de energia (GWh/ano)</i>
Minas Gerais	47.105
Espírito Santo	1.130

Rio de Janeiro	1.316
São Paulo	115.653
Total	165.204

Fonte: Autor.

O Gráfico 2 apresenta o potencial de produção total de energia elétrica sustentável que poderia ser gerado considerando as fontes analisadas e representam os dados da Tabela 31.

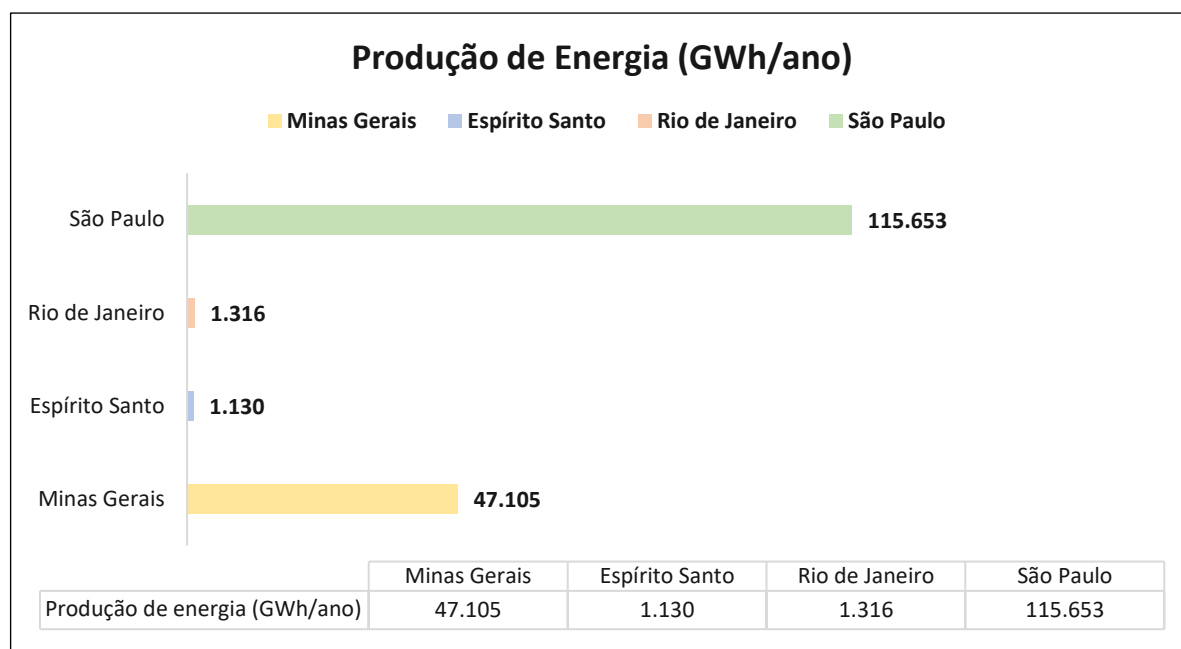


Gráfico 3: Potencial de produção total de energia elétrica sustentável na região Sudeste.
Fonte: Autor.

4. CONCLUSÃO

As mudanças climáticas provocadas pela acumulação de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera tem sido um dos maiores impactos das atividades econômicas na natureza. O Brasil, apresentando-se como potência emergente, busca alcançar no mundo contemporâneo o desafio de expandir a economia e garantir a preservação do meio ambiente. Essa é uma tendência global que vem ganhando relevância no cenário internacional e reflete a opinião de diversos pesquisadores, cientistas e especialistas da área ambiental.

Independente da onda ideológica ou influência política na esfera nacional, o mundo globalizado aponta para a necessidade de uma economia de baixo carbono onde existam esforços significativos para contribuir na redução das emissões de carbono na atmosfera. A produção de energia assistida por hidrogênio sustentável não é a solução, mas sim uma solução, em meio a um conjunto de mudanças que devem ser feitas em nível global.

A geração de energia elétrica por células a combustível alimentadas por hidrogênio sustentável representa uma convergência necessária para que Brasil alcance uma economia de baixo carbono. Nosso país apresenta, sobretudo na região Sudeste, uma vasta extensão territorial e uma forte produção agrícola. A geração de hidrogênio sustentável por meio da biomassa dos resíduos agrícolas se apresentou como a tecnologia com maior eficiência dentre todas as fontes analisadas, abrindo caminho para que o Brasil aproveite melhor os resíduos que são em muitas vezes desperdiçados no campo.

No que se refere ao potencial eólico, esse se apresenta muito forte no estado de Minas Gerais e apresenta um potencial similar ao observado em alguns estados da região Nordeste, referência na produção de energia eólica no Brasil. Em geral, esse potencial aumenta na medida em que os investimentos públicos e privados crescem nesse setor, abrindo assim, caminhos para um aumento na produção de hidrogênio sustentável assistido pela energia eólica.

O potencial solar fotovoltaico se apresenta na região Sudeste com pouco impacto na produção de hidrogênio sustentável. Tal fato se deve às fortes taxas de urbanização nas cidades e o pouco espaço disponível para inserção de usinas

geradoras de energia solar, uma vez que o estudo não considerou o potencial solar fotovoltaico das residências do Sudeste brasileiro.

Nessa lógica, é possível analisar pelos resultados do presente trabalho que a região Sudeste é capaz de gerar 165,2 TWh/ano de energia elétrica com os diferentes sistemas analisados, abrindo espaço para uma convergência necessária em torno de uma agenda econômica global que respeite a adoção de critérios ambientais e abra caminhos para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono.

O presente trabalho abre caminho para uma análise que contemple um recorte espacial maior e apresente dados consolidados de todas as Unidades da Federação do território brasileiro. Estudos futuros podem apontar novas quantidades de energia sustentáveis produzidas através do hidrogênio que assegure toda a produção energética nacional e faça o Brasil caminhar para uma economia de baixo carbono.

5. REFERÊNCIAS

ABDI. **Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil**. Brasil: ABDI, 2014.

ABIB – Associação Brasileira de Indústrias da biomassa. **Inventário Residual Brasil**, 2011. Disponível em: <<http://pt.calameo.com/accounts/200968>>. Consultado em 13 de setembro de 2015.

ALMEIDA, A. S. DE; SOUZA, J. G. DE; MADEIRO, L. C. N.; COSTA, M. L. A. DA; CUNHA, A. L.; RODRIGUES, M. A.; SANTOS, A. F. DOS. Hidrogênio, o combustível do futuro. **Diversitas Journal**, v. 4, n. 2, p. 356-366, 2019.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do. **Atlas Eólico: Espírito Santo** / Odilon A. Camargo do Amarante, Fabiano de Jesus Lima da Silva, Paulo Emiliano Piá de Andrade. Vitória (ES): ASPE – Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo, 2009. 100 p.

AMARANTE, C. *et al.* **Atlas Eólico: Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2010.

AMARANTE, O.A.C.; SILVA, F.J.L.; RIOS FILHO, L.G. **Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2002. 73 p.

ANDRADE, V. R. **Gaseificação de biomassa, uma análise teórica e experimental**. Tese de Doutorado de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **BOLETIM DO ETANOL Nº6**. FEVEREIRO – 2016.

APPLEBY, A. J; FOULKES F.R. **Fuel cell handbook**, New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.

AZEVEDO, E. M. Crescimento da energia eólica no Brasil. **Revista Administradores**, 2020. Disponível em <administradores.com.br/artigos/crescimento-da-energia-eolica-no-brasil>. Acesso em: 22 Set. 2019.

BALAT, H.; KIRTAY, E. **Int. J. Hydrogen Energy**, 35, 7416, 2010.

BAYER, B. Experience with auctions for wind power in Brazil. **Renew Sustain Energy Rev.** 81p: 2644-2658, 2018.

BERNARDI JUNIOR, P. **Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões Norte e Nordeste visando a geração de energia elétrica distribuída**; Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2009.

BEZERRA, F. N. R. LEMOS, J. J. S. LIMA, P. V. P. S. AGUIAR, J. V. Dependência externa e (in) sustentabilidade da matriz energética brasileira entre 1970 e 2014. **Planejamento e políticas públicas (PPP)**. n. 53. jul./dez. 2019.

BEZERRA, N. R. B. **Sustentabilidade da matriz energética brasileira**. 2016. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) –Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência**, vol. 43, núm. 10, 2018, Outubro, pp. 680-688.

BOWEN D. A.; LAU F., ZABRANSKY R.; REMICK R.; SLIMANE R.; DOONG S. **Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production by Gasification of Biomass Hydrogen**, 2003.

BRAGA, A. da C. **Morfologia, transformação e co-presença em centros urbanos: o caso do centro do Rio de Janeiro/RJ**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BRAGA, Lúcia Bollini. **Aspectos técnico, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. 2014. 140 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira**. Brasília 408 p., 2018.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**, v. 74, p. 631 – 653, maio 1995.

BRONZATTI, Fabrício Luiz; NETO, Alfredo Iarozinski. **Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030**, 2008.

CASTRO, C. N. O programa nacional de produção e uso do biodiesel (PNPB) e a produção de matéria-prima de óleo vegetal no norte e no nordeste. Brasília, DF: **IPEA**, 2011.

CHU, S.; GOLDEMBERG, J.; ARUNGU-OLENDE, S.; EL-ASHRY, M.; DAVIS, G. e NAKICENOVIC, N. Lighting the Way: Toward a Sustainable Energy Future. Amsterdam: **InterAcademy Council**, 2007.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Universidade do Amazonas/Efei, Manaus, 1997.

DASAPPA, S.; PAUL, P.J.; MUKUNDA, H.S.; RAJAN, G.N.K.; SRIDHAR, S.; SRIDHAR, H.V. Biomass gasification technology—A route to meet energy needs. *Curr. Sci.* 2004, 87, 908–916.

DE HOLLANDA, J. B. & ERBER,P. Cana-de-açúcar: Usando todo o seu potencial energético. Volume 5. **Série NAIPPE Cadernos** (Núcleo de Análise Interdisciplinar de Políticas e Estratégias da Universidade de São Paulo. s/d.

DE OLIVEIRA, L. G. S. **Aproveitamento Energético de Resíduos Agrícolas –O Caso da agroeletricidade distribuída**. Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2011.

DECOURT, B.; LAJOIE, B.; DEBARRE, R.; SOUPA, O. **Hydrogen-Based Energy**. Conversion, More Than Storage: System Flexibility. n. February, 2014. Disponível em: <www.sbc.slb.com/sbcinstitute.aspx>. Acesso em: 04 Mai 2020.

DIOLA, V.; SANTOS, F.A. Fisiologia. In: SANTOS, F., BORÉM, A., CALDAS, C. (Ed.). Cana-de-Açúcar: **Bioenergia, Açúcar e Álcool –Tecnologias e Perspectivas**. Viçosa –UFV. p. 487-517, 2010.

DOE (U.S.). Department of Energy, **Hydrogen Information Netwok**. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>> Acesso: 04 Mai 2020.

DOUBEK, G. **Desenvolvimento de sistemas catalíticos não suportados para células a combustível de membrana polimérica de temperatura elevada de operação**. USP: 2013.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Planning for a renewable future in the Brazilian power system. **Energy**, v. 164, n. 1, p. 496-511, dez.2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218317006>> Acesso em: 22 Abr. 2020.

EPE. **Nota Técnica DEA 19/14 Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**, 2014.

EPE. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira: Nota técnica EPE**. Rio de Janeiro - RJ: 2012.

EPE. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro - RJ: 2020.

FONSECA, E. **Meio ambiente e contas nacionais: a experiência internacional. Contabilização econômica do meio ambiente**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1992.

GAO, N. LI, A., QUAN, C. **A novel reforming method for hydrogen production from biomass steam gasification**. Bioresource Technology 100 (2009) 4271–4277.

GASIFICATION WORLD DATABASE. **Current Industry Status. U.S.** Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, 2007.

CEMIG, COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CEMIG.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HIDRELÉTRICAS EMITEM GASES DO EFEITO ESTUFA, REVELA ESTUDO DA COPPE. Disponível em: **Revista Light**, 24 de maio de 2018.

HY GENERATION. **Electrolysis process configuration**. Disponível em: http://hy-generation.com/21prod_h2.html.

IBGE. Mapa de Clima do Brasil 2002. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm. Acesso em: 22 mai. 2020.

- IEA [International Energy Agency]. **World Energy Outlook (WEO)**. 2014.
- LANA, L. T. C. et al. **Energia solar fotovoltaica**: Revisão bibliográfica. *Engenharias On-line*, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2016.
- LIMA, LP, RIBEIRO, GB de D, PEREZ, R. **The energy mix and energy efficiency analysis for Brazilian dairy industry**. *J. Cleaner Prod.* 181: 209 -216, 2018.
- LINARDI, M. **Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível**, São Paulo, Artliber LTDA. 2010.
- LORA, E.E.S.; ANDRADE, R.V.; MARTINEZ, J.D.; ROCHA, M.H.; SALES, C.A.V.B.; MENDOZA, M.A.G.; OBANDO, D.S. (2012) Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In: Lora, E.E.S., Venturini, O.J. (Coord.) **Biocombustíveis**. 1.ed. Rio de Janeiro, Interciência. pp. 411–498
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 37-46, 2002.
- Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, **Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível (PROCaC)**, 2002.
- MARQUES, Leonardo de Oliveira. SILVA, Leandro Bezerra da. VELLUTINI, Felipe Gomes. **O impacto do aumento do uso de fontes renováveis alternativas na matriz elétrica brasileira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- MATOS, M. **Investimentos financeiros em projetos de célula a combustível e hidrogênio no Brasil**. UNICAMP, Campinas, SP, 2009.
- MATTOS, R. S. et al. **Integração de modelos econômico e de insumo-produto para previsões de longo prazo da demanda de energia no Brasil**. *Estudos Econômicos*. São Paulo, vol.38 n.4 out./dez.,2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-41612008000400001>. Acesso em: 22 Abr. 2019.
- MILLER JR, G. T. **Ciência Ambiental**, São Paulo, Cengage Learning, 2014.
- MIRANDA, P. E. V. **O alvorecer da energia do hidrogênio**. In: **Boletim de conjuntura do Setor Energético**, FGV. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/19643/ColunaOpiniaodezembro20Energia%20doHidrogenio.pdf>>. Acesso em 04 Ago de 2020.
- MORAES, M. L.; BACCHI, M. R. P. Etanol do início às fases atuais de produção. **Revista Política Agrícola**, Brasília, v. 23, n. 4, out./nov./dez. 2014.
- NADALETI, Willian César et al. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, p. 1-7. Jul. 2020.

NETO, Emilio Hoffmann Gomes. Atividades com Células a Combustível e Hidrogênio no Brasil. In: **Brasil H2 Fuel Cell Expo/Seminar**, 1., 2007, Curitiba. Disponível em: <<http://www.portalh2.com.br/prtlh2/images/artigos/a32.pdf>>.

OLIVEIRA, Aretha Manoella Queiroz; PINHEIRO, José Guilherme Leitão. ENERGIA RENOVÁVEL COM UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA. **Episteme Transversalis**, [S.l.], v. 11, n. 1, maio 2020.

PAZ, Marcos de Araújo. **Controle de cheias em usinas hidroelétricas e o conflito com a geração de energia**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. doi:10.11606/D.18.2017.tde-30102017-091457.

PEREIRA, E. M. D. et al. **Mapeamento básico das condições gerais para tecnologias heliotérmicas no Brasil: Projeto Energia Heliotérmica**, 2006.

PEREIRA, E.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2a Edição**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINTO, C. F. **Estudo sobre uso de célula a combustível movida a hidrogênio solar em residências**. Tese(doutorado) –Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PINHEIRO, M. B. C. **Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza, 2020.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l: s.n.]

PINHO, L. L. R. **Avaliação da produção de hidrogênio a partir de excedentes de energia eólica utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ -COPPE, 2017.

PRINCE-RICHARD, S. A. **Techno-Economic Analysis of Decentralized Electrolytic Hydrogen Production for Fuel Cell Vehicles**, Master Thesis, University of Victoria, Canada, 2004. Disponível em: <www.iesvic.uvic.ca/library/publications/Dissertation-SPRichard.pdf>. Acesso em 04 Ago 2020.

RAFFI, Sérgio Aldrighi. **Os investimentos estatais na geração de hidrogênio no Brasil**. Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Economia, 2012.

REN21. **Renewables 2015 – Global Status Report**, 2015.

S., Dasappa & Paul, P. & Mukunda, Hanasoge & N K S, Rajan & Gururaja Rao, Sridhar & H V, Sridhar. (2004). Biomass gasification technology - A route to meet energy needs. **Current Science**: 87p, 2004.

SA, Lívian R. Vasconcelos de; CAMMAROTA, Magali C.; FERREIRA-LEITAO, Viridiana S.. **Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros**. Quím. Nova, São Paulo , v. 37, n. 5, p. 857-867, June 2014.

SCARPATTI, M. P. et al. **Energia solar no Espírito Santo: tecnologias, aplicações e oportunidades**. 2014.

SANTIAGO, Emerson. **Primeira Crise do Petróleo**, 2011. Disponível em: <https://www.infoescola.com/historia/primeira-crise-do-petroleo/>>. Acesso em: 14 Mai. 2020.

Secretaria de Energia de São Paulo. **Atlas Eólico do Estado de São Paulo**. São Paulo: 2012.

SILVA CÉSAR, A.; CONEJERO, M. A.; RIBEIRO, E. C. B.; BATALHA, M. O. **Competitiveness analysis of “social soybeans” in biodiesel production in Brazil**. Renew. Energy In press: 2018.

SILVA, F. H. G. **Obtenção e uso de hidrogênio em célula de combustível para geração de energia limpa de fontes renováveis**. 2013. Tese de Graduação. Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, I. P. et al. Resíduos agroindustriais como biomassa alternativa para geração de energia distribuída em comunidades rurais. In: SILVA, G. F. (Org.) et al. **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro**. Aracaju: Associação Acadêmica de Propriedade Intelectual, 2019. p. 189-211.

SILVA, Marco Antonio Oliveira da. **Estudos eletroquímicos de eletrólise a membrana polimérica para produção de hidrogênio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, University of São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, S. S.; CHANDEL, A. K. **Biofuels in Brazil: fundamental aspects, recent developments, and future perspectives**. [s.l.] Springer, 2014. 435p.

SILVEIRA, P. G. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. **Revista Opinião Jurídica**, Medellin, vol.17, n. 33, p. 123-147, set. 2017.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI C. C. A.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; DOS PASOS, B. M.; GIROTTI, S. B.F.T. **Forest biomass chain of production: Challenges of small-scale forest production in southern Brazil**. J. Cleaner Prod.174: 889-898, 2018.

SOLAR, Atlas Rio. Atlas solarimétrico do Estado do Rio de Janeiro/organization. **IEPUC-Instituto de Energia da PUC-Rio,[performed by EGPEnergia and PUC-Rio].-Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio**, p. 60, 2016.

TAYRA, Flavio. O conceito do desenvolvimento sustentável, Campina Grande (PB): **Revista de economia e desenvolvimento sustentável**, 2007.

TOLMASQUIM, M. T. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, n. 6-7, jan./jun. 2000. Disponível em: <<http://www.scielo>.

br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2000000100012>. Acesso em: 09 Mar. 2020.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, Amilcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos**. CEBRAP, São Paulo, n. 79, p. 47-69, nov. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000300003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 05 Ago. 2020.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TOLMASQUIM, M. T.; **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**, Rio de Janeiro, 2003.

TRAJANO, S. V., 2010. **Potencial De Geração De Energia Elétrica Com Sistemas Fotovoltaicos Com Concentrador No Brasil**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

VELLUTINI, Felipe Gomes; SILVA, Leandro Bezerra; MARQUES, Leonardo de Oliveira. **O impacto do aumento do uso de fontes renováveis alternativas na matriz elétrica brasileira**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VICHI, Flavio; MANSOR, Maria Teresa Castilho. Energia, Meio Ambiente e Economia: o Brasil no Contexto Mundial. **Quim. Nova**, Vol. 32, No. 3, 757-767, 2009.

WCED. **Our common Future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass Bioenergy**. 105: 83-95, 2017.

WISER, R. et al. **Wind Technologies Market Report**. United States: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US), 15 ago. 2014. Disponível em: <<http://www.osti.gov/scitech/biblio/1163270>>. Acesso em: 01 Mai. 2020.