



ESTRATÉGIAS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: REVISÃO DE LITERATURA

ARTIGO ORIGINAL

LIMA, Leandro Jose Barbosa¹, HAMZAGIC, Miroslava²

LIMA, Leandro Jose Barbosa. HAMZAGIC, Miroslava. **Estratégias para a transição energética: revisão de literatura.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 07, Ed. 06, Vol. 08, pp. 96-120. Junho de 2022. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-ambiental/transicao-energetica>, DOI:

10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-ambiental/transicao-energetica

RESUMO

Mediante a necessidade de buscar fontes energéticas que geram menos gases de efeito estufa e que tragam, conseqüentemente, um impacto menor ao meio ambiente, surgem diversas estratégias de transição energética. Nesse contexto, o presente artigo visou responder: quais são as estratégias de transição energética? Sendo assim, tem-se como objetivo apresentar algumas estratégias em andamento para o processo de transição energética, abordando o tema sobre três aspectos principais, sendo eles: a eficiência energética; a energia renovável; e a captura e sequestro de carbono. Para isso, a metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica seguida da análise crítica da literatura encontrada. Como resultados, notou-se que as estratégias apresentadas permitem a redução das emissões de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono, que vem afetando o clima do planeta. Por fim, conclui-se que as estratégias apresentadas na categoria de eficiência energética foram: os programas de etiquetagem; utilização de material reciclado; automação e utilização de inteligência artificial; e gerenciamento das emissões de metano. Na categoria de energia renovável, apontou-se como estratégias: o etanol; o biodiesel; o biometano; o biogás; o gás natural; o hidrogênio; a energia solar, eólica, hidroelétrica, geotérmica; e a armazenagem de energia. Ao final, apresentou-se a estratégia de captura, utilização e armazenamento de carbono. Vale destacar, também, que esta é uma área muito vasta em oportunidades para pesquisas e inovações, estando em pleno desenvolvimento e demandando muitos outros trabalhos que tratem da eficiência energética, captura de carbono e energias renováveis.

Palavras-chave: mudanças climáticas, transição energética, poluição atmosférica, dióxido de carbono.



1. INTRODUÇÃO

Atualmente, vive-se em um mundo de notáveis mudanças climáticas, onde 4.2 milhões de pessoas morrem todos os anos em função da poluição atmosférica (WHO, 2021). Esses gases poluentes permitem a passagem da luz solar em direção ao planeta, pois retêm o calor, elevando a temperatura, o que, conseqüentemente, aumenta a poluição e contribui para o agravamento do efeito estufa. As conseqüências desse processo são: mudanças climáticas, como: estiagens maiores, redução de reservas de água potável, aumento do nível do mar, redução na produção de alimentos (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017b); e problemas de saúde, como: doenças cardíacas, respiratórias e câncer (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017a).

Os gases de efeito estufa (GEE) são provenientes de queimadas naturais e vulcões, mas a maior parte das emissões provêm de atividades antropogênicas, como a geração de energia e agricultura (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017a). Os GEE incluem: o Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), CFC-12 e o HCFC-22, sendo o CO_2 o mais importante, dado o impacto pelo seu volume. Por conta da participação do CO_2 no efeito estufa, estes são quantificados em CO_2 equivalente, 'CO₂eq' ou Carbono equivalente (BABARINDE e ADIO, 2020). Eles, ainda, estão classificados de acordo com o seu potencial de impacto no aquecimento global (Global Warming Potentials, GWP), uma vez que cada um deles tem uma capacidade de acúmulo de calor e uma vida específica (BABARINDE e ADIO, 2020).

Sendo assim, em resposta aos impactos já observados no planeta e com o objetivo de criar políticas globais de prevenção ao efeito estufa, os países se uniram pela primeira vez (após o final da Guerra Fria), em um evento dedicado à discussão do tema, entre os dias 3 e 14 de junho de 1992, no Brasil. Apesar da criação de um acordo comum, nem todos os países seguiram as metas estabelecidas. O mesmo aconteceu depois em outros encontros, como o de Kyoto (1997) e as negociações de Copenhagen (2009). Finalmente, em 2016, se conseguiu um acordo mais abrangente, o chamado Acordo de Paris, onde já existia uma maior "maturidade climática". Esse acordo fez com que cada país chegasse a um compromisso próprio para contribuir globalmente com uma meta de limitar o aumento da temperatura global em até 2 graus



Celsius até 2050. Ademais, alguns pontos-chaves discutidos foram: limitar o uso indiscriminado de combustíveis fósseis; criar uma economia crescente, promovendo geração de emprego; a sustentabilidade econômica; baixa emissão de carbono; aprimoramento da agricultura; e combate ao desmatamento (TV BRASILGOV, 2016).

Como exemplo dos compromissos e metas desse acordo, o Reino Unido criou leis que obrigam as empresas produtoras de energia a reduzirem a emissão de CO₂ em 80%, tendo como referência os níveis de emissão de 1990 (BABARINDE e ADIO, 2020).

Entretanto, destaca-se que para alcançar essa meta é preciso dispor de tecnologias. Quanto a isso, estudos apontam que 25% da redução de 'CO₂e' virá de tecnologias já existentes, 35% de tecnologias em fase de desenvolvimento e 40% de tecnologias que ainda não foram testadas comercialmente (BAKER HUGHES, 2021a).

É neste cenário que surge a transição energética, como um fenômeno que está ocorrendo em resposta à necessidade de buscar fontes energéticas que gerem menos gases de efeito estufa (GEE) e, conseqüentemente, que impactem menos as pessoas e o meio ambiente. Entretanto, quais são as estratégias de transição energética?

Para responder a este questionamento, o presente artigo, tem como objetivo apresentar algumas estratégias em andamento para o processo de transição energética, abordando o tema sobre três aspectos principais, sendo eles: a eficiência energética; a energia renovável; e a captura e sequestro de carbono.

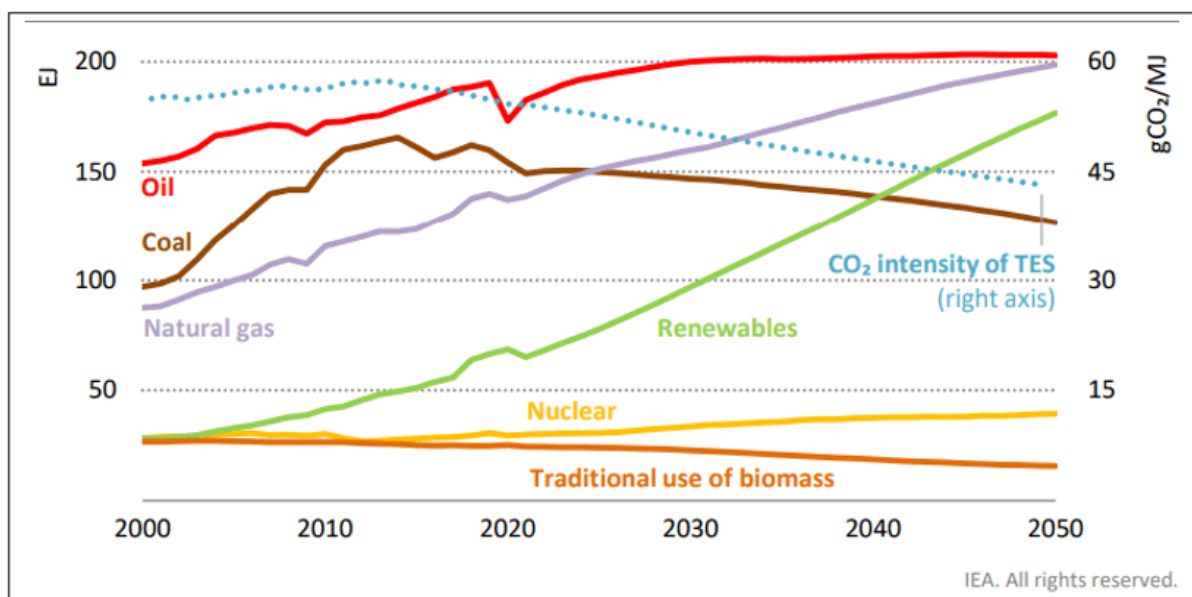
Para isso, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, a fim de entender e explorar o tema. Essa foi uma pesquisa exploratória, que buscou decifrar algumas estratégias existentes em meio a transição energética, ressaltando a necessidade de futuros pesquisadores realizarem novas pesquisas, para aumentar o conhecimento dentro desse campo e contribuir para uma economia de baixo carbono, com menor impacto ambiental e climático.

2. REVISÃO DE LITERATURA

De acordo com informações da Agência Internacional de Energia, as emissões de CO₂ vem crescendo de maneira muito acelerada em países em desenvolvimento, enquanto nos Estados Unidos e Europa se observa uma tendência de leve queda (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Nesse contexto, a transição energética é algo necessário para que os países cresçam sem impactar o meio ambiente.

Em consonância, o gráfico 1 demonstra a energia total requerida e a intensidade das emissões de CO₂, levando em consideração as metas estabelecidas entre os países (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Gráfico 1 - Energia total requerida e intensidade das emissões de CO₂.



Fonte: International Energy Agency (2021).

Conforme observado no Gráfico 1, existe uma tendência no crescimento na demanda por: petróleo, gás natural, renováveis e nuclear, enquanto, se observa uma queda na demanda do uso tradicional de biomassa e carvão. Verifica-se, ainda, que apesar do apelo pela redução a zero de combustíveis fósseis, essa realidade ainda não é possível devido a falta de meios suficientes para entregar a energia requerida para o crescimento do consumo.



Visando abordar algumas estratégias em andamento para o processo de transição energética, selecionou-se 3 categorias, sendo elas:

- **Eficiência Energética:** que abrange estratégias relacionadas a eliminação de desperdícios, com aplicação em tecnologias de construção, transporte, geração de energia e distribuição, veículos e conceitos de projeto (BABARINDE e ADIO, 2020);
- **Energia Renovável:** que abrange estratégias relacionadas ao uso de energia renovável, como: geotérmica, solar, eólica e hidráulica, e a substituição de geração de energia por fontes que emitem mais carbono para fontes que emitem menos carbono (gás natural vs carvão, etanol vs gasolina) (BABARINDE e ADIO, 2020);
- **Captura e Sequestro de Carbono:** que abrange estratégias relacionadas a processos de captura de carbono antes da sua emissão atmosférica (e o processo de captura de carbono lançado na atmosfera), que se decompõe em quatro partes principais: captura, transporte, armazenamento geológico (ou uso na indústria) e monitoramento (BABARINDE e ADIO, 2020).

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Quando se fala em eficiência energética, o grande objetivo é reduzir as emissões com aproveitamento máximo da energia produzida, redimensionamento e/ou controle de vazamentos. Nesse contexto, aborda-se a seguir algumas estratégias para a transição energética, visando maior eficiência, sendo elas: os Programas de Etiquetagem, o uso de material reciclado, a automação e a inteligência artificial, e o gerenciamento das emissões de metano.

2.1.1 PROGRAMAS DE ETIQUETAGEM

Os Programas de Etiquetagem têm auxiliado diversos países do mundo em iniciativas de redução no consumo de energia e, conseqüentemente, na redução da 'pegada de carbono'. No Brasil, esse tipo de programa se iniciou em 1993. Em 2007, o rótulo foi aplicado a 21 categorias de produtos. Nesse período, estimou-se uma economia de



3,7 TWh. Esse desafio obrigou a indústria a evoluir e produzir produtos mais eficientes, a exemplo do motor de indução elétrica com consumo de 29% de toda energia produzida no Brasil. Ao final de 2007, com o programa de etiquetagem, conseguiu-se alcançar uma economia de 428 GWh (CARDOSO *et al.*, 2009).

No Brasil, este Programa está atualmente passando por uma revisão, focando, por exemplo, nas geladeiras, visando a produção de bens que reduzam ainda mais a demanda de energia no país, no médio e longo prazo, resultando, consequentemente, na menor emissão de CO₂ (FONTES, 2021).

Em 2009, outro Programa de Etiquetagem foi implementado no Brasil, o Programa de Etiquetagem de Automóveis. Ele trouxe não somente as informações sobre o consumo de CO₂ por tipo de combustível, mas também informações relacionadas ao consumo de energia, normalizado, por quilômetro, dando ao consumidor opções de escolher melhores produtos e obrigando as montadoras a buscarem maior eficiência. No acompanhamento das ações desse Programa, notou-se que sub-compactos e utilitários esportivos compactos tiveram reduções de 7% e 8% no consumo de combustível, acarretando, consequentemente, redução de emissões dos GEE (BALES *et al.*, 2015).

Este Programa, conforme demonstrado por Cella; Guarda e Domingos (2020), também pode ser aplicado em edifícios comerciais, pois o consumo elétrico em edificações de serviço, no Brasil, ultrapassa o percentual de 21% do consumo nacional, sendo considerado, pelos governos uma grande oportunidade para a redução de emissões dos GEE.

Outro setor que deveria receber atenção dos Programas de Etiquetagem, é o de lâmpadas incandescentes, pois essas lâmpadas consomem 82% mais energia e duram 50 vezes menos que a tecnologia de LED atual. Ademais, a troca traria benefícios relacionados à menor geração de resíduos, reduzindo, também, a necessidade de consumo de energia nos processos produtivos. Além disso, as lâmpadas de LED são 70% mais eficientes em consumo que as fluorescentes e



possuem um processo de reciclagem mais simples, seguro e econômico (SANTOS *et al.*, 2015).

2.1.2 RECICLAGEM

Outra alternativa é o uso de material reciclado. Um modelo apresentado pela Alcoa (2020) destaca a redução de 30% da emissão de gases do efeito estufa com a produção de alumínio a partir de material reciclado.

Na cadeia de produção do aço, 75% da emissão de dióxido de carbono vem da produção do ferro-gusa. Para produzir 1 kg de aço em alto forno usando minério de ferro e sucata, se emite aproximadamente 2,5 t CO₂. Mas, quando é utilizado material reciclado, que pode ir em forno elétrico, o mesmo volume emite aproximadamente 462 kg de CO₂, ou seja, 81% menos CO₂ para a atmosfera (MELO *et al.*, 2021).

2.1.3 AUTOMAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Novos sensores de monitoramento de propriedades de óleos lubrificantes operando em conjunto com a internet nas nuvens e algoritmos têm, também, servido como uma forma de determinar o exato momento de troca de óleo combustível. Com isso, se tem evitado o desperdício de litros de óleo lubrificante na ordem de 44 toneladas de CO₂ por embarcação. Nesse contexto, destaca-se, portanto, que soluções similares de manutenção preditiva podem reduzir quantidades de manutenções e outras intervenções que também geram emissões de GEE. Verifica-se, ainda, que diversos artifícios relacionados a diminuição da emissão dos GEE estão surgindo com a Indústria 4.0 (PARKES e HUGHES, 2020).

2.1.4 GERENCIAMENTO DE EMISSÕES DE METANO

Apesar de mais limpo que o carvão, tanto em emissão de CO₂eq quanto em outros elementos químicos danosos a saúde, o gás natural é uma fonte de metano (5-10% das emissões mundiais), que pode vazar e contribuir para o agravamento do efeito estufa 24 vezes maior que o CO₂ (THOMAS; KUMAR e KUMAR, 2020).



Entretanto, é válido destacar que a emissão do metano não está somente limitada ao caso de vazamentos no uso do gás natural. Ela, também, ocorre: quando a queima do gás não é completa, o que pode acontecer durante o processo de *flaring*, que é uma forma de conter o excesso de pressão na linha de gás ou na compressão de gás natural (OGWU; OLUWAFERANMI e JOHNSON, 2021); na queima incompleta de biomassa (a depender do tipo de biomassa); na decomposição de matéria orgânica do lixo; em processos relacionados a agricultura (a cultura de arroz, que responde por 20% das emissões de metano mundialmente) e pecuária (92-98% das emissões acontecem durante o processo de ruminação). Soma-se a isto as emissões pelo estrume desses animais podendo, também, ser natural, o que inclui terras molhadas (25% das emissões globais), cupins, vegetação, oceano, animais selvagens, dentre outros (THOMAS; KUMAR e KUMAR, 2020).

O processo natural de produção de metano ocorre pela metanogênese, que ocorre em meio anaeróbico onde o composto $C_6H_{12}O_6$ é decomposto por bactérias em $3CO_2$ mais $3CH_4$. Essas bactérias estão naturalmente presentes em campos de arroz, florestas e solos aquosos (THOMAS; KUMAR e KUMAR, 2020).

Sendo assim, algumas soluções para o gerenciamento das emissões de metano, são: o monitoramento das medições de emissões, seja por sensores, drones ou ainda por satélite, sendo esta uma importante forma de reconhecer e mapear áreas de riscos; o monitoramento da chama da queima do *flare*, que pode aumentar a eficiência de queima para até 98%; uso de compressores herméticos para evitar vazamentos no processo de compressão; tubulações mais modernas que não permitam a difusão do gás; ou, ainda, processos de remediação de formações pós *fracking*. Como visto, a produção de biometano pode, também, ser uma solução para os casos envolvendo decomposição de lixo, estrume e de matéria orgânica em geral (THOMAS; KUMAR e KUMAR, 2020).

Uma outra forma de controlar as emissões na agricultura está relacionada com a alteração da estratégia de irrigação. Nesse contexto, diferentes práticas de cuidado com o solo podem ser utilizadas, como, por exemplo, a aplicação de doses de sulfato e outros controles de acidificação de solo. Na pecuária, as emissões podem ser



controladas através do controle da alimentação, usando, por exemplo, ração rica em proteínas. Ademais, na mineração, a perfuração de poços de alívio do metano antes do processo de mineração iniciar, pode contribuir para o controle das emissões durante esse processo (THOMAS; KUMAR e KUMAR, 2020).

2.2 ENERGIA RENOVÁVEL

Atualmente, verifica-se a busca pela utilização de energias definidas como limpas, tais como: hidrotérmica, solar, eólica e hidráulica, em substituição às energias produzidas por fontes que emitem mais carbono. Outras substituições importantes, conhecidas como energia com menos carbono, são: gás natural vs carvão, etanol vs gasolina. Portanto, nos subtópicos a seguir, são apresentadas distintas soluções e inovações que são referências nas áreas de energias renováveis e que contribuem para a transição energética.

2.2.1 ETANOL

O etanol surgiu no Brasil como uma alternativa para a gasolina, dada a crise global do petróleo da década de 1970. No princípio, havia um foco de ressaltar o nacionalismo e o protagonismo do Brasil, pois este combustível é importante para o processo de descarbonização, uma vez que utiliza o carbono que é capturado pelas plantas durante sua vida e que na queima é novamente liberado fechando, assim, o ciclo (FREITAS; ROSEIRA e SAMPAIO, 2020).

O etanol pode ser utilizado de duas formas para motores a combustão: o etanol anidro, que serve como aditivo à gasolina; e, o etanol hidratado, que é utilizado diretamente no tanque de combustível de forma completamente autônoma (ZANARDI e COSTA JUNIOR, 2016).

Se estima que o uso do etanol levou o Brasil a evitar a emissão de 566 milhões de toneladas de CO₂ desde 2003, o que seria o equivalente às emissões anuais somadas de Argentina, Venezuela, Chile, Colômbia, Uruguai e Paraguai (ARAUJO, 2021).



Ademais, a título de comparação, são emitidos 720 g de CO₂ por real gasto com gasolina, enquanto 142 g de CO₂ são emitidos quando o mesmo veículo está abastecido pelo Etanol por real gasto (FERREIRA, s.d.). Considerando a média do setor produtivo, o uso de etanol comparado a gasolina, impede a emissão de: 2,564 kg de CO₂/litro de etanol anidro e 1,722 kg de CO₂/litro de etanol hidratado (EPE, 2005).

Há um terceiro uso do etanol em desenvolvimento: misturado com água, na proporção de ~50%, para alimentar uma célula de combustível e, com isso, a célula produz hidrogênio que pode ser utilizado como fonte elétrica para o veículo. Essa técnica traz como principal vantagem o fato de habilitar o uso do hidrogênio, que é uma fonte mais limpa, além de evitar a necessidade de baterias nos carros, pois a matriz logística de distribuição de combustíveis já está preparada para alimentar os veículos equipados com essa tecnologia (SILVA *et al.*, 2004; FIUZA *et al.*, 2012; TORRES, 2021).

2.2.2 BIODIESEL

Uma outra opção de combustível renovável que pode ser utilizado em substituição ao combustível fóssil é o biodiesel etílico e o biodiesel metílico. Ambos podem ser oriundos da mamona, palma ou soja, por exemplo. Este combustível é obtido através de uma reação química entre triglicerídeos ou ácidos graxos e um álcool e, em casos de concentrações de 100% de biodiesel, as emissões evitadas podem chegar a: 2,76 kg CO₂eq/litro para o Biodiesel Etílico de Palma; 2,537 6kg CO₂eq/litro para o Biodiesel Etílico de Soja; e 1,7676 kg CO₂eq/litro para o Biodiesel Etílico de Mamona. Em todos os casos, considera-se o ciclo completo de produção (EPE, 2005).

2.2.3 GÁS NATURAL VEICULAR (GNV), BIOGÁS (GNC) E BIOMETANO

Sabe-se que o Gás Natural Veicular (GNV) é 20% menos emissor de CO₂ do que a gasolina. Dessa forma, ele contribui para a redução da poluição (COPPE/UFRJ,



2011). Entretanto, quando comparado ao carvão mineral, as emissões de CO₂eq são 42% menores (CAMIOTO e REBELATTO, 2014).

O biogás (GNC) provê a oportunidade de erradicação de uma fonte de emissão do gás metano, por tratar a putrefação, *in natura*, de dejetos biológicos (DREGER, 2017). Além disso, a sua combustão é neutra, pois vem de matéria orgânica que absorve o CO₂ em seu ciclo de vida (SALATI, 2021).

O GNC pode ser substituído diretamente pelo GNV (ZANK *et al.*, 2020), uma vez que este já se encontra disponível para o consumidor, é mais barato (3,99/4,15 reais/m³) e permite uma autonomia 30 km maior para o mesmo volume no cilindro (CARDOSO, 2021).

Ademais, ressalta-se que é possível a produção do biogás a partir da biomassa da produção de Etanol, tornando o seu ciclo ainda mais eficiente (EPBR, 2020), sendo este, também, capaz de ofertar 17% da energia elétrica do Brasil em 1 ano (SALATI, 2021).

O biometano é produzido através da purificação do biogás e se estima que este possa substituir cerca de 34% do consumo anual do diesel. No Brasil, em 2020, o consumo de Diesel foi de 57,4 bilhões de litros e, em 1 km de percurso a diesel, se emite 1,229 mil g CO₂eq. Entretanto, se esse mesmo quilômetro for percorrido por um caminhão movido a biometano a emissão seria de 72 g CO₂eq (SALATI, 2021).

2.2.4 HIDROGÊNIO

O hidrogênio é produzido através da hidrólise da água, o que demanda consumo de energia. Em sua conversão, possui um maior poder calorífico com menor peso molecular, ou seja, mais energia com menos massa. Ademais, ele é estocável, o que significa que quando associado a outras formas de energia limpa, como: solar, geotérmica, hidráulica ou eólica, produz o chamado hidrogênio verde, que é acumulado em abundância. Posteriormente, esse gás pode ser convertido em energia e, ao invés de produzir CO₂ e outros elementos tóxicos, a queima do hidrogênio



produzirá água e eletricidade. Ele, também, pode ser combinado ao gás natural levando a uma queima mais limpa (EPBR, 2020).

Dependendo-se do tipo de energia utilizada para a sua produção, o hidrogênio pode ser classificado em cores: o preto ou marrom, quando produzido através do carvão; o cinza e o turquesa, quando produzido através do gás natural; o amarelo, quando produzido por meio das fontes energéticas disponíveis na rede; o azul, quando os gases que geram efeito estufa são capturados durante a produção; o rosa, quando produzido pela energia nuclear; e o verde, quando produzido através de energia renovável (BOTHE, 2020).

Apesar de ser mais fácil de estocar e transportar que outras formas de energia, esse gás demanda o uso de cilindros pressurizados, que podem ser complexos para algumas aplicações, e o uso de mais energia durante o processo de compressão. Desta forma, uma alternativa para o transporte do hidrogênio é a amônia, que pode ser armazenada à temperatura ambiente sem a necessidade de compressão, o que facilita o processo de transporte (EGUTE *et al.*, 2010).

Ademais, algumas empresas estão interessadas na produção do aço verde com o uso de hidrogênio ou de eletricidade em substituição ao gás ou ainda ao carvão, o que levaria as emissões de GEE a praticamente zero (VEJA, 2021).

2.2.5 ENERGIA SOLAR E EÓLICA

O vento já é usado como fonte de energia mecânica há muitos anos. Atualmente, tem sido utilizado, também, para a geração de energia elétrica, sendo um dos seus maiores problemas de penetração, o ruído gerado pelas pás. Há uma estimativa de que existam 20 mil geradores instalados mundialmente, com um custo médio de 48 Euros por MWh (GUERRA e YOUSSEF, 2011).

O vento é produzido por cerca de 2% da energia térmica solar absorvida da terra em associação com o movimento de rotação terrestre. O potencial eólico de uma região varia de acordo a características geográficas, como, por exemplo: relevo, obstáculos e altura (GUERRA e YOUSSEF, 2011; DUFFY *et al.*, 2020).



Os principais componentes de um sistema eólico são: o vento; o rotor; a transmissão; a caixa multiplicadora; o gerador elétrico; o mecanismo de controle; a torre e o transformador. Em termos de construção, o eixo de geração pode ser vertical ou horizontal, sendo que a quantidade de pás pode variar de acordo com a aplicação (GUERRA e YOUSSEF, 2011).

A energia solar foi criada e desenvolvida nos Estados Unidos em 1954, mas tinha um custo de produção muito elevado (acima de 100 USD/w), que foi sendo reduzido com o tempo e o avanço tecnológico (40 USD/w em 1980). Devido a um impulso do governo alemão para incentivar as energias renováveis, no ano 2000 (>10 USD/w), a China passou a ter uma maior participação no mercado e, com isso, o preço caiu ainda mais (>5 USD/w) (DW PLANET A, 2021a).

O maior problema da energia solar é que ela apenas funciona quando há sol e existem dificuldades no seu armazenamento (EPBR, 2020) (DW PLANET A, 2021a). Nesse contexto e levando em consideração que a noite existe um aumento na demanda de energia, não existe a possibilidade de suprir essa demanda com energia solar, sendo preciso iniciar o uso de usinas não renováveis e descartar parte da energia acumulada durante as horas de sol para não sobrecarregar o sistema (DW PLANET A, 2021a).

2.2.6 ENERGIA HIDROELÉTRICA

A energia hidráulica usa a energia potencial acumulada pela água represada em reservatórios, entretanto, é válido destacar que são necessárias condições geográficas favoráveis para a produção de eletricidade. Esse sistema tem a vantagem de permitir que a energia seja produzida por meio de comportas. Porém, sua capacidade é limitada pelo volume do reservatório, impactado pela potência incerta de chuvas e, conseqüentemente, de afluência de água. Nesse cenário, em alguns casos se faz necessário optar pelo esvaziamento do reservatório e abertura das comportas, o que leva a não geração de energia. Se, neste caso, fosse possível o armazenamento da energia produzida, ela poderia ser utilizada para aplicações futuras (ALENCAR *et al.*, 2009).



2.2.7 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Quase todas as energias renováveis possuem problemas de disponibilidade em certas condições. Portanto, para superar essa limitação, atualmente, existem diversas soluções disponíveis. Dentre elas: o uso de baterias de Ion de Lítio, que pelo recente processo de evolução passou a ser uma alternativa para armazenar energia produzida em excesso; o *Pumped Hydro Storage*, onde a água é bombeada para um lago no alto de uma colina ou para uma posição levada, com o uso da energia solar ou de outra fonte renovável, e, assim, como no exemplo do hidrogênio, quando a energia renovável não está presente ou suficiente, a água desce por uma turbina e gera eletricidade; a produção do hidrogênio por eletrólise da água, onde blocos são elevados por uma grua com a ajuda da energia solar e, durante a noite, eles são descidos, produzindo, assim, energia (DW PLANET A, 2021b); a suspensão de cargas de poços, incluindo poços de petróleo antigos, que são empilhadas e abaixadas momento da necessidade de energia (GRAVITRICITY, 2021).

Outra solução, abordada por uma companhia chamada *Form Energy* é a bateria Ferro-Ar. Ela possui uma tecnologia simples, mas que pode ser mais vantajosa do que as baterias de Ion de Lítio, pois armazenam energia por muitos dias, por meio do princípio básico de corrosão para o armazenamento de energia, possuindo 1/10 do custo das baterias de Ion de Lítio, o que equivale a, aproximadamente, 6 USD/kW contra 80 USD/kW e podem armazenar mais de 3 MW/acre (CLEARPATH ACTION, 2021; FORM ENERGY, 2021; MINARI, 2021).

2.2.8 ENERGIA GEOTÉRMICA

A energia geotérmica usa o calor da terra para produzir vapor de água e, com isso, produzir energia elétrica. Ela foi explorada em escala experimental, inicialmente, na Itália, em 1904, porém não tinha um potencial econômico de interesse. Em 1970, com a crise energética, a Islândia, que era fortemente dependente de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade teve que explorar mais essa tecnologia e, hoje, possui cerca de 30% da sua matriz energética baseada em energia geotérmica, que está disponível 24 horas por dia e 365 dias no ano (DW PLANET A, 2020).



Praticamente, todos os países possuem potencial de energia geotérmica. Ademais, mapas com o potencial geotérmico de cada região podem facilmente serem encontrados. Estima-se que de 3 a 4% da demanda mundial por energia possa ser coberta com energia geotérmica e, a Indonésia, presente no círculo de fogo, é o país com maior potencial geotérmico (DW PLANET A, 2020).

O processo de produção dessa energia consiste em bombear água através de um poço até uma região subsuperficial de interesse geotérmico e usar o vapor que retorna desse bombeio para produzir eletricidade em uma turbina de vapor. Esse processo é chamado de uso indireto, mas há também o uso direto, onde o vapor gerado é utilizado para o aquecimento. Nesse contexto, a produção de eletricidade pode acontecer em um sistema fechado (CLGS, *Closed-loop Geothermal System*) ou através de fraturas (EGS, *Enhanced Geothermal System*), tendo, esse segundo, um potencial de causar terremotos (ALLAHVIRDIZADEH, 2020; DW PLANET A, 2020)

O poço utilizado na produção de energia geotérmica tem um processo de perfuração muito similar a perfuração de um poço de petróleo, porém sofre com maiores desafios tecnológicos, uma vez que precisa atravessar zonas de altas temperaturas, rochas vulcânicas com maior dureza e muitas vezes fraturadas, que afetam as ferramentas de perfuração e, conseqüentemente, elevam o investimento inicial na construção da planta geotérmica (ALLAHVIRDIZADEH, 2020; DW PLANET A, 2020).

Além disso, existe, também, a opção de utilizar poços de petróleo abandonados para a produção direta ou indireta de energia geotérmica (CAULK e TOMAC, 2017).

Entretanto, um dos principais problemas da energia geotérmica é que ela é produzida em um local específico e é de difícil transporte. Dessa forma, uma alternativa seria o uso da energia Geotérmica para a produção do hidrogênio e posterior exportação, aproveitando, assim, ao máximo o potencial de algumas regiões do planeta (HILL, 2021).



2.3 CAPTURA, UTILIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO

A transição energética é um fenômeno que acontecerá com a presença de fontes emissoras de carbono. Dessa forma, o mundo pode precisar da remoção de bilhões de toneladas de dióxido de carbono todos os anos para que até 2050 seja possível reduzir as emissões que não podem ser completamente eliminadas e trazer o clima de volta às condições normais (TEMPLE, 2021)

Entretanto, tornar os sistemas mais eficientes ou iniciar o movimento para a utilização de combustíveis renováveis, não será suficiente para atingir as metas de redução da emissão dos GEE. Sendo assim, se faz necessário encontrar uma forma de se conseguir usar os combustíveis que estão disponíveis hoje e não permitir que o CO₂ gerado pela combustão destes entre direto na atmosfera. Ademais, para os casos onde não se pode parar a emissão, é preciso capturar esse CO₂ direto do ar com a chamada *Direct Air Capture* (DAC) e, dessa forma, dar uso ou permanentemente armazenar esse carbono. A essa técnica de captura e armazenagem dá-se o nome de *Carbon Capture and Storage* (CCS) ou *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS). Ainda, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), sem a Captura de Carbono será impossível atingir as metas estipuladas (DW PLANET A, 2021b; EKELAND *et al.*, 2021; BABARINDE e ADIO, 2020).

Contudo, vale destacar que essa não é uma ideia nova, pois lidar com o CO₂ já foi um desafio no desenvolvimento de submarinos e, também, durante a corrida espacial. Entretanto, ressalta-se que esse grupo de tecnologias novas ou já existentes, pode significativamente reduzir as emissões de CO₂ em plantas de energia a gás ou carvão, e, ainda, ser aplicável a outras aplicações industriais, como: a indústria de cimento ou de processamento de gás natural. Além disso, mais de 40% das emissões de CO₂ nos Estados Unidos vem da geração de energia e, a tecnologia de CCS, é capaz de reduzir entre 80 e 90% dessas emissões, pois, deve-se considerar que, somente as fábricas com plantas a carvão geram 3.5 milhões de toneladas de CO₂ por ano nos Estados Unidos (BRAHMBHATT, 2016; DW PLANET A, 2021b).



A despeito dos benefícios, a captura direta de ar, ainda possui um alto custo, ou seja, é preciso desenvolvimento tecnológico e criação de uma economia ao redor dessa técnica para torná-la viável, seja por créditos de carbono, taxaço de poluidores ou por incentivos do governo (BRAHMBHATT, 2016; DW PLANET A, 2021b).

O ponto de viabilidade econômica dessa técnica é de, aproximadamente, 100 dólares por tonelada. Clientes nos Estados Unidos, normalmente, pagam entre 65 e 110 dólares em dióxido de carbono usado para propósitos comerciais. Chegando a esse valor, esta estratégia pode resolver de 10 a 20% das emissões que ainda são muito difíceis e caras de eliminar e, ainda, competir com o custo de captura na fonte da emissão (BRAHMBHATT, 2016).

Outro ponto que deve ser considerado é que as tecnologias existentes para a captura de CO₂ usam de 25 a 40% da energia produzida pela planta de energia (BONILLA, 2020) e, também, aumentam o consumo de água, que já é alto para usinas de carvão. É válido destacar que, em alguns casos, com a implementação da CCS esse consumo de água chega a dobrar (ROSA *et al.*, 2020).

Com relação a DAC, salienta-se que ela pode servir para gerar créditos de carbono, o que ajudaria áreas com dificuldades de investir em combustíveis mais limpos, no atingimento das metas de neutralidade de carbono (NET-ZERO ou NZE) (TEMPLE, 2021).

É, também, possível armazenar o CO₂ capturado em formações geológicas, como: reservatórios de óleo e gás; formações salinas profundas; jazidas de carvão; além de altas profundidades oceânicas. Há ainda, a possibilidade de se perfurar um poço ou de aproveitar poços já depletados para o armazenamento do CO₂ (BONILLA, 2020). Uma outra alternativa em estudo, é a mineralização geológica do CO₂ através da injeção em locais com a presença de Cálcio e Magnésio para a formação de carbonatos, desde que existam as condições de pressão e temperaturas adequadas (GADIKOTA, 2021).



Outra estratégia que está sendo estudada pela Universidade Federal do Paraná, é um incinerador que pode ser utilizado para a queima de lixo. Após este processo, os gases resultantes da queima desse resíduo são tratados com o uso de microalgas, que tem uma grande capacidade de absorção de CO₂ (UFPR TV, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz renovável mundial está se expandindo, mas não ainda a um nível que elimine os combustíveis fósseis. Além disso, a demanda por energia vem crescendo e as mudanças climáticas têm afetado regimes de ventos e chuvas, impactando a capacidade de geração de energias renováveis, o que leva ao risco de apagão ou racionamento de energia (CARRANÇA, 2021). Dessa forma, ações adicionais são requeridas para que sejam emitidos menos GEE (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021), como observa-se no caso da captura de carbono, seja pelo meio de filtros, químicos (BABARINDE e ADIO, 2020) ou ainda pelo uso das microalgas (UFPR TV, 2016).

Um outro caminho é o uso mais eficientes dos combustíveis ou por eficiência energética, a exemplo da cogeração (MITIUKOV; SPIRIDONOV e SAMIGULLINA, 2021), do uso de combustíveis que poluem menos, como o biogás (DREGER, 2017) e o etanol (SILVA *et al.*, 2004). Ademais, o biogás e demais biocombustíveis, assim como o uso de células de combustível podem ser soluções mais eficientes e práticas, dada a possibilidade de uso de redes de disseminação desses combustíveis já existentes.

Entretanto, verifica-se que o uso de veículos elétricos não necessariamente é a melhor opção para todos os países. Nesse contexto, é importante considerar que no Brasil são emitidos 0,074 kg CO₂e/kWh, enquanto, em outros países do hemisfério norte, esse número é de 1 kg CO₂e/kWh (CARBON FOOTPRINT, 2020). Nesse cenário, há, também, o Ciclo Combinado, que é a definição que se dá para a combinação de sistemas de motores a combustão utilizados para a geração de eletricidade com sistemas de geração elétrica por vapor de água, que aproveitam a temperatura dos



gases de escape, aumentando a eficiência energética (MITIUKOV; SPIRIDONOV e SAMIGULLINA, 2021).

A indústria do cimento é responsável por 8% das emissões mundiais de CO₂, pelo processo de aquecimento ou pela produção da sua principal matéria prima, o Clínquer (reação química que transforma o calcário virgem em cal, dividindo o material em óxido de cálcio e CO₂). Neste processo, encontram-se 90% das emissões de GEE relacionadas a esse tipo de indústria (RODGERS, 2018). Entretanto, há a possibilidade de produzi-lo com 30% menos emissões (MEHRA, 2016). Nesse contexto, uma alternativa para o cimento Portland é o LC³, um cimento que usa quase metade do Clínquer e argila, que é um produto descartado pela mineração. Ademais, segundo estudos, o cimento LC³ tem um desempenho mecânico similar ao Portland (BARBALHO; SILVA e RÊGO, 2020).

Em termos de soluções para a redução do impacto, o uso da queima de resíduos ao invés de combustíveis sólidos, já proporcionou uma redução da pegada de CO₂ em 18%, nas últimas décadas, o que pode ser ainda melhorado com outras fontes de energia mais limpas e com a captura de carbono (RODGERS, 2018).

Com respeito às energias renováveis, as limitações que são o armazenamento e o transporte podem ser resolvidas com o emprego de baterias mais econômicas e com maior capacidade de carga x tempo, como o caso da bateria de ferro-ar (MINARI, 2021) e, principalmente, no caso do hidrogênio, se tornarem fontes ilimitadas de energia (EPBR, 2020). Além de fornecerem a alguns lugares do mundo, como regiões com maior potencial eólico ou regiões com maior potencial geotérmicos, a denominação de fornecedores globais de hidrogênio verde, que poderá ser transportado por gasodutos, caminhões ou navios, proporcionando, assim, o acesso a uma fonte limpa de energia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição energética é um terreno fértil para a inovação, e precisa da criatividade para o atingimento das metas estabelecidas no acordo de Paris (GATES, 2021). Como



apresentado no decorrer deste artigo, a solução não é única, pois passa pela adoção de diversas tecnologias existentes, em desenvolvimento ou que ainda não foram pensadas (BAKER HUGHES, 2021b), especialmente levando em consideração o crescimento da população mundial e o aumento da demanda de energia elétrica (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

Nesse contexto, visou-se responder: quais são as estratégias de transição energética? Tendo como objetivo principal apresentar algumas estratégias em andamento para o processo de transição energética, abordando o tema sobre três aspectos principais, sendo eles: a eficiência energética; a energia renovável; e a captura e sequestro de carbono. Sendo assim, ante ao exposto, apresentou-se, na categoria de eficiência energética: os programas de etiquetagem; utilização de material reciclado; automação e utilização de inteligência artificial; e gerenciamento das emissões de metano. Na categoria de energia renovável: o etanol; o biodiesel; o biometano; o biogás; o gás natural; o hidrogênio; a energia solar, eólica, hidroelétrica, geotérmica; e a armazenagem de energia. E, por fim, a estratégia de captura, utilização e armazenamento de carbono

Na área de eficiência energética pode-se citar a busca por equipamentos e sistemas mais eficientes que consumam menos energia e menos recursos (SANTOS *et al.*, 2015), demonstrando, assim, o uso de programas de etiquetagem (CELLA; GUARDA e DOMINGOS, 2020). Pode-se, também, citar os processos de automação e de técnicas de inteligência artificial empregadas para aumentar a eficiência de diversos sistemas (PARKES e HUGHES, 2020).

Com relação às energias renováveis, apontou-se que elas estão em plena expansão, bem como o desenvolvimento de novas técnicas de armazenamento de energia (GRAVITRICITY, 2021), o barateamento de equipamentos produzidos para a produção dessas energias, como o caso ocorrido com a energia solar (DW PLANET A, 2021a), o avanço tecnológico, que tem também tornado essas técnicas mais eficientes, e o uso de combustíveis mais limpos, como é o caso de gás natural veicular ou ainda o etanol (EPE, 2005, O'SHEA *et al.*, 2020).



Entretanto, é válido lembrar que ainda existem áreas em que a utilização de combustíveis fósseis não poderão ser completamente eliminadas. Dessa forma, a técnica de captura de carbono é a melhor solução, seja pela remoção direta de carbono no ar ou pela captura de carbono na fonte, técnicas estas que ainda são caras e geram ineficiências energéticas, mas que podem capturar de 80-90% do CO₂ emitido (BABARINDE e ADIO, 2020).

Como resultados, indica-se que a integração e o aprimoramento tecnológico das distintas fontes de energias devem resultar em maiores reduções das emissões de CO₂ e de GEE. Entretanto, destaca-se que para o atingimento das metas de redução do aquecimento global, é preciso inovação e o aprimoramento em cada um dos aspectos apresentados (GATES, 2021), sendo este, portanto, um caminho de oportunidades para o desenvolvimento de outros trabalhos em cada uma das áreas aqui apresentadas, visto que cada redução de CO₂ conta.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, G. Uso de etanol no Brasil evitou emissão de 556 mil t de CO₂ desde 2003, diz Unica. **Reuters**, junho de 2021. Disponível em: <https://mobile.reuters.com/article/amp/idBRKCN2DE2K2-OBRBS>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

ALENCAR, T. T.; LEITE, P. T.; CARNEIRO, A. F. M.; e CARVALHO, A. C. P. L. F. Desenvolvimento de uma ferramenta inteligente amigável para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência. **VIII Th Latin American Congress Electricity Generation and Transmission**, 2009.

ALCOA. Alcoa triplica o uso de alumínio reciclado e reduz emissões de gases de efeito estufa. **Alcoa**, agosto de 2020. Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/news/releases?id=2020/08/alcoa-triplica-o-uso-de-aluminio-reciclado-e-reduz-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-&year=y2020>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

ALLAHVIRDIZADEH, P. A review on geothermal wells: Well integrity issues. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 1-19, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124009>. Acesso em: 28 de julho de 2022.

BABARINDE, F.; ADIO, M. A Review of Carbon Capture and Sequestration Technology. **Journal of Energy Technology and Environment**, p. 1-11, 2020. Disponível em: DOI:10.37933/nipes.e/2.2020.1. Acesso em: 24 de junho de 2022.



BARBALHO, E. de A.; SILVA, E. F. da; RÊGO, J. H. da S. Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC3 para diferentes teores de substituição. **Revista Matéria**, vol. 25, nº 1, p. 1-15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0906>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

BAKER HUGHES. *How ready are we to tackle CO2 emissions?* **YouTube**, maio de 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=rnbS-vUio5A>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

BAKER HUGHES. *VitalyX. Baker Hughes*, julho de 2021b. Disponível em: <https://www.bakerhughesds.com/measurement-sensing/vitalyx-oil-monitoring-platform>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

BONILLA, P. *Carbon Capture Infographic*. **ResearchGate**, 2020. Disponível em: DOI:10.13140/RG.2.2.31039.94881. Acesso em: 28 de julho de 2022.

BRAHMBHATT, S. R. *The Economics of Carbon Capture*. **CryoGas International**, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/302987161_The_Economics_of_Carbon_Capture. Acesso em: 28 de junho de 2022.

BALES, M. P. *et al.* A avaliação do programa brasileiro de etiquetagem veicular demonstra a necessidade da melhoria contínua. **XXIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA**, vol. 2, num. 1, p. 1-11, setembro de 2015. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/a-avaliacao-do-programa-brasileiro-de-etiquetagem-veicular-demonstra-a-necessidade-da-melhoria-continua-20178>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

BOTHE, D. *Green, blue hydrogen - Potentials and security of supply - DVGW Congress Perspectives for H2 Module #1*. **Frontier-Economics**, outubro de 2020. Disponível em: <https://www.frontier-economics.com/media/4258/prs-bothe-green-blue-hydrogen-potential-and-security-of-supply-en-stc.pdf>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

CARDOSO, R. B. *et al.* Avaliação da economia de energia, atribuída a ações de etiquetagem energética, em motores de indução no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, vol. 15, nº 1, p. 29-47, 2009. Disponível em: <https://www.sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/229/210/>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

CARDOSO, L. Conheça o combustível ecológico que é mais barato e eficiente do que o GNV. **Jornal Extra**, junho de 2021. Disponível em: <https://extra.globo.com/economia/conheca-combustivel-ecologico-que-mais-barato-eficiente-do-que-gnv-25043071.html>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

CAMIOTO, F. de C.; REBELATTO, D. A. do N. Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço. **Gest.**



Prod., v. 21, n. 4, p. 732-744, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-530x448/12>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

CAULK, R. A.; TOMAC, I. *Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production*. **Renewable Energy**, vol. 112, p. 388-397, 2017. Disponível em: https://econpapers.repec.org/article/eeerenene/v_3a112_3ay_3a2017_3ai_3ac_3ap_3a388-397.htm. Acesso em: 28 de julho de 2022.

CELLA, A. M.; GUARDA, E. L. A. de; DOMINGOS, R. M. A. Desempenho energético de um edifício de escritórios: aplicação do método simplificado da nova proposta de etiquetagem de edifícios comerciais. **XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC**, p. 1-8, dezembro de 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347949765_DESEMPENHO_ENERGICO_DE_UM_EDIFICIO_DE_ESCRITORIOS_APLICACAO_DO_METODO_SIMPLIFICADO_DA_NOVA_PROPOSTA_DE_ETIQUETAGEM_DE_EDIFICIOS_COMERCIAIS. Acesso em: 27 de junho de 2022.

CARBON FOOTPRINT. *Country Specific Electricity Grid Greenhouse Gas Emission Factors*. **Grid Electricity Emissions Factors v1.1**, 2020. Disponível em: https://www.carbonfootprint.com/docs/2020_06_emissions_factors_sources_for_2020_electricity_v1_1.pdf. Acesso em: 28 de junho de 2022.

CARRANÇA, T. Apagão ou racionamento: 10 termos para entender a crise do setor elétrico. **BBC**, junho de 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-57647243>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

CLEARPATH ACTION. *A "Reversible Rust" Battery That Could Transform Energy Storage*. **Youtube**, julho de 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1n1qZHni718&t=32s>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

COPPE/UFRJ - INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA. Inventário e Cenário de Emissões dos Gases de Efeito Estufa da Cidade do Rio de Janeiro. **COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/1712030/DLFE-222982.pdf/NelsonSINVENTARIOFINALMAC_Resumo_Geral_Inv_e_Cenario_v05abr_E.pdf. Acesso em: 28 de junho de 2022.

DREGER, I. **Biogás: contribuição eco-econômica: Produção compartilhada ou condominial de biogás para pequenas propriedades rurais (Portuguese Edition)**. Novas Edições Acadêmicas, 2017.

DUFFY, A. *et al.* Land-based wind energy cost trends in Germany, Denmark, Ireland, Norway, Sweden and the United States. **Applied Energy**, v. 277, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114777>. Acesso em: 28 de junho de 2022.



DW PLANET A. *Geothermal energy is renewable and powerful. Why is most of it untapped?* **YouTube**, dezembro de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=c7dy0hUZ9xl>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

DW PLANET A. *How solar energy got so cheap, and why it's not everywhere (yet).* **YouTube**, janeiro de 2021a. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sUvaYycoWql&t=95s>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

DW PLANET A. *Can carbon capture actually work?* **YouTube**, janeiro de 2021b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JHs-eWHb16g&t=105s>. Disponível em: 28 de junho de 2022.

EGUTE, N. dos S. *et al.* Amônia como fonte de hidrogênio para utilização em células a combustível. **5º Congresso Internacional de Bioenergias**, p. 1-6, 2010. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2010/eventos/15803.pdf>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

EKELAND, A. *et al.* *Is There a Future for Carbon Capture and Storage?* **Hradec Economic Days**, 2021. Disponível em: DOI:10.36689/uhk/hed/2021-01-016. Acesso em: 26 de junho de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Potencial de redução de emissões de co2 em projetos de produção e uso de biocombustíveis**. EPE, 2005. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE%20-%202%C2%BA%20Biocombust%C3%ADveis%20x%20MDL\[1\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE%20-%202%C2%BA%20Biocombust%C3%ADveis%20x%20MDL[1].pdf). Acesso em: 27 de junho de 2022.

EPBR. André Clark, diretor geral da Siemens Energy Brasil. EPBR, **Youtube**, outubro de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=DBUV0kkyFpw>. Acesso em: 15 de Março de 2021.

FREITAS, E. P. de; ROSEIRA, A. M.; SAMPAIO, M. de A. Geopolítica do etanol: soberania energética e projeção internacional do Brasil (1930-2015). **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, nº 45, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.28332>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

FONTES, G. Geladeira 'econômica' gasta dobro do ideal, mas mantém desconto de imposto. **Uol**, Maio de 2021. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2021/05/20/geladeira-gasto-energia-etiqueta-inmetro.htm>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

FERREIRA, L. Qual a pegada de carbono de R\$ 1? **Revista Galileu**, s.d. Disponível em: <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI204587-17933,00-QUAL+A+PEGADA+DE+CARBONO+DE+R.html>. Acesso em: 27 de junho de 2022.



FIUZA, R. da P. *et al.* A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. **Química Nova**, vol. 35, ed. 8, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000800025>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

FORM ENERGY. *Battery Technology*. **Form Energy**, julho de 2021. Disponível em: <https://formenergy.com/technology/battery-technology/>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

GADIKOTA, G. *Carbon Mineralization pathways for Carbon Capture, Storage and Utilization*. **Communications Chemistry**, v. 4, n° 23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s42004-021-00461-x>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

GATES, B. *A new way to invest in clean energy innovation: Breakthrough Energy Catalyst*. **Youtube**, julho de 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=oD17uLWd2qA>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

GRAVITRICITY. *Gravity Energy Storage*. **Gravitricity**, julho de 2021. Disponível em: <https://gravitricity.com/>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

GUERRA, J. B. S. O. de A.; YOUSSEF, Y. A.; **Energias Renováveis - Energia Eólica**. Livro Digital: Jelare, 2011. Disponível em: <https://docplayer.com.br/583283-Energia-eolica-energias-renovaveis-paulo-roberto-rodrigues-jose-baltazar-salgueirinho-osorio-de-andrade-guerra-youssef-ahmad-youssef.html>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

HILL, L. B. **PIVOT2021: Geothermal Reimagined Conference**. [S.l.]: [s.n.], julho de 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050**. 4° revisão, outubro de 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Acesso em: 24 de junho de 2022.

MEHRA, P. LC3 reduz pegada de carbono na construção. **Valor**, novembro de 2016. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2016/11/04/lc3-reduz-pegada-de-carbono-na-construcao.ghtml>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

MELO, R. H. J. de. *et al.* Reciclagem metálica veicular com redução na emissão de CO_2 e consumo energético. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 06, ed. 06, vol. 16, pp. 96-140. Junho de 2021. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/consumo-energetico>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/consumo-energetico. Acesso em: 27 de junho de 2022.

MINARI, G. Bateria de ferro-ar 10x mais barata que o lítio armazena 100 horas de energia. **CanalTech**, julho de 2021. Disponível em:



<https://canaltech.com.br/inovacao/bateria-de-ferro-ar-10x-mais-barata-que-o-litio-armazena-100-horas-de-energia-190895/>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

MITIUKOV, N. W.; SPIRIDONOV, S. V.; SAMIGULLINA, G. Z. *Cogeneration Plant Optimization*. **International Science and Technology Conference**, p. 1-4, 2021. Disponível em: doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042008. Acesso em: 28 de junho de 2022.

NATIONAL GEOGRAPHIC. *Causes and Effects of Climate Change*. **YouTube**, agosto de 2017a. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=G4H1N_yXBiA. Acesso em: 24 de junho de 2022.

NATIONAL GEOGRAPHIC. *Air Pollution 101*. **YouTube**, outubro de 2017b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=e6rglsLy1Ys&t=16s>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

O'SHEA, R. *et al.* *Using biogas to reduce natural gas consumption and greenhouse gas emissions at a large distillery*. **Applied Energy**, v. 279, p. 1-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115812>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

OGWU, C. E.; OLUWAFERANMI, F. M.; JOHNSON, A. I. *Impact of Gas Flaring on Climate Change (A Case Study of Niger Delta Region of Nigeria)*. **Global Scientific Journals**, v. 09, ed. 05, p. 1781-1789, maio de 2021. Disponível em: https://www.globalscientificjournal.com/researchpaper/IMPACT_OF_GAS_FLARING_ON_CLIMATE_CHANGE_A_CASE_STUDY_OF_NIGER_DELTA_REGION_OF_NIGERIA_.pdf. Acesso em: 27 de junho de 2022.

PARKES, G. HUGHES, B. *Monitoring Lubricants in the Digital Era*. **Machinery Lubrication**, ed. 4, 2020. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31836/digital-lubricant-monitoring>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

RODGERS, L. Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO₂ que está por toda parte, mas você talvez não saiba. **BBC News**, dezembro de 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

ROSA, L. *et al.* *Hydrological Limits to Carbon Capture and Storage*. **Nature Sustainability**, 2020. Disponível em: <https://nature.berkeley.edu/matteolab/wp-content/uploads/2020/05/CCS-water-Nature-Sustainability-2020.pdf>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

SANTOS, T. S. dos. *et al.* Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. **Eng Sanit Ambient**, v. 20, n. 4, out/dez de 2015. Disponível em: DOI: 10.1590/S1413-41522015020040125106. Acesso em: 27 de junho de 2022.



SIMÕES DOS SANTOS, T. et al. Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais. **Eng Sanit Ambient**, p. 595-602, 2015.

SILVA, E. P. et al. **O Etanol como Fonte de Hidrogênio para Células a Combustível na Geração Distribuída de Energia Elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2004.

SALATI, P. De onde vem o que eu como (e uso): resíduos da cana-de-açúcar geram o biogás, que vira energia elétrica e combustível substituto do diesel. **G1**, julho de 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/agro-a-industria-riqueza-do-brasil/noticia/2021/07/17/de-onde-vem-o-que-eu-como-e-uso-residuos-da-cana-de-acucar-geram-o-biogas-que-vira-energia-eletrica-e-combustivel-substituto-do-diesel.ghtml>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

THOMAS, J.; KUMAR, A.; KUMAR, A. *Agricultural Methane Emissions: Consequences and Mitigations*. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 02, ed. 09, p. 729-732, 2020. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.089>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

TORRES, C. Nissan terá carros elétricos com célula de etanol para dispensar recarga. **MobiAuto**, junho de 2021. Disponível em: <https://www.mobiauto.com.br/revista/nissan-tera-carros-eletricos-com-celula-de-etanol-para-dispensar-recarga/909>. Acesso em: 27 de junho de 2022.

TEMPLE, J. *What it will take to achieve affordable carbon removal*. **MIT Technology Review**, junho de 2021. Disponível em: <https://www.technologyreview.com/2021/06/24/1027083/what-it-will-take-to-achieve-affordable-carbon-removal/>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

TV BRASILGOV. Saiba mais sobre o Acordo ambiental de Paris. **YouTube**, outubro de 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ih62P5U4-m8&t=485s>. Acesso em: 24 de junho de 2022.

UFPR TV. Scientia - Tratamento de emissões e efluentes com microalgas. **Youtube**, novembro de 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=7EAGxyzYF6bQ>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

VEJA. Siderúrgicas investem em “aço verde” para cumprir metas sustentáveis. **Veja**, julho de 2021. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/agenda-verde/siderurgicas-investem-em-aco-verde-para-cumprir-metas-sustentaveis/>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. *Air pollution*. **World Health Organization**, 29 Junho 2021. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Acesso em: 24 de junho de 2022.



ZANARDI, M. dos S.; COSTA JUNIOR, E. F. da. Tecnologia e perspectiva da produção de etanol no Brasil. **Revista Liberato**, v. 17, nº 27, p. 20-34, 2016. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/390>. Acesso em: 27 de julho de 2022.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis. **Exacta – Engenharia de Produção**, vol. 18, nº 3, p. 502-516, 2020. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.5585/exactaep.v18n3.10802>. Acesso em: 28 de junho de 2022.

Enviado: Junho, 2022.

Aprovado: Junho, 2022.

¹ Graduado em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estácio de Sá (UNESA), e Graduado em Tecnologia Mecânica com ênfase em Automação Industrial pelo CEFET/RJ. Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (UNITAU), MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), MBA em Gestão de Projetos pela Fundação de apoio ao CEFET/RJ, Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Candido Mendes (UCAM), Especialista em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estácio de Sá (UNESA) e certificado Supervisor de Radioproteção pela CNEN. ORCID: 0000-0002-6647-3914.

² Orientador. Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Taubaté, UNITAU, com pós-graduação em Administração de Marketing e Engenharia de Segurança do Trabalho pela Escola Politécnica de Pernambuco. Mestre em Gestão de Desenvolvimento Regional pela UNITAU e doutora em Engenharia de Produção pela Escola Politécnica da USP. ORCID: 0000-0001-8082-5763.