

AS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO: SUAS APLICAÇÕES NO SISTEMA ENERGÉTICO GLOBAL EM EQUILÍBRIO COM O MEIO AMBIENTE

HYDROGEN FUEL CELLS: ITS APPLICATIONS IN THE GLOBAL ENERGY SYSTEM IN BALANCE WITH THE ENVIRONMENT

Robson Pereira Rodrigues¹, José Eduardo Silva Souza¹, José Humberto Machado Tambor²

Resumo: As células de combustível de hidrogênio experimentaram ciclos de expectativas excessivas seguidas de baixos resultados. No entanto, um corpo crescente de evidências sugere que essas tecnologias formam uma opção atraente para a descarbonização profunda dos sistemas globais de energia e do meio ambiente, e que melhorias recentes em seus custos e desempenho também apontam para a viabilidade econômica. Os veículos a hidrogênio estão disponíveis comercialmente em vários países e foram vendidos 225.000 sistemas de aquecimento doméstico a células de combustível. Isso representa uma mudança na situação de apenas cinco anos atrás. Portanto, este artigo teve como objetivo investigar o potencial que as células de combustível de hidrogênio têm para a provisão de energia limpa bem como suas aplicações no sistema energético global. Como procedimento metodológico, foi realizada uma pesquisa bibliográfica exploratória. Espera-se com esta revisão mostrar que os desafios em torno do custo e desempenho permanecem, e melhorias consideráveis ainda são necessárias para o hidrogênio se tornar verdadeiramente competitivo. Mas tal competitividade, no futuro de médio prazo, não parece mais uma perspectiva irreal, o que justifica plenamente o crescente interesse e apoio político a essas tecnologias em todo o mundo. Embora existam fortes razões para acreditar que o hidrogênio e as células de combustível podem experimentar uma trajetória de custo e desempenho semelhante à da energia solar fotovoltaica e das

baterias, vários desafios ainda precisam ser superados para que o hidrogênio e as células de combustível atinjam seu potencial.

Palavras-Chave: célula de hidrogênio; meio ambiente; célula de combustível e combustível fóssil

Abstract: *Hydrogen fuel cells experienced cycles of excessive expectations followed by low results. However, a growing body of evidence suggests that these technologies form an attractive option for decarbonising deep global energy and environmental systems, and that recent improvements in their costs and performance also point to economic viability. Hydrogen vehicles are commercially available in several countries and 225,000 domestic heating systems have been sold to fuel cells. This represents a change in the situation just five years ago. Therefore, this article aims to investigate the potential that hydrogen fuel cells have for the provision of clean energy as well as their applications in the global energy system. As a methodological procedure will be carried out an exploratory bibliographic research. This review is expected to show that the challenges around cost and performance remain, and considerable improvements are still required for hydrogen to become truly competitive. But such competitiveness in the medium-term future no longer seems an*

¹Centro Universitário ENIAC. e-mail: robson.lacorte@gmail.com

²Professor Doutor: Centro Universitário ENIAC. E-mail: jose.humberto@eniac.edu.br

unrealistic prospect, which fully justifies the growing interest and political support for these technologies around the world. While there are strong grounds for believing that hydrogen and fuel cells can experience a cost and performance trajectory similar to those of solar PV and batteries, several challenges must still be overcome for hydrogen and fuel cells to finally live up to their potential

Keywords: *hydrogen cell; environment; fuel cell and fossil fuel*

I. INTRODUÇÃO

Sabe-se que em 2017, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) - excluindo as emissões decorrentes de mudanças no uso da terra - alcançaram um recorde de 49,2 GtCO₂ e, segundo a (SEEG, 2018). Este é um aumento de 1,1% em relação ao ano anterior. As emissões da mudança de uso da terra, que variam de ano para ano por causa das condições climáticas, adicionaram mais 4,2 GtCO₂, elevando o total para 53,5 GtCO₂e (ONU, 2018). Apesar do crescimento modesto na economia mundial, as emissões de CO₂ da combustão de combustíveis fósseis, produção de cimento e outros processos industriais permaneceram relativamente estáveis de 2014 a 2016 (MATOS, 2017). Isso trouxe otimismo para as discussões de política climática, indicando que as emissões globais de GEE podem mostrar sinais de pico. No entanto, estimativas preliminares das emissões globais de CO₂ de combustíveis fósseis, indústria e cimento para 2017 sugerem um aumento de 1,2%.

Os principais impulsionadores do aumento são o crescimento do produto interno bruto (PIB) (cerca de 3,7%) e a redução mais lenta da energia, e especialmente da intensidade do carbono, em comparação com o período de 2014 a 2016 (ONU, 2014).

O aumento de 2017 deixa uma incerteza considerável sobre se a desaceleração de 2014-2016 foi impulsionada principalmente por fatores econômicos de curto prazo. Uma vez que as

emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis, indústria e cimento dominam as emissões totais de GEE, as mudanças nas emissões de CO₂ tiveram a maior influência nas emissões de GEE de 2014 a 2017 (MATOS, 2017).

As mudanças na utilização do solo permaneceram relativamente baixas, apesar das grandes variações anuais e incerteza nos dados de entrada. O pico global de emissões até 2020 é crucial para atingir as metas de temperatura do Acordo de Paris, mas a escala e o ritmo das ações de mitigação atuais ainda são insuficientes (M.M.A, 2016).

O pico global de emissões de GEE é determinado pelas emissões agregadas de todos os países. Embora tenha havido progresso constante no número de países que atingiram o pico de suas emissões de GEE ou se comprometeram a fazê-lo no futuro, os 49 países que até agora o fizeram e os 36% de participação global as emissões que representam, não são grandes o suficiente para permitir que as emissões mundiais atinjam o pico no curto prazo (PEREIRA, 2014).

Até 2030, até 57 países, representando 60% das emissões globais, terão o pico, se os compromissos forem cumpridos. Os países que já atingiram o pico têm um papel crítico a desempenhar na determinação do momento e do nível de pico de emissões globais, já que a taxa de descarbonização de cada país, após o pico, será um fator determinante nas emissões cumulativas globais. No entanto, é claro que os países que atingiram o pico de suas emissões de GEE não reduziram suas emissões a uma taxa suficientemente rápida desde o ano de pico.

Coletivamente, os membros do G20 estão projetados para cumprir as promessas de Cancun até 2020, mas ainda não estão no caminho para essa realização até 2030. Enquanto os membros do G20 estão coletivamente no caminho certo para alcançar os níveis de emissões em 2020, implícitos pelos compromissos de Cancun, alguns países como Canadá, Indonésia, México, República da Coreia, África do Sul e EUA não estão projetados para

cumprir suas promessas em Cancun, ou há incerteza sobre se eles irão alcançá-los.

Atualmente, os países do G20 não estão coletivamente a caminho de cumprir suas metas incondicionais para 2030. Cerca de metade das trajetórias de emissões de GEE, os membros do G20 ficam aquém de alcançar suas metas como a Argentina, Austrália, Canadá, República da Coreia, Arábia Saudita, África do Sul e EUA.

Três membros do G20 (Brasil, China e Japão) estão a caminho de cumprir suas metas de redução do CO₂ sob as políticas atuais, enquanto as emissões sob as políticas atuais de três países adicionais (Índia, Rússia e Turquia) são projetadas para serem mais de 10% abaixo de sua NDC incondicional. Isso pode, em alguns casos, refletir uma ambição relativamente baixa nos NDCs. É incerto se dois países (Indonésia e México) estão a caminho de cumprir suas metas de NDC em 2030 sob as políticas atuais.

Hoje muitas empresas de automóveis, em busca de energia mais limpa da redução de emissão CO₂ nas cidades, buscam o aperfeiçoamento de veículos com zero carbono por meio de, principalmente, células de combustível que já foram demonstradas com sucesso a partir de 2004.

A maioria dos problemas iniciais de desenvolvimento, como o arranque de temperaturas e temperaturas abaixo de zero, foi resolvida. Os veículos hoje demonstraram cerca de 3.000 horas (dependendo da velocidade: 150-300 mil km) de operação. A operação de partida e parada e o ciclo de carga transitória íngreme (levando a problemas de gerenciamento de água e transporte de gás) afetaram principalmente a vida útil desses sistemas FC (PEI e CHEN, 2014).

Esses e outros problemas de durabilidade estão prontos para serem resolvidos. Os altos custos, no entanto, ainda são um grande problema, apesar da significativa redução de custos alcançada nos últimos anos (DUPONT, 2015).

Em 2014, a Hyundai iniciou um programa inovador de locação mundial do seu carro ix35. O Toyota MIRAI FC-EV

(descrito no artigo de T. Yoshida e K. Kojima nesta edição da Interface) tem uma pilha PEFC de 100 kW com uma densidade de potência de 3 kW/litro (2kW/kg), e é abastecido por dois tanques de 700 bar H₂, permitindo um alcance de 650 km. O sistema é hibridizado por uma bateria Ni-MH de 1,6 kWh que também é usada para frenagem regenerativa.

Em 2013, a Toyota relatou uma demanda total de Pt <30 g (comparar com um catalisador a 4-7 g de Pt) (FCT, 2013) para um sistema de propulsão de veículo. Isso equivaleria a menos de 3% do preço de venda previsto nos EUA (cerca de US \$ 57.500) ou na Europa (cerca de US \$ 86.000) (FUZATO et al, 2014).

Os ônibus Bus4Transit são um dos melhores aplicativos de transporte. A operação de ônibus movidos a célula de combustível é facilitada, já que os ônibus são localizados centralmente e abastecidos. Além disso, em comparação com veículos de passageiros, há mais espaço de integração disponível para o sistema de célula de combustível e para os tanques de H₂. Seu custo geralmente é mitigado por subsídios do governo.

Os primeiros ônibus conceituais foram introduzidos no início dos anos 90. Desde 1994/1998, ônibus de transporte de metanol foram operados pela Universidade de Georgetown. Dados os tempos de partida mais rápidos e a dinâmica mais rápida do PEFC, o uso de H₂ como combustível é mais viável.

Já na Europa, foram realizados os seguintes programas de demonstração de ônibus: Transporte Urbano Limpo para a Europa (CUTE) de 2003 a 2006 (27 ônibus Mercedes-Benz Citaro, 250 kW, 40 kg H₂ comprimido a 350 bar, faixa 200 km) e o programa HyFLEET: CUTE de 2006 a 2009 (47 ônibus H₂, dos quais 14 eram ônibus H₂-ICE). Além disso, programas de ônibus foram demonstrados em Perth, Pequim e Islândia.

Outros esforços incluíram 3 ônibus da Gillig na Califórnia, um programa de 20 ônibus iniciado em Whistler em 2009, e um programa de 10 ônibus em Hamburgo em 2010. Portanto, este artigo tem como objetivo investigar o potencial que as células

de combustível de hidrogênio têm para a provisão de energia limpa bem como suas aplicações no sistema energético global.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

As células de combustível são vistas por muitas pessoas como uma das principais soluções para o século XXI, permitindo a produção eficiente de energia e calor a partir de uma variedade de fontes de energia primária. Células de combustível são dispositivos eletroquímicos que usam hidrogênio (H₂), ou combustíveis ricos em H₂, junto com oxigênio do ar, para produzir eletricidade e calor. No entanto, existem muitas variantes deste processo básico, dependendo do tipo de célula de combustível e do combustível utilizado.

Hidrogênio e células de combustível não são sinônimos; eles podem ser implantados em combinação ou separadamente. As células de combustível podem operar com gás natural, o que evita a combustão e, portanto, 90% dos poluentes transportados pelo ar. O hidrogênio pode ser queimado em motores e caldeiras sem emissões diretas de CO₂ e emissões próximas de zero de NO_x.

Essa tecnologia é muito interessante para muitas aplicações diferentes, incluindo microgeradores de energia, geradores de energia auxiliares, geradores de energia estacionários, geradores de energia distribuída e geradores de energia portáteis para transporte, projetos militares e o mercado automotivo.

O princípio da célula de combustível foi descoberto pelo cientista alemão C. F. Schönbein em 1838. Baseado nesse trabalho, a primeira célula de combustível foi demonstrada pelo cientista galês Sir W.R. Grove em 1839 (ACHOUR, 2015).

Em 1939, o engenheiro britânico F.T. Bacon desenvolveu com sucesso uma célula de combustível estacionária de 5 kW.

Em 1955, W.T. Grubb, um químico que trabalhava para a *General Electric (GE) Company* (EUA), modificou ainda mais o projeto da célula de combustível original usando uma membrana de

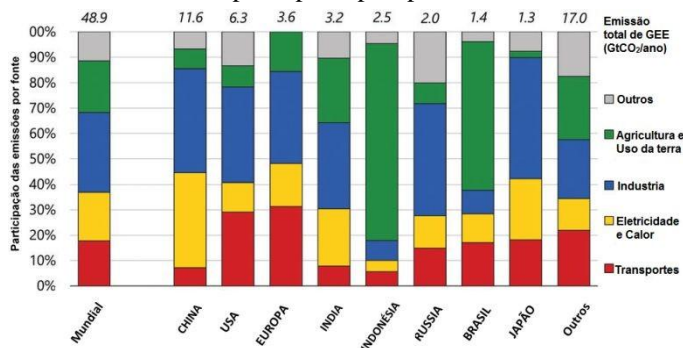
troca iônica de poliestireno sulfonado como o eletrólito (OLABI, 2014).

Na década de 1980, o hidrogênio foi identificado como "um elemento crítico e indispensável de um sistema de energia sustentável e descarbonizado" para fornecer energia segura, eficaz em termos de custos e não poluente (ANDRADE, 2015).

O hidrogênio, como um combustível alternativo viável, continua a prometer muito e a produzir poucos resultados em pesquisas, (VONBUN, 2015). Contudo, o hidrogênio poderia desempenhar um papel significativo no futuro de baixo carbono: (HART et al., 2016; BRANDON et al., 2017; HYDROGEN COUNCIL, 2017; HANLEY et al., 2018) contrabalançando eletricidade como um transportador de energia de carbono zero que pode ser facilmente armazenado e transportado, permitindo um sistema de energia mais seguro com dependência reduzida de combustível fóssil, com a versatilidade de operar através do transporte, calor, indústria e setores de eletricidade (AGOSTINHO, et al., 2016; BRANDON et al., 2017) Juntos, eles respondem por dois terços das emissões globais de CO₂ (Figura 1), segundo os autores.

Enquanto a eletricidade está se mostrando comparativamente fácil de descarbonizar graças às reduções dramáticas de custos e à absorção de energias renováveis (DUPONT et al. 2015), esses outros setores não devem ser esquecidos.

Figura 1: Emissões globais de CO₂: Emissões globais de gases de efeito estufa em 2014, discriminadas por setor e pelos principais países.



Fonte: adaptado pelo próprio autor de: <http://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>

No Reino Unido, por exemplo, espera-se que o calor e o transporte descarbonem em apenas um terço a taxa de produção de eletricidade, com emissões caindo 24% em comparação a 68% nos próximos 15 anos (DOE, 2013).

As tecnologias de hidrogênio e célula de combustível oferecem maior escolha pessoal na transição para uma economia de baixo carbono, dado seu desempenho, operação e experiência de consumo semelhantes às tecnologias movidas a combustíveis fósseis. Eles também fornecem seguro valioso contra a possibilidade de outras tecnologias alardeadas não conseguirem fornecer, como captura e armazenamento de carbono, bioenergia e bombas de calor híbridas.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi classificada como tecnológica, pois utilizará de conhecimentos básicos das tecnologias sobre as células de combustível existentes nos bancos de dados eletrônicos

Quanto à abordagem, será qualitativa, por se tratar da visão, o conhecimento e a abordagem do pesquisador sobre as interpretações do contexto científico compreendido pelo título desta pesquisa.

Quanto aos procedimentos metodológicos, foi realizada uma pesquisa bibliográfica exploratória nos bancos de dados da Scielo, Lilacs e Google acadêmico usando os seguintes descritores de busca: célula de hidrogênio, meio ambiente, célula de combustível e combustível fóssil. Foram encontrados 56 artigos os critérios de inclusão para a realização deste estudo. Para maximizar o número de artigos recuperados, foi definida uma restrição de data de publicação dos artigos selecionados entre os anos de 2013 a 2018.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os efeitos dos combustíveis fósseis no meio ambiente

Globalmente, a maior parte da poluição do ar é gerada pelos combustíveis fósseis (carvão, diesel, gasolina, petróleo e gás natural) para a produção de eletricidade, aquecimento, transporte e indústria (VITAL, 2018). A população mundial suporta uma carga desproporcional de doenças e comprometimento do desenvolvimento tanto da poluição ambiental quanto das mudanças climáticas.

Em 2011, os combustíveis fósseis representaram 82% da oferta total de energia primária (PEREIRA, 2014). A combustão dos combustíveis fósseis, relacionada à energia em países de alta e média renda, e queima de biomassa, em países de baixa renda, respondem pela maior parte da poluição atmosférica global, gerando 85% da poluição respirável suspensa no ar e quase todas as emissões de dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio. a atmosfera (DRUMM et al, 2014).

As atividades humanas emitem cerca de 35 bilhões de toneladas métricas de dióxido de carbono na atmosfera a cada ano, principalmente a partir do uso de energia. O Índice Anual de Gases de Efeito Estufa aumentou 40% de 1990 a 2016, com a maior parte desse aumento atribuível ao aumento dos níveis de CO₂ (GIODA, 2018).

Também são emitidos carbono negro, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), dióxidos de nitrogênio e enxofre, mercúrio e substâncias químicas voláteis que formam o ozônio (O₃) no nível do solo. Todos estão associados a múltiplos efeitos adversos à saúde da população mundial.

A população mundial, já tem suportado uma carga desproporcional de doenças e comprometimento do desenvolvimento tanto da poluição ambiental quanto da mudança climática devido à combustão de carvão, petróleo, gasolina, diesel e gás natural (DRUMM et al, 2014).

As avaliações dos custos de saúde e econômicos dos impactos dos subprodutos da combustão de combustíveis fósseis em crianças têm sido tipicamente fragmentadas, publicadas em revistas especializadas e consideradas separadamente a poluição do ar e a mudança climática (FERNANDES, 2014).

Este efeito de silo impediu uma avaliação completa dos danos às crianças que resulta de uma economia baseada no carbono e impediu o avanço de políticas adequadamente abrangentes para proteger este grupo vulnerável.

Pode-se, então, fazer uma contabilidade holística dos danos causados pela queima de combustíveis fósseis. Tal contabilidade é necessária para estimular a mitigação e ação globais necessárias para reduzir as disparidades entre regiões e classes socioeconômicas e enfrentar a crescente ameaça às gerações futuras.

A injustiça ambiental está desproporcionalmente pesada para saúde e economia que recai, principalmente, sobre os jovens, os pobres e certas minorias, especialmente naqueles países em desenvolvimento que são mais vulneráveis aos impactos dos poluentes tóxicos do ar e as mudanças climáticas resultantes da combustão de combustíveis fósseis. Aliviar esse fardo traria grandes e duradouros benefícios para as crianças e seus descendentes.

Fazendo-se a transição para fontes de energia sustentáveis e renováveis para transporte, geração de eletricidade e indústria, os benefícios seriam mais duradouros para as crianças. Estes incluem significativamente menos casos de bebês nascidos prematuros ou com baixo peso ao nascer, crianças com distúrbios cognitivos e comportamentais, problemas de saúde mental, asma e outras doenças respiratórias e potencialmente doenças cardiovasculares e câncer; todos ligados a poluentes tóxicos do ar (SILVA et al, 2017).

A mitigação da mudança climática significaria menos crianças que sofrem de doenças relacionadas ao calor, desnutrição, doenças infecciosas, traumas físicos e psicológicos, problemas de saúde mental e doenças respiratórias. Todos esses benefícios de

saúde ocorreriam imediatamente e se desenrolariam ao longo da vida, já que danos, doenças ou danos relacionados à exposição no início da vida podem afetar a saúde e o funcionamento a longo prazo.

De crescente preocupação são os efeitos adversos no desenvolvimento inicial do cérebro, prejudicando a capacidade das crianças de aprender, daí a sua futura produtividade econômica e capacidade de contribuir com ideias e energia para a sociedade. Como resultado, eles, suas famílias e a comunidade em geral são menos resilientes capazes de sobreviver, adaptar-se e crescer diante de estresse e choques e transformar quando as condições exigem. A sociedade torna-se ainda menos justa, pois as crianças mais afetadas são as pobres e desfavorecidas.

Os EUA, por exemplo, como um dos maiores poluidores do planeta, têm o carvão e o gás natural como os maiores contribuintes para a poluição de carbono (constituindo um terço de todas as emissões de carbono domésticas). O metano liberado pela produção de gás natural, petróleo e carvão é o segundo em importância.

Embora o gás natural emita significativamente menos poluição tóxica do ar e CO₂ do que os outros combustíveis fósseis (LYRA e GIODA et al, 2016), a perfuração, extração e transporte de gás natural resultam no vazamento de metano que é 34 vezes mais efetivo que o CO₂ na captura de calor no período de dois anos. Dada à sua crescente participação no consumo total de combustível, prevê-se que o gás natural ultrapasse o carvão como fonte de emissões de CO₂ relacionadas com a energia nos EUA.

Segundo a Agência Internacional de Energia, o crescimento mundial do consumo de carvão diminuirá entre 2015 e 2021, uma vez que os países desenvolvidos continuam a abandonar o carvão como fonte de energia e os platôs de consumo da China. No entanto, esse declínio será compensado pela crescente demanda entre os países emergentes, como na Índia e no sudeste da Ásia (CAMPOS, 2017).

Outras pesquisas preveem que o carvão continuará a ser a segunda maior fonte de energia

em todo o mundo, após petróleo, até 2030; e de 2030 a 2040, será a terceira maior fonte de energia, superada apenas pelos combustíveis líquidos e gás natural (OLIVEIRA et al, 2017).

O Hidrogênio como fonte de energia limpa.

O estresse ambiental para o planeta Terra estimulou uma busca por inovação no sistema de energia em escala global. Existe um profundo interesse em promover um futuro mais limpo para as gerações presentes e futuras, evidenciado pelas 148 nações que ratificaram o Acordo Climático de Paris 2015.

Essas nações concordam que o remédio para o estresse ambiental exige a limitação das emissões de gases de efeito estufa (carbono) o mais rápido possível, e manter a temperatura global subindo neste século para 2°C no mínimo e 1,5°C idealmente (BRUNO et al, 2017).

Portanto, diante das pesquisas realizadas, encontraram-se vários motivos por que o hidrogênio deve ser a principal fonte de energia do futuro no planeta Terra: o hidrogênio é o mais abundante e mais leve dos elementos, é inodoro e não tóxico. Tem o maior teor energético de combustíveis comuns em peso - quase três vezes o da gasolina (MIRANDA et al. 2013; ANDRADE e LORENZI, 2015).

O hidrogênio não é encontrado livre na natureza e deve ser “extraído” de diversas fontes: combustível fóssil, renováveis, por energia nuclear e eletrólise da água (AGOSTINHO e DIAS, 2016; ALMEIDA et al. 2016; QUINELATO e JUNIOR, 2016).

Uma fonte de energia (eletricidade, calor ou luz) é necessária para "gerar" (extrair ou reformar) o hidrogênio. Hoje, a maior parte do hidrogênio é produzida a partir da energia fóssil usando reforma a vapor do metano (SMR) do gás natural, seguida por oxidação parcial (POX) e reforma autotérmica (ATR), que combina os processos SMR e POX; como a eletricidade, o hidrogênio é um “portador de energia” (DUPONT, 2015).

Ele pode ser usado em uma ampla gama de aplicações em todos os setores da economia: transporte, energia, indústria e edifícios.

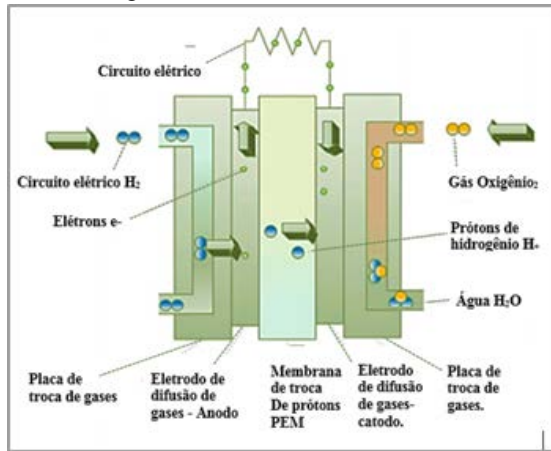
A célula de combustível, um dispositivo eletroquímico.

As células de combustível convertem eficientemente diversos combustíveis diretamente em eletricidade sem combustão, e são elementos-chave de um amplo portfólio para a construção de uma economia de energia limpa competitiva, segura e sustentável.

Eles oferecem uma ampla gama de benefícios, incluindo redução de emissões de gases de efeito estufa; redução do consumo de petróleo; ampliação do uso de energia renovável (por meio do uso de hidrogênio derivado de recursos renováveis como combustível para transporte, bem como para armazenamento e transmissão de energia); conversão de energia altamente eficiente; flexibilidade de combustível (uso de diversos combustíveis domésticos, incluindo hidrogênio, gás natural, biogás e metanol); redução da poluição do ar, critérios poluentes, uso da água; e suporte de rede altamente confiável.

As células de combustível também têm inúmeras vantagens que as tornam atraentes para os usuários finais, incluindo operação silenciosa, baixa necessidade de manutenção e alta confiabilidade. Devido à sua ampla aplicabilidade e usos diversos, as células de combustível podem enfrentar desafios críticos em todos os setores de energia: comercial, residencial, industrial e de transporte.

Figura 2: Célula de combustível



Fonte: Fuzato, 2014.p.493.

<http://www.swge.inf.br/cba2014/anais/PDF/1569905183>

O hidrogênio e a eletricidade são, de fato, portadores de energia complementares: o hidrogênio pode ser convertido em eletricidade e a eletricidade pode ser convertida em hidrogênio.

O uso de hidrogênio para armazenamento de energia (curto prazo, reserva sazonal a longo prazo) é algumas vezes chamado de “mudança de horário com hidrogênio”. O armazenamento subterrâneo de hidrogênio em cavidades salinas e poços de petróleo esgotados é uma prática bem estabelecida.

Tabela 1: Características dos diferentes tipos de células a combustível.

Tipo de célula	Eletrólito e espécie que transporta a carga	Temperatura de operação / °C	Reações
Ácido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄ (90-100%) (H ⁺)	160-220	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ 1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Alcalina (AFC)	KOH (30-50%) (OH ⁻)	<100	H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻ 1/2O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2OH ⁻
Eletrólito polimérico (PEFC)	membrana de Nafion® (H ⁺)	60-120	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻ 1/2O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O
Metanol direto (DMFC)	membrana de Nafion® (H ⁺)	60-120	CH ₃ OH + H ₂ O → CO ₂ + 6H ⁺ + 6e ⁻ 3/2O ₂ + 6H ⁺ + 6e ⁻ → 3H ₂ O
Óxido sólido (SOFC)	ZrO ₂ (O ²⁻)	800-1000	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2e ⁻ 1/2O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻
Carbonato fundido (MCFC)	Li ₂ CO ₃ / K ₂ CO ₃ (CO ₃ ²⁻)	600-800	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻ 1/2O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻

Fonte: Quinelato e Junior, 2016. p. 127-144

Vantagens e Desvantagens das Células de Combustível

Se comparado com geradores elétricos movidos a combustíveis fósseis convencionais, o uso de células de combustível traz muitas vantagens

como maior eficiência volumétrica e gravimétrica; baixas emissões químicas, acústicas e térmicas; modularidade e flexibilidade de localização; baixa manutenção; flexibilidade de combustível (dependendo do tipo de célula de combustível) e nenhuma produção de poluentes (QUINELATO, 2016).

Mesmo que sejam capazes de fornecer muitas vantagens importantes, todas as tecnologias de células de combustível ainda estão em fase de desenvolvimento e estão sobrecarregadas com gargalos que tornam seu uso menos conveniente do que as outras tecnologias que já estão em uso.

Diante das pesquisas realizadas, observaram-se as seguintes desvantagens do uso das células de combustíveis: os custos das células de combustível para geração elétrica estacionária ainda são muito altos e inadequados para a substituição das tecnologias baseadas em combustíveis fósseis; o ciclo de vida e o tempo de degradação de muitas tecnologias de células de combustível (especialmente as tecnologias de alta temperatura, que são as melhores para geração de energia elétrica) ainda não são totalmente conhecidas; o hidrogênio, que é um dos principais combustíveis para as tecnologias de células de combustível, é caro e ainda não existe uma rede para sua produção e distribuição (VARGAS et al. 2016).

O uso de células a combustível de baixa temperatura no mercado automotivo é limitado pelo fato de que é difícil confinar uma quantidade adequada de hidrogênio em pequenos recipientes de combustível e pelo fato de que o hidrogênio é um gás inflamável e potencialmente explosivo (MIRANDA et al. 2013).

Tecnologias de Células de Combustível

Na verdade, existem muitas tecnologias de células de combustível disponíveis no mercado, e cada uma delas é caracterizada por faixa de temperatura operativa, tipo de combustível que pode ser usado, tipo de catalisador usado pela célula e a relação de eficiência do combustível com a conversão de energia (BARBOSA et al. 2016). As

principais tecnologias disponíveis no mercado são as seguintes:

1. Células a Combustível de Membrana Polimérica de Eletrólito (PEMFC)

A membrana polimérica conduz prótons quando umedecida em temperaturas baixas (80°C), permitindo uso de catalisadores de platina, mais eficientes e sensíveis à contaminação por CO. É adequada à utilização estacionária de pequena potência e à aplicação veicular.

2. Célula de Combustível Metanol (DMFC)

São semelhantes às PEMFC, porém, possuem catalisadores capazes de oxidar as moléculas dos álcoois. Células DMFC estão em fase de teste, mas células DEFC, embora interessantes, pois o etanol não é tóxico e é renovável, necessitam de avanços em pesquisa. Estas células possuem aplicações no mercado de equipamentos portáteis.

3. Células de Combustível Alcalinas (AFC)

O eletrólito é uma solução de KOH e conduz íons OH. A célula alcalina opera em temperaturas na faixa de 70 a 100°C.

4. Célula Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)

Utilizam como eletrólito ácido fosfórico, apresentam rendimento de 40 a 80%, trabalham a temperaturas da ordem de 200°C e têm sido desenvolvidas em potências da ordem de 200 kW, sendo que existe projeto de desenvolvimento de célula de 11 MW (MIRANDA, 2013).

5. Célula Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)

Utilizam como eletrólito carbonato de sódio ou de magnésio, apresentam rendimento de 60 a 80%, trabalham a temperaturas em torno de 650°C e têm

sido desenvolvidas em potências variando de 200 kW a 2MW, sendo que existe projeto de desenvolvimento de célula de 100 MW. Pelas altas temperaturas, permite processo de cogeração.

6. Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)

Algumas dessas tecnologias são usadas para: geração elétrica estática ou distribuída, propulsão de veículos, geração elétrica móvel, enquanto outras são simplesmente usadas como geradores de energia auxiliar (ACHOUR, 2015).

Hidrogênio: usos, fontes e métodos de produção

Hoje, o hidrogênio é usado na indústria de refino como petroquímico para hidrocrackeamento e dessulfurização. Na indústria química, é usado para produção de amônia e fertilizante para a agricultura. Também é usado para aplicações nos setores de produção e fabricação de metal, produção de metanol, processamento de alimentos e eletrônicos. Como um "gás industrial", o hidrogênio já é um grande negócio global com fortes fundamentos.

O mercado de geração de hidrogênio deverá ser avaliado em US \$ 115,25 bilhões em 2017 e crescer para US \$ 154,74 bilhões em 2022. Esse mercado compreende dois segmentos: hidrogênio "comercial" - ou seja, hidrogênio gerado no local ou em uma instalação de produção central e vendido a um consumidor por pipeline, tanque de granel ou entrega de caminhão de cilindro; e hidrogênio "cativo" - hidrogênio produzido pelo consumidor para uso interno e consumido no ponto de uso.

Fontes de hidrogênio e métodos de produção: passado e presente.

Gaseificação de carvão produz gás de síntese (*syngas*) que contém hidrogênio. No final do século XVIII, o carvão era gaseificado para produzir gás de carvão ou "gás da cidade" - primeiro para

iluminação, depois para aquecimento e cozimento (MOREIRA et al. 2013).

Hoje, a maior parte do hidrogênio industrial é produzido ou “reformado” a partir do metano na energia fóssil, principalmente do gás natural, embora o petróleo e o carvão também sejam usados. Em menor grau, a eletrólise da água (via eletrólitos alcalinos) também tem sido usada para produzir hidrogênio (QUINELATO e JUNIOR, 2016).

Fontes emergentes de hidrogênio e métodos de produção

As fontes de hidrogênio estão se diversificando. Por exemplo: a energia nuclear é uma fonte de carbono zero na produção de hidrogênio. As matérias-primas renováveis (eólica, solar, biomassa, hidrelétrica e geotérmica) são, do mesmo modo, fontes de hidrogênio amigas do ambiente cuja utilização aumentou consideravelmente. Felizmente, abundam as matérias-primas de hidrogênio renováveis. Eles são encontrados na maior parte do mundo, garantindo fontes domésticas de produção de hidrogênio (AGOSTINHO e DIAS, 2016).

O uso da eletrólise para dividir a água em hidrogênio e oxigênio está aumentando (BARBOSA e TAMBOR, 2016). A eletrólise pode ocorrer em baixas e altas temperaturas e em escalas que variam de *quilowatts* a *megawatts* de tamanho. A membrana de eletrólito de polímero [PEM] e as tecnologias alcalinas são tecnologias de baixa temperatura.

Embora a eletrólise do PEM seja menos comprovada e mais dispendiosa em termos de investimento/despesa de capital (CAPEX) do que a eletrólise alcalina, ela é mais compacta e adequada para o balanceamento dinâmico de carga das redes elétricas necessárias com o uso de energia renovável intermitente (VARGAS et al, 2016).

Particularmente, eletrolisadores que usam eletricidade renovável para gerar hidrogênio não tem pegada de carbono. Os eletrolisadores de água alcalinos e PEM estão disponíveis na escala Megawatt (MW) (SILVA et al, 2014).

A eletrólise a alta temperatura divide a água entre 700-1000°C. O eletrólito de óxido sólido (SOEC) é o eletrolisador de alta temperatura mais utilizado (MIRANDA, 2016).

O uso de pequenos reformadores para a produção de hidrogênio via gaseificação de matérias-primas de biomassa e fósseis também deve aumentar. Eletrolisadores de pequena escala e sistemas de reformadores com capacidades de hidrogênio na faixa de 50-500 metros cúbicos normais por hora (Nm³/hora) já estão comercialmente disponíveis (SCHULTZ et al. 2015).

De acordo com o estudo realizado por Papp et al. (2016), a tecnologia de captura e sequestro de carbono (CCS) pode remover as emissões de CO₂ de combustíveis fósseis usados para produzir hidrogênio antes da combustão ou após a combustão.

À medida que a tecnologia CCS amadurece, seu uso é antecipado na escala de serviços públicos. Além da eletrólise e reforma com CCS, espera-se que o hidrogênio também seja produzido a partir de líquidos bio-derivados e conversão microbiana.

Pesquisas estão em andamento em métodos de produção de hidrogênio a longo prazo, incluindo: produção de biohidrogênio; eletrólise renovável; separação de água solar fotoeletroquímica (PEC); e ciclos termoquímicos de alta temperatura solar (PAPP et al. 2016).

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrogênio tem oscilado desde os choques do petróleo da década de 1970 e continua sendo uma opção marginal do sistema energético. No entanto, o seu uso atual se modificou: a Honda, a Toyota e a Hyundai lançaram os primeiros veículos movidos a célula de hidrogênio produzidos em massa, e as células de combustível agora aquecem 225.000 residências.

As empresas pioneiras, principalmente no Japão, estão começando a ver oportunidades de exportação lucrativas.

O hidrogênio pode desempenhar um papel importante ao lado da eletricidade na economia de baixo carbono, com a versatilidade de fornecer serviços de sistemas de energia, transporte e calor. Ele não sofre o requisito fundamental para o balanceamento instantâneo de oferta e demanda, e assim possibilita rotas complementares para uma descarbonização mais profunda, fornecendo flexibilidade e armazenamento de baixo carbono.

Os numerosos caminhos de produção, distribuição e consumo de hidrogênio apresentam compensações complexas entre custo, emissões, escalabilidade e requisitos de pureza e pressão; mas fornecem uma infinidade de opções que podem ser exploradas dependendo das circunstâncias locais (por exemplo, energia renovável ou locais adequados para a extração de CO₂).

Quando usadas juntas, as células de combustível de hidrogênio são de emissão zero no ponto de uso, com emissões globais dependentes do método de produção de combustível (como na eletricidade).

Os custos dos veículos com célula de combustível são altos em relação aos veículos elétricos a bateria, mas com a produção em massa eles podem alcançar a paridade entre 2025 e 2030.

O *driving range* e o tempo de reabastecimento são significativamente melhores do que os veículos elétricos premium, o que é particularmente vantajoso para ônibus, produtos pesados e outros veículos altamente utilizados. Tal como acontece com os veículos elétricos e ao contrário dos biocombustíveis, os veículos com células de combustível podem resolver problemas de qualidade do ar urbano, produzindo emissões de escape zero. Isso tem o potencial de impulsionar a implantação em cidades, ferrovias, aeroportos, portos marítimos e armazéns.

As inovações na descarbonização do calor ficam atrás de outros setores, como bombas de calor, aquecimento urbano e queima de biomassa e enfrentam múltiplas barreiras. As famílias estão acostumadas a sistemas de aquecimento poderosos, compactos e de resposta rápida, que podem ser modificados para usar hidrogênio. O calor e a potência combinados das células de combustível

podem operar na rede de gás natural de hoje, embora com economias de carbono limitadas.

O hidrogênio apresenta várias opções para descarbonizar essa rede a longo prazo. As tecnologias de hidrogênio podem suportar sistemas de eletricidade de baixo carbono dominados por energias renováveis intermitentes e/ou demanda de aquecimento elétrico.

As aplicações de hidrogênio e a infraestrutura de apoio podem ser instaladas de forma incremental e simultânea, com cuidado para evitar investimentos potencialmente altamente lamentáveis no início.

A focalização em usuários específicos, como frotas de veículos cativos (por exemplo, ônibus urbanos com depósitos centrais de reabastecimento) poderia fornecer a alta utilização e exigir a certeza necessária para o investimento. Dada a diversidade de vias de descarbonização, uma estratégia clara reduzirá os custos da introdução de tecnologias de hidrogênio e de célula de combustível.

A inovação bem-sucedida requer uma política energética focada, previsível e consistente, que é provavelmente o maior desafio na realização do potencial de hidrogênio e de célula de combustível.

Políticas *stop-go* e mudanças frequentes e inesperadas de políticas minam a confiança que as empresas e o setor precisam para fazer investimentos de longo prazo em tecnologias de baixo carbono, como hidrogênio e células de combustível.

De acordo com as pesquisas realizadas neste artigo, pode-se entender que os países devem desenvolver um sistema de apoio político às tecnologias de hidrogênio e de célula de combustível que ofereça a estabilidade de longo prazo necessária para grandes investimentos transformadores.

Revisões de políticas, pontos de decisão e marcos em um programa de apoio devem ser anunciados com antecedência, com o apoio contínuo condicionado ao cumprimento de metas razoáveis de desempenho e custo. Dado tal apoio sustentado, e o progresso tecnológico nas células

de hidrogênio e combustível nos últimos anos, há fortes razões para acreditar que o hidrogênio e as células de combustível podem experimentar uma trajetória de custo e desempenho semelhante à das baterias e fotovoltaicos solares e no médio prazo fornecer outra opção importante e complementar de baixo teor de carbono, com versatilidade a ser implantada em múltiplos usos em todo o sistema de energia.

VI. REFERÊNCIAS

- ACHOUR, H; OLABI, A.G. Driving cycle developments and their impacts on energy consumption of transportation. *J Clean Prod* August 2015; 11:0959e6526.
- AGOSTINHO, F.; DIAS, Á.L. Hydrogen cells and the future: the intention to use the hydrogen cell by transport companies. *International Business and Economics Review*, 2016, nº7. e-ISSN 2183-3265.
<http://www.cigest.ensinus.pt/pt/edicoes.html>
- ALASWAD, A; PALUMBO. A; DASSISTI, M; OLABI, A.G. PEM fuel cell cost analysis during the period. In: Accepted in reference module in materials science and materials engineering (MATS). All rights reserved: 2016 Elsevier Inc.
- ALMEIDA, Á.W.P. DE; GONÇALVES, A.N; SANTOS, B.P; CARDOSO, C.S; CARVALHO, G.B; REIS, L.F. DOS. Estudo teórico e prático da célula de hidrogênio PEM FC. *Rev. Esfera acadêmica tecnologia* (ISSN 2526-4141), vol. 1, n. 2, 2016.
- ANDRADE, T.N. DE; LORENZI, B.R.; Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil. *Revista Sociedade e Estado – Set./Dez.* 2015, Vol. 30, nº. 3.
- BARBOSA, C.H; TAMBOR, J.H.M. Redução De Consumo De Combustível Convencional Pela Adição De Gás Hidrogênio. *Revista Eniac de publicação internacional de Iniciação Científica. Revista Caleidoscópio.* vol. 1, n. 8. 2016.
<https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais/article/view/416/501>
- BRANDON, N. P; KURBAN, Z. *Philos. Trans. R. Soc., A*, 2017, 375, p.1–17.
- BRUNO, F.M.R; FROZZA, M.S; FRAGA, J.M.L. O acordo de paris sobre o combate ao aquecimento global após a ordem executiva de independência energética de Washington. *Anais do 4º Congresso Internacional de Direito e Contemporaneidade: mídias e direitos da sociedade em rede* <http://www.ufsm.br/congressodireito/anais>. 2017 - UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS.
- CAMPOS, R.F.F. de; COSTA, D.D. Análise do impacto ambiental pela dispersão de poluentes atmosféricos, através da queima de resíduos. *Interfac. EHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade*, vol. 12 no 1– junho de 2017, São Paulo: Centro Universitário Senac ISSN 1980-0894 Portal da revista *Interfac EHS*:
<http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/>
- PEI, P. and CHEN, H. *Appl. Energ.*, 125, 60 (2014).
- DUPONT, F.H; GRASSI, F; ROMITTI, L. *Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável.* *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM*, 2015, vol. 19, nº. 1, Ed. Especial, p. 70 – 81. ISSN: 22361170.
- DRUMM, F.C; GERHARDT, A.E; FERNANDES, G. D’AVILA; CHAGAS, P; SUCOLOTTI, M.S; KEMERICH, P.D. DA C. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia*

- Ambiental-Reget - Vol. 18 nº. 1 Abr. 2014, p. 66-78.
- FERNANDES, A.R. Análise da qualidade do ar e preocupações com a saúde. Porto, Fev/2017. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/102619/2/180885.pdf>
- FERNANDES, V.C.; CUNHA, E.F. DA; BONIFÁCIO, R.N.; DRESCH, M.A.; DOUBEK, G; SANTIAGO, E.I.; LINARDI, M.; Desenvolvimento De Tecnologia Para Confecção De Eletrodos E Conjuntos Eletrodo-membrana-Eletrodo (Mea) Por Impressão À Tela Para Aplicação Em Módulos De Potência De Células Pemfc. *Quim. Nova*, Vol. 35, No. 4, 775-779, 2012.
- FCT - Fuel Cell Today, <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/analyst-views/2013/13-11-06-the-cost-of-platinum-in-fuel-cell-electric-vehicles>, 2013.
- FUZATO, G.H. F; AGUIAR, C.R. DE; MACHADO, R.Q; GONÇALVES, A.F.Q; BASTOS, R.F. Emulador de células a combustível utilizando um conversor buck de múltiplas fases. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*. Belo Horizonte, MG, Set. 2014.p.492-498.
- GIODA, A. Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global. *Quim. Nova*, Vol. 41, No. 8, 839-848, 2018.
- HYDROGEN COUNCIL, Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition, 2017.
- HART, D; HOWES, J; MADDEN, B; BOYD, E. Hydrogen and Fuel Cells: Opportunities for Growth. A Roadmap for the UK, E4Tech and Element Energy, 2016.
- HANLEY, E. S; DEANE, J.P; GALLACHO'IR; B. P.O. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2018, 82, 3027–3045.
- LYRA, C; GIODA, A. et al. Impactos Ambientais: Comparação entre o Gás LP e outros Combustíveis e os Possíveis Impactos nas Mudanças Climáticas. Prêmio GPL de inovação e tecnologia, 2016.p.15.
- MATOS, L.W. DE. Análise dos métodos de redução de emissão de CO₂ em uma indústria de cimento. XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Energia no Mundo, Matrizes Energéticas e Matrizes Elétricas. Edição de 13 de dezembro de 2017.
- M.M.A – Ministério do Meio Ambiente. 2016. Acordo do Paris. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencaodas-nacoes-unidas/acordo-de-paris>
- MIRANDA, L.H.T.G; SEO, E.S.M; JUNIOR, A.V. Células a combustível como alternativa para redução de CO₂ equivalente na frota de veículos leves. *Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade*. Interfac, EHS. ISSN 1980-0894, MIRANDA vol. 8, n. 2, 2013.
- MIRANDA, P.E.V. DE.; Versatilidade dos Reatores de Óxido Sólido. *Revista Matéria*. ISSN 1517-7076 Editorial, pp. I-II, vol. 21. n. 03. 2016.
- MOREIRA, R; CARVALHO, F.M.S. DE; BERGAMASCHI, V.S. E POLITANO, R. Patentes Depositadas Em Âmbito Nacional Como Indicador De Desenvolvimento Das Tecnologias De Produção De Hidrogênio. *Quim. Nova*, Vol. 36, No. 5, 748-751, 2013.
- OLABI, A.G. State of the art on renewable and sustainable energy. *Energy* 2014;61: 2e5.
- OLIVEIRA, A.C; PEREIRA, B.L.C; SALLES, T.T; CARNEIRO, A.C.O; LANA, A.Q. Análise de Risco Econômico de Dois Sistemas Produtivos de

- Carvão Vegetal Floresta e Ambiente, 2017; 24: e20160265. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.026516>.
- OMS – Organização Mundial da Saúde – Air Quality Guideline – global update, 2018.
- ONU - Organização das Nações Unidas. 24ª Conferência das Partes (COP-24) da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, o Emissions Gap Report, 2018
- ONU - World Urbanization Prospects. Organização das Nações Unidas (ONU). Report. pdf. 2014. <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014->
- PAPP, G.H; MOHR, G.E; MORA, P.C; NALI, P.R; STORTINI, S.M; VELÁZQUEZ, G. Captura e armazenamento de dióxido de carbono em usinas de cana-de-açúcar. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 87-111, 2016.
- PEREIRA, T.C.G. Energias Renováveis: Políticas Públicas e Planejamento Energético. COPEL, 2014. 303 p.
- QUINELATO, L.G; JUNIOR; M.A.F. Células de hidrogênio como combustível. Ling. Acadêmica, Batatais, vol. 6, n. 1, p. 127-144, jan./jun. 2016.
- SCHULTZ, E.L; SOARES, I.P.; ROCHA, J.D.; DAMASO, M.C.T; GAMBETTA, R. Hidrogênio. Revista Comunicado Técnico, Embrapa. ISSN 2177-4447, Brasília, DF. Março, 2015.
- SILVA, A.F. DA; VIEIRA, C.A. Ciência e Sustentabilidade – CeS. Juazeiro do Norte, vol. 3, n. 1, p. 166-189, jan/jun 2017 I ISSN 2447-4606.
- SILVA, R.M. DA; SILVA, R.C. DA; AQUINO, K.A. DA S. Estudo Da Eletroquímica A Partir De Pilhas Naturais: Uma Análise De Mapas Conceituais. Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review – V4(2), pp. 45-56, 2014.
- SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2018. <http://seeg.eco.br/>
- VARGAS, R.A; CHIBA, R; FRANCO, E.G; SEO, E.S.M. Uma Visão da Tecnologia de Células a Combustível. Faculdade Alfacastelo. CCTM, 2016.p.13.
- VITAL, M.H.F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. BNDES Set., Rio de Janeiro, vol. 24, n. 48, p. 167-244, set. 2018.
- VONBUN, C. Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura. Cadernos do Centro de Ciências Sociais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. SYNTHESIS, Rio de Janeiro, vol.8, nº 2, 2015, p.45-63. DOI: 10.12957/synthesis.2015.30472