



FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO HIDROGÊNIO

ELECTRICITY GENERATION USING HYDROGEN

Henrique Lourenço Mecone¹ i

Sergio Luiz Volpiano² ii

Elias Faustino de Sousa³ iii

Marcos Ribeiro de Carvalho⁴ iv

RESUMO

A utilização do gás hidrogênio na geração de energia elétrica já é uma realidade e vem de encontro com a necessidade crescente de geração de energia limpa.

Este artigo demonstra algumas características, aspectos de segurança e ambientais do hidrogênio e discute dois métodos de geração de energia um é através de células de combustível o outro é através de turbo gerador com utilização do vapor gerado em caldeiras movidas a hidrogênio. A pesquisa foi feita em sites específicos sobre o assunto hidrogênio e também a citação de um estudo para geração de energia elétrica utilizando o hidrogênio em uma empresa na cidade de Jundiaí.

ABSTRACT

The use of hydrogen gas in electricity generation is already a reality and due to the need for clean energy generation will soon be a reality more evident than we imagine.

This article demonstrates some characteristics, safe and environmental aspects of hydrogen as well two methods of power generation that is through fuel cells or turbo generators using steam generated in hydrogen powered boilers. The research was done on specific sites about hydrogen an also the citation of a study for electricity generation using hydrogen in a company in the city of Jundiaí.

¹ Pós-graduando em Eficiência Energética na Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: riquemecone@yahoo.com.br

² Orientador. Docente e Me. em Engenharia Elétrica em Sistema de Potência da Faculdade Senai de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: sergio.volpiano@sp.senai.br

³ Docente na Escola SENAI “Armando de Arruda Pereira” Esp. em Mecatrônica. E-mail: elias.sousa@sp.senai.br

⁴ Docente na Escola SENAI “Armando de Arruda Pereira” E-mail: marcos.carvalho@sp.senai.br

1 INTRODUÇÃO

As demandas por novas fontes de geração de energia elétrica térmica e mecânica novas formas de armazenamento estão sendo pesquisadas e desenvolvidas.

Como exemplo tem-se, a energia Eólica, Solar, Geotérmica, Ondas e Marés, Biomassa, Biogás e o Hidrogênio.

Para três dos exemplos citados acima, Biomassa, Biogás e o Hidrogênio, além de serem fontes de geração de energia elétrica são utilizados para o armazenamento energético com ciclos combinados de geração.

2 HIDROGÊNIO

O Hidrogênio é um dos elementos químicos mais abundante encontrado no universo, a massa do sol é composta por 30% de hidrogênio, é encontrado na água que cobre 70% da superfície da Terra e em todo material orgânico.

2.1 Propriedades e Comparações

Abaixo as principais propriedades do hidrogênio:

Tabela 1 - Propriedades do hidrogênio

Propriedade	Valor	Unidade
Temperatura de Autoignição ²	560	°C
Ponto de Ebulição (1 atm)	-252.9	°C
Densidade (NTP) ¹	0,08375	kg/m ³
Coeficiente de difusão no ar (CNTP) ¹	0,610	cm ² /s
Entalpia (CNTP) ¹	3858,1	kJ/kg
Entropia	53.14	J/g-K
Temperatura da chama no ar	2045	°C
Range inflamável no ar	4,0 – 75,0	vol%
Energia de ignição no ar	2 x 10 ⁻⁵	J
Energia Interna (CNTP) ¹	2648,3	kJ/kg
Massa molecular	2,02	
Gravidade específica (ar=1) (CNTP) ¹	0,0696	
Volume específico (CNTP) ¹	11,94	m ³ /kg
Condutividade Térmica (CNTP) ¹	0,1825	W/m-K
[1] CNTP (condição normal de temperatura e pressão) = 20°C and 1 atm;		
[2] A temperatura de autoignição depende da concentração do hidrogênio, pressão e também das características da parede do vaso de pressão.		

Fonte: Traduzido pelo autor do site H2 Hydrogen Tools (2019)

Dos pontos destacados em vermelho na tabela 1 temos, a densidade de 0,08375 kg/m³ que é 14,3 vezes menor que o ar atmosférico e massa molecular de apenas 2,02 sendo a menor massa dos elementos químicos, tornando-se um combustível eficiente em peso em relação aos outros, pois para produzir a mesma energia produzida com 1kg de Hidrogênio é necessário 2,98kg de gasolina e por este motivo é utilizado como combustível para ônibus espaciais da NASA.

O hidrogênio tem a mais alta energia comparativamente com qualquer combustível. A quantidade de energia liberada durante a reação do hidrogênio é aproximadamente 2,5 vezes o poder de combustão dos hidrocarbonetos conforme tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Poder calorífico

Combustível	Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 kJ/g	119,93 kJ/g
Metano	55,53 kJ/g	50,02 kJ/g
Propano	50,36 kJ/g	45,6 kJ/g
Gasolina	47,5 kJ/g	44,5 kJ/g
Gasóleo	44,8 kJ/g	42,5 kJ/g
Metanol	19,96 kJ/g	18,05 kJ/g

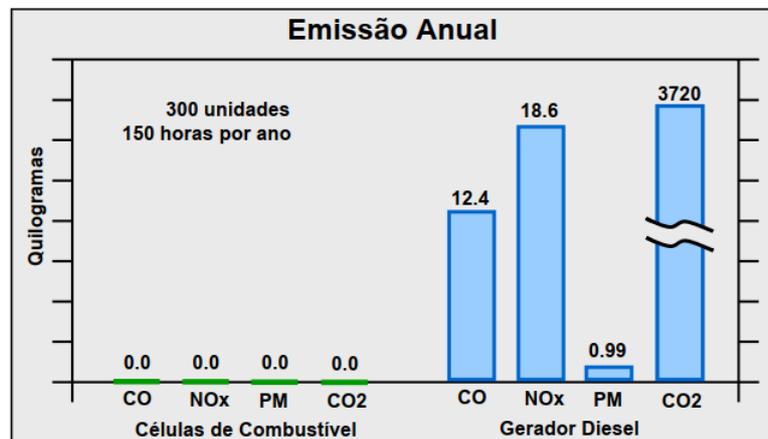
Fonte: (SANTOS, 2019, p. 2)

2.2 Meio ambiente

Em questões ambientais é um combustível excelente, pois é atóxico, não gera nenhum resíduo prejudicial ao meio ambiente e a saúde humana. Na geração de energia elétrica somente a água limpa é produzida como subproduto quando o hidrogênio é combinado com oxigênio em uma célula de combustível.

A figura abaixo mostra a comparação da emissão de poluentes entre células de combustível de hidrogênio versus geradores diesel gerando a mesma potência elétrica:

Figura 1: Comparativo de Emissões



Fonte: Traduzido pelo autor de (BLANCHARD, 2011, p. 8)

2.3 Segurança

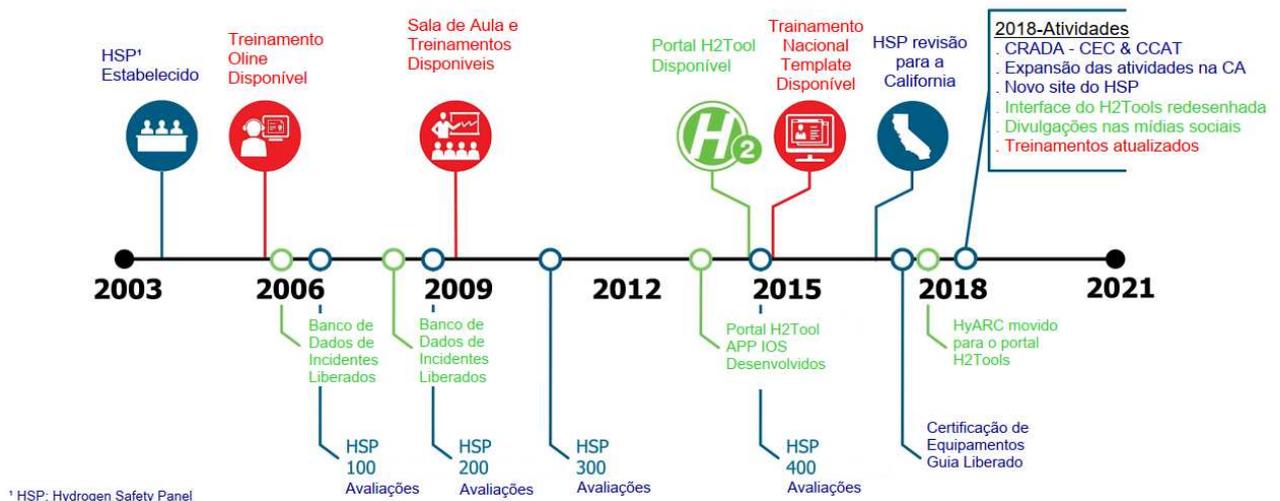
O hidrogênio é conhecido como um gás inseguro e explosivo, no entanto, como todos os combustíveis que forem manuseados, transportado e armazenados incorretamente serão inseguros. Quando respeitado as diretrizes de armazenamento, manuseio e transporte o hidrogênio terá a mesma segurança que os demais combustíveis.

Atualmente há instituições, associações e normas ligadas a segurança do hidrogênio, tais como, “*American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*” que é responsável pelo Guia de Segurança de Hidrogênio e Sistemas de Hidrogênio, “*International Fire Code (IFC)*” que é o Código Internacional de Fogo em tradução literal, National Fire Protection Association (NFPA) que é um órgão americano que disponibiliza informações sobre códigos e normas relacionadas a incêndio que para o caso do hidrogênio é NFPA2 e a NFPA55, ABNT/CEE-067 - Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio, NBR ISO 161110-1 – Geradores de hidrogênio que utilizam tecnologias de processamento de combustível.

A organização H₂ Hydrogen Tools é atualmente o órgão mais envolvido com a segurança de hidrogênio, no qual todos os anos há um encontro para discutir a segurança do hidrogênio no mundo, abaixo temos representado a linha temporal desta organização:

Figura 2 – Linha do Tempo da organização H₂ Hydrogen Tools

Linha do Tempo do Projeto - Painel de Segurança do Hidrogênio

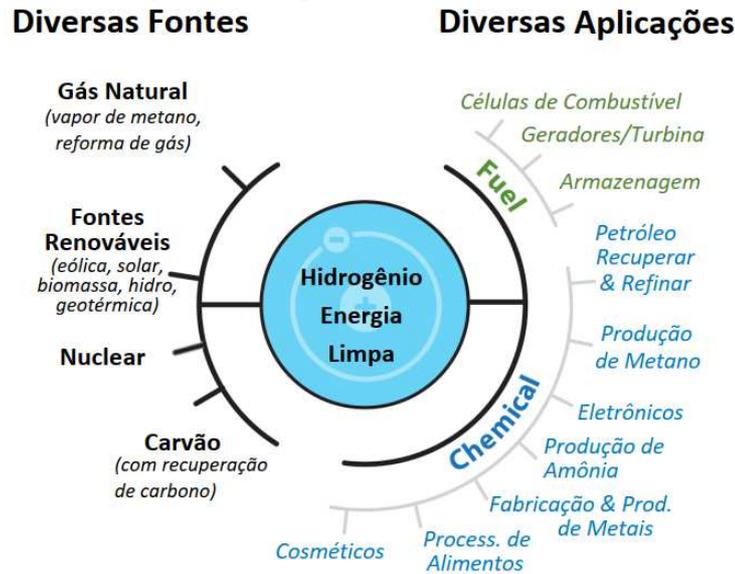


Fonte: Traduzido de (BARILO, 2018, p. 5)

3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conforme figura abaixo o hidrogênio é utilizado para as mais diversas aplicações, neste artigo iremos estudar sobre a geração de energia elétrica a partir de células de combustível e turbinas.

Figura 3 – Fontes e aplicações do Hidrogênio



Fonte: Traduzido e adaptado de (BARILO 2018, p. 26)

3.1 Geração de Energia Elétrica a Partir de Células de Combustível

Inicialmente iremos exemplificar o processo de eletrolise que é a base para entendermos uma célula de combustível.

3.1.1 Eletrolise

O processo de eletrolise é utilizado na indústria química para a fabricação de cloro, clorato de sódio entre outros produtos e tem como subproduto o hidrogênio e oxigênio, mas também pode ser um processo somente para geração de hidrogênio. A energia elétrica utilizada no processo de eletrolise é sempre consumida, fornecida através de uma fonte externa.

A eletrolise a base de água para geração de hidrogênio e o método mais eficiente e promissor para a produção de hidrogênio puro, no qual a energia necessária para o processo de eletrolise pode ser proveniente de fontes renováveis como solar e eólica. Este processo pode ser classificado de três modos denominados a seguir: eletrolise alcalina, membrana de polímero e óxido sólido. Esta classificação depende do tipo de agente iônico (OH^- , H^+ , O_2^-) e da temperatura de operação.

Para o processo de eletrolise alcalina e de membrana a temperatura é normalmente abaixo de 100 °C. Na eletrolise alcalina o anodo e o cátodo são imersos em eletrólitos líquidos alcalinos o mais comum é o hidróxido de potássio e o diafragma permeado por OH^- entre os dois eletrodos que servem para separar os gases. Na eletrolise de membrana os

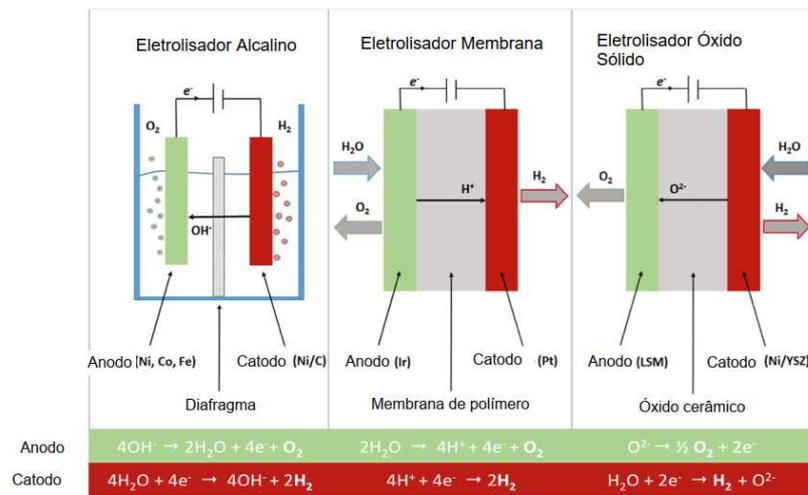
eletrodos são de polímero óxido sólido, os eletrólitos sólidos cumprem a função de serem os separadores de gases.

O processo de óxido sólido opera normalmente a temperaturas acima de 500 °C, com água em forma de vapor.

A figura 4 apresenta os três processos de eletrolise, para os três casos sempre têm-se: anodo (eletrodo negativo), catodo (eletrodo positivo) e o eletrólito (condutor iônico) e este último que pode ser em forma líquida como no processo alcalino ou em forma sólida como nos processos de membranas e óxido sólido. O anodo e catodo são feitos de materiais condutores metálicos e são separados entre si pelo eletrólito, os mesmos tem como principal função criar o fluxo de elétrons (corrente elétrica) entre si através do eletrólito.

Na reação química entre os elétrons e demais elementos químicos são gerados o hidrogênio e o oxigênio O hidrogênio gerado será o combustível para as células de hidrogênio e para outras aplicações que se utilize hidrogênio.

Figura 4 – Processos de Eletrolise



Fonte: Traduzido e adaptado de (SAPOUNTZI et. al., 2016, p. 3)

3.1.2 Geração de Energia com Células de Combustível

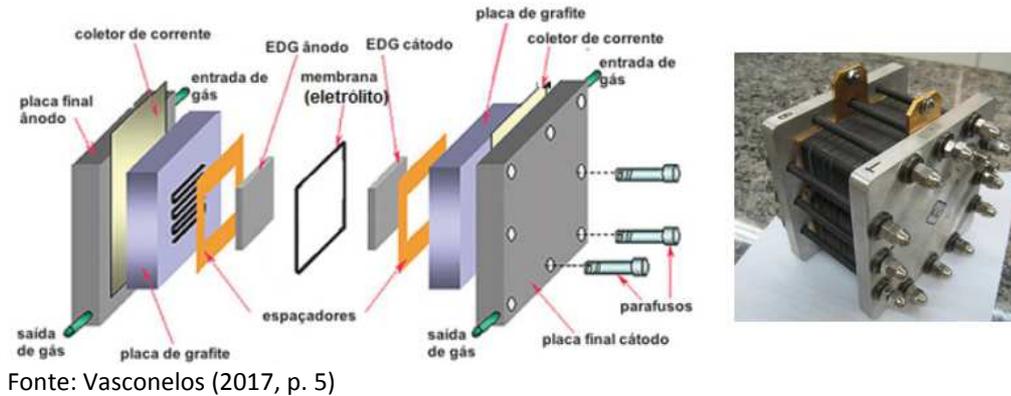
Em uma célula de combustível, a energia elétrica é gerada pela reação química ocorrida internamente na célula e consumida externamente pela carga que é o inverso da eletrolise, no qual energia elétrica é consumida na reação química.

A célula de combustível a hidrogênio ou célula de combustível como é mais conhecida, é um conversor que gera eletricidade e água pela combinação de hidrogênio como combustível e o oxigênio como comburente. É uma reação química exotérmica e é expressa quimicamente pela equação global $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ e adicionalmente calor e corrente elétrica.

A célula de combustível é constituída por três principais componentes: um eletrólito, em contato com dois eletrodos porosos (condutores): de um lado, o anodo (eletrodo negativo) e do outro lado, o catodo (eletrodo positivo). Os eletrodos, em um de seus lados, são revestidos por uma camada de catalisador (normalmente à base de platina ou níquel), e ficam separados entre si pelo eletrólito, o qual é constituído de material impermeável, também contendo uma fina camada de catalisador, permitindo, no caso, somente a

passagem de cátions (íons positivos) do anodo para o catodo. É na superfície dos eletrodos que as reações eletroquímicas ocorrem. A figura 5 ilustra os componentes descritos.

Figura 5 – Representação Prática de uma Célula de Combustível tipo Membrana



O catalisador, normalmente um metal (platina, níquel, óxido de níquel, prata, óxidos de metais, metais nobres), tem a função de favorecer ou acelerar a cinética das reações químicas entre o oxigênio e o hidrogênio. O eletrólito pode ser líquido ou sólido, como o caso das membranas poliméricas trocadoras de prótons.

No anodo, ocorre a oxidação do combustível, representado pelo gás hidrogênio ali injetado. Ao ser difundido (sob pressão e pré-aquecido) nesse eletrodo, o hidrogênio sofre dissociação, de modo que seus prótons são transportados pelo eletrólito, atravessando suas membranas, em direção ao catodo. Os elétrons liberados na dissociação circulam externamente ao eletrólito, em direção ao catodo.

No catodo, é injetado o agente oxidante, o gás oxigênio. Após ser separado pelo catalisador, cada átomo de oxigênio recebe dois elétrons que circularam externamente ao eletrólito, e ao se combinar com os cátions de hidrogênio que foram transportados pelo eletrólito, forma então água. A figura 6 ilustra o processo de reação descrito.

Equacionando as reações dos eletrodos e global da célula, temos:

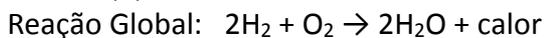
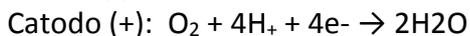
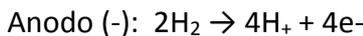
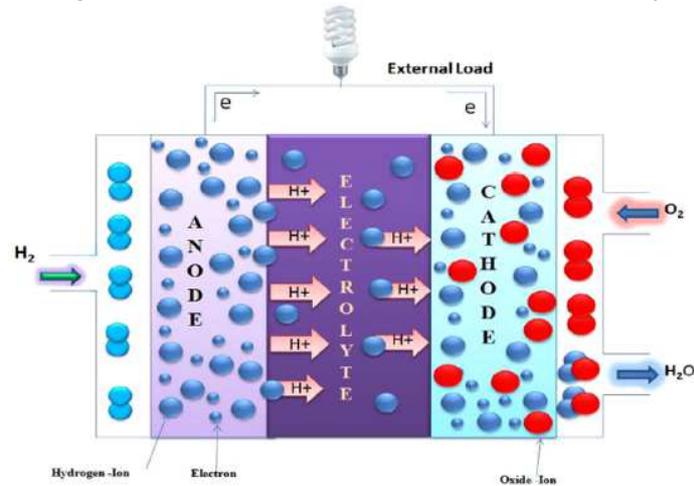


Figura 6 – Representação Teórica de uma Célula de Combustível tipo Membrana



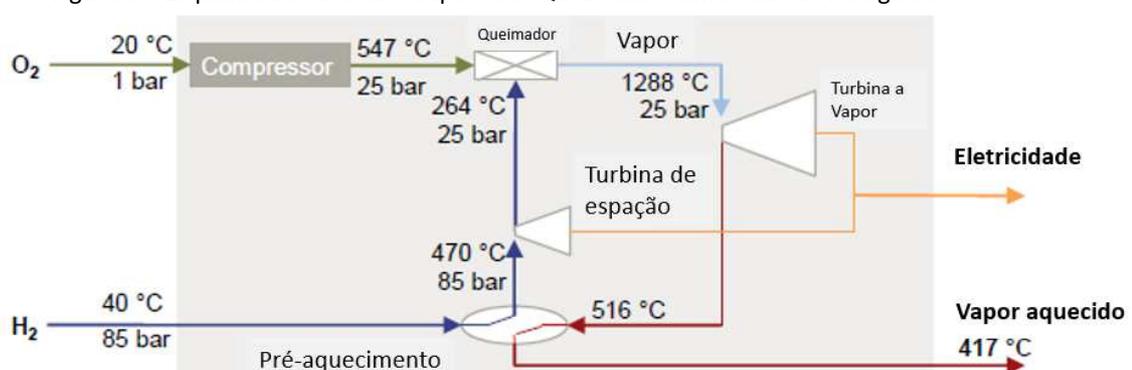
Fonte: Fonte: Vasconelos (2017, p. 4)

A circulação de elétrons externamente ao eletrólito, decorrente da reação catalítica do hidrogênio no anodo, até o catodo caracteriza uma corrente elétrica, tendo então, a conversão da energia química em energia elétrica. Como a reação de formação de água no catodo também produz calor, dependendo de sua intensidade (em especial nas células que operam a alta temperatura), pode ser utilizado num sistema de cogeração, para geração de mais eletricidade através de uma turbina ou microturbina (no próximo item iremos abordar com mais detalhes este assunto), ou para sistema de aquecimento de água em edificações.

3.2 Geração de Energia Elétrica a partir de turbinas

Turbina é tecnologicamente e comercialmente uma tecnologia mais conhecida e empregada para geração de energia elétrica a partir do gás natural, o mesmo princípio é utilizado para a produção de eletricidade com o hidrogênio. O hidrogênio e oxigênio sofrem combustão em uma caldeira produzindo calor que aquece a água pressurizada e a transformada em vapor pressurizado que aciona uma turbina a vapor, assim a energia mecânica produzida pela turbina é convertida em energia elétrica por um gerador de eletricidade. Abaixo a figura 6 representando um esquema de turbina a hidrogênio com reaproveitamento do vapor aquecido:

Figura 6 – Esquema de Turbina a Vapor com Queimador Alimentado a Hidrogênio



Fonte: Traduzido e adaptado de (AT. KEARNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2014, p. 98)

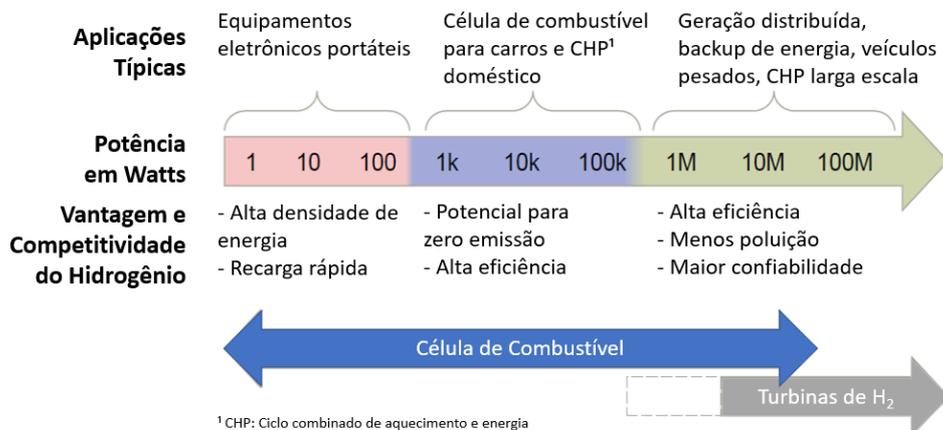
3.3 Comparativo células de Combustível e Turbinas

Conforme descrito anteriormente, as células de combustível convertem energia química em energia elétrica diferentemente das turbinas não há partes moveis, tornando as células de combustível mais confiáveis. Podem ser configuradas dos mais diversos tamanhos podendo ser utilizadas em pequenas aplicações como geração de energia em residências, sistemas de telecomunicações (antenas de celular) em substituição aos geradores diesel, sistema de back-up em substituição a nobreaks e até mesmo gerações de grande porte para o fornecimento de energia.

A combustão de hidrogênio para geração de energia em uma turbina converte energia mecânica em energia elétrica através do gerador, essa conversão requer um grande espaço para instalação e conseqüentemente são utilizadas somente em geração de grande porte.

Pode haver a impressão de que as células de combustíveis e turbinas competem entre sim, no entanto, as células de combustíveis são mais adequadas para aplicações descentralizadas, tais como, mobilidade e transporte de cargas, enquanto as turbinas são mais adequadas para aplicações centralizadas e de longa escala, tais como, indústria, geração de energia em grande potência. Na figura 7 é possível entender as aplicações das duas tecnologias versus a potência.

Figura 7 – Variação de potência e aplicação de célula verso turbina



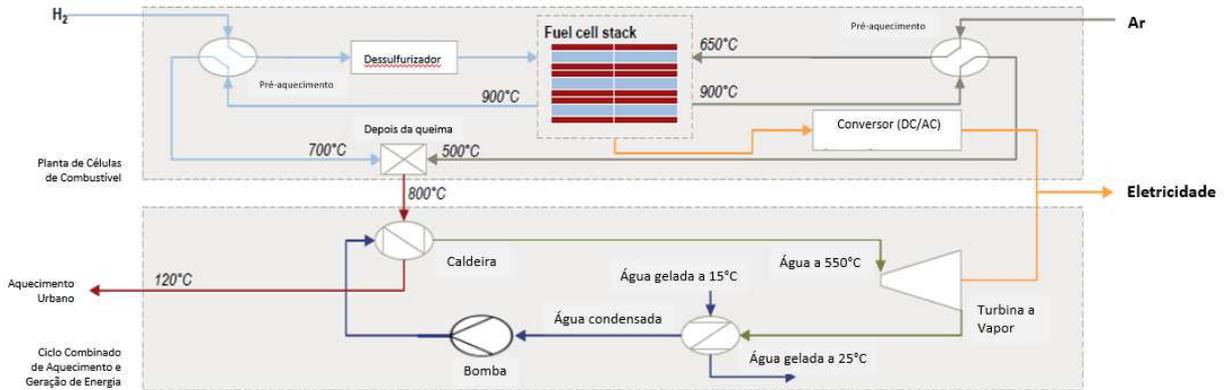
Fonte: Traduzido e adaptado de (AT. KEARNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2014, p. 86)

Apesar da tecnologia crescente das células de hidrogênio o grande desafio para a geração de energia elétrica em grande escala, ainda é mais econômico do que técnico, pois para um ciclo completo que é a de geração do hidrogênio e depois a conversão do mesmo em eletricidade a eficiência é de 20 a 48%. Porém este ciclo pode ter sua eficiência melhorada ao ser combinado com uma turbina e o reaproveitamento do calor gerado no aquecimento do vapor, este processo recebe o nome de ciclo combinado e tem uma eficiência maior que 60%.

Abaixo na figura 8 há um exemplo de ciclo combinado onde o hidrogênio e o ar (oxigênio) excedentes das células de combustível saem deste processo a uma temperatura de 900°C, executam o pré-aquecimento do novo gás que será enviado para as células, este excedente aquecido e sobra do processo das células é enviado para o queimador que tem uma de temperatura de saída de 800°C, na caldeira é gerado vapor a 550°C e este vapor é responsável por alimentar uma turbina e então gerar energia elétrica que é somada a

energia gerada nas células de combustível. Neste processo é possível verificar que além da energia elétrica, haverá a geração de vapor para aquecimento (calefação) urbana, e aquecimento de água a 25°C, sendo assim mais eficiente do que somente a geração de energia através das células de combustível.

Figura 8 – Exemplo de um ciclo combinado de geração de energia e calor



Fonte: Traduzido e adaptado de (AT. KEARNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2014, p. 89)

Tabela 3 - Comparação entre célula de combustível e turbina

	Aplicação	Eficiência H2 -> Energia	Eficiência H2 -> Energia (CCCE)	Custo de Investimento ³	Tempo de vida (CCCE)	Vantagens	Desvantagens
Células de combustível Baixa temperatura ¹	- Back-up power - FCEV - Micro geração combinada	32% (CCMPP) 45% (CCAF)	72%	< \$3.200 /kW para CCMPP com CCCE	> que 10.000 com trocas parciais de células	- Pouco tempo de instalação - Mais comercialmente e tecnologicamente desenvolvido em relação a células de alta temperatura - Muitas aplicações	- Baixa eficiência - Alto custo - Baixo tempo de vida
Células de combustível Alta temperatura ²	- Geração distribuída - Unidades de geração auxiliares	50%	76% (2014) 80% (Futuro)	< \$3.200 /kW para CCOS com CCCE	> que 15.000 com trocas parciais de células	- Boa eficiência em CCCE - Flexibilidade de combustível (também trabalha com metanol) - Comercialmente desenvolvido - Muitas aplicações	- Baixa eficiência - Alto custo - Baixo tempo de vida
Turbinas a Hidrogênio	- Geração em larga escala (indústria, rede nacional)	45% (ciclo aberto) 60% (ciclo fechado)		<\$1000 / kW (ciclo aberto)	20 anos (300.000 horas)	- Baixo custo - Alta eficiência - Longo tempo de vida	- Longo tempo de instalação - Poucos caso aplicados - Poucas aplicações

1. Células de combustível de baixas temperaturas: -20-250°C
 2. Células de combustível de altas temperaturas: 150-1000°C
 3. Valores baseados nas tecnologias do ano de 2014
 CCMPP: Célula de combustível com membrana de permuta protônica
 CCAF: Célula de combustível ácido fosfórico; CCOS: Célula de combustível de óxido sólido
 CCCE: Ciclo combinado de calor e energia

Fonte: Traduzido e adaptado de (AT. KEARNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2014, p. 87)

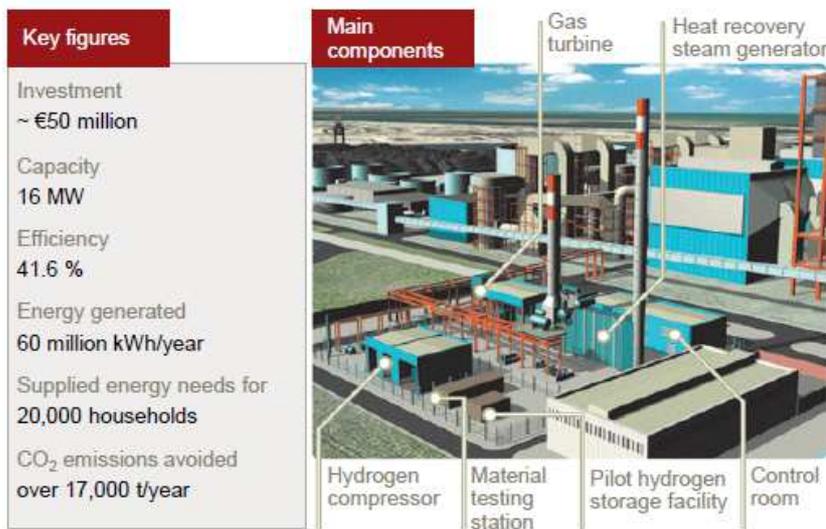
4 PROJETOS

4.1 Enel – Fusina - Itália

As turbinas a hidrogênio puro ainda estão na fase de desenvolvimento, mas o interesse neste tipo de equipamento está sendo motivado por seu papel em projetos de captura e armazenamento de carbono. O projeto piloto operando com matéria-prima 100% de hidrogênio é a usina da Enel de 16 MW em Fusina, Itália, que possui uma eficiência de 41,6%. A turbina faz parte de uma planta de captura e armazenamento de carbono, na qual o hidrogênio é obtido da gaseificação de carvão por meio de uma pré-combustão.

Na figura 9 abaixo temos a ilustração dos principais componentes e dados do projeto.

Figura 9 – Projeto Fusina , Itália - Enel



Fonte: Traduzido e adaptado de (AT. KEARNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE, 2014, p. 99)

4.2 Mina Glencore Raglan – Canadá

Projeto com o fornecimento de um sistema de eletrolise de 350kW + 120kW de células de combustível. Foi utilizado o princípio de geração de hidrogênio através de fontes renováveis, no qual há a produção de hidrogênio, armazenamento do mesmo e depois a conversão para energia elétrica.

Abaixo a figura 10 representa o local onde se encontra a eletrolise para geração de hidrogênio e as células de combustível para geração de eletricidade. Na figura 11 temos o exemplo da célula de combustível utilizada no projeto e na figura 12 um esquemático da planta de geração de energia como um todo, onde, através de energia renováveis (eólica ou solar) é gerado energia elétrica, esta energia é utilizada no processo de eletrolise para geração de hidrogênio e o mesmo é armazenado em tanques por semanas ou até meses e poderá ser transformado em energia elétrica novamente conforme a necessidade do usuário.

Figura 10 – Projeto Mina Glencore Raglan

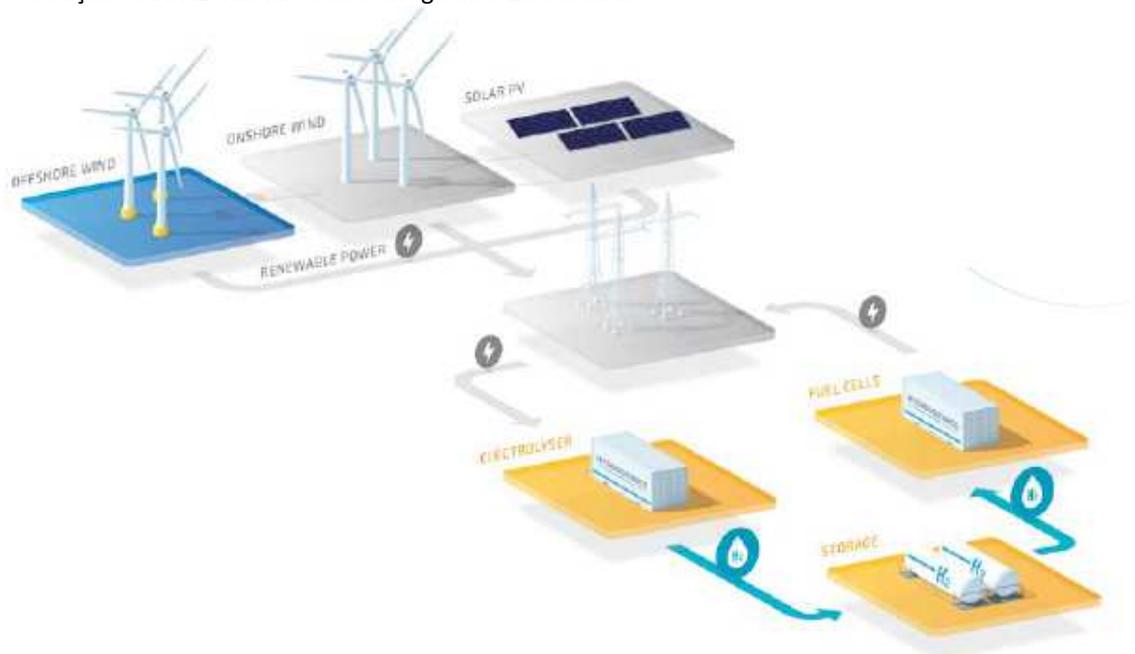


Fonte: Hydrogenics (2018, p. 12)

Figura 11 – Célula de Combustível Hydrogenics – HyPO-120kW



Figura 12 – Geração e Armazenamento de Hidrogênio e Eletricidade



Fonte: Hydrogenics (2018, p. 12)

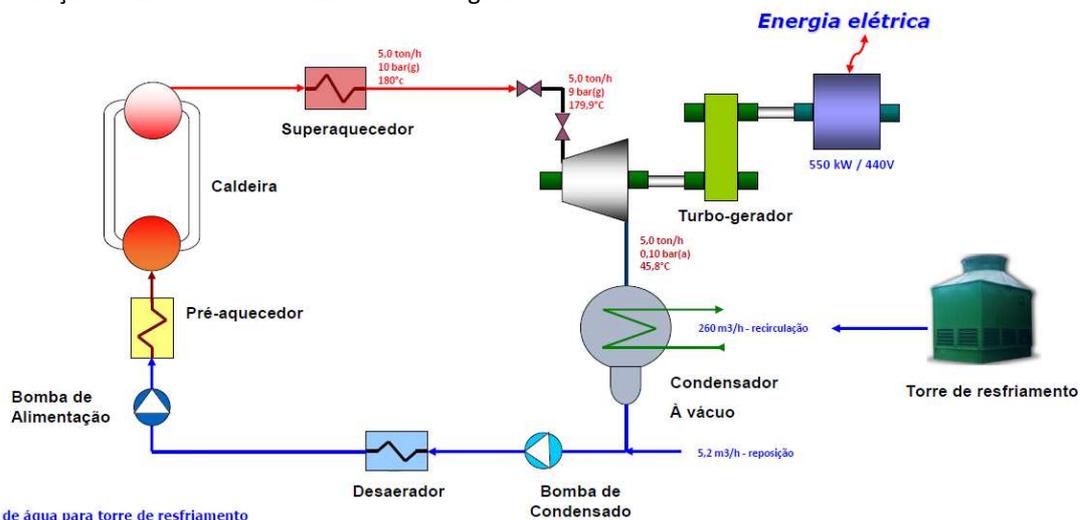
4.3 Nouryon – Brasil, Jundiá

A empresa Nouryon unidade Jundiá é uma empresa química, que utilizado em seu processo de produção um sistema de eletrolise de alta potência e um dos subprodutos desta produção é o hidrogênio que é atualmente descartado para a atmosfera.

Está em fase de estudo um projeto para que o hidrogênio descartado seja aproveitado como combustível da caldeira representada na figura 13 e assim gerar eletricidade para consumo próprio da empresa.

O projeto terá o seguinte funcionamento: o hidrogênio queimado na caldeira irá aquecer a água a uma temperatura de 150°C e superaquecido até 180°C, com uma pressão de 9 bar, o vapor gerado aciona a turbina que é acoplado a um alternador gerando 550kWh de energia a uma tensão de 440V. Esta tensão será elevada para 13,8kV e inserida no grid através de uma subestação existente. A figura 13 ilustra este funcionamento.

Figura 13 – Geração de Eletricidade Utilizando o Hidrogênio



2% – reposição de água para torre de resfriamento
 1,5% para make-up da caldeira.
 15% de consumo de energia da planta com relação a energia gerada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Dados do projeto Nouryon – Brasil, Jundiá

Empresa de implementação	Nouryon
Seguimento	Químico
Consumo médio de energia elétrica da planta	35 MWh
Geração de energia com o projeto	550 kWh
Porcentagem de geração x consumo	1,57 %
Custo de implementação	R\$ 3,7 milhões
Retorno de Investimento	3,4 anos
Custo do kWh gerado nos primeiros 3,4 anos	R\$ 0,234
Custo do kWh gerador após 3,4 anos	R\$ 0,012

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de haver muitos projetos de geração de energia elétrica para distribuição comercial a partir do hidrogênio, ainda é um nicho de mercado pouco desenvolvido devido a fatores econômicos, em contrapartida, a utilização do hidrogênio para mobilidade, e armazenamento de energia emergencial na substituição de geradores diesel e logística no carregamento, transporte e manuseio de materiais já é uma realidade que vem sendo utilizada em grande escala em todo o mundo.

O desenvolvimento em mobilidade e logística (empilhadeiras) se dá devido a eficiência de até 60% de uma célula de combustível que é o dobro comparado a um motor a combustão, o reabastecimento em minutos comparado aos veículos elétricos, autonomia de até 680 km é o grande benefício ambiental proporcionado pelo hidrogênio. Para exemplificar no ano de 2018 nos Estados Unidos foi contabilizado mais de 20mil empilhadeiras, 30 ônibus, 5mil carros movidos a hidrogênio com 35 pontos de abastecimento. Estão sendo planejados 1000 pontos de abastecimento até 2030.

O armazenamento de energia através do hidrogênio também está sendo aplicado em grande escala em locais remotos para a geração de eletricidade.

O hidrogênio pode não ser a forma mais econômica para geração de energia, mas certamente é a forma mais limpa de geração. A combinação com outras fontes de energias renováveis tornará o planeta mais eficiente e despoluído.

REFERÊNCIAS

A.T. KERNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE. Hydrogen-based energy conversion - factbook. In: Hydrogen-based energy conversion. 2014. **Anais eletrônicos**. Fev. 2014. Disponível em: <https://www.energy-transition-institute.com/documents/17779499/17781876/Hydrogen+Based+Energy+Conversion+FactBook.pdf/ab80d85b-faa3-9c7b-b12f-27d8bad0353e?t=1590787502834>. Acesso em: 01 dez. 2019.

BARILO, NICK; Introduction to hydrogen and fuel cell technologies and safety considerations. In: H₂ HYDROGEN Safety Panel; 2018, Richland, Washington, Estados Unidos da América. **Anais**, Pacific Northwest National Laboratory, 2018. p. 5-26.

BLANCHARD, Joe. **Smart energy solutions using fuel cells**. Spokane, WA, EUA, 2011.

H₂ HYDROGEN TOOLS. Basic Hydrogen Properties Chart. Disponível em: <https://h2tools.org/tools>. Acesso em: 20 nov. 2019.

H₂ HYDROGEN TOOLS. Codes and Standards. Disponível em: <https://h2tools.org/codes-standards>. Acesso em: 20 nov. 2019.

HYDROGENICS. Renewable hydrogen solutions. **Catálogo de produtos da empresa Hydrogenics**. 2008. p. 13.

SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede; SANTOS, Fernando António Castilho Mamede. O combustível hidrogênio. **Millenium**, n. 31, fev. 2016. Disponível em: <http://www.ipv.pt/millenium/millenium31/15.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2019.

SAPOUNTZI, M. Fonteini; GRACIA, M. Jose; WESTSTRATE, C.J. (Kees-Jan); FREDRIKSSON, Hans O.A; NIEMANTSVERDIET, J.W. (Hans), Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas, **Progress in Energy and Combustion Science**, Holanda e China, 02 set. 2016, p. 3.

VASCONCELOS, Glauco Nogueira. **Um panorama sobre as tecnologias de célula a combustível**. Trabalho Acadêmico – (Programa de Pós-Graduação em Energia) Universidade de São Paulo. 2017, São Paulo: USP, 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a esposa, familiares e amigos pelo apoio, palavra sabia e motivadora que não me deixaram desistir e principalmente aos meus pais que foram responsáveis por toda a minha educação e sempre fizeram o impossível para que hoje eu seja um homem honrado pelo conhecimento e sabedoria adquirida ao longo dos anos.

Sobre os autores:

ⁱ HENRIQUE LOURÇO MECONE



Graduação em Tecnologia de Automação Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (2007), Graduação em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de São Paulo (2011), Pós-Graduação em Eficiência Energética pela Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica (2018). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em projetos e aplicação de equipamentos industriais, gestão técnica de projetos industriais, gestão de pessoas e comissionamento de equipamentos.

ⁱⁱ SERGIO LUIZ VOLPIANO



Graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes com especialização em Eletrônica Industrial pela Universidade São Judas Tadeu e Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistema de Potência pela Universidade de São Paulo. Trabalha como professor da Faculdade Senai de Tecnologia em Mecatrônica Industrial e na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, (Fatec) em São Bernardo do Campo lecionando as disciplinas de Eletrônica de Potência, Máquinas Elétricas, Acionamento Eletrônico de Máquinas Elétricas, Eletrônica Digital, Instalações Elétricas Industriais, Eletrônica Geral e Análise de Circuitos em Corrente Contínua e Corrente Alternada nos cursos de graduação e Pós-graduação. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas, Conversão Eletromecânica de Energia, Sistemas de Potência e Eletrônica Industrial.

iii ELIAS FAUSTINO DE SOUSA

Possui Graduação em Tecnologia eletrônica e automação industrial, especialização em Mecatrônica (Latu Sensu) e complementação pedagógica. Técnico de ensino e professor de cursos de técnicos, graduação e pós-graduação no SENAI São Paulo. Disciplinas já lecionadas: Eletricidade e eletrônica Básica, Eletrônica Digital, Instalações elétricas, Comandos Elétricos, Montagens de Painéis, Controladores lógicos programáveis (CLP), Automação e Controle, Eletrohidráulica e eletropneumática, Válvulas Proporcionais hidráulicas, Eficiência energética em sistemas hidráulicos e Pneumáticos, Projetos mecatrônicas, Microcontroladores .

iv MARCOS RIBEIRO DE CARVALHO

Possui graduação em Tecnólogo Eletrônica pela Faculdade de Tecnologia SBC (2009), Pós-graduação em Automação Industrial pela Faculdade Senai de Mecatrônica Industrial (2011). Atualmente é Técnico de Ensino da Escola SENAI "Armando de Arruda Pereira", atuando como docente no curso técnico em mecatrônica. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Eletrônica de Potência, Máquinas Elétricas, Sistemas e Controles Eletrônicos. <http://lattes.cnpq.br/0435778574491228>