

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL E
SÓCIOECONOMIA RURAL**

RAFAEL OMETTO DO AMARAL

**CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO QUE UTILIZAM
ETANOL COMO FONTE DE HIDROGÊNIO**

**SERTÃOZINHO
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL E
SÓCIOECONOMIA RURAL**

RAFAEL OMETTO DO AMARAL

**CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO QUE UTILIZAM
ETANOL COMO FONTE DE HIDROGÊNIO**

**Monografia apresentada ao
Departamento de Tecnologia
Agroindustrial e Sócioeconomia Rural
do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal de São Carlos
como requisito parcial para a obtenção
de Certificado de Conclusão de Curso
de Pós-graduação *Lato-Sensu* em
Gestão de Tecnologia Industrial
Sucroenergética.**

**Orientador: Prof. Dr. Octavio Antonio
Valsechi**

**SERTÃOZINHO
2017**

RAFAEL OMETTO DO AMARAL

**CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO QUE UTILIZAM
ETANOL COMO FONTE DE HIDROGÊNIO**

Monografia apresentada ao Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Pós-graduação *Lato-Sensu* em Gestão de Tecnologia Industrial Sucoenergética. Sertãozinho, 02 de dezembro de 2017.

Orientador:

**Prof. Dr. Octavio Antonio Valsechi
Universidade Federal de São Carlos**

Examinador (a):

Universidade Federal de São Carlos

Dedico este trabalho a todos aqueles que fazem de sua vida uma luta diária para a melhora deste mundo.

“Sucesso e genialidade são 10% de inspiração e 90% de transpiração.” (Albert Einstein).

RESUMO

Atualmente, com o esforço global para reduzir as emissões de carbono e encontrar fontes de energia mais limpas, o hidrogênio é considerado um possível vetor energético do futuro, desde que seja oriundo de fontes renováveis como biocombustíveis, por exemplo. As células de combustível do tipo óxido sólido vêm se destacando entre as demais devido a sua versatilidade, alta eficiência e possibilidade de reforma interna de combustíveis, evitando a necessidade de armazenamento do hidrogênio. O etanol possui diversas vantagens em ser utilizado como fonte de hidrogênio, devido a sua baixa toxicidade e volatilidade, facilidade no transporte e uma infraestrutura de distribuição já disponível. O Brasil é um dos principais produtores mundiais do biocombustível, oriundo da cana-de-açúcar, que possui uma menor pegada de carbono, quando processado em plantas com cogeração de energia e colheita mecanizada, tornando-se um forte candidato a fazer parte da futura economia do hidrogênio. Este trabalho tem como objetivo uma revisão bibliográfica da tecnologia de célula de combustível do tipo de óxido sólido, que utiliza o etanol como combustível. Pretende-se verificar o potencial dessa tecnologia se fazer presente no futuro em aplicações residenciais, industriais e mobilidade, e discutir o possível impacto no setor sucroenergético brasileiro.

Palavras-chave: célula de combustível de óxido sólido, etanol.

ABSTRACT

Today, with the global effort to reduce carbon emissions and find cleaner sources of energy, hydrogen is considered a possible energy vector of the future, as long as it comes from renewable sources such as biofuels. Solid oxide fuel cells have been gaining prominence among the others due to their versatility, high efficiency and the possibility of internal fuel reform, avoiding the need to store hydrogen. Ethanol has several advantages being used as a source of hydrogen due to its low toxicity and volatility, ease of transportation and the available distribution infrastructure. Brazil is one of the world's leading producers of biofuel from sugarcane, which has a smaller carbon footprint when processed in mills with cogeneration and mechanized harvesting, making Brazil a strong candidate to be part of the future economy of hydrogen. This work aims a bibliographic review of solid oxide fuel cell technology that uses ethanol as fuel. It is intended to verify the potential of this technology to be present in the future of residential, industrial and mobility applications, and discuss the possible impact in the Brazilian sugar-energy sector.

Key Words: *solid oxide fuel cell, ethanol.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Objetivo	9
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	10
2.1	Células de combustível.....	10
2.1.1	Tipos de célula de combustível	11
2.1.2	Célula de combustível de óxido sólido	12
2.1.3	Reforma de etanol para a SOFC	13
2.2	Aplicações industriais	14
2.3	Aplicações em mobilidade	17
2.3.1	Mobilidade marítima	17
2.3.2	Mobilidade automotiva.....	18
2.3.3	Mobilidade ferroviária	21
2.4	Aplicações residenciais	22
3	METODOLOGIA.....	25
4	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia mais promissora do século 21, na conversão de energia química para elétrica, é a célula de combustível que vem atraindo um considerável interesse, devido à alta eficiência, versatilidade e ambientalmente aceitável pelas baixas emissões de carbono (TSIAKARAS; DEMIN, 2001).

O hidrogênio é considerado um vetor energético que precisa ser extraído de algum composto, que pode ter origem fóssil ou renovável. O “hidrogênio negro”, oriundo de hidrocarbonetos como petróleo e gás natural, ainda é utilizado como fonte para as células de combustível, porém, eventualmente, as reservas se tornarão caras e escassas, além do conhecido impacto ambiental em sua utilização. Já o denominado “hidrogênio verde”, oriundo de fontes renováveis como o etanol, promove um melhor aproveitamento de fontes da natureza (CAMARGO, 2004).

Atualmente, a célula de combustível de óxido sólido, ou como é mais conhecida na literatura internacional *Solid Oxide Fuel Cell* – SOFC, vem se destacando entre as demais devido à alta eficiência na conversão de energia, modularidade, a não necessidade de materiais nobres em seus eletrodos e altas temperaturas de operação, que oferecem a possibilidade da cogeração e aproveitamento de calor. O etanol, como fonte de hidrogênio, possui diversas vantagens como: facilidade no transporte, baixa toxicidade e volatilidade, além das diversas fontes de biomassa para a sua produção (ARTEAGA-PEREZ, 2009).

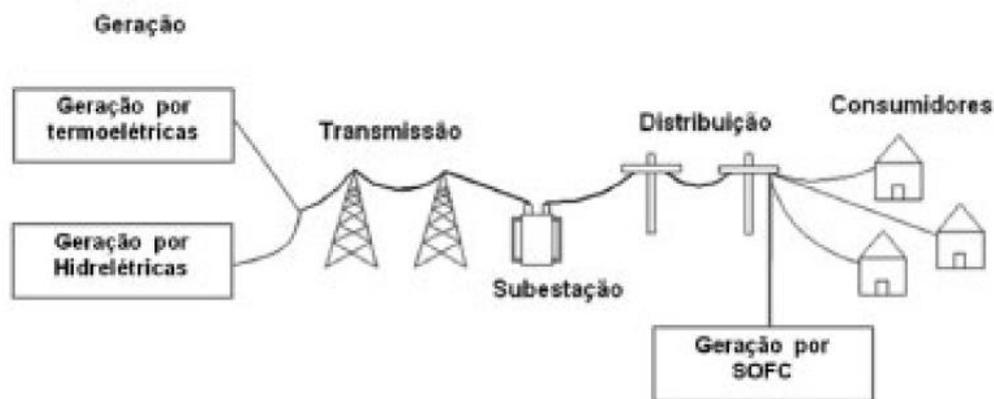
Pequenas plantas híbridas de célula de combustível de óxido sólido, com até 10 kW de potência, focadas em uso residencial e aproveitamento do calor para aquecimento do ambiente e água, conseguem atingir uma eficiência de 60% quando utilizadas com etanol (ROKNI, 2013).

O Japão toma a liderança no desenvolvimento de materiais cerâmicos avançados, que permitem a fabricação da SOFC em um tamanho reduzido, menor temperatura de operação e rápida partida, o que estende as possibilidades de aplicações não só estacionárias, mas também móveis. Um dos propósitos dessa tecnologia é o aumento da autonomia de veículos elétricos, sistema que consegue atingir eficiência na conversão de energia acima de 50% na roda do veículo, valor que supera os limites dos motores à combustão convencionais (FUJISHIRO ET AL, 2011).

O uso da SOFC em ambiente industrial, substituindo meios tradicionais de geração que utilizam combustíveis fósseis, como motores à diesel, pode reduzir em até 55% a emissão de gases de efeito estufa e até 64% o consumo de combustíveis fósseis, quando utilizado o etanol na célula (CASAS ET AL, 2011).

Segundo Fiuza et al (2012), as SOFCs serão destinadas ao mercado de geração distribuída de energia, através de pequenas e médias estações estacionárias (5 a 200 kW). Este modelo reduz investimentos em linhas de transmissões e perdas entre o gerador e o consumidor, conforme a Figura 01. Entretanto, há a necessidade de monitoramento remoto destas estações, eficiência, durabilidade e confiabilidade, principalmente na estocagem e transporte do etanol para o abastecimento.

Figura 01: Ilustração de sistemas tradicionais de geração de energia e a inserção de SOFCs na geração distribuída.



Fonte: Utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. Autores: Raigenis da P. Fiuza, Marcos A. da Silva, Luiz Antônio M. Pontes, Leonardo S. G. Teixeira, Jaime S. Boaventura. Ano: 2012

1.1 Objetivo

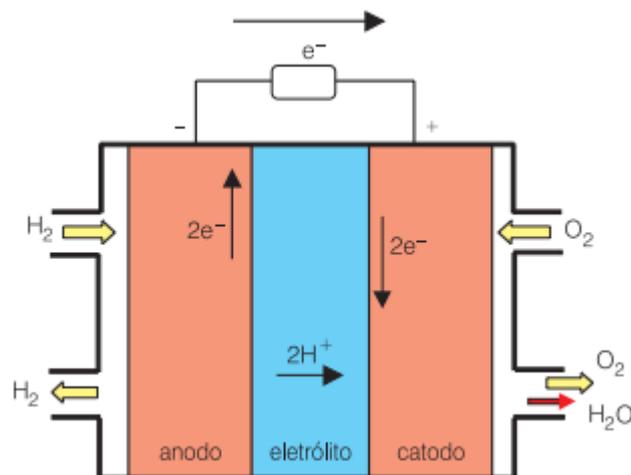
A proposta do trabalho é uma revisão bibliográfica da tecnologia de célula de combustível do tipo de óxido sólido, que utiliza o etanol como combustível e discorrer o possível impacto futuro no setor sucroenergético.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Células de combustível

Segundo Hoffmann (2005), a célula de combustível utiliza a combinação química dos gases hidrogênio e oxigênio, para a geração de energia elétrica, térmica e água. É composta por eletrodos porosos, que permitem a passagem dos gases até atingir a superfície do eletrólito, revestido pelo catalisador. O eletrodo negativo (ânodo) fica em contato com o hidrogênio e o positivo (cátodo) em contato com o oxigênio, ao contrário do que ocorre na eletrólise. Após a passagem dos gases nos eletrodos, eles entram em contato com catalisadores, como a platina, por exemplo, que são responsáveis pela quebra da molécula de hidrogênio em íons e elétrons. O eletrólito com o catalisador são a lógica do funcionamento da célula, pois têm a propriedade de permitir somente a passagem dos prótons (cargas positivas). Os elétrons não passam pelo eletrólito e devem fluir por um circuito externo, onde se aproveita o fluxo, a corrente elétrica, conforme demonstrado na Figura 02.

Figura 02: Funcionamento da célula de combustível



Fonte: Portal Biossistemas Brasil – O que é célula de combustível. Autor: Leonardo P. Magalhães. Ano: 2010.

2.1.1 Tipos de célula de combustível

Hoffmann (2005) discorre que:

[...] existem pelo menos seis tecnologias principais que variam em tamanho, temperatura, combustível, eletrólito e aplicações. Por exemplo, existem tecnologias que funcionam em temperaturas de 1000°C, bem interessante para aplicações industriais, mas não para um telefone celular. Enquanto outras, em temperaturas mais baixas, de 60 a 220°C, são utilizadas para equipamentos portáteis, automóveis e também para a geração de energia estacionária.

As células de combustível de baixa temperatura, como a de membrana de troca de prótons *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* – PEMFC, a de ácido fosfórico *Phosphoric Acid Fuel Cell* – PAFC e a alcalina *Alkaline Fuel Cell* – AFC, surgiram a partir dos anos 50 e tiveram aplicações estacionárias e móveis em alguns casos. Têm como vantagem a rapidez na partida e, com exceção da PAFC, necessitam de hidrogênio puro. A desvantagem é a necessidade da platina como catalisador que encarece o produto. (HOFFMANN, 2005).

As células de combustível de alta temperatura, como a de óxido sólido *Solid Oxide Fuel Cell* – SOFC e a de carbonato fundido *Molten Carbon Fuel Cell* – MCFC podem ser utilizadas para a geração de energia em residências (5 a 10 kW) ou indústrias (acima de 250 kW), e também, atualmente, é alvo de pesquisas no campo automobilístico. A principal vantagem é a geração de calor que pode ser aproveitado em uma cogeração e atingir eficiência de até 85% do combustível utilizado. A desvantagem é a lentidão no funcionamento (HOFFMANN, 2005).

As células de combustível líquidas, como a de metanol direto *Direct Methanol Fuel Cell* – DMFC e a de etanol direto *Direct Ethanol Fuel Cell* – DEFC, utilizam o metanol e o etanol, respectivamente, diluídos ou não, diretamente na célula, podendo ser considerado uma vantagem. Devido à baixa temperatura, a tecnologia é preferida para uso em equipamentos eletrônicos portáteis, porém a DEFC ainda não é muito viável, tecnicamente, pela baixa eficiência (HOFFMANN, 2005).

A Tabela 01 resume as principais tecnologias citadas:

Tabela 01: Seis principais tecnologias de células de combustível.

Célula e Combustível	Eficiência Elétrica	Temperatura de Operação (°C)	Densidade de Potência (kW/m ²)	Reforma de Combustível	Combustível
Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)	35-55%	50-100	3,8 - 13,5	Externo	Hidrogênio
Alcalina (AFC)	45-65%	90-100	0,7 - 8,1	Externo	Hidrogênio puro
Ácido Fosfórico (PAFC)	40-50%	160-210	0,8 - 1,9	Externo	Gás natural, bio gás
Óxido Sólido (SOFC)	50-65%	500-1000	1,5 - 5,0	Externo ou Interno	Gás natural, bio gás, etanol, etc
Carbonato Fundido (MCFC)	50-65%	600-800	0,1 - 1,5	Externo ou Interno	Gás natural, bio gás, etanol, etc
Metanol Direto (DMFC)	40-50%	50-200	1,0 - 6,0	Não requer	Metanol diluído em água

Fonte: Adaptado de Hidrogênio: evoluir sem poluir. Autor: Emilio Hoffmann Gomes Neto

2.1.2 Célula de combustível de óxido sólido

A célula de combustível de óxido sólido – SOFC, objeto de foco neste trabalho, vem sendo considerada como uma das tecnologias mais promissoras, devido à alta eficiência elétrica gerada a partir do gás natural, biogás ou até etanol, com plantas que podem ser integradas à sistemas com turbinas a gás ou vapor. A alta temperatura produzida pode ser utilizada em outros ciclos como o de Rankine ou Brayton, por exemplo, para geração adicional de energia, aproveitamento do calor ou resfriamento, seja uma cogeração ou trigeração. Valores teóricos indicam que um ciclo, combinado com uma SOFC, pode atingir até 90% de eficiência na conversão de energia. (CHOUDHURY; CHANDRA; ARORA, 2012).

Conforme Gupta, Yadav (2016), as SOFCs se diferem em vários aspectos de outras células, podem operar em temperaturas acima de 1000°C, o que é significativamente mais quente que a maioria, e são compostas somente de materiais em estado sólido, não havendo restrições em suas configurações de construção. A célula consiste em dois eletrodos, ao redor de um eletrólito cerâmico, oriundo de óxido de zircônia. O único subproduto do processo é a molécula de água e calor.

O combustível é também o principal parâmetro para a performance da célula. O hidrogênio de alta pureza contribui para um bom funcionamento, porém, como é muito caro de se produzir e de difícil manuseio, não se faz estritamente necessário, pois a função do eletrodo é provocar a reação entre o reagente

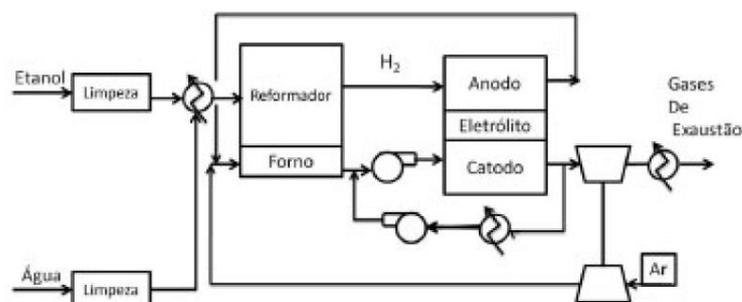
(combustível e oxigênio) e o eletrólito, sem que seja consumido ou corroído. Cada componente da SOFC deve atender requerimentos como estabilidade adequada (química, morfológica e dimensional), condutividade adequada, compatibilidade química com os demais componentes, expansão térmica adequada para evitar trincas, eletrólito denso para evitar mistura de gases e cátodo/anodo poroso para o transporte de gases (GUPTA; YADAV, 2016)

2.1.3 Reforma de etanol para a SOFC

Segundo Fiuza et al (2012) “A SOFC pode operar em três diferentes tipos de configurações: operação com reformador externo, reformador interno indireto (IIR-SOFC) e reformador interno direto (DIR-SOFC).”

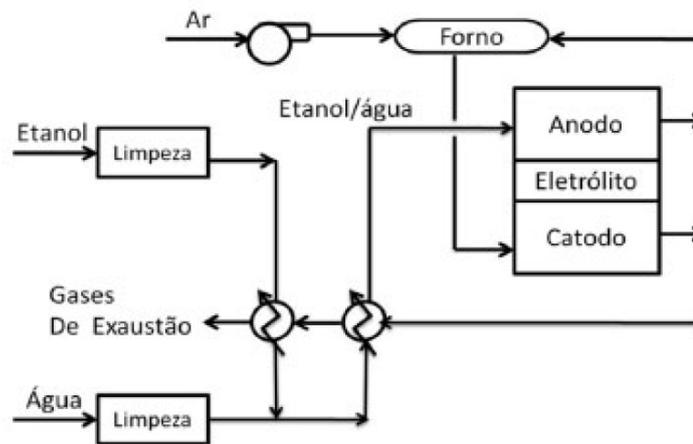
Na reforma interna indireta, o combustível é alimentado em uma seção separada fisicamente da célula, porém, o reformador e a célula estão aproximadamente na mesma temperatura, envoltos por uma caixa isolante, conforme a Figura 03. Temos como vantagem, nessa configuração, uma maior purificação do hidrogênio, melhorando o desempenho da célula. Em relação à reforma interna direta, a alimentação do combustível é feita diretamente no ânodo sem uma reforma prévia, podendo ser uma mistura de etanol e água, conforme a Figura 04. Neste último caso, temos como vantagem o consumo contínuo do hidrogênio, durante a reforma do combustível, facilitando a reação, porém, a alimentação direta do etanol no ânodo pode levar a formação de carbono, reduzindo a vida útil (FIUZA et al, 2012).

Figura 03: SOFC a etanol com reforma indireta



Fonte: Utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. Autores: Raigenis da P. Fiuza, Marcos A. da Silva, Luiz Antônio M. Pontes, Leonardo S. G. Teixeira, Jaime S. Boaventura. Ano: 2012

Figura 04: SOFC com reforma direta no ânodo.



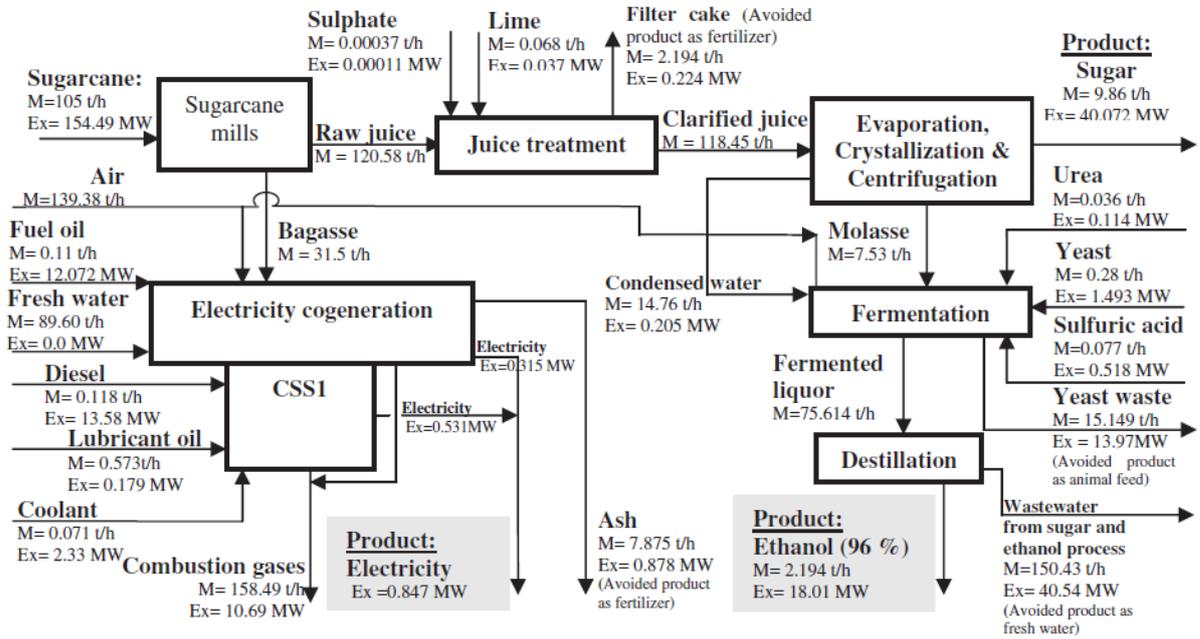
Fonte: Utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. Autores: Raigenis da P. Fiuza, Marcos A. da Silva, Luiz Antônio M. Pontes, Leonardo S. G. Teixeira, Jaime S. Boaventura. Ano: 2012

2.2 Aplicações industriais

O efeito da integração da SOFC em uma usina de açúcar e etanol de tamanho padrão, em Cuba, é avaliado quanto aos benefícios ambientais. A unidade processa 105 t/h de cana e produz 9,86 t/h de açúcar bruto e 2,20 t/h de etanol hidratado, com o consumo de 847 kWh. Parte da energia consumida é provida por um turbo-gerador a vapor, com 315 kW de potência, e o restante da energia (531 kW), através de um gerador convencional à diesel, com consumo de 118 l/h de combustível e emissão de 158,49 t/h de gases de combustão, conforme demonstrado no balanço da Figura 05. O vapor é gerado através da queima do bagaço (31,5 t/h) e a produção do etanol, através da fermentação do melaço (4,12 t/h). A planta opera 100 dias por ano (CASAS ET AL, 2011).

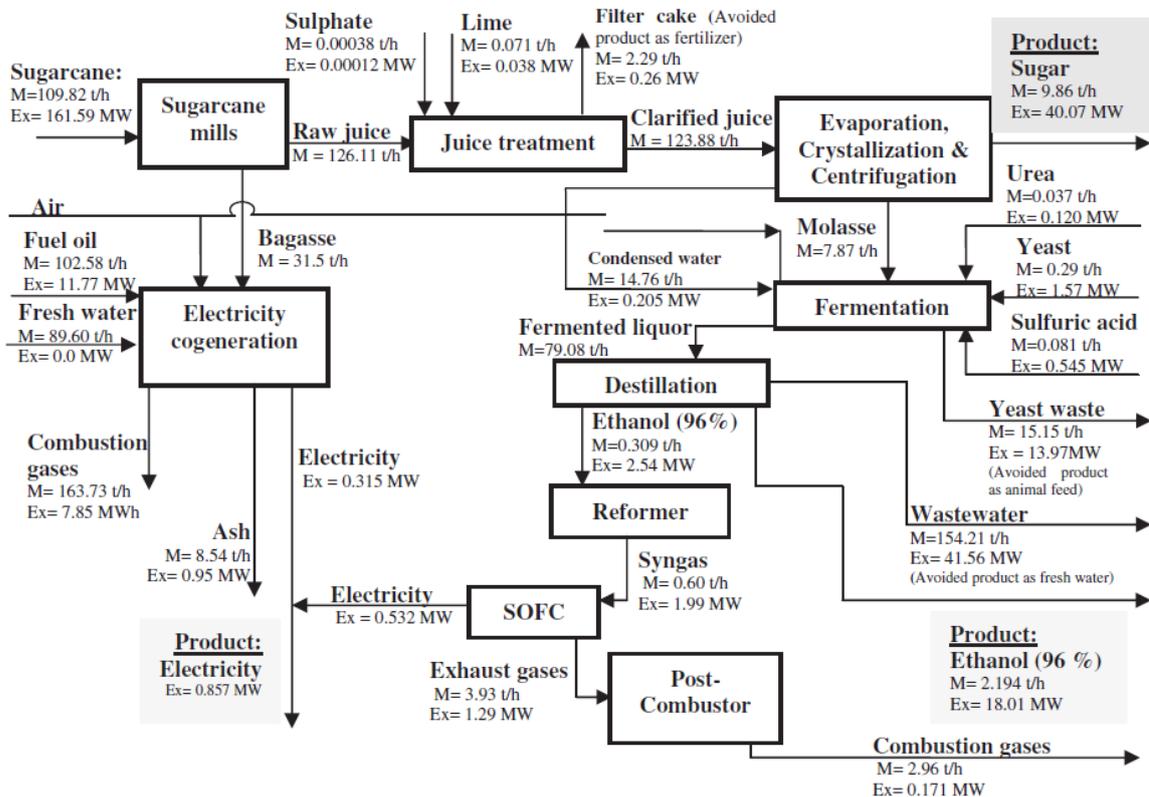
Conforme a proposta de Casas et al (2011), o sistema de SOFC é integrado e parte da produção de etanol (0,31 t/h) é transferida para o reformador, que abastece a célula de combustível, gerando 532 kW, energia suficiente para a substituição do tradicional gerador à diesel. O balanço pode ser observado na Figura 06, com emissão de gases de combustão por parte da célula na ordem de 2,96 t/h, valor significativamente menor do que a geração à diesel.

Figura 05: Balanço da produção tradicional de açúcar e etanol



Fonte: *Integration of Solid Oxide Fuel Cell in a sugar-ethanol factory: analysis of the efficiency and the environmental profile of the products.* Autores: Yannay Casas, Jo Dewulf, Luis E. Arteaga-Pérez, Mayra Morales, Herman V. Langenhove, Elena Rosa. Ano: 2011

Figura 06: Balanço da produção tradicional de açúcar e etanol integrada com a SOFC

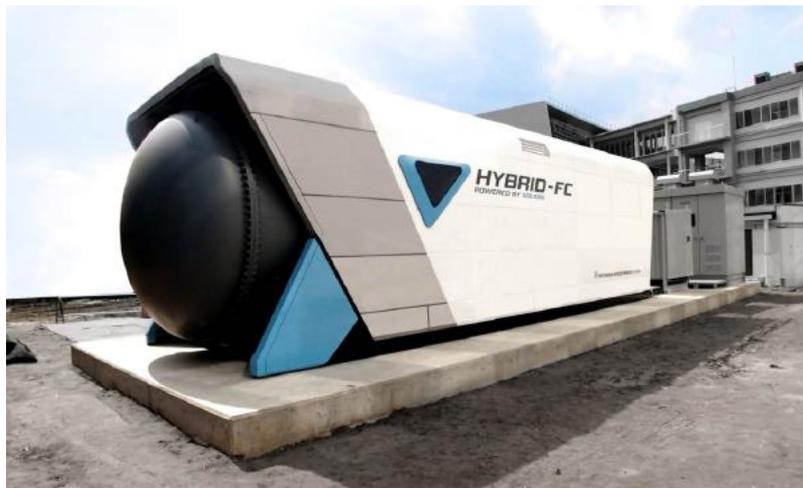


Fonte: *Integration of Solid Oxide Fuel Cell in a sugar-ethanol factory: analysis of the efficiency and the environmental profile of the products*. Autores: Yannay Casas, Jo Dewulf, Luis E. Arteaga-Pérez, Mayra Morales, Herman V. Langenhove, Elena Rosa. Ano: 2011

Os resultados demonstraram, que o uso da SOFC, reduziu em 55% as emissões dos gases de efeito estufa e 64% o uso de recursos não renováveis, quando comparado ao sistema convencional, que utiliza o gerador à diesel. Um maior índice de renovabilidade (0,93) e eficiência em exergia (38%) também foram observados (CASAS ET AL, 2011).

A *Mitsubishi Hitachi Power Systems* (MHPS) desenvolveu um sistema de geração híbrido de uma SOFC, com capacidade de 250 kW de potência (quando combinado a uma turbina a gás) e atingiu 4100 horas de operação contínua. O modelo, conforme Figura 07 ocupa uma área aproximada de 40 m², reduzindo pela metade o tamanho em relação ao último modelo desenvolvido, graças à alta densidade dos cartuchos das células, em uma proporção de 1.800 peças por metro quadrado. Este modelo atingiu uma eficiência de geração de energia elétrica em 55% e eficiência total (considerando o aproveitamento da água quente à 85°C) de 73%. (KOBAYASHI ET AL, 2015).

Figura 07: Modelo desenvolvido pela MHPS em demonstração.



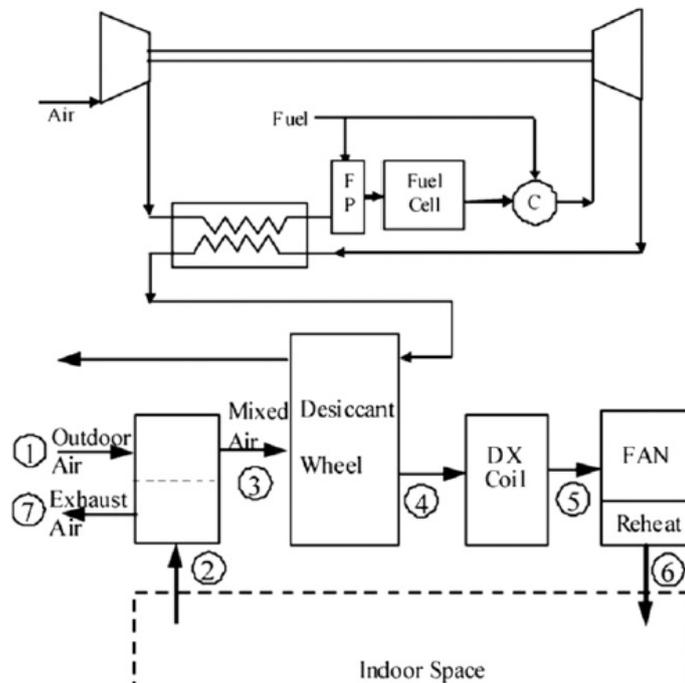
Fonte: *Development of next-generation large-scale SOFC toward realization of a hydrogen society*. Autores: Y. Kobayashi, M. Nishimura, H. Kishizawa, K. Tomida, K. Hiwatashi, K. Takenobu. Ano: 2015

2.3 Aplicações em mobilidade

2.3.1 Mobilidade marítima

O transporte marítimo utiliza, em sua maior parte, combustíveis fósseis, que contribuem para o efeito do aquecimento global. Os navios poluem, quando estão atracados e ociosos, pois dependem de motores à diesel para a geração de energia. Para a redução de emissões de CO₂, NO_x e SO_x, quando atracados, pode-se utilizar um sistema de SOFC, para o sistema de geração de energia, em um sistema combinado de aquecimento, resfriamento e energia (*Combined Heating, Cooling and Power - CCHP*), Figura 08. Este sistema pode atingir uma eficiência teórica de até 43,2% nesta aplicação, valor substancialmente maior quando comparado ao sistema convencional com gerador à diesel (12,1%) (CHOUDHURY; CHANDRA; ARORA, 2013).

Figura 08: Esquema de uma SOFC combinado a um sistema CCHP



Fonte: Application of solid oxide fuel cell technology for power generation.

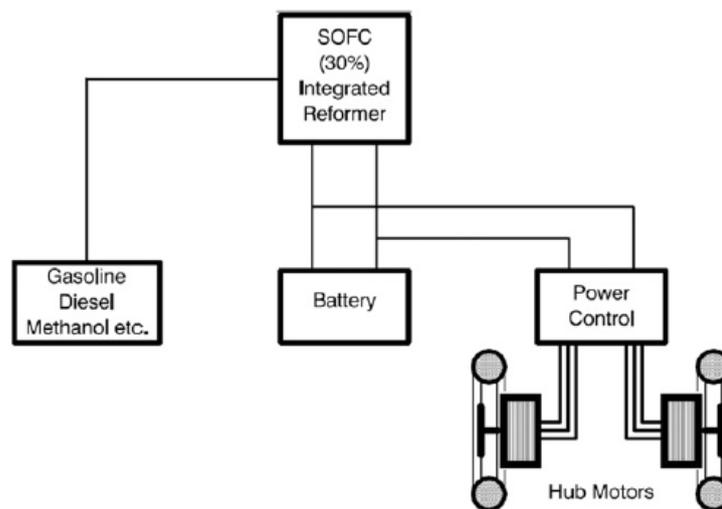
Autores: Arnab Choudhury, H. Chandra, A. Arora. Ano: 2013

2.3.2 Mobilidade automotiva

Conforme Choudhury, Chandra e Arora (2013) demonstram na Figura 09 e mencionam:

A compatibilidade da SOFC com combustíveis de hidrocarbonetos torna a SOFC uma forte candidata a esta aplicação. Basicamente, um veículo típico seria um híbrido equipado com uma SOFC e uma pequena bateria amortecedora, convertendo continuamente o combustível convencional em energia contínua. A temperatura da célula de combustível é ajustada para a demanda real de energia.

Figura 09: Esquema de veículo híbrido equipado com SOFC



Fonte: Application of solid oxide fuel cell technology for power generation.

Autores: Arnab Choudhury, H. Chandra, A. Arora. Ano: 2013

Segundo Fujishiro, et al (2011), o desenvolvimento de uma micro SOFC, que utiliza materiais cerâmicos avançados e nano tecnologia em sua fabricação, permite a utilização da SOFC em aplicações automotivas, pois não atinge altas temperaturas de operação, possui uma rápida partida e tamanho compacto. A eficiência da conversão de energia atinge acima de 50%, valor que ultrapassa os limites do tradicional motor à combustão. Os desafios estão em reduzir o custo de produção para a viabilidade econômica.

O protótipo de um veículo, que utiliza uma célula de combustível do tipo SOFC, alimentada com 100% de etanol, foi desenvolvido e testado no Brasil em 2016

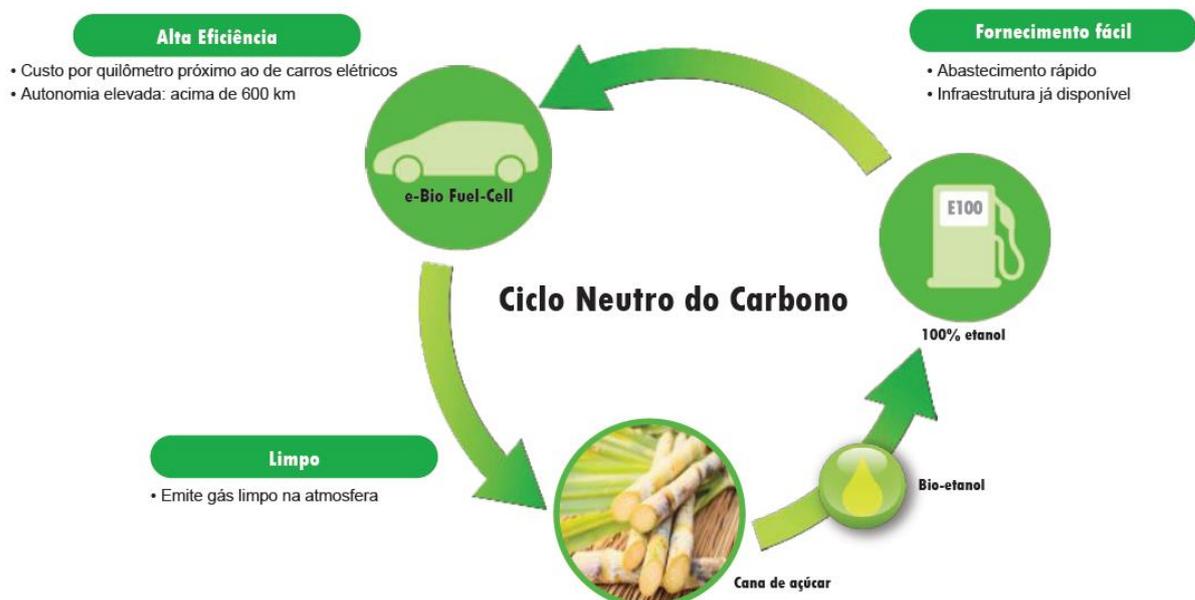
pela Nissan Motor Co. Ltd., conforme a Figura 10. O projeto é denominado “*e-Bio Fuel Cell*” e tem como objetivo o ciclo neutro do carbono, baixo custo por quilômetro rodado, autonomia próxima à de carros com motor a gasolina e dispensa o carregamento em um posto ou na residência, conforme a Figura 11 demonstra (ABE, 2016).

Figura 10: Protótipo Nissan “*e-Bio Fuel-Cell*”



Fonte: Nissan Intelligent Mobility – e-Bio Fuel-Cell System. Autor: Ricardo Abe. Ano: 2016.

Figura 11: Conceito do veículo “*e-Bio Fuel-Cell*”

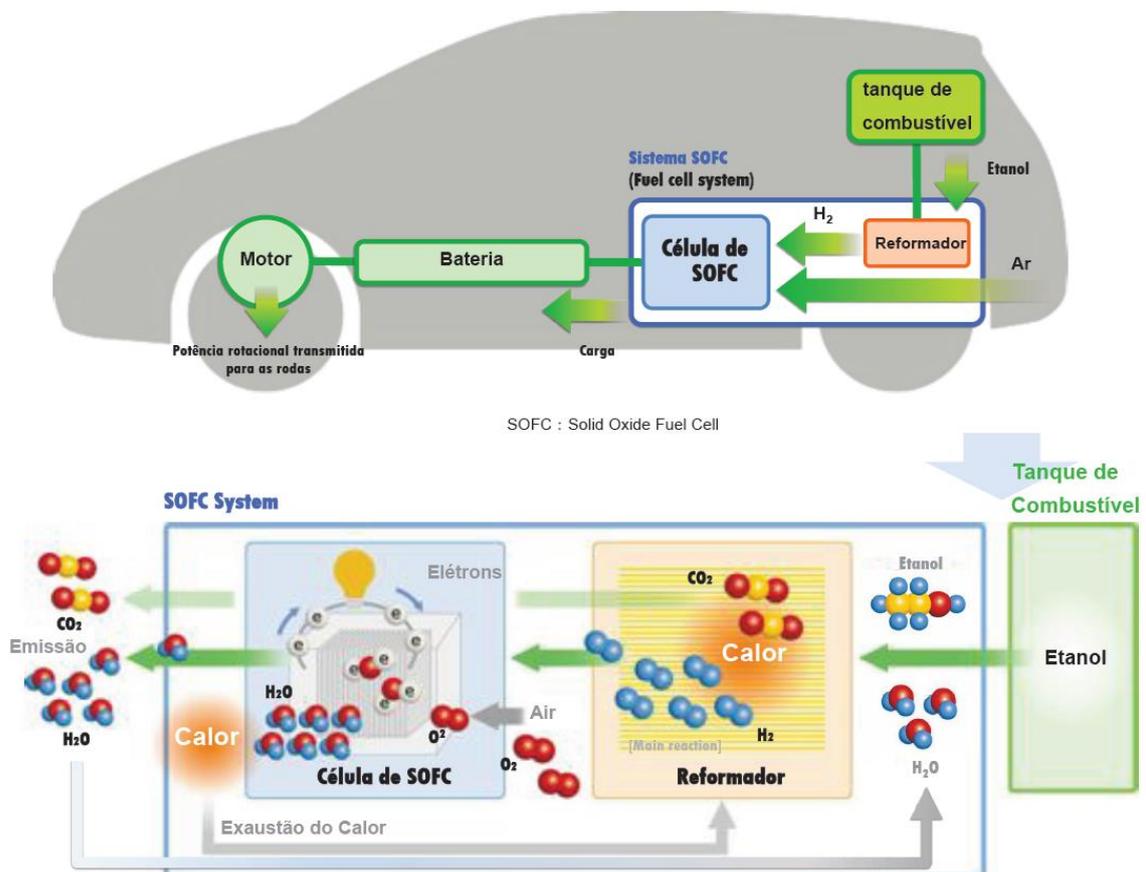


Fonte: Nissan Intelligent Mobility – e-Bio Fuel-Cell System. Autor: Ricardo Abe. Ano: 2016.

Conforme Abe (2016), o veículo utiliza a infraestrutura existente de postos de combustíveis, nos mercados com disponibilidade de etanol. O veículo possui alta disponibilidade podendo operar todos os dias, abastecimento rápido e custo por quilômetro, equivalente aos veículos elétricos, com R\$ 0,10/km, assumindo a utilização do etanol, a 45% de concentração, e preço de R\$ 1,90/l.

O protótipo do veículo “*e-Bio Fuel-Cell*” utiliza o combustível etanol líquido, a 100% de concentração ou diluído até 45%, em um tanque de combustível convencional, o que torna fácil o manuseio e reabastecimento. O hidrogênio é gerado por meio da reação química do etanol e a energia é gerada através da SOFC, carregando a bateria para alimentar o motor elétrico, conforme demonstra a Figura 12. A reação do etanol com a água gera 6 moléculas de hidrogênio e duas de gás carbônico, e a emissão final é de gás carbônico e água. O calor emitido pela SOFC é reutilizado para a reforma do etanol, aumentando a eficiência. As especificações do veículo protótipo podem ser observadas na Tabela 02 (ABE, 2016).

Figura 12: Funcionamento do sistema “*e-Bio Fuel-Cell*”.



Fonte: Adaptado de Nissan Intelligent Mobility – e-Bio Fuel-Cell System. Autor: Ricardo Abe. Ano: 2016.

Tabela 02: Especificações do veículo protótipo

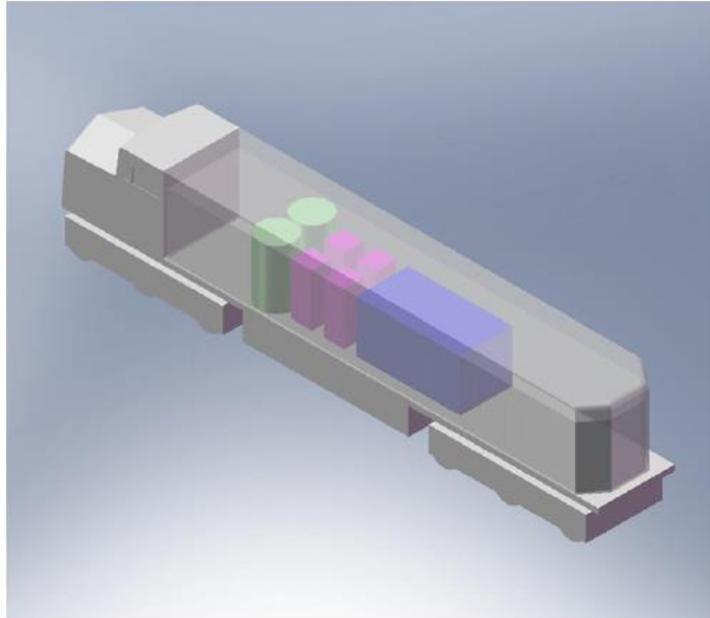
Características	Especificação
Veículo de Base	e-NV200
Capacidade da Bateria	24kWh
Powertrain	Elétrico 100% Etanol
Capacidade do Tanque	30 litros
Potência SOFC	5 kW
Autonomia	Superior a 600 km

Fonte: Nissan Intelligent Mobility – e-Bio Fuel-Cell System. Autor: Ricardo Abe. Ano: 2016.

2.3.3 Mobilidade ferroviária

A viabilidade de um sistema híbrido da SOFC com uma turbina a gás, denominado *Solid Oxide Fuel Cell – Gas Turbine* (SOFC-GT), para a substituição do motor padrão à diesel de uma locomotiva é avaliada, mantendo as mesmas dimensões da máquina para a instalação do sistema. O estudo contempla uma locomotiva do fabricante GE, modelo AC4400CW, com um motor à diesel de 4500 hp (3355 kW). A SOFC, em questão, deve entregar 2900 kW de potência e, junto com uma turbina a gás de mais 500 kW, a locomotiva atingiria a potência necessária para operação. As dimensões foram calculadas e, conforme a Figura 13, é possível verificar o conceito do layout do sistema, dentro do modelo da locomotiva em questão. O diesel é o combustível utilizado pelas operadoras das ferrovias de carga e eles estão familiarizados com esta infraestrutura. O sistema permite a adaptação, facilmente, de biocombustíveis líquidos e, eventualmente, porém mais difícil, gás natural liquefeito ou hidrogênio líquido. A economia de recursos não renováveis e a redução das emissões partículas é notória. (MARTINEZ; BROUWER; SAMUELSEN, 2012)

Figura 13: Conceito do layout do sistema SOFC-GT em uma locomotiva

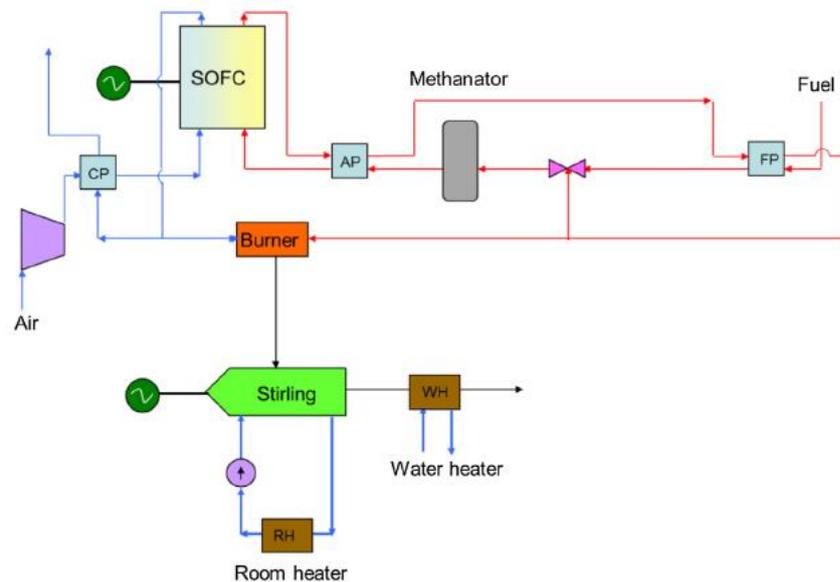


Fonte: *Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power part II. System packaging and operating route simulation.* Autores: Andrew S. Martinez, Jacob Brouwer, G. Scott Samuelsen. Ano: 2012

2.4 Aplicações residenciais

Um novo sistema híbrido, utilizando a SOFC juntamente com um motor do tipo Stirling (máquina térmica de ciclo fechado ou conhecido como motor a ar quente), com potência de 10 kW para uma casa média, é proposto. Simulações indicaram a performance do sistema, utilizando diferentes tipos de combustível como: gás natural, metanol, etanol, amônia e dimetil etileno (DME). A configuração do sistema depende da natureza do combustível utilizado, devido ao tipo de reforma necessária do combustível. O esquema da Figura 14 demonstra a configuração, quando utilizado os combustíveis DME, metanol e etanol. A saída de ar, produzida no lado do cátodo, é dividida para o pré-aquecimento da entrada do ar e mantém a temperatura suficientemente alta no queimador, para prover calor ao motor Stirling. A saída de gases ainda possui um valor energético considerável e é utilizada em um trocador de calor, para aquecimento da casa e água de uso doméstico (ROKNI, 2013).

Figura 14: Esquema do sistema da SOFC e motor Stirling utilizando etanol, metanol e DME como combustível.



Fonte: *Thermodynamic analysis of SOFC - Stirling hybrid plants using alternative fuels*. Autor: Masoud Rokni. Ano: 2013

Em todos os combustíveis, a demanda de energia foi fixada em 10 kW. Todos os fluxos, entradas, saídas, perdas foram consideradas, na simulação, e as plantas foram termicamente autossustentáveis, sem a necessidade de receber calor externo de outra fonte. Os principais resultados estão dispostos na Tabela 03. Uma diferença notável é o consumo de ar. O etanol é o que menos utiliza ar, pois em sua reforma existe uma alta concentração de metano, que leva uma maior reforma interna e, conseqüentemente, menos ar é requerido para resfriamento; portanto, o consumo de energia no compressor é menor. A temperatura de queima do etanol também é a maior, promovendo uma maior geração no motor Stirling. Os resultados demonstram que este sistema tem a maior eficiência com etanol e a menor com a amônia (ROKNI, 2013).

Tabela 03: Comparativo dos combustíveis no sistema SOFC-Stirling

Parameter	NG	DME	Ethanol	Methanol	Ammonia
Fuel mass flow (kg/h)	1.33	2.13	2.15	3.06	3.34
Air compressor mass flow (kg/h)	58.44	60.82	52.09	71.00	58.71
Air-fuel ratio (-)	43.9	28.6	24.2	23.2	17.6
CPO or methanator inlet T (°C)	525	300	300	300	–
CPO or methanator outlet T (°C)	650	595	528	566	–
SOFC off-fuel (kg/h)	6.44	5.87	5.94	6.98	7.02
Fuel recirculated to methanator (%)	–	2.8	3.2	3.3	–
Burner temperature (°C)	1256.0	1304.8	1346.9	1200.1	1152.2
Stirling outlet temperature (°C)	632.8	635.2	637.4	630.0	627.6
Stirling power (kW)	1.105	1.177	1.121	1.211	1.062
Power consumption (kW)	0.131	0.135	0.116	0.158	0.135
Thermal efficiency (LHV) (%)	59.03	58.58	62.62	59.04	57.89

Fonte: *Thermodynamic analysis of SOFC - Stirling hybrid plants using alternative fuels*. Autor: Masoud Rokni. Ano: 2013

3 METODOLOGIA

O trabalho trata-se de uma pesquisa bibliográfica referente à tecnologia de células de combustível do tipo óxido sólido que utilizam etanol como fonte de energia.

4 CONCLUSÃO

A célula de combustível tem o potencial de se tornar uma tecnologia muito presente na era das energias renováveis, pois o seu processo de transformação de combustíveis, diretamente em energia elétrica, é mais eficiente que meios tradicionais, como motores à combustão, e possui baixa emissão de carbono.

O hidrogênio, quando armazenado sob forma líquida ou gasosa, para ser utilizado como combustível das células, requer baixíssimas temperaturas e altíssimas pressões, respectivamente, processo que, muitas vezes, inviabiliza a utilização das células ou torna o local perigoso devido ao risco de explosão. A reforma de combustíveis, antes ou diretamente na célula, evita a necessidade do armazenamento de hidrogênio e pode utilizar uma infraestrutura já existente nas cidades, por exemplo, postos de combustíveis e redes de gás natural.

Existem diversas fontes de combustível para as células, tanto renováveis ou não. Considerando o atual cenário das tentativas de diversos países em reduzir as emissões de carbono e a proximidade da escassez de combustíveis fósseis, o etanol torna-se uma alternativa viável e sustentável nesta aplicação.

As células de combustível de óxido sólido são uma realidade e, empresas como a *Mitsubishi Hitachi Power Systems* (MHPS), fabricam estes sistemas e já comprovaram a eficiência em uma operação contínua. A reforma do etanol para a aplicação em células de óxido sólido também já foi e continua sendo objeto de estudo e experimentos práticos, demonstrando ser o combustível com a melhor eficiência em conversão de energia, em um sistema residencial.

A aplicação da SOFC em uma usina de açúcar e etanol, utilizando parte do próprio combustível produzido para a geração de energia elétrica, evitando o uso de gerador à diesel, possui um grande potencial no quesito ambiental; porém, este modelo não se aplicaria à maioria das usinas, que possuem autossuficiência energética, através da geração em turbinas à vapor. Este tipo de modelo pode ser viável em outras aplicações industriais, que necessitam de energia e calor no processo e utilizam fontes não renováveis.

O desenvolvimento e testes do veículo protótipo, que utiliza o etanol como combustível na SOFC, feito pela Nissan Motor Co. Ltd., demonstra o potencial de ser uma tecnologia disruptiva e presente futuramente no Brasil, devido à

infraestrutura já existente, na distribuição do etanol combustível, em grande parte do país. Os valores atingidos nos testes equiparam o custo do quilômetro rodado ao veículo elétrico e eleva o combustível etanol a atingir uma média de consumo de mais de 20 km/l, com uma concentração de 45%, superando marcas de qualquer motor à combustão do tipo flex. Portanto, esta tecnologia é a de maior potencial de ascensão e produção em massa das células de combustível de óxido sólido, que utilizam etanol.

O setor sucroenergético vem sofrendo nos últimos anos, com os preços do etanol, devido a políticas internas de subsídio aos combustíveis fósseis e, mais recentemente, à queda do preço do barril de petróleo, pois em média o consumo de etanol em motores flex é 30% maior que o da gasolina. Portanto, é viável o abastecimento do biocombustível somente com uma diferença de preço acima deste percentual. A tecnologia de célula de combustível SOFC utilizando etanol, ao invés do tradicional motor flex, pode levar o combustível a um patamar de eficiência muito superior em relação aos fósseis, alavancando a produção nacional do biocombustível, fomentando o desenvolvimento do setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS

- ABE, Ricardo. Nissan Intelligent Mobility: e-Bio Fuel-Cell System. Brasília, 2016.15p.
- ARTEAGA-PEREZ, L.E.; CASAS, Y.; PERALTA, L.M.; KAFAROV, V.; DEWULF, J.; GIUNTA, P. An auto-sustainable solid oxide fuel cell system fueled by bio-ethanol. Process simulation and heat exchanger network synthesis. **Chemical Engineering Journal**, n. 150, p. 242-251, 2009.
- CAMARGO, J.C. **O etanol como fonte de hidrogênio para células de combustível na geração distribuída de energia elétrica**. 2004. 162 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- CASAS, Y.; DEWULF, J.; ARTEAGA-PÉREZ, L.E.; MORALES, M.; LANGEHOVE, H.V.; ROSA, E. Integration of solid oxide fuel cell in a sugar-ethanol factory: analysis of the efficiency and the environmental profile of the products. **Journal of cleaner production**, n. 19, p. 1395-1404, 2011.
- CHOUHDURY, A.; CHANDRA, H.; ARORA, A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 20, p. 430-442, 2013.
- FIUZA, R.P.; SILVA, M.A.; PONTES, A.M.; TEIXEIRA, L.S.G.; BOAVENTURA, J.S. A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. **Química nova**, Salvador, v. 35, n. 8, p. 1-15, 2012.
- FUJISHIRO, Y.; SUZUKI, T.; YAMAGUSHI, T.; HAMAMOTO, K.; AWANO, M. Challenge for the development of micro SOFC manufacturing technology: compact SOFC using innovative ceramics integration process. **Synthesiology**, v.14, n. 1, p. 36-45, 2011.

GUPTA, N.; YADAV, G.D. Solid oxide fuel cell: a review. **International Reserach Journal of Engieneering and Technology**, v. 35, n.6, p. 1006-1011, 2016.

JANSAK, W.; ASSABUMRUNGRAT, S.; DOUGLAS, P.L.; CROISET, E.; LAOSIROPOJANA, N.; SUWANWARANGKUL, R.; CHAROJROCHKUL, S. Thermodynamic assessment of solid oxide fuel cell system integrated with bioethanol purification unit. **Journal of power sources**, n. 174, p. 191-198, 2007.

KOBAYASHI, Y.; TOMIDA, K.; NISHIURA, M.; HIWATASHI, K.; KISHIZAWA, H.; TAKENOBU, K. Development of next generation large scale SOFC towards realization of a hydrogen society. **Mitsubishi Heavy Industries Technical Review**, v. 52, n. 2, p. 111-116, 2015.

MAGALHÃES, L.P. **Portal Biosistemas**: O que é célula de combustível. Disponível em: <<http://www.usp.br/portalbiosistemas/?p=4316>>. Acesso em 12 ago. 2017.

MARTINEZ, A.S.; BROUWER, J.; SAMUELSEN, G.S. Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power part II. System packaging and operating route simulation. **Journal of power sources**, n. 213, p. 358-374, 2012.

NETO, E.H.G. Hidrogênio, evoluir sem poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005.

PIRKANDI, J.; MAHMOODI, M.; OMMIAN, M. An optimal configuration for a solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system based on thermo-economic modelling. **Journal of Clean Production**, n. 19, p. 10-41, 2017.

ROKNI, M. Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell) - Stirling hybrid plant using alternative fuels. **Energy**, n. 61 p. 87-97, 2013.

TSIAKARAS, P.; DEMIN, A. Thermodynamic analysis of a solid oxide fuel cell system fueled by ethanol. **Journal of power sources**, n. 102, p. 210-217, 2001.