

Utilização de células de biocombustível movidas a etanol para trens de carga

Luiz Henrique Hungria^{1*}, Vinícius dos Santos Sanches¹, Camila Moscibrocki¹.

¹ Rumo S.A. – Engenharia de Desenvolvimento. Rua Emílio Bertolini, 100, 82920-030, Curitiba, PR, Brasil.

e-mail: hungria@rumolog.com; vinicius.sanches@rumolog.com;
camila.moscibrocki@rumolog.com

Resumo: Quando considerados todos os processos para geração de energia elétrica, tais como químico, mecânico, hidráulico, térmico e fotoelétrico, vê-se que fatores tais como disponibilidade, eficiência, custo e agressão ao meio ambiente influem fortemente na escolha do sistema de propulsão a ser adotado. A locomotiva para trens de carga é uma geradora de potência variável móvel que precisa de uma fonte primária que seja de elevada vida útil, tenha alta eficiência, custos reduzidos e utilizar combustível renovável, não agressor do meio ambiente e ter alta densidade de energia para dar autonomia a partir de um armazenamento relativamente pequeno na locomotiva. Fazendo estas considerações, percebe-se que apenas a opção de **células de combustível** (do inglês “fuel cells” ou FC) preenche a todos estes requisitos. Dentro dos diversos tipos de células, podemos eliminar aquelas que utilizam apenas hidrogênio puro devido ao perigo de transportá-lo e armazená-lo e do alto custo de seus componentes internos. Assim, recai-se à **célula de combustível do tipo óxido sólido** (do inglês “solid oxide fuel cells” ou SOFC) por permitir o uso de combustíveis ricos em hidrogênio que podem ser extraídos por meio de reforma e cujos materiais empregados são de menor custo e resistentes ao monóxido de carbono.

Palavras-Chaves: Locomotivas, célula de combustível, etanol.

1. INTRODUÇÃO

$$\eta = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}} \quad (1)$$

A ferrovia iniciou utilizando locomotivas a vapor para tracionar os vagões sobre trilhos (1825). A energia primária era um motor de combustão externa cujo fluido era o vapor de água que era produzido em uma caldeira e enviado a êmbolos que, através de seu deslocamento longitudinal, faziam as rodas se moverem por meio de movimento rotacional.

Por ser uma máquina térmica utilizando um fluido externo para impulsionar as partes mecânicas, o seu rendimento global era muito baixo, de apenas 8 %.

Máquinas térmicas convertem calor em trabalho mecânico utilizando um combustível para produzir este calor. Para o caso de uma caldeira utilizava-se madeira ou carvão. O rendimento térmico destas máquinas é dado pelo ciclo de Carnot:

Visando tornar as ferrovias mais competitivas (maior produção a menores custos), as locomotivas a vapor começaram a ser substituídas por tração diesel-elétrica a partir de 1945.

Com esta nova fonte primária de energia, o rendimento global do sistema passou para 33 %, ou seja, quatro vezes o rendimento global de uma locomotiva a vapor.

O motor Diesel é também uma máquina térmica, e, portanto, tem seu rendimento térmico de acordo com a equação (1). Trata-se de um motor de combustão interna onde o fluido motor é também o combustível, sendo neste caso, o óleo diesel.

O movimento de rotação do virabrequim faz um gerador principal girar, gerando corrente elétrica para os motores de tração. Estes, por meio do engrenamento pinhão (no motor de

tração) e coroa (no rodeiro) geram o movimento rotacional das rodas. O esquema geral deste sistema pode ser visto na Fig. 1.

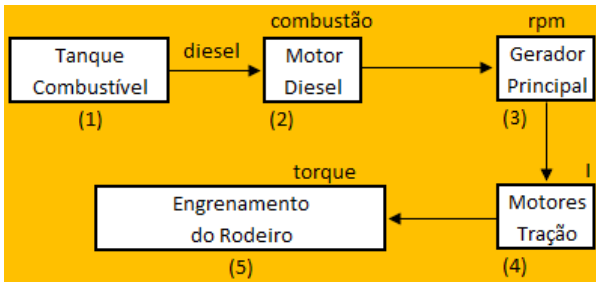
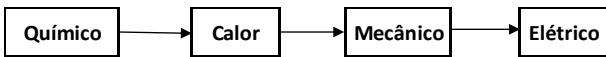


Fig. 1 Esquema atual de uma locomotiva.

A sequência de transformação de energia segue os seguintes passos:



Hoje, novos desafios se fazem presentes e geram a necessidade de se pesquisar novas fontes de energia primária para os trens. Eles são: extinção de combustíveis fósseis não renováveis, poluição causada pelos gases de exaustão gerando tanto danos à saúde como os gases causadores de efeito estufa, além do baixo rendimento energético global dos atuais sistemas movidos a motores térmicos. Dentre as várias alternativas energéticas, a FC tem se mostrado como a mais promissora fonte primária, por gerar energia elétrica diretamente a partir de uma reação eletroquímica.



O rendimento energético global é em torno de 60%, aumentando em 1,8 vezes o rendimento de uma locomotiva diesel elétrica. Já não segue a eficiência termodinâmica do ciclo de Carnot. Além disso, os produtos resultantes exauridos do sistema são apenas vapor de água e calor. Quando for utilizado combustível com cadeia de carbono também é exaurido o CO₂.

O esquema geral deste sistema pode ser visto na Fig. 2.

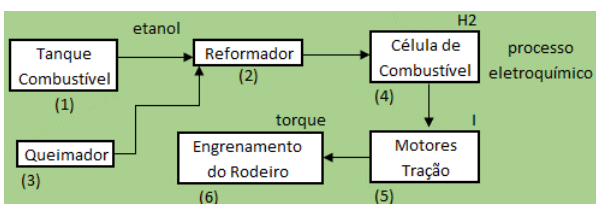


Fig. 2 Esquema do sistema de propulsão de locomotiva por meio de FC.

Esta fonte primária utiliza um processo eletroquímico para geração de eletricidade, em substituição ao processo de combustão precedente.

No gráfico 1, vemos um comparativo de eficiência energética entre as diversas fontes de energia primária em função da potência disponibilizada, lembrando que uma locomotiva alcança uma potência de 3.300 kW.

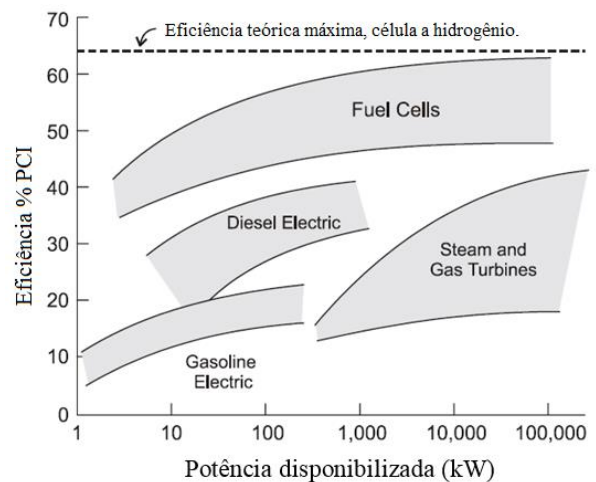


Gráfico 1. Eficiência energética versus potência disponibilizada [1].

Este sistema pode utilizar combustíveis renováveis para que a reação eletroquímica possa gerar corrente elétrica.

Na Fig. 3 pode ser visto o esquema de uma FC.

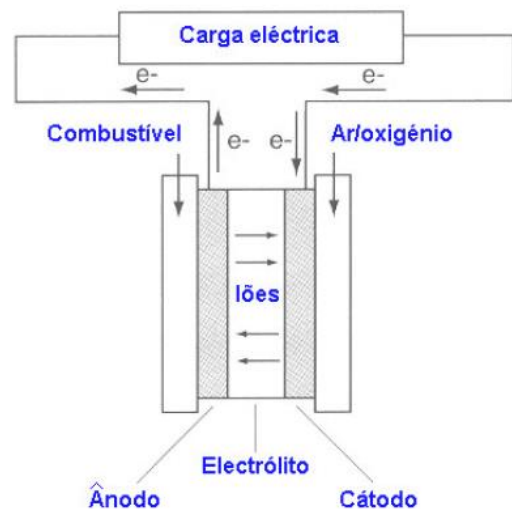


Fig. 3 Esquema de uma célula de combustível.

2. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR CÉLULA DE COMBUSTÍVEL [1]

Uma FC é um dispositivo eletroquímico que converte energia química a partir de um combustível e um gás oxidante (ar) diretamente em eletricidade, sem combustão.

2.1 Vantagens das células de combustível

a) operam sem produzir poluição quando se utiliza hidrogênio puro. Neste caso, os produtos de exaustão são apenas água pura e calor. Quando opera com gás reformado rico em hidrogênio ocorre alguma emissão prejudicial embora muito menor do que aqueles emitidos por motores que usam combustíveis fósseis.

b) operam com maiores eficiências termodinâmicas do que os motores térmicos. Como as FC não usam combustão, sua eficiência não é ligada à máxima temperatura de operação. Como resultado disto, a eficiência da conversão de energia química em elétrica (processo eletroquímico) pode ser significativamente maior.

c) exibem uma alta eficiência em cargas parciais e não mostram queda em sua eficiência quando o tamanho da FC diminui.

d) são dispositivos rígidos (sem partes móveis) que reagem quimicamente e mudam o regime de carga instantaneamente.

e) quando usado como um dispositivo de geração de energia elétrica, a FC requer poucas transformações de energia quando comparado com um motor térmico.

f) não requerem regulagem.

g) não requerem recarregamento. O sistema de combustível pode ser reabastecido muito rapidamente e tem uma autonomia tanto maior quanto maior for o tanque de armazenamento.

2.2 Desvantagens das FC

a) embora o uso de hidrogênio beneficie o meio ambiente quando usado em FC, é também maior sua responsabilidade devido à dificuldade de fabricá-lo e armazená-lo. Os processos de fabricação são caros e

consomem intensamente energia, cuja origem é a partir de combustíveis fósseis. Sistemas de armazenamento de hidrogênio gasoso são grandes e pesados para acomodar uma baixa densidade de energia por volume de hidrogênio. Sistemas de armazenamento de hidrogênio líquido são menores e mais leves, porém operam sob temperaturas criogênicas.

Se o hidrogênio é armazenado como um hidrocarboneto ou álcool e liberado sob demanda por meio de um reformador, a armazenagem e o manuseio ficam simplificados, mas alguns benefícios ambientais são perdidos.

b) as FC requerem combustível relativamente puro, livre de contaminantes específicos. Estes contaminantes incluem enxofre, compostos de carbono e resíduo de combustíveis líquidos que podem desativar o catalisador, efetivamente destruindo sua habilidade de operar.

c) o uso de *platina* como catalisador para promover a reação eletroquímica é um metal raro e muito caro.

d) as FC que usam membranas de troca de íons não podem secar durante o uso e devem permanecer úmidas durante a armazenagem. Tentativas de iniciar ou operar estas FC sob condições secas podem conduzir a danos na membrana.

e) as FC são rígidas, mas dependem de sistemas de suporte. Dentre eles, faz-se necessário um compressor de ar. Isto impõe cargas adicionais sobre o sistema geral. A complexidade do sistema aumenta significativamente quando as FC são operadas em conjunto com um reformador.

f) o sistema completo de uma FC é pesado devido aos sistemas de suporte e armazenagem de combustível. Sistemas que incluem um reformador são ainda mais pesados.

g) são uma tecnologia emergente. Redução de custo, peso e tamanho concorrem com o aumento de confiabilidade e vida útil.

2.3 Escolha do tipo de FC

Analisando a tabela 1 e considerando as vantagens e desvantagens citadas nos itens anteriores, a escolha do tipo de FC recaiu sobre a de *Óxido Sólido*, cuja abreviatura é SOFC (*solid oxide fuel cell*).

Tabela 1. Comparativo entre os tipos de FC existentes [7].

Tipo de célula de combustível	Temperatura de funcionamento (°C)	Potência específica (mW/cm ²)	Potência (kW)	Eficiência elétrica (%)	Tolerância ao CO
PAFC	180-210	150-300	50-1000	40	<1%
PEMFC	≤90	300-1000	0,001-1000	40-50	<50 ppm
AFC	60-250	150-400	1-100	50	<50 ppm
MCFC	≈650	100-300	100-100000	45-55	Combustível
SOFC	600-1000	250-350	10-100000	50-60	Combustível

A SOFC utiliza um eletrólito que conduz íons de óxido (O²⁻) do cátodo para o ânodo. Isto é o oposto da maioria dos tipos de FC, às quais conduzem os íons de hidrogênio do ânodo para o cátodo. Ver Fig. 4.

O eletrólito é composto de um óxido sólido, normalmente Y₂O₃ (Ítria) estabilizado com ZrO₂ (Zircônia). A FC opera a 600 – 1.000°C. Tipicamente, o ânodo é Ni – ZrO₂ e o cátodo é Sr - dopado com LaMnO₃.

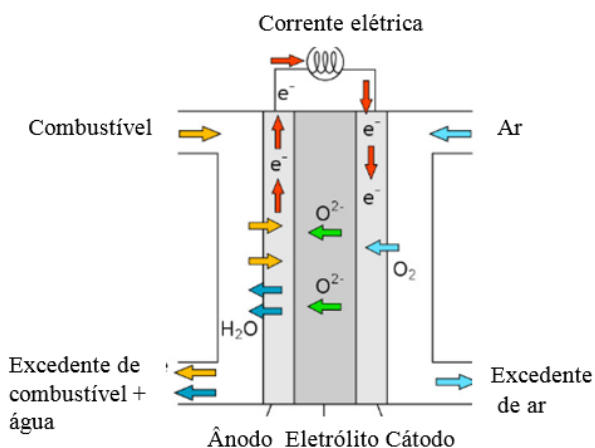


Fig. 4 Célula de combustível tipo óxido sólido.

Vantagens:

- suporta reforma interna espontânea de combustíveis hidrocarbonetos.
- opera igualmente bem usando combustíveis anidros ou hidratados.
- tem reações cinéticas rápidas.
- tem elevada eficiência energética.
- pode operar em elevadas densidades de corrente.
- tem um eletrólito sólido evitando problemas associados com manuseio de líquidos.
- pode ser fabricado em diferentes formas e configurações (planas, tubulares).

h) não necessitam de catalisadores feitos com metal nobre como a platina.

Desvantagens:

- não tem ainda processos práticos de fabricação.
- a tecnologia ainda não é madura.
- tem uma intolerância ao enxofre.
- requerem desenvolvimento de materiais que possuam condutibilidade, permaneçam sólidos em altas temperaturas, sejam quimicamente compatíveis com outros componentes da FC, sejam estáveis dimensionalmente e tenham alta resistência mas permitam ser normalmente fabricados.

Reações:

- no ânodo:

$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ => reação do hidrogênio que ocorre independentemente do combustível.

$CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2 e^-$ => reação do monóxido de carbono e ocorre somente com hidrocarbonetos.

- no cátodo:

$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$ => reação do oxigênio e ocorre independentemente do combustível.

Combinando as reações do ânodo e do cátodo, as reações gerais da FC são:

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ => reação do hidrogênio e ocorre independentemente do combustível.

$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$ => reação do monóxido de carbono e ocorre somente com hidrocarboneto.

A FC produz água, independentemente do combustível, e dióxido de carbono se usado um combustível de hidrocarboneto.

Tanto a água quanto o dióxido de carbono devem ser continuamente removidos do ânodo para facilitar a reação.

2.4 Partes do sistema da FC

A Fig. 5 mostra um *layout* simplificado para uma instalação baseada em SOFC. O ar para a operação do reformador e para o cátodo é

comprimido e depois dividido entre estas operações.

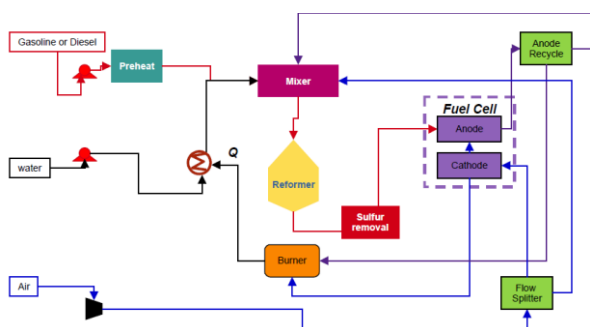


Fig. 5 Esquema de uma instalação de uma célula de combustível do tipo óxido sólido (SOFC) [2].

O suprimento de água externa provavelmente não será necessária pois o fluxo de reciclagem do ânodo poderá fornecer toda a água necessária. O gás residual do ânodo não reagido é recuperado em um queimador de gás residual. A energia adicional é disponível em um sistema SOFC a partir da recuperação da entalpia dos gases de exaustão que estão tipicamente a 400 - 600°C.

Os reformadores de SOFC baseados em combustíveis a base de hidrocarboneto e álcool serão do tipo exotérmico (ou seja, oxidação parcial ou reforma autotérmica), pois não existem reformadores a vapor viáveis para esses combustíveis.

Seguindo a sequência da Fig. 2, os seguintes componentes serão necessários para o sistema a base de SOFC:

(1) Tanque de Combustível:

Para a armazenagem do etanol hidratado. O volume precisará ser calculado para dar a autonomia necessária à locomotiva, para que consiga transitar entre postos de abastecimento já existentes ao longo da ferrovia.

O material do tanque deverá ser analisado considerando os seguintes aspectos:

- resistência à corrosão.
- resistência mecânica a choques.
- evitar contaminação do combustível.

(2) Reformador:

Deverá ser do tipo autotérmico. Este tipo de reformador procura combinar as características do reator de oxidação parcial, a saber, ser compacto e acompanhar a

mudança de carga, com a eficiência do reformador a vapor.

O processo do reformador autotérmico pode ser visto no esquema da Fig. 6.

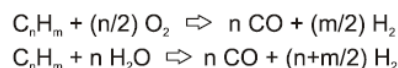
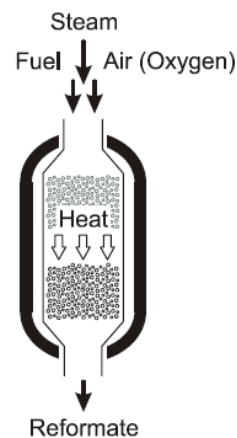


Fig. 6 Processo autotérmico [1].

Em um reformador autotérmico, o combustível, o vapor e o oxigênio (ou ar) são alimentados sobre um leito de catalisador misto que suporta tanto as reações de oxidação como as de reforma a vapor.

O calor gerado pela reação de oxidação parcial fornece o calor necessário para os pontos essenciais e para a reação de reforma a vapor, assim como elimina a necessidade de um queimador externo ou fonte de calor. Este processo requer integração térmica cuidadosa e controles rígidos para garantir o balanço de calor e correspondência de temperatura entre as duas reações.

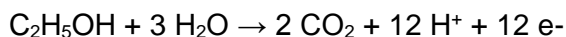
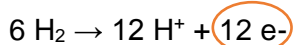
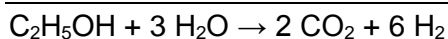
Embora os reformadores autotérmicos superem parte das limitações dos reformadores de oxidação parcial, eles ainda operam em eficiências inferiores a dos reformadores a vapor e também devido à diluição da corrente de hidrogênio. Além disso, os reformadores autotérmicos são os menos desenvolvidos de todos os sistemas de reformadores e ainda exigem significativo esforço de engenharia antes de se tornarem práticos.

(3) Queimador:

Para vaporização do combustível preparando-o para entrar no reformador.

(4) SOFC:

No ânodo ocorre a reação:



A diferença de potencial (E^0) de cada unidade da célula é:

$$\Delta G^0 = nFE^0 \quad (2)$$

$$E^0 = \frac{\Delta G^0}{nF} = \frac{1.325.44 \cdot 10^5}{12 \cdot 96.485} = 1,14 V$$

n: número de moles de elétrons liberados na reação.

F: constante de Faraday, vale 96.485 C/mol.
 ΔG^0 : energia livre de Gibbs do etanol a 25°C.

A potência específica será entre 250 a 350 mW/cm² (tab. 1), em corrente contínua. Haverá necessidade de inversores para enviar corrente alternada aos motores de tração.

(5) Motores de tração:

Os motores elétricos fazem girar o engrenamento pinhão-coroa para criar o movimento de rotação sobre os rodeiros da locomotiva.

(6) Engrenamento:

A energia elétrica é finalmente transformada em energia mecânica para produção de trabalho.

2.5 Conjunto de baterias

O conjunto de FC irá gerar apenas 50% (1.650 kW) da demanda máxima de potência necessária ao longo do trajeto, pois, de acordo com o ciclo de trabalho de uma locomotiva de linha mostrado na tabela 2, 60% do tempo em tração se utiliza a potência até o ponto 5.

Quando houver necessidade de demandas superiores, o conjunto de baterias, como fonte secundária de energia, entrará em ação para atendimento destes transientes.

O tipo de bateria a ser selecionada será a do tipo Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄). São baterias de lítio, com maior aplicação em sistemas de tração. Apresentam boa capacidade de potência e estabilidade na reação química e térmica, o que se traduz em

uma menor probabilidade de ignição ou explosão nos casos em que a bateria seja posta à situação de sobretensão, curto-circuito ou temperaturas elevadas [6].

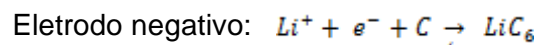
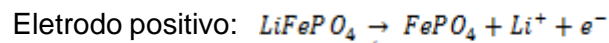


Tabela 2. Ciclo de trabalho de uma locomotiva de linha. [7]

Ponto (notch)	Ciclo de trabalho (%)
DB	13,2%
Idle	56,1%
T1	4,4%
T2	4,9%
T3	4,1%
T4	2,6%
T5	2,3%
T6	2,5%
T7	3,0%
T8	7,0%
Total	100%

Principais características da bateria LiFePO₄:

- Tensão máxima: 3,6 V
- Tensão nominal: 3,3 V
- Tensão mínima: 2,5 V
- Dens. energética específica: 110 Wh/kg
- Dens. potência específica: > 300 W/kg

3. PROJETO DE UMA LOCOMOTIVA

O principal motor será uma SOFC. Esta célula deverá fornecer continuamente, no mínimo, a potência média do ciclo de trabalho.

O dispositivo de armazenagem auxiliar de energia, o qual consistirá de baterias do tipo Lítio Ferro Fosfato, deverá estocar energia suficiente para suprir a potência que exceder à potência contínua, a fim de atender o pico de potência exigida, que será em torno de 3.300 kW para esta aplicação. Esta energia deverá estar disponível enquanto não superar a capacidade de descarga das baterias. Caso seja necessário mais tempo de fornecimento de energia, isto significará que será preciso aumentar o número de baterias [4].

A Fig. 8 mostra o esquema geral da locomotiva com a fonte de energia primária

(células de combustível) e com a fonte secundária (conjunto de baterias).

3.1 Compartimento traseiro

Neste compartimento ficarão alojados os seguintes sistemas: SOFC, o conversor DC/DC, o módulo de refrigeração, o compressor de ar (freio e demais sistemas) e o ventilador para os motores de tração localizados no truque abaixo deste compartimento.

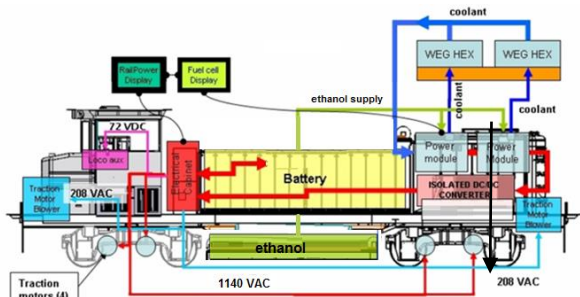


Fig. 8 Esquema do sistema de propulsão híbrida para uma locomotiva [4].

(1) Células de combustível SOFC:

Recebe o hidrogênio obtido da reforma autotérmica do etanol. Este ficará armazenado em um tanque alocado na parte inferior da locomotiva.

Tanto a SOFC quanto o conjunto de baterias fornecerão energia elétrica para ser aproveitada pelos motores de tração a 1.140 V em corrente alternada.

(2) Conversor DC/DC:

Para fazer uso da potência gerada pela SOFC (fonte primária) e pelo conjunto de baterias (fonte secundária) e liberar para o barramento de alta tensão da locomotiva no correto nível de potência e tensão, haverá necessidade de um conversor DC/DC.

Haverá necessidade de um inversor DC/AC para fornecer corrente alternada para os motores de tração.

3.2 Parte central da locomotiva

(3) Tanque de combustível e tanque de água:

Para armazenamento do etanol hidratado. O material do tanque poderá ser aço inoxidável ou polimérico. O volume precisará ser determinado, podendo ter até 18.500 L. Haverá um tanque adicional para armazenar

o condensado de parte da água proveniente dos gases de escapeamento.

(4) Conjunto de baterias:

Como fonte secundária de energia, um conjunto de baterias precisará ser dimensionado para atuar nos transientes de demanda de potência e permitir seu pleno carregamento através das SOFC quando baixar a demanda de potência sobre elas, ou através do freio dinâmico regenerativo.

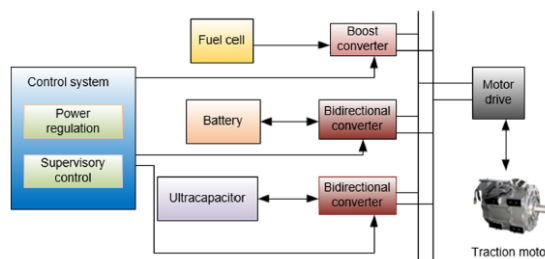


Fig. 9 Esquema das opções de potência de uma locomotiva híbrida com sistema de controle integrado [5].

3.3 Parte frontal da locomotiva

(5) Sistema de controle:

Será composto por: instrumentação, atuadores e controlador de automação programável (PAC). Durante a operação normal, o PAC recebe o ponto de ajuste da potência do controlador da locomotiva. O PAC retransmitirá este ponto de potência para controlador de conversor DC/DC e também estabelecerá as condições necessárias para o sistema de SOFC gerar a potência requerida. Primeiro, a vazão de ar necessária para produzir a potência desejada será calculada. O compressor de ar é controlado para liberar a vazão de ar calculada. Pequenas correções nesta vazão serão realizadas pela medição da vazão de ar real liberada para as SOFC.

Assumindo que a vazão de ar seja suficiente, o suprimento de hidrogênio será consumido em uma taxa que é proporcional à corrente projetada para o sistema de SOFC.

(6) Supercapacitor:

É um condensador eletroquímico que tem uma extraordinária capacidade de armazenamento de energia relativamente a seu tamanho quando comparado a capacitores comuns.

O sistema de potência da locomotiva deverá ser projetado para que as SOFC forneçam a demanda média de potência, enquanto que as mudanças de demanda de potência sejam complementadas por supercapacitores e baterias, sendo que o supercapacitor será utilizado para liberar rapidamente a potência transiente.

(7) Tecnologia de regeneração da frenagem dinâmica:

Deverá ser incluído no sistema de armazenamento de energia por baterias. Durante a frenagem dinâmica, parte da intensidade de corrente elétrica gerada será aproveitada para recarregar o conjunto de baterias.

(8) Controle de potência:

Este sistema será composto por um sistema baseado em lógica difusa (*fuzzy logic*). O sistema de controle deverá gerenciar a demanda de potência e fornecer ao sistema híbrido uma eficiência operacional otimizada da SOFC assim como manter uma faixa especificada do estado de carregamento das baterias.

O sistema de controle por “lógica difusa” deverá fornecer tensões mínimas e máximas mais baixas no barramento DC, favoráveis aos inversores de motor. Isto permitirá uma expectativa de vida mais longa do conjunto de baterias e uma maior eficiência do sistema de potência.

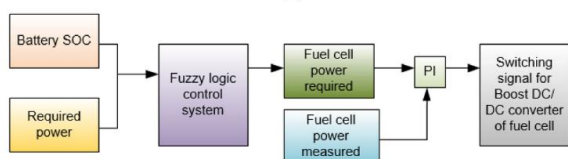


Fig. 10 Esquema de controle por meio de sistema por “lógica difusa” [5].

(7) Montagem e isolamento do sistema de SOFC: [4]

A locomotiva irá constantemente acoplar vagões, que poderão conduzir a choques acima de 10 g. Embora estes choques sejam de curta duração, podem conduzir a falhas por fadiga dos componentes do sistema ou da estrutura de montagem. Para minimizar esta severa condição, cada módulo deve ser isolado dos choques por meio de molas ou

amortecedores de borracha ou sintéticos. O amortecedor deverá absorver suficiente energia para que os componentes só recebam a parte resultante que podem suportar. Geralmente choques de 10 g deverão ser amortecidos de forma a só liberar, no máximo, 3 g para o sistema. A frequência natural do conjunto montado deverá ser bem menor do que a frequência de perturbação do sistema. O sistema de isolamento deverá absorver choques vindos das 3 direções: horizontal, lateral e vertical.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível verificar o potencial desta nova fonte primária de energia denominada “Célula de Combustível” cuja tecnologia está atualmente em desenvolvimento, não sob o aspecto de funcionamento (já dominado), mas sim sob o aspecto econômico, para que seja viável comercialmente nos próximos anos (2030). A SOFC é a que tem maiores probabilidades de se tornar viável economicamente a curto prazo e ter uma maior expectativa de vida útil. É necessário que a ferrovia conheça esta tecnologia e esteja preparada para especificar suas futuras locomotivas para colher os maiores benefícios possíveis que elas poderão fornecer.

5. REFERÊNCIAS

- [1] *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*, College of the Desert, Dec 2001.
- [2] *Fuel Cell Handbook*, seventh edition, EG&G Technical Service, Inc., Nov. 2004.
- [3] *System design of a large fuel cell hybrid locomotive*, 2007, A.R. Miller e outros.
- [4] *A Review on Fuel Cell-Based Locomotive Powering Options for Sustainable Transportation*, Osamah Siddiqui and Ibrahim Dincer, 2019.
- [5] *Hybrid Gas Turbine Fuel Cell System*, Jack Brouwer.
- [6] *Combustíveis*, Luiz Henrique Hungria, 2018.
- [7] *Duty cycle AC44i Rumo.xlsx*. Luis Carlos Hohmann, Wabtec, nov. 2019.