

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

THIAGO SILVA E SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA CÉLULA A
COMBUSTÍVEL/BANCO DE BATERIAS PARA VEÍCULOS
ELÉTRICOS HÍBRIDOS MOVIDOS A HIDROGÊNIO**

VITÓRIA
2021

THIAGO SILVA E SOUZA

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA CÉLULA A
COMBUSTÍVEL/BANCO DE BATERIAS EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS HÍBRIDOS MOVIDOS A HIDROGÊNIO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Thiago Silva e Souza**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação

Coorientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin


VITÓRIA
2021

THIAGO SILVA E SOUZA

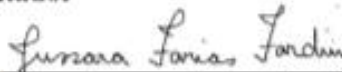
OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL/BANCO DE BATERIAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS MOVIDOS A HIDROGÊNIO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Thiago Silva e Souza**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

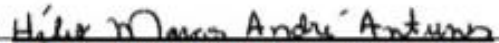
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientadora



Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Dra. Stéfani Yanussi Melo Guaitolini
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Ao Pai das luzes, ao Cristo crucificado, e ao Consolador, minha devoção sincera e
agradecimento pela capacitação e pelo fôlego de vida.

RESUMO

Quais os aspectos mais elementares e fundamentais para a otimização de um sistema banco de baterias/célula a combustível de um Veículo Elétrico Híbrido a Hidrogênio? Baseado nesse problema de pesquisa, a presente monografia buscou compilar, por meio de literatura da área, os principais aspectos relevantes para a otimização desse sistema em aplicações diretas de veículos elétricos híbridos a hidrogênio (VEHCaC), assim como lançou luz sobre fatores adicionais que exercem influência direta em sua performance. O objetivo dessa compilação é auxiliar no projeto e otimização de futuros sistemas, dado o enorme potencial e a maneira com que os VEHCaC têm se consolidado como fortes candidatos para substituir os motores a combustão interna que são predominantes no setor de transportes atualmente. A metodologia empregada foi a de pesquisa bibliográfica, devido à multidisciplinariedade do tópico e da possibilidade de um escopo mais amplo de investigações. Os resultados da análise dos dados, coletados em dissertações, teses e artigos publicados em revistas e periódicos técnico-científicos, trouxeram como aspectos fundamentais para o projeto do sistema banco de baterias/célula a combustível (CaC): (I) o tratamento das diferentes perdas na CaC, (II) o equacionamento de sua eficiência teórica e real, (III) a curva SOC da bateria e sua “capacidade efetiva” relacionada ao tempo de descarga, e (IV) questões adicionais que exercem influência sobre o sistema, como *peak-shaving*, perdas no conversor CC/CC e grau de hibridização. Outros fatores de maior grau de complexidade foram também mencionados nas considerações finais, tendo em vista a aplicação para pesquisas futuras. Alguns exemplos destes fatores são: a análise dos ciclos de direção, o gerenciamento de potência por meio de estratégias de controle, o impacto das flutuações de corrente na CaC e etc. Esta pesquisa deve ser entendida em seu caráter informativo e se justifica pelo alto grau de inovação e multidisciplinaridade da aplicação em questão.

Palavras chave: Veículos híbridos. Célula a combustível. CaC. PEMFC.

ABSTRACT

What are the most elementary and fundamental aspects for the optimization of a battery bank / fuel cell system of a hydrogen hybrid electric vehicle? Based on this research problem, the present paper sought to compile, through literature in the area, the main aspects relevant to the optimization of this system in direct applications of hydrogen hybrid electric vehicles (FCV), as well as to shed light on additional factors that have a direct influence over its performance. The purpose of this compilation is to assist in the design and optimization of future systems, given the enormous potential and the way in which the FCV have consolidated themselves as strong candidates to replace the internal combustion engines that are prevalent in the transport sector today. The methodology applied was of literature survey, due to the multidisciplinary nature of the topic, and the possibility of a wider scope of investigation. The results of the data analysis collected in dissertations, thesis and articles published in electronic repositories showed as fundamental aspects for the design of the battery bank/fuel cell (FC) system: (I) The treatment of different losses in the FC, (II) the equation of its theoretical and real efficiency, (III) a SOC curve for the battery and its “effective capacity” related to the discharge time, and (IV) additional issues that influence the system, such as: peak-shaving phenomena, losses in the DC/DC converter and the degree of hybridization of the vehicle. Other factors of greater complexity were also mentioned in the final considerations, in view of the application for future research. These are: analysis of driving cycles, power management through control strategies, impact of current fluctuations on the FC, etc. This research must be understood in its informative character and is justified by the high degree of innovation and multidisciplinary nature of the application in question.

Keywords: Hybrid vehicles. Fuel cells. FC. PEMFC

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do sistema híbrido CAC + baterias.....	15
Figura 2 – Imagem de veículo elétrico híbrido da atualidade: Hyundai Nexo.....	18
Figura 3 – Toyota Mirai.....	20
Figura 4 – Arquitetura do trem de força de um VEH série	21
Figura 5 – Arquitetura do trem de força de um VEH paralelo	22
Figura 6 – Arquitetura do trem de força de um VEH split.....	22
Figura 7 – Trem de força “CaC – Bateria – Série – Híbrido”	23
Figura 8 – Esquemático de uma célula a combustível a hidrogênio	24
Figura 9 – Conjunto anodo-eletrólido-catodo, constitutivo de uma PEMFC.....	26
Figura 10 – Circuito equivalente de uma bateria.....	28
Figura 11 – Entradas e saídas de uma CaC	31
Figura 12 – Curvas de descarga de uma bateria VRLA de 7,2 Ah.....	37
Figura 13 – Princípio de funcionamento do <i>peak shaving</i>	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tensão da CaC modelada usando perdas por ativação e intercâmbio de combustível/correntes internas	34
Gráfico 2 – Curva característica de tensão versus corrente ($V \times I$) de uma CaC.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados experimentais obtidos para um painel fotovoltaico.....	46
Tabela 2 – Dados experimentais obtidos para um aerogerador.....	47
Tabela 3 – Dados experimentais obtidos para um sistema híbrido (aerogerador/painel solar)	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Escolha de tecnologia de propulsão elétrica por empresa	14
Quadro 2 – Comparação dos tipos de bateria dos veículos elétricos.....	29
Quadro 3 – Três tipos diferentes de bateria da marca Victron, relacionando a “capacidade efetiva” como função do tempo de descarga	38
Quadro 4 – Dados experimentais de três tipos diferentes de arquitetura de conversores, com suas respectivas eficiências	41
Quadro 5 – Eficiências dos elementos principais do sistema banco de baterias/célula a combustível.....	43
Quadro 6 – Tipos de perdas dos principais elementos do sistema banco de baterias/célula a combustível.....	44
Quadro 7 – Perdas adicionais do sistema banco de baterias/célula a combustível.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CaC	Célula a combustível
CC	Corrente contínua
EPA	<i>Environmental protection agency</i>
HHV	<i>High heat value</i>
LIB	<i>Lithium-ion battery</i>
MCI	Motor a combustão interna
NASA	<i>National aeronautics and space administration</i>
PEM	<i>Proton exchange membrane</i>
PEMFC	<i>Proton exchange membrane fuel cell</i>
SOC	<i>State of charge</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VE	Veículo elétrico
VEB	Veículo a bateria
VECaC	Veículo elétrico a célula a combustível
VEH	Veículo elétrico híbrido

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{bat}	Capacidade da bateria
F	Constante de Faraday
I	Corrente elétrica
I_{bat}	Corrente na bateria
PB, \max	Máxima potência do banco de baterias
$PFCS, \max$	Máxima potência da célula a combustível
R_{int}	Resistência interna
V	Tensão
V_a	Aumento progressivo até a tensão de operação
V_{ativ}	Perdas por ativação
V_c	Tensão de operação de uma célula da pilha
V_{conc}	Perdas por concentração
V_{ohm}	Perdas ôhmicas
Δg_{livre}	Energia livre de Gibbs
$\tau_{elétrico}$	Trabalho elétrico
μ_f	Coefficiente de utilização de conteúdo
η	Eficiência
η_{Bat}	Eficiência do banco de baterias
η_{FC}	Eficiência da célula a combustível
η_{sis}	Eficiência do sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	133
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos Geral e Específicos	16
1.3	Metodologia da Pesquisa	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Veículos Elétricos Híbridos (VEH)	18
2.1.1	Veículos Híbridos de Célula a Combustível (VEHCaC).....	19
2.2	O Sistema Banco de Baterias/Pilha de CaCs	21
2.3	Células a Combustível	23
2.3.1	Células a Combustível do tipo Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC).....	25
2.4	Baterias	27
2.4.1	Principais Parâmetros das Baterias	27
2.4.2	Baterias em Veículos Híbridos	28
3	DISCUSSÃO DOS DADOS	31
3.1	Eficiência Energética das CaCs	31
3.2	Perdas nas CaCs	34
3.3	Estado de Carga das Baterias (SOC)	36
3.4	Eficiência Energética das Baterias	38
3.5	Influências Adicionais ao Sistema	39
3.5.1	Conversores CC/CC e CaCs	39
3.5.2	Peak-shaving	41
3.5.3	Consumo de Hidrogênio e Grau de Híbridização (DOH).....	43
3.6	Eficiência Global do Sistema Célula a Combustível/Banco de Baterias	43
3.6.1	Validação da Equação de Eficiência Global	45
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O uso da energia elétrica para propulsão de veículos não é nada novo. Remonta ao século 19, quando Robert Anderson projetou o primeiro veículo elétrico a bateria não recarregável, seguido de diversas outras invenções similares, até a criação do primeiro veículo híbrido em 1911 pela *Woods Motor Vehicle* (MATALLANA *et al.*, 2019). Apesar do aparente sucesso inicial da propulsão elétrica, no início da década de 1930, invenções como a chave de ignição elétrica, melhorias na autonomia, potência, conforto, etc. e o baixo preço do barril do petróleo contribuíram para o monopólio de mercado dos veículos a combustão interna e, consequentemente, com o declínio dos veículos eletrificados (YIN YONG *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, mais especificamente no início do século 21, tornou-se perceptível a forma como os veículos elétricos têm cada vez mais encontrado espaço e investimento nas aplicações de transporte, seja no mercado automobilístico, máquinas pesadas, caminhões e carretas etc. (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS, 2020). As principais razões para essa re inserção dos veículos elétricos no mercado têm de ver com o aumento da consciência ambiental dos governos e da opinião pública, bem como a alta e a flutuação do preço do barril do petróleo (MATALLANA *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, diferentes tipos de veículos elétricos se colocam como alternativas sustentáveis para a indústria dos transportes. É possível classifica-los em pelo menos três grandes grupos, no que se refere ao sistema de propulsão: Veículos à Bateria (VEB), Veículos elétricos à célula a combustível (VECac) e Veículos elétricos híbridos (VEH). Deve ser destacado que os VEH são mais comumente compostos por um motor a combustão interna (MCI) e um banco de baterias, mas podem ser do tipo CaC/banco de baterias (REVOREDO, 2007). O Quadro 1, a seguir, mostra as escolhas de empresas fabricantes de automóveis no que diz respeito à escolha de tecnologia de propulsão para seus veículos elétricos.

Quadro 1 – Escolha de tecnologia de propulsão elétrica por empresa

Empresa	Tipo de sistema	CaC	Combustível
Daimler Chrysler	Célula a combustível	Direta	Hidrogênio
	Híbrido de CaC/banco de baterias	Indireta	Metanol
Ford	Célula a combustível	Direta/indireta	Hidrogênio/metanol
General Motors	Híbrido de CaC/banco de baterias	Direta/indireta	Hidrogênio/metanol
Honda	Híbrido de CaC/ultracapacitor	Direta/indireta	Hidrogênio/metanol
Mazda	Híbrido de CaC/ultracapacitor	Direta	Hidrogênio
Nissan	Híbrido de CaC/banco de baterias	Indireta	Metanol
Renault	Híbrido de CaC/banco de baterias	Direta	Hidrogênio
Toyota	Híbrido de CaC/banco de baterias	Direta/indireta	Hidrogênio/metanol
Volkswagen	Célula a combustível	Direta	Hidrogênio
	Híbrido de CaC/banco de baterias	Indireta	Metanol
ZeTech	Híbrido de CaC/banco de baterias	Direta	Hidrogênio

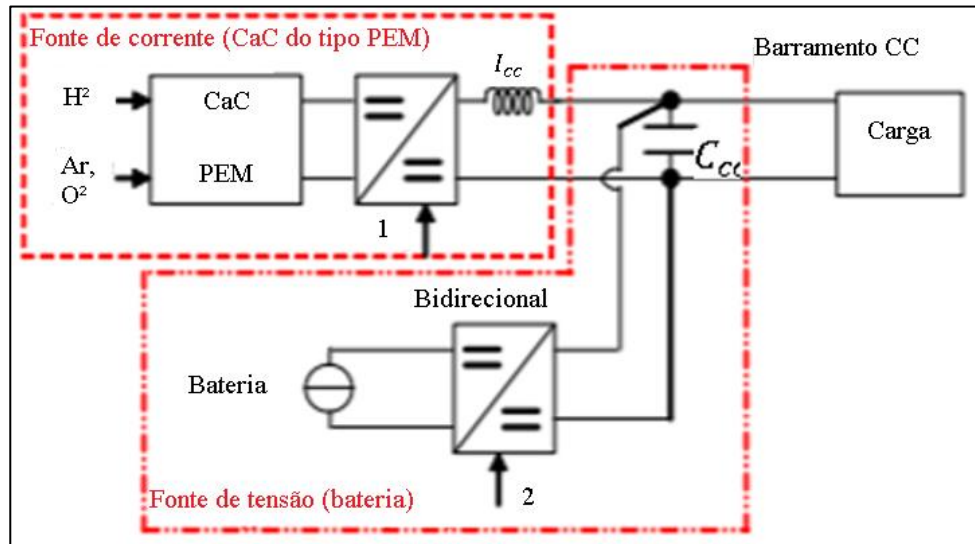
Fonte: McNicol, Rand e Williams (2001, p. 52).

Nota: Adaptado pelo autor.

É interessante notar também que todas essas empresas com exceção da ZeTech (que opta pelo uso de baterias alcalinas) usam células a combustível do tipo PEM (MCNICOL; RAND; WILLIAMS, 2001).

Dos vários tipos de CaCs existentes no mercado, a PEM constitui uma das mais interessantes para a aplicação em veículos elétricos híbridos (VEH) devido às seguintes características: temperatura de operação relativamente baixa, alta eficiência, alta densidade energética, pouco barulho e emissão de poluentes (ALASWAD *et al.*, 2016). Apesar de ser uma tecnologia limpa e com grande potencial, mudanças bruscas na demanda de potência causam não-linearidades eletroquímicas e térmicas severas nas células combustíveis, que, em última análise, acabam por reduzir a vida útil da CaC (BECHERIF; AYAD; MIRAOU, 2006). Por conta disso, sistemas híbridos de CaC e banco de baterias, mostrados na Figura 1, têm sido propostos como uma maneira de contornar os problemas gerados pelo transitório de demanda das cargas (BECHERIF *et al.*, 2015).

Figura 1 – Estrutura do sistema híbrido banco de baterias/célula a combustível



Fonte: Becherif (2006, p. 587).

Nota: Adaptado pelo autor.

Isso posto, a pesquisa realizada tem como escopo a análise do sistema híbrido representado na Figura 1, lançando luz às duas principais partes constituintes deste sistema: A pilha de CaC e o banco de baterias, bem como as interações entre esses elementos, buscando definir quais parâmetros e aspectos constituintes desses elementos afetam diretamente o gerenciamento da eficiência do sistema como um todo. O trabalho também se vale de pesquisa na literatura da área para analisar os principais desafios práticos de otimização desse sistema num veículo automotivo, como os ciclos de direção, a partida do motor e as estratégias de controle do sistema para economia de combustível.

1.1 Motivação

Conforme discutido anteriormente, é cada vez mais latente o protagonismo das fontes de energia sustentáveis frente aos tradicionalmente usados combustíveis fósseis. Essa chamada “transição da energia” tem promovido mudanças em diversas áreas, e mobilizado inúmeros agentes internacionais a se organizarem em busca de mudança (SINGH *et al.*, 2019). Uma das áreas que vem sendo especialmente pressionada à mudança é a indústria dos transportes,

responsável por 17% das emissões de CO_2 todos os anos (FRAGIACOMO; FRANCESCO, 2017).

Sob essa ótica, é possível perceber que há uma tendência à eletrificação, ou pelo menos à hibridização de veículos, principalmente em países com políticas duras de redução de CO_2 , abrindo assim espaço no mercado para células a combustível PEM (ALASWAD *et al.*, 2019). Esta pesquisa justifica-se por três razões principais: (I) lança luz sobre um dos principais componentes no projeto de Veículos Elétricos Híbridos de Célula a Combustível (VEHCaC), que é o sistema célula a combustível/banco de baterias, contribuindo para a viabilização de máquinas que funcionem à base de energias renováveis. (II) O trabalho é de relevância para o Brasil que, por ser um país em desenvolvimento e de proporções continentais, possui grande frota de veículos automotivos e de transporte; sendo, portanto, responsável no processo de redução de gases de efeito estufa e grande potencial cliente da tecnologia de VEHCaCs. (III) As questões relativas à essa discussão podem corroborar outras pesquisas que já estão sendo realizadas na área, além de servir como uma base para cálculos reais de eficiência do sistema banco de baterias/célula a combustível para VEHCaCs.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

Esta pesquisa teve como objetivo geral determinar, por meio de um levantamento na literatura da área, os parâmetros fundamentais que influenciam a otimização de um sistema banco de baterias/Célula a Combustível, tendo em vista a aplicação direta para veículos híbridos à célula combustível (VEH).

Dessa feita, foram investigadas as variáveis inerentes ao projeto do sistema banco de baterias/células combustível de uma máquina com motor elétrico, bem como os fatores que geram perdas e/ou interferem na eficiência das mesmas. Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- I. Fazer um levantamento bibliográfico sobre diferentes tipos de VEHs e principais tecnologias CaC e baterias para a aplicação em questão;
- II. Investigar na literatura da área os parâmetros da CaC e do banco de baterias, a serem levados em consideração no gerenciamento de eficiência do sistema;
- III. Discutir influências adicionais ao referido sistema.

1.3 Metodologia da Pesquisa

Esta é uma pesquisa exploratória, de natureza básica, abordagem qualitativa e desenvolvida por meio do método de pesquisa bibliográfica. Conforme Gil (2018), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida principalmente por meio de livros e artigos científicos. A principal vantagem apresentada por esse método, de acordo com o referido autor (GIL, 2008, p. 45), “reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente”. Por isso, entendendo-se a multidisciplinaridade dos diferentes aspectos constituintes do sistema banco de baterias/CaCs, bem como o número elevado de variáveis que afetam diretamente a determinação de sua eficiência na aplicação em VEHCaCs e também do relativo grau de inovação da tecnologia, o referido método foi escolhido para esta investigação.

Os dados da análise e discussão, apresentados nas seções 2 e 3, foram coletados em dissertações, teses e artigos publicados em repositórios eletrônicos, tais como o *ScienceDirect*, *Research Gate* e *Elsevier*.

O processo de confecção do trabalho incluiu:

- a) Escolha do tema;
- b) Levantamento bibliográfico preliminar;
- c) Formulação do problema;
- d) Busca de dados em fontes fidedignas;
- e) Leitura analítica do material;
- f) Organização lógica do assunto, para atender aos objetivos da pesquisa;
- g) Redação da monografia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção compila resultados do levantamento bibliográfico sobre diferentes tipos de VEHs e principais tecnologias CaC e baterias utilizadas nesses casos.

2.1 Veículos Elétricos Híbridos (VEH)

Veículos elétricos híbridos são um tipo específico de veículo elétrico que utiliza duas (ou mais) fontes de propulsão distintas. A configuração mais comum é a de um motor a combustão interna (MCI) juntamente com um banco de baterias (REVOREDO, 2007). Existem também os VEHCaCs, que são configurações do tipo CaC/BB, e também os “híbridos-triplos”, compostos de CaC, banco de baterias e ultra-capacitor (PEDE *et al.*, 2004).

Figura 2 – Imagem de veículo elétrico híbrido da atualidade: Hyundai Nexo



Fonte: Hyundai (2020).

Além da classificação quanto às fontes de propulsão, os VEH podem ser divididos, dependendo da potência entregue ao *drive train*, em série, paralelo ou *split* (REDDY; NATAJARAN, 2018).

A arquitetura “série” se dá por meio de um ou mais motores elétricos, alimentados pelas fontes de energia fornecendo a força de tração até as rodas.

Na arquitetura “paralelo”, é possível que o motor seja “propelido diretamente pelo motor de combustão interna, usando um sistema de engrenagens que transmite a potência gerada pelo mesmo as rodas e/ou por meio de motores elétricos alimentados por outra(s) fonte(s) de energia, normalmente um banco de baterias” (REVOREDO, 2007, p. 4).

Por último, a arquitetura *split* nada mais é do que a variante da configuração em paralelo, na qual cada um dos eixos do veículo é alimentado por meio de uma fonte de energia diferente.

Por mais que veículos elétricos híbridos propelidos por MCI sejam a solução economicamente viável e madura da atualidade, com relação a um cenário a longo prazo, Sorrentino, Pianese e Maiorino (2012) comentam:

uma eletrificação massiva não apenas encoraja a ampla difusão de carros puramente elétricos, especialmente para direção urbana, mas também age como uma ponte para a introdução de Veículos Elétricos Híbridos de Célula a Combustível (VEHCaC), que são uma evolução natural dos VEH série *plug-in*, já que eles sobretudo requerem a substituição do gerador baseado no MCI, por um sistema de CaCs muito mais eficiente (SORRENTINO; PIANESE; MAIORINO, 2012, p. 309).

2.1.1 Veículos Híbridos de Célula a Combustível (VEHCaC)

Dentre os tipos de VEH já discutidos na seção anterior, os veículos híbridos de Célula a Combustível são uma das soluções mais promissoras (REVOREDO, 2007). A eficiência em um VEHCaC é maior que 48%, sendo que a máxima eficiência de motores a combustão interna não passa de 35% (NASSIF; ALMEIDA, 2020).

A premissa essencial de um VEHCaC, explicado por Larminie e Dicks (2003, p. 362) “está na possibilidade de se trabalhar com a CaC muito próxima de sua potência máxima o tempo inteiro. Quando o requerimento total de potência do sistema é baixo, então a energia elétrica sobressalente é armazenada em uma bateria ou capacitor. Quando a solicitação de potência excede o que pode ser fornecido pela CaC, então energia é retirada da bateria ou capacitor”.

Células a combustível são dispositivos capazes de transformar energia química em energia elétrica, possuem alta eficiência de operação e produzem pouco ruído. Além disso, segundo Revoredo (2007, p. 17), possuem “características que tornam atraente sua aplicação em

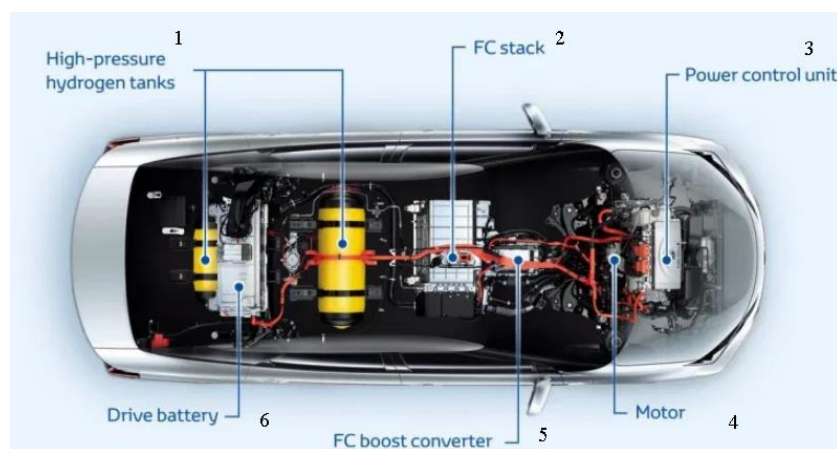
veículos, a saber: baixo peso, baixo custo e possibilitam o desenvolvimento de veículos com boa autonomia.”

É importante ressaltar que as CaCs não armazenam energia, por isso mesmo é natural que, para o uso em VEHCaCs, as CaCs sejam acompanhadas de outra tecnologia capaz de armazenar energia. Banco de baterias e ultra capacitores são bons exemplos de tecnologias adequadas à essa aplicação.

Uma das vantagens competitivas de um VEHCaC é o fato de que podem operar continuamente caso haja suficiência de combustível, e não produzem CO_2 . Esses veículos são, portanto, uma solução limpa (diferente dos carros à diesel e gasolina) e que não precisa de parar para a recarga (problema característico dos veículos elétricos a bateria).

O alto custo das CaCs e dos VEHCaCs tem sido uma grande barreira para a significativa penetração no mercado atual de carros, mas esse cenário também está sendo transformado. Um dos maiores exemplos dessa mudança com relação aos veículos híbridos de célula a combustível é o Toyota Mirai, mostrado na Figura 3. Para Ma (2020), “a produção em massa do Toyota Mirai em 2014 marcou a entrada dos Veículos de Célula a Combustível no mercado automotivo” e resalta que “outras empresas também lançaram produtos VEHCaC nos anos recentes”. Como exemplo disso, pode-se citar o Honda Clarity, o Ford Focus FCV, e etc.

Figura 3 – Toyota Mirai



Fonte: Green Optimistic (2020).

Nota: Adaptado pelo autor.

¹ – Tanques de hidrogênio em alta pressão. ² – Pilha de CaCs.

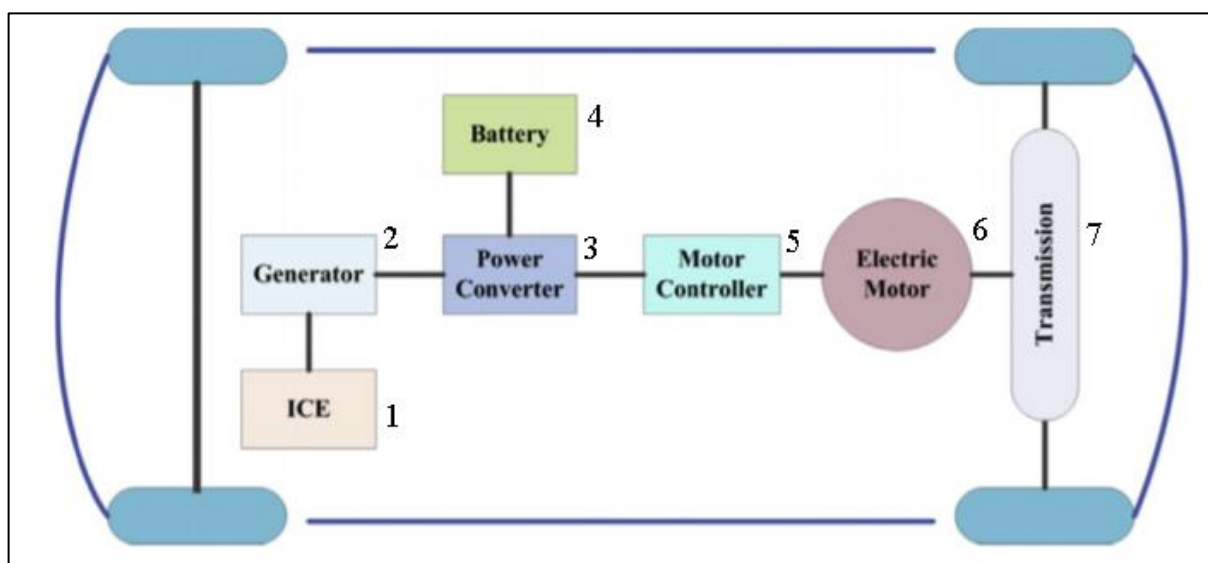
³ – Unidade controladora de potência. ⁴ – Motor. ⁵ – Conversor.

⁶ – Banco de baterias.

2.2 O Sistema Banco de Baterias/Pilha de CaC

Como já mencionado previamente, na seção sobre VEHS, dependendo da potência entregue ao trem de força, os VEH podem ser classificados em série, paralelo ou *split* (REDDY, NATAJARAN, 2018). As Figuras 4, 5 e 6 mostram, respectivamente, as arquiteturas do trem de força de um VEH série, paralelo e *split* com motor a combustão interna.

Figura 4 – Arquitetura do trem de força de um VEH série



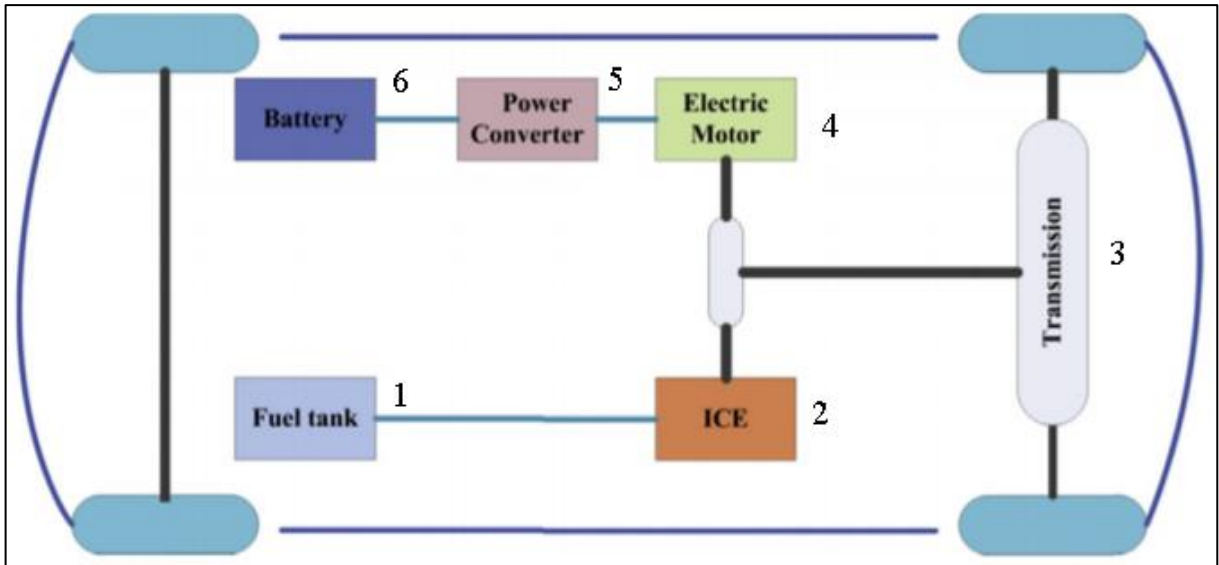
Fonte: Reddy, Natajaran (2018, p. 17389).

Nota: Adaptado pelo autor.

¹ – Motor à combustão interna. ² – Gerador. ³ – Conversor de potência. ⁴ – Bateria. ⁵ – Controlador.

⁶ – Motor elétrico. ⁷ – Transmissão.

Figura 5 – Arquitetura do trem de força de um VEH paralelo



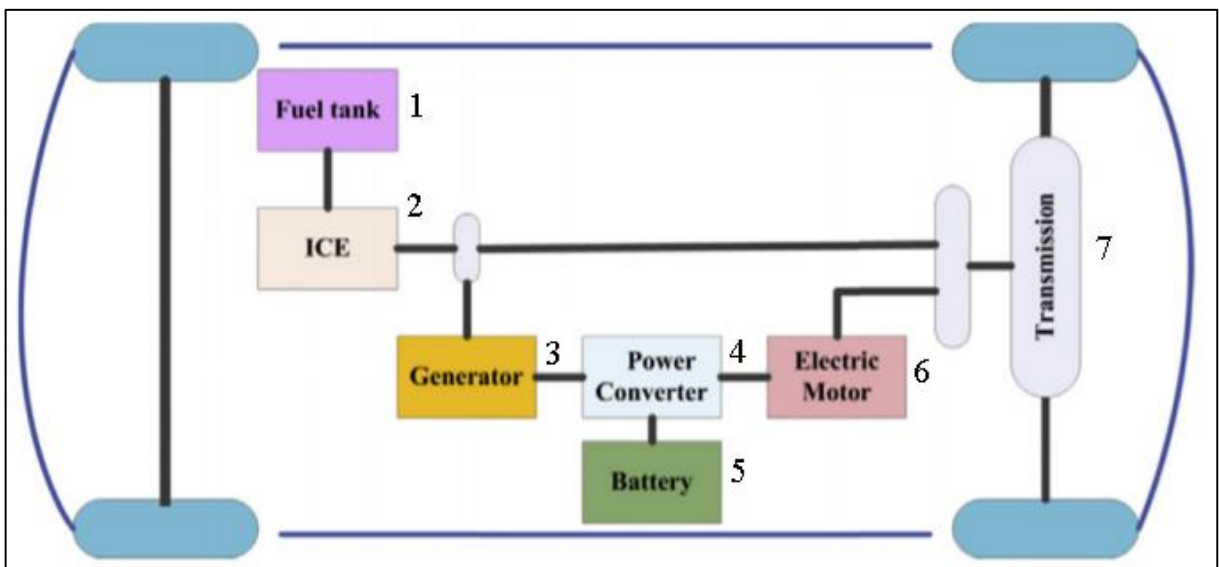
Fonte: Reddy, Natajara (2018, p. 17389).

Nota: Adaptado pelo autor.

¹ – Tanque de combustível. ² – Motor à combustão interna. ³ – Transmissão. ⁴ – Motor elétrico.

⁵ – Conversor de potência. ⁶ – Bateria.

Figura 6 – Arquitetura do trem de força de um VEH *split*



Fonte: Reddy, Natajara (2018, p. 17390).

Nota: Adaptado pelo autor.

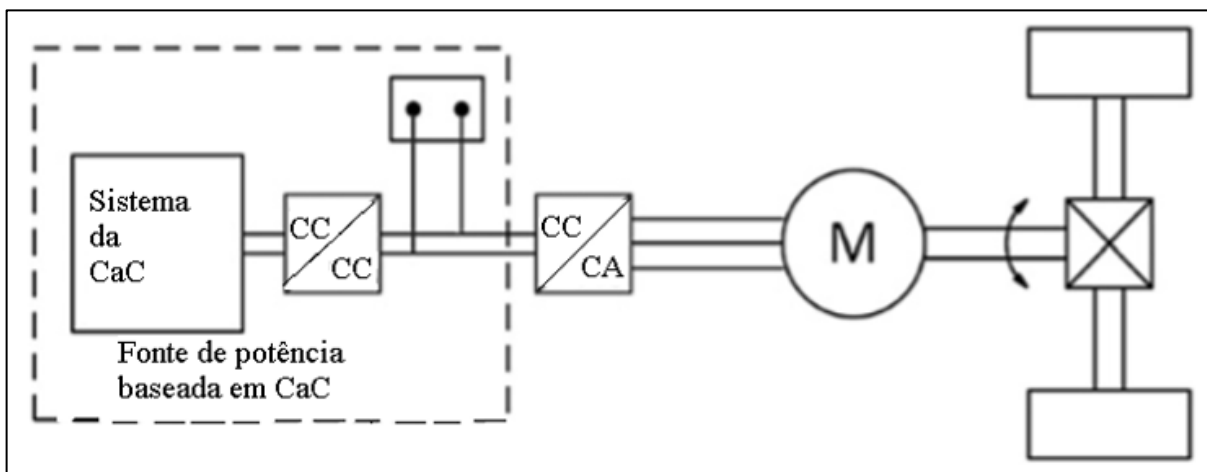
¹ – Tanque de combustível. ² – Motor à combustão interna. ³ – Gerador. ⁴ – Conversor de potência.

⁵ – Bateria. ⁶ – Motor elétrico. ⁷ – Transmissão.

Os três tipos de arquitetura possuem pontos fortes e fracos, e existem, atualmente, veículos híbridos representantes de cada um deles.

A presente pesquisa voltou-se para os VEHCaC com trem de força do tipo “CaC - Bateria – Série – Híbrido”, representado na Figura 7, que são uma variação do “série-híbrido” tradicional, com a particularidade de que não há motor a combustão interna conectado a um gerador. Ao invés disso, toda a potência requerida pelo motor elétrico é proveniente do sistema banco de baterias + CaCs.

Figura 7 – Trem de força “CaC - Bateria – Série - Híbrido”



Fonte: Larriba, Garde e Santarelli (2012, p. 2010).

Nota: Adaptado pelo autor.

O sistema acima foi escolhido por ser uma espécie de sistema “fundamental”. Isso significa que, a partir dele, podem ser adicionados outros componentes, como ultra capacitores, reformadores, módulos adicionais que permitam frenagem regenerativa, inversores, e etc.

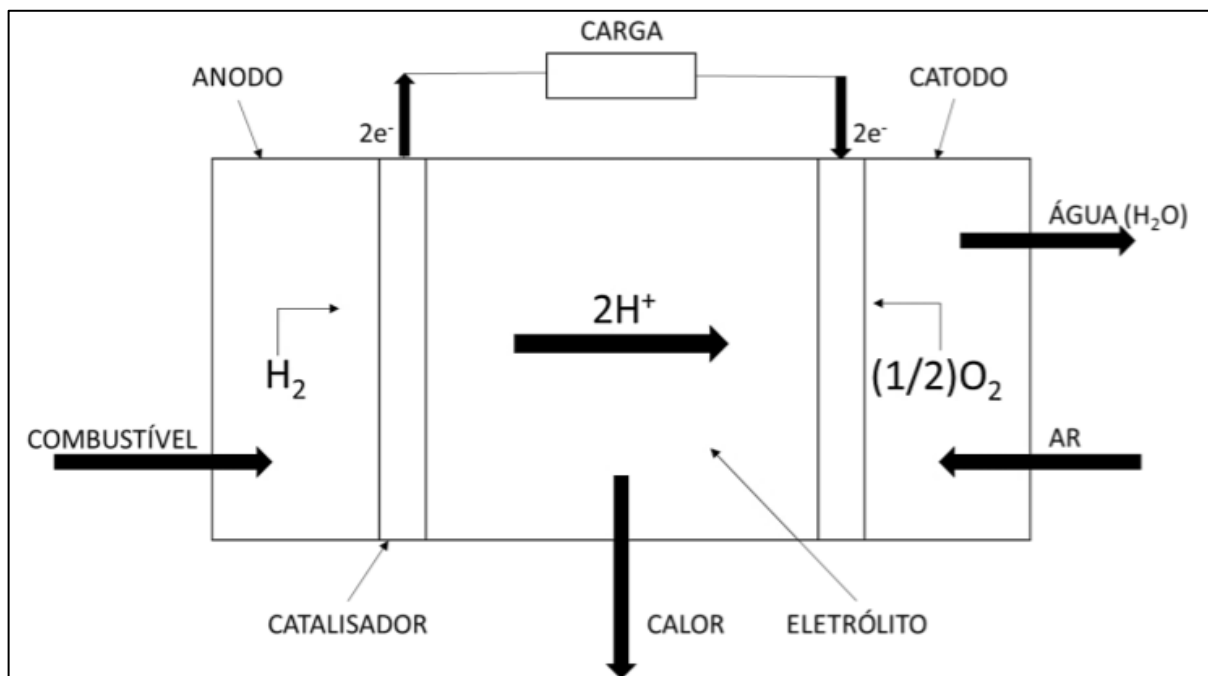
Dessa forma, apesar de não englobar todos os elementos possíveis num trem de força de um VEHCaC, a maior parte dos VEHCaC apresenta um sistema banco de bateria/CaC em sua composição.

2.3 Células a Combustível

As células a combustível, representadas na Figura 8, comumente chamadas de CaC, são dispositivos que convertem a energia química de um combustível diretamente em eletricidade sem que haja combustão. Nesse processo, energia é liberada sempre que o combustível reage na superfície do eletrodo, liberando elétrons e formando prótons. A reação é de caráter

eletroquímico e a energia é uma combinação de uma baixa-tensão em CC e calor (BECHERIFF, 2006).

Figura 8 – Esquemático de uma célula a combustível a hidrogênio



Fonte: Nascimento (2017, p. 44).

Segundo Barbir (2019), as reações que ocorrem dentro da célula combustível podem ser definidas pelas equações (1), (2) e (3) que dizem respeito ao ânodo, ao cátodo e à equação geral, respectivamente.



Essas equações demonstram o processo de conversão do hidrogênio, que é inserido na célula a combustível, e o oxigênio, proveniente do ar atmosférico, em água. É válido ressaltar que não há emissão de nenhum tipo de gás poluente nesse processo, sendo esta uma forma totalmente limpa de conversão energética.

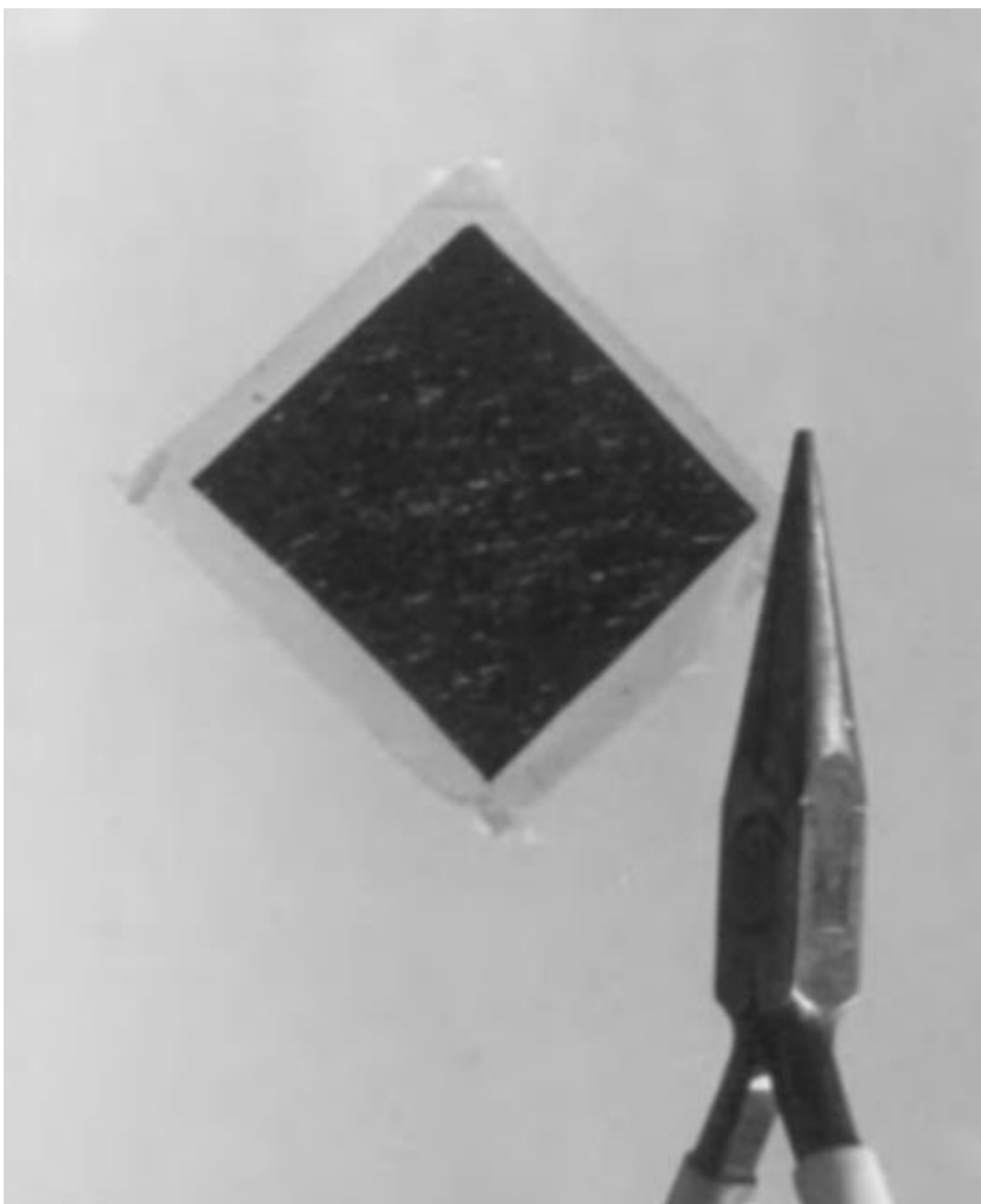
2.3.1 Células a Combustível do tipo Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC)

Apesar da existência de diversos tipos de CaCs que poderiam ser utilizadas na aplicação em VEHs, a célula a combustível do tipo eletrólito polimérico (PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane*) tem se consolidado como um dos principais candidatos nesse nicho, por conta de sua alta densidade de potência, rápido *startup* e baixa temperatura de operação se comparada a outras CaCs (WANG; PENG, 2014).

A célula a combustível do tipo PEM foi produzida pela primeira vez nos Estados Unidos pela *General Electric* na década de 60 com o objetivo de auxiliar a agência espacial NASA (do inglês *National Aeronautics and Space Administration*) nos seus primeiros veículos espaciais tripulados (LARMINIE; DICKS, 2003). Os dispositivos do tipo PEM são fortes candidatos para substituir os motores a combustão interna, absolutamente predominantes no setor de transportes nos dias de hoje (ALASWAD *et al.*, 2016). As CaCs PEM possuem alta eficiência, alta densidade de potência, além de operar em baixas temperaturas, o que resulta em uma partida mais veloz se comparada a outros tipos de CaC (NASCIMENTO, 2017).

A estrutura da PEMFC é bastante parecida com as estruturas de outras CaCs. Nesse caso, a maior diferença é que o eletrólito usado nas PEMFC é um polímero condutor iônico que não conduz elétrons, mas é permeável a prótons (NASCIMENTO, 2017). O conjunto anodo-eletrólito-catodo forma uma “membrana” muito fina, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Conjunto anodo-eletrólito-catodo, constitutivo de uma PEMFC



Fonte: Larminie e Dicks (2003, p. 75).

O eletrólito da CaC PEM consegue trabalhar mesmo em baixas temperaturas, o que a torna ideal para aplicações onde a CaC precisa entregar energia rapidamente ao sistema. Além disso, o fato de que não existem riscos associados a fluidos corrosivos, combinados com seu imenso potencial em termos de escalabilidade, tornam a CaC PEM particularmente ideal para a aplicação em veículos (LARMINIE; DICKS, 2003).

Nos anos recentes, diversas pesquisas foram conduzidas com o intuito de melhorar a performance das CaCs do tipo PEM. Para Nascimento (2017, p. 47), “os resultados dessas pesquisas possibilitaram a redução do custo do kW e o aumento da densidade de potência para a PEMFC, o que contribuiu para que essa tecnologia ganhasse espaço significativo no mercado”.

2.4 Baterias

As baterias são elementos com alta densidade de energia que convertem energia química em energia elétrica. A célula da bateria consiste em dois eletrodos, um positivo e um negativo, unidos por meio de um eletrólito. A reação química entre essas partes é o que gera a eletricidade.

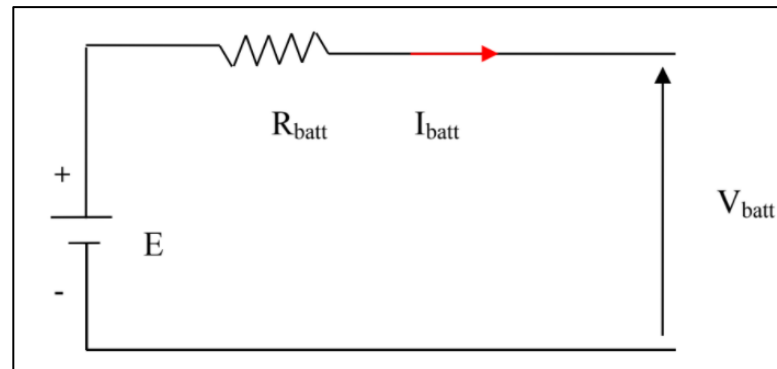
Esses elementos são usados para armazenar cargas elétricas grandes ou pequenas, dependendo de seus aspectos constituintes. A capacidade da bateria corresponde à quantidade de carga elétrica que pode ser acumulada durante o carregamento, armazenada durante o transitório e liberada durante a descarga, de maneira reversível (KIRCHEV, 2015).

Segundo Becheriff (2006), o fator principal que limita a carga e a descarga da bateria, em termos de capacidade de corrente, é a resistência interna da bateria. Isso é ainda mais acentuado pelo fato do circuito equivalente série de resistências constituintes da bateria adquirir valores diferentes para pontos distintos de operação de carga e descarga (BECHERIF; AYAD; MIRAOU, 2006).

2.4.1 Principais Parâmetros de uma Bateria

O circuito equivalente de uma bateria pode ser visto como na Figura 10, onde R_{bat} é a resistência interna da bateria, V_{bat} é a tensão nos terminais da bateria, I_{bat} é a corrente na bateria e E é a fonte de tensão. A relação entre essas grandezas é dada pela equação (4).

Figura 10 – Circuito equivalente de uma bateria



Fonte: Mebarki et al. (2016, p. 20997).

$$V_{bat} = E - R_{bat} \cdot I_{bat} \quad (4)$$

Ainda tomando-se o modelo apresentado, a capacidade da bateria pode ser calculada pela equação (5):

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(0) \int_0^t \eta(SOC(t), sign(I_{bat}(t))) \cdot I_{bat}(t) \cdot dt \quad (5)$$

2.4.2 Baterias em Veículos Híbridos (VEHs)

Diferentemente da aplicação em veículos a bateria, onde esta é a única responsável pela geração de energia, e conseqüentemente pelo *range*. Nos veículos Híbridos, ela é uma das duas fontes de propulsão (YIN YONG *et al.*, 2015). Para o escopo deste projeto, a outra fonte será sempre um sistema CaC.

Apesar de diversos avanços nas últimas décadas, ainda existem alguns gargalos na aplicação de baterias para propulsão em veículos elétricos híbridos. Alguns exemplos disso são o ciclo de vida da bateria, questões de segurança e principalmente viabilidade econômica, como afirmam Yin Yong e outros (2015).

Como já citado anteriormente nesta secção, os parâmetros de maior importância na escolha das baterias de um veículo híbrido são a densidade de energia, o número de “ciclos” de vida e o preço de produção. Esses tipos de bateria são comparados no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação dos tipos de bateria dos veículos elétricos

Custo de produção (\$/kWh)	Temperatura de operação (°C)	Efeito memória	Auto descarga (% por mês)	Ciclo de vida	Potência específica	Densidade de energia Volumétrica (Wh/L)	Densidade de energia (Wh/kg)	Tensão Nominal (V)	Tipo de bateria
60	-15 a 50	Não	<5	1000	180	100	35	2.0	Chumbo ácido
250-300	-20 a 50	Sim	10	2000	200	300	50-80	1.2	Nickel-cádmium
200-250	-20 a -60	Raramente	20	<3000	200-300	180-220	70-95	1.2	Nickel-hidreto metálico
230-345	245 a 350	Não	<5	>1200	155	160	90-120	2.6	ZEBR A (sal fundido)
150	-20 a 60	Não	<5	2000	200-430	200-400	118-250	3.6	Íon-Lítio
150	-20 a 60	Não	<5	>1200	260-450	200-250	130-225	3.7	Polímero de Lítio
350	-45 a 70	Não	<5	>2000	2000-4500	220	120	3.2	Fosfato de Lítio-ferro
90-120	-10 a 55	Não	<5	200	80-140	1400	460	1.65	Zinco-ar
100-150	-60 a 60	Não	8-15	300	-	350	350-650	2.5	Lítio-enxofre
-	-10 a 70	Não	<5	100	-	1520-2000	1300-2000	2.9	Lítio-ar

Fonte: Yin Yong e outros (2015, p. 369).

Nota: Adaptado pelo autor.

Percebe-se pelo Quadro 2 que algumas tecnologias, apesar de muito promissoras, são tanto quanto onerosas se comparadas, por exemplo, com as baterias de chumbo-ácido. Além disso, questões de segurança e efeito de memória (vício de bateria) fizeram com que as baterias do tipo Ni-Cd desaparecessem completamente das aplicações em VE e VEH (YIN YONG *et al.*, 2015).

Um dos maiores avanços da tecnologia de baterias para aplicação em veículos elétricos e VEH se deu com a introdução das baterias a base de lítio, onde estão incluídas as baterias de íon-lítio, LiPo e LiFePO₄. As baterias a base de lítio possuem alta densidade de energia e de potência, são leves, relativamente baratas, não-tóxicas e respondem bem a cargas rápidas (YIN YONG *et al.*, 2015), tornando-as ideais para a aplicação em VEs e VEHs.

É válido ressaltar que as baterias a base de lítio, apesar das vantagens já discutidas, apresentam um desafio crescente no que se refere ao grande volume de baterias no fim de sua vida útil que necessitam ser recicladas (BAI, 2020). Tendo em vista que a redução de CO₂ tem sido um dos maiores fatores impulsionadores para o mercado de carros elétricos e elétricos híbridos (MATALLANA *et al.*, 2019), o avanço da capacidade de reciclagem desse tipo de baterias é condição *sine qua non* para o estabelecimento a longo prazo dessa tecnologia de baterias na aplicação a VE e VEHs. Sob essa ótica, Bai *et al.* (2020, p. 2) assevera “programas de pesquisa estão sendo formados e fundados globalmente: incluindo o *ReCell Center*, nos Estados Unidos, o projeto *ReLiB* no Reino Unido, o projeto *ReLieVe* na União Europeia, e outros, para desenvolver processos economicamente e ambientalmente sustentáveis para lidar com o grande número de baterias de íon-lítio gastas”.

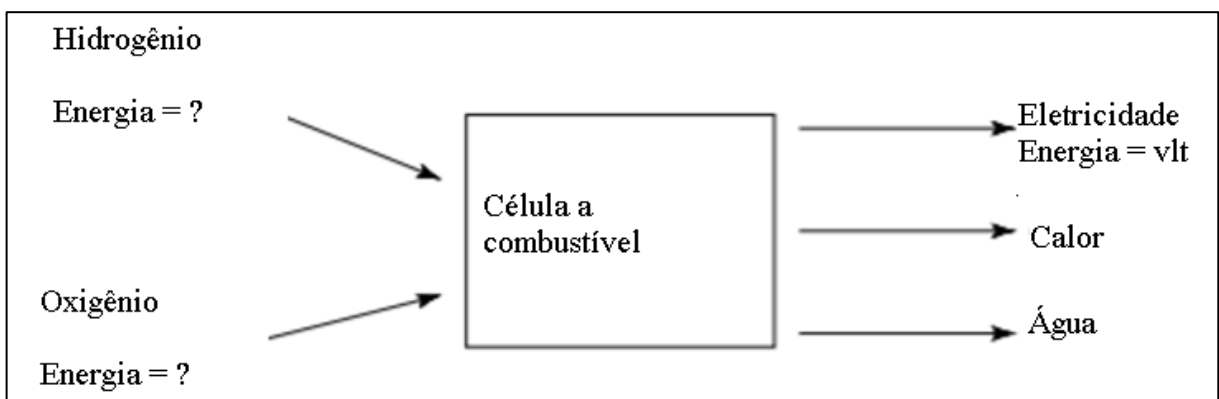
3 DISCUSSÃO DOS DADOS

Como já postulado na introdução deste trabalho, veículos elétricos híbridos a célula combustível são uma das mais promissoras tecnologias dos tempos atuais, e se colocam como alternativa aos MCI por conta dos problemas ambientais e metas de redução de emissão de CO_2 fixadas por diversos países (REVOREDO, 2019). Por conta do relativo grau de novidade deste tipo de aplicação e da multidisciplinariedade envolvida no projeto de um sistema banco de baterias/CaCs, essa seção apresenta um compilado da literatura da área no que se refere aos principais parâmetros a serem avaliados na otimização de um sistema banco de baterias/CaC. Destarte, os referidos parâmetros foram divididos nas seguinte seções e subseções: 3.1) eficiência energética das CaCs; 3.2) perdas nas CaCs; 3.3) curvas de descarga e SOC; 3.4) perdas adicionais do sistema – subdividida em conversores CC/CC e CaCs; *peak-shaving*, consumo de hidrogênio e grau de hibridização (DOH).

3.1 Eficiência Energética das CaCs

Diferentemente da maior parte dos dispositivos geradores de potência, em uma célula a combustível, não é muito intuitivo perceber que forma de energia está sendo transformada em eletricidade.

Figura 11 – Entradas e saídas de uma CaC



Fonte: Larminie e Dicks (2003, p. 26).

Nota: Adaptado pelo autor.

Com base na Figura 11, percebe-se que a “energia química” contida nos elementos H_2 , O_2 e H_2O precisa ser melhor definida. Para isso, são usados termos como: entalpia, função de Helmholtz e energia livre de Gibbs (LARMINIE; DICKS, 2003). Para o caso de CaCs, a “energia livre de Gibbs” é conceito essencial na determinação da eficiência de geração de energia elétrica.

A energia livre de Gibbs (Δg_{livre}) pode ser definida como a “energia disponível para realizar trabalho, desconsiderando-se qualquer trabalho realizado pelas mudanças em temperatura e/ou volume” (LARMINIE; DICKS, 2003, p. 26), e a variação da energia livre de Gibbs em uma CaC é dada pela equação (6), onde $\Delta g_{produtos}$ é a energia livre de Gibbs dos produtos e $\Delta g_{reagentes}$ é a energia livre de Gibbs dos reagentes.

$\Delta g_{reagentes}$ é a energia livre de Gibbs dos reagentes.

$$\Delta g_{livre} = \Delta g_{produtos} - \Delta g_{reagentes} \left[\frac{J}{mol} \right] \quad (6)$$

Por sua vez, o trabalho elétrico ($\tau_{elétrico}$) realizado pela movimentação de dois elétrons pelo potencial elétrico E é dado pela equação (7), onde F é a constante de Faraday

$$\tau_{elétrico} = -2 * F * E [J] \quad (7)$$

Partindo-se do pressuposto de que toda energia entregue pelo hidrogênio (combustível) fosse transformada em energia elétrica, o trabalho elétrico seria igual à variação da energia livre de Gibbs. Dessa forma, a tensão de circuito aberta seria conforme representado a seguir na equação (8).

$$E = -\frac{\Delta g_{livre}}{2 * F} [V] \quad (8)$$

A tensão de circuito aberto definida na equação (8) é igual a 1,48V quando utilizado o maior valor de aquecimento (HHV) do hidrogênio (LARMINIE, DICKS, 2003, p. 34).

Essas tensões seriam obtidas caso houvesse 100% de eficiência no sistema. Na prática, a eficiência é a tensão de operação da célula (V_c), dividida pela tensão de circuito aberto, demonstrada na equação (9).

$$\text{Eficiência da célula} = \frac{V_c}{1,48} 100\% \text{ (com relação ao HHV)} \quad (9)$$

Outra observação importante é que nem todo o combustível (Hidrogênio) usado na CaC reage gerando energia. Por conta disso, um coeficiente de utilização de conteúdo pode ser definido como na equação (10).

$$\mu_f = \frac{\text{massa de } H_2 \text{ reagente}}{\text{massa de } H_2 \text{ alimentada a CaC}} \quad (10)$$

Portanto, a equação final que define a eficiência da CaC é dada pela equação (11).

$$\text{Eficiência, } \eta = \mu_f \frac{V_c}{1,48} 100\% \quad (11)$$

Onde, segundo Larminie e Dicks (2003), uma boa estimativa para μ_f é 0,95. Dessa forma, a eficiência da CaC pode ser estimada simplesmente pela medida da sua tensão.

Conclui-se, portanto, que a tensão de circuito aberto pode ser encontrada pela equação (8). Entretanto, devido ao fato de que Δg_{livre} sofre alteração pela temperatura de operação e outros fatores, a máxima eficiência da CaC é dada pela equação (11), apresentada anteriormente.

A eficiência teórica do sistema célula combustível genérico é de 83%, tomando-se o maior valor de aquecimento do hidrogênio (HHV) (BARBIR, 2019). Apesar disso, a real eficiência do sistema célula a combustível genérico é bem menor do que essa, por conta das perdas na forma de calor, resistência iônica e elétrica, transporte de massa e etc. que serão detalhadas na próxima seção.

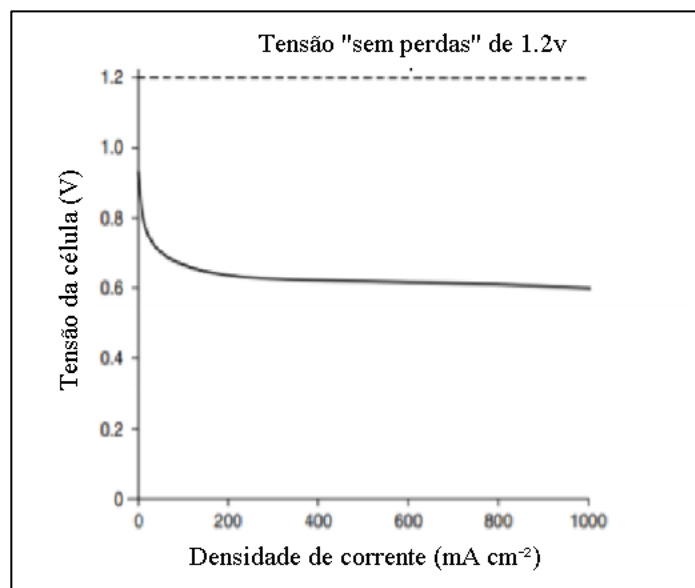
3.2 Perdas nas CaCs

Na prática, existem diversos tipos de perdas associados ao funcionamento das células a combustível que fazem com que a tensão real de saída da CaC seja sempre inferior à tensão de circuito aberto E , discutida na seção anterior. Essas são chamadas de “perdas irreversíveis” e podem ser classificadas como: perdas por ativação e intercâmbio de combustível/ correntes internas, perdas ôhmicas e perdas por concentração, a serem comentadas a seguir.

As perdas por ativação dizem respeito à energia de ativação necessária para o acontecimento das reações eletroquímicas, elas se traduzem em uma queda de tensão nos terminais da CaC (NASCIMENTO, 2017). Já as perdas por intercâmbio de combustível/correntes internas podem ser entendidas como “O combustível que é desperdiçado pelos íons que migram pelo eletrólito, que, por conta do catalisador, reagirão diretamente com o oxigênio, sem produzir corrente” (LARMINIE; DICKS, 2003).

Normalmente essas perdas são pouco relevantes para a eficiência de operação, exceto em casos de operação em baixa temperatura, que é precisamente o caso de células PEM. O Gráfico 1 mostra a tensão da CaC modelada usando apenas perdas por ativação e intercâmbio de combustível/correntes internas.

Gráfico 1 – Tensão da CaC modelada usando perdas por ativação e intercâmbio de combustível/correntes internas



Fonte: Larminie e Dicks (2003, p. 56).
Nota: Adaptado pelo autor.

As perdas ôhmicas são uma das principais fontes de perda de energia em CaCs e se devem “à resistência ao fluxo de íons e fluxo de elétrons que acontecem na célula a combustível durante seu funcionamento” (GUAITOLINI, 2019, p.24). Essas perdas são geradas pela resistência elétrica dos eletrodos e pelas resistências de contato da CaC e dependem também da forma como a pilha é estruturada e da temperatura de operação.

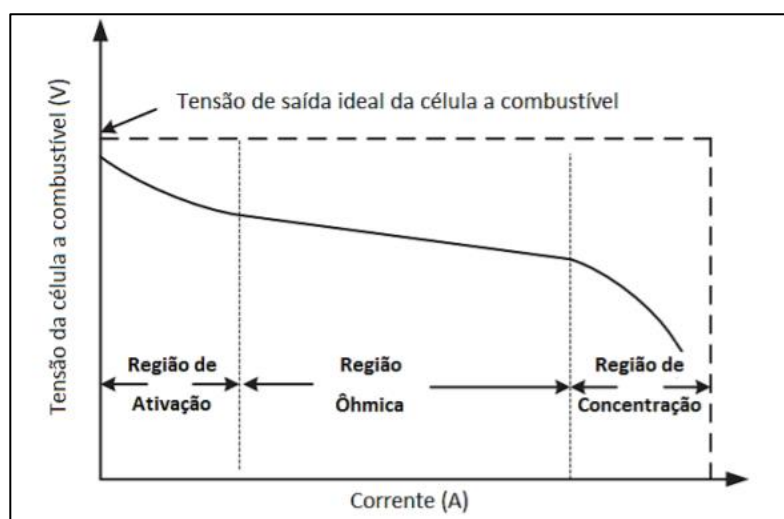
As perdas por concentração “estão relacionadas com o transporte de massa, ou seja, à transferência dos íons da solução para o eletrodo” (GUAITOLINI, 2019, p.25). Durante a operação da CaC, ocorrerá uma alteração da concentração de reagentes no eletrodo. Essa mudança na concentração dos reagentes implicará em redução da pressão parcial do oxigênio que por sua vez implicará em queda de tensão nos terminais da CaC (LARMINIE; DICKS, 2003).

Levando-se em consideração todas essas perdas irreversíveis, é possível exprimi-las em uma única equação (12), que representa a tensão de operação real de uma CaC.

$$V_{out} = E_N - V_{ativ} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (12)$$

Além disso, o Gráfico 2 traz a curva característica de tensão *versus* corrente (VxI) de uma CaC que mostra claramente três regiões de operação com suas respectivas perdas mais significativas.

Gráfico 2 – Curva característica de tensão versus corrente (VxI) de uma CaC

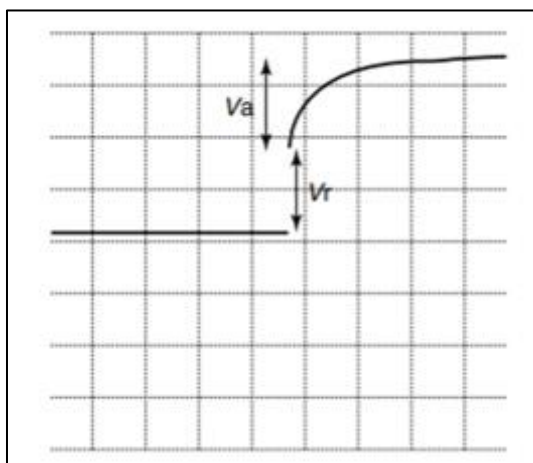


Fonte: Nascimento (2017, p. 50).

Em suma, especificamente para CaC do tipo PEM, com o arcabouço teórico apresentado nesta seção, evidenciou-se que as perdas por concentração se tornam problemáticas apenas em correntes muito altas (que devem ser atendidas pela descarga das baterias). Além disso, já que a PEMFC a hidrogênio opera em baixas temperaturas, as perdas por sobretensão de ativação no catodo (diferença de pressão do oxigênio) precisam de especial atenção, bem como as perdas ôhmicas, que se configuram como fator relevante em virtualmente todos os tipos de CaCs.

A Figura 12 exemplifica o comportamento de uma CaC do tipo PEM – onde V_r é o aumento imediato de tensão e V_a é o aumento progressivo até a tensão de operação, mostrando um atraso do fornecimento de tensão a partir de uma abrupta injeção de corrente. Isso significa dizer que existe um atraso significativo no momento de acionamento até se atingir a tensão de operação.

Figura 12 – Curva característica de tensão versus corrente ($V \times I$) de uma CaC

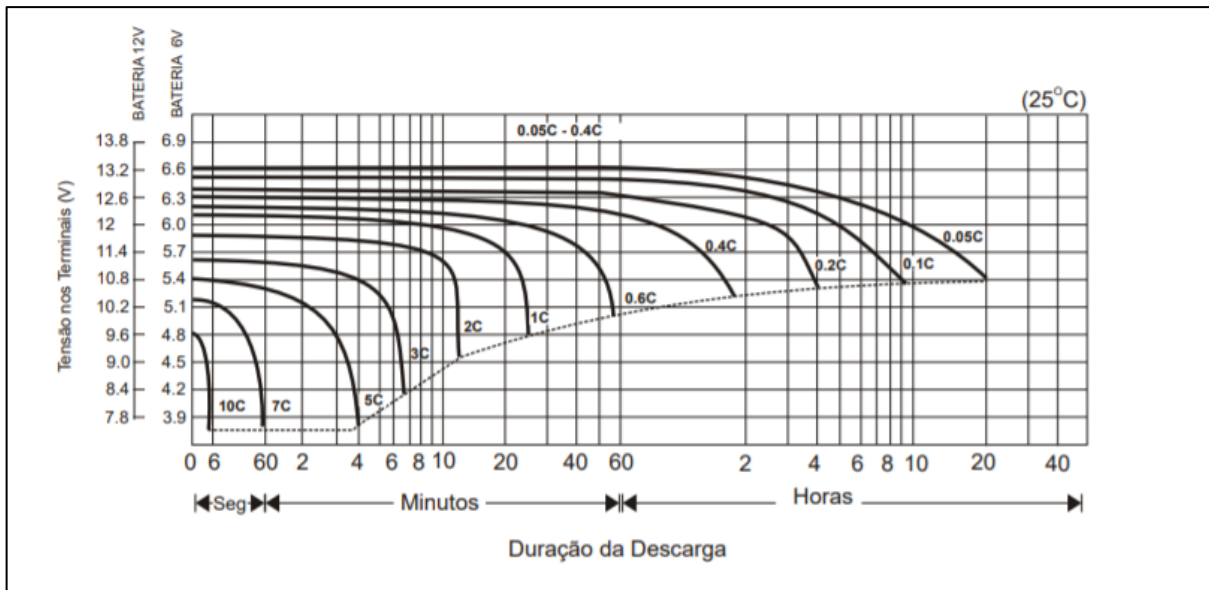


Fonte: Larminie e Dicks (2003, p. 65).

3.3 Estado de Carga das Baterias (SOC)

É possível, levando-se em consideração as particularidades das resistências internas das baterias, modelar funções não-lineares de corrente e estado de carga, chamadas SOC (do inglês *state of charge*) para a eficiência de carga e descarga da bateria. Essas funções, quando analisadas graficamente, têm forte relação com as curvas de descarga da bateria. É por meio delas que se pode encontrar o melhor ponto de operação para o funcionamento das baterias, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Curvas de descarga de uma bateria VRLA de 7,2 Ah



Fonte: Departamento técnico da unicoba (2003, p.6).

Para Revoredo (2007, p. 28), “o estado de carga é definido como a diferença entre a carga máxima possível da bateria (100%) e a quantidade de descarga imposta”. A seguir, a equação (13) estima o estado de carga (*SOC*) de uma bateria.

$$SOC(t) = \frac{c_{bat}(t)}{c_{bat}(0)} \cdot 100 \quad (13)$$

É possível perceber que, para a modelagem do banco de baterias para a aplicação em VEHCaCs, a potência que será entregue pela bateria não está relacionada com a máxima carga possível, e sim com a capacidade efetiva da bateria, que depende do seu estado de carga.

Apesar da possibilidade de cálculo teórico a partir da capacidade de Peukert (REVOREDO, 2007), a maior parte dos fornecedores de bateria disponibilizam informação tabelada que relaciona o tempo de descarga da bateria com sua “capacidade efetiva”, ou seja, a capacidade em Ah dado um certo tempo de descarga, como mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 – Três tipos diferentes de bateria da marca Victron, relacionando a “capacidade efetiva” como função do tempo de descarga

Tempo de descarga (corrente constante)	Tensão final	AGM <i>deep cycle</i>	Gel <i>deep cycle</i>	Gel <i>long life</i>
20 horas	10,8	100	100	112
10 horas	10,8	92	87	100
5 horas	10,8	85	80	94
3 horas	10,8	78	73	79
1 hora	9,6	65	61	63
30 minutos	9,6	55	51	45
15 minutos	9,6	42	38	29
10 minutos	9,6	38	34	21
5 minutos	9,6	27	24	
5 segundos		8C	7C	

Fonte: Victron (2021, p. 1).

Nota: Adaptado pelo autor.

Além de saber o número de horas possíveis de descarga da bateria, relacionada com a capacidade efetiva de operação das baterias, o cálculo e o conhecimento da SOC também são importantes no cálculo da eficiência energética da bateria, como será visto a seguir.

3.4 Eficiência Energética das Baterias

A eficiência energética de uma bateria, está ligada à quantidade de energia fornecida por ela, em comparação com a energia usada para carregá-la (REVOREDO, 2007). Teoricamente, a bateria deveria entregar toda a energia com que foi carregada ao descarregar, porém, por conta de fatores como: temperatura de operação, tipo da bateria, perdas ôhmicas, perdas Faradaicas, taxa de carga e principalmente do estado de carga (SOC), isso não acontece.

A discussão sobre o estado de carga é particularmente relevante por exercer muito impacto na eficiência de uma bateria. Isso porque a eficiência de uma bateria que foi carregada de 30% a 80% de sua capacidade será muito maior do que se ela fosse carregada de 0% a 80% de sua capacidade (REVOREDO, 2007).

Discorrendo sobre a modelagem de uma bateria, e relacionando o estado de carga com a eficiência, Achaibou, Haddadi e Malek (2012) propõem a equação (14) para a eficiência energética das baterias.

$$\eta_c = 1 - \exp \left[\frac{20.73}{\frac{I}{I_{10}} + 0.55} (SOC - 1) \right] \quad (14)$$

Onde η é a eficiência, SOC o estado de carga e I é a corrente e I_{10} a corrente normalizada com relação à capacidade C_{10} (descarga em 10 horas).

3.5 Influências Adicionais ao Sistema

Segundo conclui Revoredo (2007, p. 101), “as simulações comprovam que o consumo de combustível de um VECaC pode ser diminuído: 1) pelo controle da operação da pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência, o que implica em menor consumo de hidrogênio; e 2) pelo controle do SOC entre limites pré-determinados e penalização do SOC com relação a diferença entre este e o valor ideal. Isso implica em um melhor aproveitamento de energia proveniente de frenagem (regeneração).”

Levando-se em consideração que os dois maiores fatores relevantes na otimização do sistema já foram abordados, a pesquisa agora se volta para uma breve reflexão acerca de algumas das influências adicionais ao sistema banco de baterias/células a combustível.

3.5.1 Conversores CC/CC e Células a Combustível

Para Garrigós e Sobrino-Manzanares (2015, p. 8419), “já que as CaCs são fontes de energia não reguladas de corrente contínua, elas usualmente requerem interfaces de Eletrônica de Potência para adaptar *input/output* dos níveis de tensão e proteger a carga e a fonte”. Suas relações de potência podem ser vistas nas equações (15) e (16) a seguir.

$$P_{totalperdas} = P_{condução} + P_{chaveamento} + P_{cobre} + P_{núcleo} \quad (15)$$

$$\eta_{conversor} = \frac{P_{saída}}{|P_{saída}| + P_{totalperdas}} \quad (16)$$

Essas equações estão relacionadas com as perdas e a eficiência num conversor CC/CC, respectivamente.

Está fora do escopo desta monografia analisar todas as possíveis interferências na eficiência do sistema banco de baterias/CaC geradas pela interação com os conversores, isso porque existem diversos tipos de arquitetura possíveis para o sistema, e esse tipo de análise é muitas vezes tema de pesquisa e discussão acadêmica à parte. É verdade que para aplicações de baixa potência, um simples conversor CC/CC (conversor elevador) seria suficiente, mas para aplicações de maior potência, essa configuração já não é adequada (GARRIGÓS; SOBRINO-MANZANARES, 2015).

Ocorrências como falhas no conversor, ondulação residual de corrente, além da perda de eficiência inerente aos componentes de Eletrônica de Potência envolvidos no arranjo são exemplos de como esse elemento do sistema pode impactar na eficiência global.

De acordo com Garrigós e Sobrino-Manzanares (2015, p. 8431), para 3 tipos diferentes de arquitetura, foram encontradas experimentalmente as eficiências dos conversores, conforme mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados experimentais de três tipos diferentes de arquitetura de conversores, com suas respectivas eficiências

	4-IBC	2-2-MIBC	(2-2-MIBC/4-IBC)
<i>Drivers</i> de MOSFETs e geradores PWM	4	4	1
Diodos de potência	4	2	-
Indutores elevadores	4	2	-
Sensores de corrente	4	2	-
Amplificadores de erro de corrente	4	2	-
Amplificadores de erro de tensão	1	1	-
Referência do núcleo do indutor	55,548	55,254	-
Massa total do indutor (g)	254	265	1,04
Área total do indutor (cm ²)	56	42	0,75
Volume total do indutor (cm ³)	85,6	87,2	1,02
Perdas totais do indutor (W)	13,2	13,4	1,01
Perdas totais nos MOSFETs	7,5	115	2
Perdas totais nos diodos de potência	11	11	1
Eficiência do conversor	0,96	0,95	0,99

Fonte: Garrigós e Sobrino-Manzanares (2015, p. 8431).

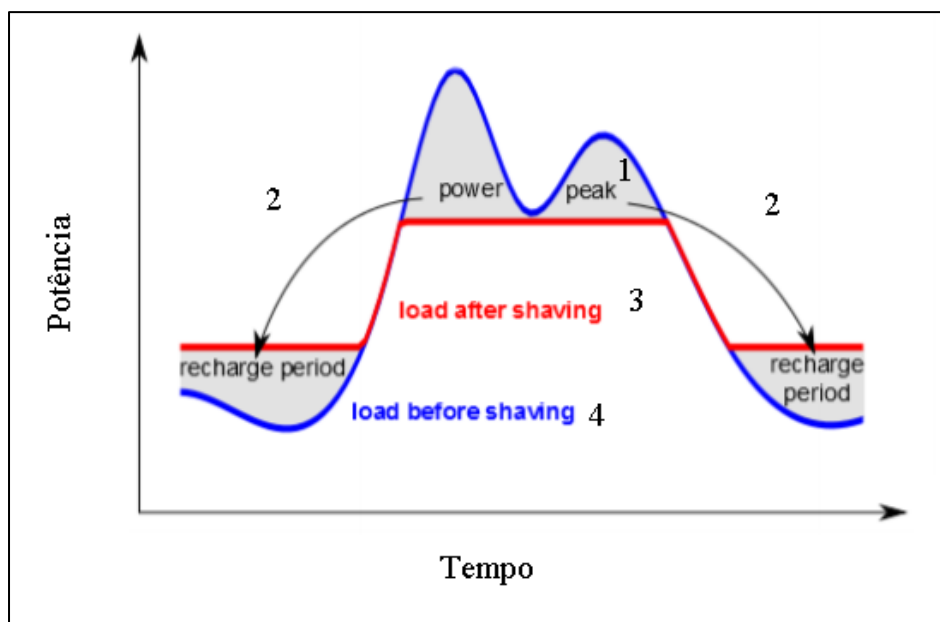
Nota: Adaptado pelo autor.

3.5.2 Peak-shaving

O fenômeno do *peak-shaving* pode ser entendido como uma estratégia de controle dos picos de demanda de potência – como ilustrado na Figura 13. O termo é muito amplo e na aplicação para VEHCaCs, acontece nos momentos onde o veículo mais demanda potência do conjunto CaC +BB.

Num VEHCaC, o *peak-shaving* é realizado pelo banco de baterias ou pelo ultra-capacitor, em momentos onde a célula a combustível não consegue entregar toda a potência necessária, ou então não consegue trabalhar com uma eficiência aceitável.

Figura 13 – Princípio de funcionamento do *peak-shaving*



Fonte: ABB (2021, p.1).

Nota: Adaptado pelo autor.

¹ – Pico de potência. ² – Tempo de recarga. ³ – Carga depois do *shaving*.

⁴ – Carga antes do *shaving*.

Para a otimização proposta nesta pesquisa, uma situação real interessante é a partida do motor.

Pede e outros (2004, p. 291) comentam que “especialmente em VEHCaCs não movidos a hidrogênio, *peak-shaving* é um assunto importante, porque o tempo de resposta de alguns subsistemas (tipicamente o processador de combustível) é muito maior que o tempo de transiente requerido pelo ciclo de direção”.

Nesse caso, por vezes, além da alta demanda de corrente no motor, o tempo de resposta da CaC é muitas vezes sub-ótimo, o que normalmente leva ou à operação em condições baixas de eficiência da CaC, ou então à descarga da bateria abaixo de um nível aceitável de SOC.

Como ambos os casos são desfavoráveis para a eficiência do sistema, soluções como o uso de CaCs do tipo PEM, baterias para operação em descarga rápida e etc. devem ser observadas, dependendo da aplicação.

3.5.3 Consumo de Hidrogênio e Grau de Híbridação (DOH)

O grau de híbridação de um VEHCaC é a razão entre a potência máxima da bateria e a potência total do trem de força (NASSIF; ALMEIDA, 2020). A equação (17) do DOH é apresentada abaixo, onde $P_{B,max}$ é a máxima potência da bateria e $P_{FCS,max}$ é a máxima potência da CaC.

$$DOH = \frac{P_{B,max}}{P_{FCS,max} + P_{B,max}} \cdot 100\% \quad (17)$$

Existe uma relação direta entre o grau de híbridação e a eficiência do sistema banco de baterias/célula a combustível, isto porque o grau de híbridação determina os “pesos” a serem utilizados no cálculo da eficiência global do sistema. Em outras palavras, o grau de híbridação representa percentualmente a quantidade de potência entregue pela bateria, com relação à potência total do sistema ($P_{B,max} + P_{FCS,max}$).

3.6 Eficiência Global do Sistema Célula a Combustível/Banco de baterias

Esta seção se propõe a unificar as discussões que vêm sendo feitas até aqui, integrando o que foi discutido no que diz respeito à eficiência do sistema célula a combustível/banco de baterias. O Quadro 5 mostra a eficiência energética dos dois principais componentes do sistema banco de baterias/célula a combustível – como consta nas seções 3.1 e 3.4.

Quadro 5 – Eficiências dos elementos principais do sistema banco de baterias/célula a combustível

Componente/fenômeno	Impacto na eficiência energética
Célula a Combustível	$\left(\mu_f \cdot \frac{V_c}{1,48} \cdot 100\%\right)$
Banco de baterias	$\left(1 - \exp\left[\frac{20,73}{\frac{I}{I_{10}} + 0,55}\right] \cdot (soc - 1)\right)$

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Já o Quadro 6 enuncia os tipos de perdas nos três principais elementos do sistema banco de baterias/célula a combustível, já discutidos nas seções 3.2 e 3.3 e na subseção 3.5.1.

Quadro 6 – Tipos de perdas dos principais elementos do sistema banco de baterias/célula a combustível

Componente/fenômeno	Perdas que geram Impacto na eficiência energética
Célula a Combustível	<ul style="list-style-type: none"> - Perdas por ativação - Perdas ôhmicas - Perdas por concentração
Banco de baterias	<ul style="list-style-type: none"> - Perdas relacionadas à curva SOC - Perdas ôhmicas - Perdas térmicas - Perdas de Faraday
Conversor CC/CC	<ul style="list-style-type: none"> - Perdas por condução - Perdas por chaveamento - Perdas no cobre - Perdas no núcleo

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Finalmente, o Quadro 7 expõe as perdas adicionais que possuem grande impacto na eficiência do sistema banco de baterias/célula a combustível, apresentadas nas subseções 3.5.2 e 3.5.3.

Quadro 7 – Perdas adicionais do sistema banco de baterias/célula a combustível

Componente/fenômeno	Perdas que geram Impacto na eficiência energética
<i>Peak-shaving</i>	Impacta diretamente a eficiência do sistema, forçando o banco de baterias a trabalhar numa região menos eficiente de SOC
Grau de hibridização (DOH)	Impacta diretamente a eficiência do sistema porque determina os “pesos” a serem utilizados na formulação global da eficiência do sistema

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Entendendo que a eficiência de um sistema híbrido é uma combinação da eficiência de suas fontes de potência, e tendo por fundamentação a pesquisa de Siqueira (2005), este trabalho

propõe o cálculo de uma média ponderada entre os elementos fornecedores de potência como uma boa aproximação da eficiência total do sistema.

A equação global da eficiência de um sistema híbrido pode ser escrita como segue na equação (18), onde η_{FC} é a eficiência da CaC, η_{Bat} é a eficiência do banco de baterias e X é a porcentagem da potência total entregue por cada uma das partes do sistema.

$$\eta_{sis} = [\{\eta_{FC} \cdot (X)\} + \{\eta_{Bat} \cdot (1 - X)\}] \quad (18)$$

A equação (19) é obtida substituindo as equações de eficiência do Quadro 5.

$$\eta_{sis} = \left[\left\{ \left(\mu_f \cdot \frac{V_c}{1,48} \cdot 100\% \right) \cdot (X) \right\} + \left\{ \left(1 - \exp \left[\frac{20,73}{\frac{I}{I_{10}} + 0,55} \right] \cdot (soc - 1) \right) \cdot (1 - X) \right\} \right] \quad (19)$$

Incluindo as perdas da CaC discutidas na seção 3.2, tem-se a equação (20).

$$\eta_{sis} = \left[\left\{ \left(\mu_f \cdot \frac{E - V_{Ativ} - V_{ohm} - V_{conc}}{1,48} \cdot 100\% \right) \cdot (X) \right\} + \left\{ \left(1 - \exp \left[\frac{20,73}{\frac{I}{I_{10}} + 0,55} \right] \cdot (soc - 1) \right) \cdot (1 - X) \right\} \right] \quad (20)$$

Considerando-se o grau de hibridização conforme a equação 17, apresentada na subseção 3.5.3, sendo:

$$DOH = \frac{P_{B,max}}{P_{FCS,max} + P_{B,max}} \cdot 100\% \quad (17)$$

Finalmente, a equação (21) define a eficiência global do sistema banco de baterias/célula a combustível.

$$\eta_{sis} = \left[\left\{ \left(\mu_f \cdot \frac{E - V_{Ativ} - V_{ohm} - V_{conc}}{1,48} \cdot 100\% \right) \cdot (1 - DOH) \right\} + \left\{ \left(1 - \exp \left[\frac{20,73}{\frac{I}{I_{10}} + 0,55} \right] \cdot (soc - 1) \right) \cdot (DOH) \right\} \right] \quad (21)$$

3.6.1 Validação da Equação de Eficiência Global

Seguidamente, é apresentado um exemplo da literatura (SIQUEIRA, 2005) onde foram calculadas para um mesmo período a eficiência de um painel solar, a eficiência de um

aerogerador, as potências entregues pelas duas fontes e a eficiência total do sistema. As Tabelas 1, 2 e 3 mostram os resultados obtidos para o painel solar, do aerogerador e do sistema híbrido, respectivamente.

Tabela 1 – Dados experimentais obtidos para um painel fotovoltaico

(continua)

Dia/mês	Irradiância solar média diária (ms^{-1})	Energia solar global total diária (Wh)	Número de horas total diária de geração eólica (h)	Corrente elétrica total diária do painel fotovoltaico (Ah)	Energia gerada pelo painel fotovoltaico total diária (Wh)	Rendimento do painel fotovoltaico (%)
15/6	549,1308	11861,23	10,00	79,24	1117,08	9,42
16/6	552,2730	11829,69	9,92	77,25	1087,13	9,19
17/6	559,4734	11983,92	9,92	87,48	1220,50	10,18
18/6	224,4029	4806,71	9,92	36,17	466,02	9,70
19/6	258,4003	5627,96	10,08	43,40	552,41	9,82
20/6	145,5699	2803,68	8,92	20,94	261,61	9,33
21/6	197,8771	4024,82	9,42	29,90	378,71	9,41
22/6	479,7561	10276,37	9,92	77,90	1057,83	10,29
23/6	612,7344	13014,48	9,83	86,36	1235,35	9,49
24/6	426,9684	9145,66	9,92	68,63	937,16	10,25
25/6	535,5326	11567,50	10,00	80,87	1152,90	9,97
26/6	590,0415	12744,90	10,00	78,10	1129,87	8,87
27/6	467,0953	10173,34	10,08	73,2	1013,46	9,96
28/6	125,008	2565,16	9,50	19,30	235,83	9,19
29/6	402,2932	8327,47	9,58	62,85	837,89	10,06
30/6	529,4447	11436,00	10,00	84,74	1150,37	10,06
1/7	612,5203	13120,18	9,92	87,88	1254,24	9,56
2/7	589,4252	12625,49	9,92	79,99	1138,54	9,02
3/7	589,9212	12636,11	9,92	76,14	1101,94	8,72
4/7	573,9918	12294,90	9,92	72,02	1046,89	8,51
5/7	176,9097	3566,50	9,33	25,51	333,98	9,36
6/7	375,7738	7913,80	9,75	59,30	780,72	9,87
7/7	545,0311	11184,04	9,50	83,24	1175,02	10,51
8/7	564,6271	12094,31	9,92	79,86	1136,64	9,40
9/7	646,9932	14207,97	10,17	80,29	1214,17	8,55
10/7	478,0927	10584,97	10,25	71,92	1033,19	9,76
11/7	500,5814	10812,56	10,00	72,10	1017,05	9,41
12/7	617,3431	13445,73	10,08	75,81	1129,44	8,40

Tabela 1 – Dados experimentais obtidos para um painel fotovoltaico

(conclusão)

Dia/mês	Irradiância solar média diária (ms^{-1})	Energia solar global total diária (Wh)	Número de horas total diária de geração eólica (h)	Corrente elétrica total diária do painel fotovoltaico (Ah)	Energia gerada pelo painel fotovoltaico total diária (Wh)	Rendimento do painel fotovoltaico (%)
13/7	635,4713	13840,57	10,08	70,55	1072,62	7,75
14/7	632,0466	13879,74	10,17	70,47	1066,88	7,69
Total	473,1600	304395,8	295,92	2011,41	28335,46	9,31

Fonte: Siqueira (2005, p. 168).

Nota: Adaptado pelo autor.

Tabela 2 – Dados experimentais obtidos para um aerogerador

(continua)

Dia/mês	Velocidade do vento média diária (ms^{-1})	Energia disponível no vento total diária (Wh)	Número de horas total diária de geração eólica (h)	Corrente elétrica total diária do aerogerador (Ah)	Energia gerada pelo aerogerador total diária (Wh)	Rendimento do aerogerador (%)
15/6	3,04	1,47	0,08	0,03	0,03	1,86
16/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18/6	4,72	287,67	3,92	53,66	49,44	17,19
19/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20/6	3,25	19,14	0,75	7,49	6,30	32,89
21/6	3,88	785,79	19,92	217,33	193,73	24,65
22/6	3,82	727,07	18,92	196,47	175,86	24,19
23/6	3,53	244,68	8,42	50,59	45,60	18,64
24/6	2,84	3,68	0,25	0,38	0,33	9,10
25/6	3,30	53,04	2,25	8,86	7,83	14,77
26/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28/6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29/6	5,75	183,03	1,42	42,97	38,56	21,07
30/6	2,82	1,17	0,08	0,09	0,08	6,65
1/7	3,04	17,25	0,92	2,35	2,19	12,71
2/7	2,32	0,64	0,08	0,03	0,03	4,23
3/7	2,43	0,74	0,08	0,01	0,01	1,81
4/7	3,64	2,47	0,08	0,29	0,27	10,87
5/7	3,22	86,44	3,92	16,91	14,67	16,98
6/7	3,43	343,10	12,75	72,38	64,23	18,72

Tabela 2 – Dados experimentais obtidos para um aerogerador

(conclusão)

Dia/mês	Velocidade do vento média diária (ms^{-1})	Energia disponível no vento total diária (Wh)	Número de horas total diária de geração eólica (h)	Corrente elétrica total diária do aerogerador (Ah)	Energia gerada pelo aerogerador total diária (Wh)	Rendimento do aerogerador (%)
7/7	4,05	853,25	18,58	253,41	223,99	26,25
8/7	4,48	1115,72	18,00	275,76	245,61	22,01
9/7	3,96	594,99	13,08	141,95	126,24	21,22
10/7	3,03	43,36	2,33	5,18	4,68	10,80
11/7	3,46	58,88	2,08	10,42	9,51	16,15
12/7	2,68	17,90	1,42	1,89	1,74	9,70
13/7	3,09	118,36	6,08	17,44	15,65	13,22
14/7	3,25	82,88	3,50	14,58	13,25	15,99
Total	2,77	5642,71	138,92	1390,45	1239,81	21,97

Fonte: Siqueira (2005, p. 169).

Nota: Adaptado pelo autor.

Tabela 3 – Dados experimentais obtidos para um sistema híbrido (aerogerador/painel solar)

(continua)

Dia/Mês	Corrente Total Diária Carga (Ah)	Tensão Média Diária Carga (V)	Corrente Total Diária Bateria (Ah)	Tensão Média Diária Bateria (V)	Energia Total Diária Consumida Carga (Wh)	Balço de Energia Total Diária Bateria (Wh)	Energia Solar + Eólica Disponível (Wh)	Energia Total Diária Gerada Pelo Sistema Híbrido (Wh)	Rendimento do Sistema Híbrido (%)
15/7	71,29	7,24	7,47	11,01	853,96	117,62	11862,7	1117,11	9,42
16/7	70,73	7,16	10,67	11,02	845,39	156,24	11829,69	1087,13	9,19
17/7	85,25	8,82	0,64	10,97	1036,33	54,57	11983,92	1220,5	10,18
18/7	51,82	9,2	-14,83	10,67	597,87	-142,89	5094,38	515,46	10,12
19/7	64,49	7,99	-22,06	10,54	704,52	-210,97	5627,96	552,41	9,82
20/7	42,28	5,19	-17,75	10,47	389,8	-178,63	2822,82	267,91	9,49
21/7	55,18	6,83	-8,22	10,68	604,82	-71,89	4810,61	572,44	11,9
22/7	74,87	10,54	16,14	10,84	908,85	203,91	11003,44	1233,7	11,21
23/7	76,79	7,62	12,71	11,08	927,42	183,03	132.59,16	1280,94	9,66
24/7	60,67	6,5	6,98	10,87	710,88	101,03	9149,34	937,49	10,25
25/7	70,29	7,24	10,14	11,03	848	151,93	11620,54	1160,73	9,99
26/7	68,64	7,1	11,43	11,02	820,93	161,47	12744,9	1129,87	8,87
27/7	65,79	7,03	7,99	10,98	778,92	117,31	10173,34	1013,46	9,96

Tabela 3 – Dados experimentais obtidos para um sistema híbrido (aerogerador/painel solar) (conclusão)

Dia/ Mês	Corrente Total Diária Carga (Ah)	Tensão Média Diária Carga (V)	Corrente Total Diária Bateria (Ah)	Tensão Média Diária Bateria (V)	Energia Total Diária Consumi da Carga (Wh)	Balço de Energia Total Diária Bateria (Wh)	Energia Solar + Eólica Disponível (Wh)	Energia Total Diária Gerada Pelo Sistema Híbrido (Wh)	Rendim ento do Sistema Híbrido (%)
28/7	31,86	2,95	-10,93	10,6	276,88	-108,78	2565,16	235,83	9,19
29/7	77,53	11,03	-10,95	10,62	883,76	-90,67	8510,5	876,45	10,3
30/7	76,71	6,55	23,32	10,76	705,68	284,45	11437,17	1150,44	10,06
01/7	70,56	7,28	16,03	11,01	844,74	215,43	13137,43	1256,43	9,56
02/7	66,52	7,06	12,49	11,03	802,63	170,08	12626,12	1138,57	9,02
03/7	63,31	6,91	10,48	11,01	760	143,69	12636,85	1101,95	8,72
04/7	61,71	6,82	10,55	10,98	730,5	144,08	12297,37	1047,16	8,52
05/7	45,34	6,53	-18,96	10,62	483,96	-185,4	3652,94	348,66	9,54
06/7	69,85	10,36	-0,5	10,58	734,72	27,11	22:56,9	844,94	10,23
07/7	82,18	10,08	16,76	10,82	926,68	209,51	12037,29	1399,01	11,62
08/7	87,43	12,24	12,03	11,04	1081,34	175,37	13210,04	1382,24	10,46
09/7	78,68	10,9	16,53	11,05	979,51	227,65	14802,96	1340,41	9,05
10/7	61,54	6,81	8,15	10,97	721,57	117,13	10628,33	1037,88	9,77
11/7	62,78	6,67	8,65	10,97	749,77	117,23	10871,44	1026,56	9,44
12/7	63,31	6,97	10,59	11,02	759,37	146,78	13463,63	1131,18	8,4
13/7	62,54	6,93	13,71	11,05	746,66	182,36	13958,93	1088,26	7,8
14/7	60,23	6,81	16,78	11,09	712,78	215,01	13962,62	1080,13	7,74
Total	1980,17	7,71	156,03	10,88	22928,23	2633,74	310038,5	29598,13	9,54

Fonte: Siqueira (2005, p. 170).

Nota: Adaptado pelo autor.

Tomando-se por referência o dia 18/6 (escolhido aleatoriamente), pelas tabelas supracitadas, vê-se nesse dia: Energia gerada pelo painel solar (W/h) = 466,04 e $\eta_{\text{painel}} = 9,7\%$. Vê-se também: Energia gerada pelo aerogerador (W/h) = 49,44 e $\eta_{\text{aero}} = 17,16\%$ e que $\eta_{\text{sis}} = 10,12\%$.

Dessa forma, sendo X a porcentagem da potência total entregue por cada uma das partes do sistema, a equação (22) relaciona essas potências.

$$X = \frac{49,44}{49,44 + 466,04} \quad (22)$$

Sabe-se, portanto, que para os dados apresentados, $X = 0,096$. Dessa forma, pela equação (18):

$$\eta_{sis} = [\{\eta_{FC} \cdot (X)\} + \{\eta_{Bat} \cdot (1 - X)\}] \quad (18)$$

Substituindo, tem-se a equação (23), que se segue:

$$\eta_{sis} = [\{0,172\} \cdot \{0,096\}] + \{0,097\} \cdot \{0,904\}] \quad (23)$$

Tem-se, finalmente: $\eta_{sis} = 10,42\%$.

Este resultado possui um erro de menos de 3% do valor da eficiência real do sistema encontrada experimentalmente. É importante ressaltar também que para outros dias o erro percentual foi bastante similar. Também, que todo o desenvolvimento até se chegar na equação (21) parte da mesma premissa de que a média ponderada é uma boa aproximação para cálculo da eficiência global de um sistema híbrido.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como considerações finais, é válido ressaltar que este trabalho não se propôs a calcular a eficiência e a economia de combustível real de um VEH. Isso não só porque existem muitas variáveis e componentes diferentes a serem levados em consideração, mas também por conta das estratégias de controle para o gerenciamento da potência (PCaC+Pbat). Seguindo essa linha de pensamento, Atwood e outros (2002) afirmam que a hibridização traz resultados positivos em termos de eficiência, acrescentando que a interação existente entre os ciclos de direção, a estratégia de controle e as eficiências dos componentes individuais do sistema é bastante complexa.

Sob essa ótica, a principal contribuição desta pesquisa é oferecer uma visão geral acerca dos principais parâmetros a serem levados em consideração na análise da eficiência e otimização de um sistema CaC/banco de baterias, bem como fornecer uma equação global de eficiência “base” para cálculo da eficiência real do sistema. Entende-se tal contribuição como significativa, devido à relativa novidade da tecnologia e à escassez de pesquisa acadêmica sobre a eficiência desse tipo de sistema, principalmente em português.

Dessa feita, estudos mais aprofundados sobre o referido assunto podem, e já estão sendo feitos, para lançar luz sobre diferentes aspectos relevantes à eficiência dos VEH a hidrogênio como, por exemplo: análise dos ciclos de direção e estratégias de controle num VEHCaC (REVOREDO, 2019; REZK, 2021), estratégias de gerenciamento de potência num VEH com tração nas quatro rodas (SOUMEUR *et al.*, 2020) e impacto das flutuações de corrente na performance das células PEM por conta da alta frequência de chaveamento dos conversores CC/CC (GUILBERT *et al.*, 2015), entre outros.

Por fim, é importante evidenciar que esta pesquisa foi de grande valia no processo de aprendizagem sobre CaCs e veículos híbridos, contribuindo com o arcabouço de conhecimento do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. **Método de controle peak shaving para armazenamento de energia.** 2021. Disponível em: https://www.sandia.gov/ess-ssl/EESAT/2013_papers/Peak_Shaving_Control_Method_for_Energy_Storage.pdf. Acesso em: 16 mar. 2021.
- ACHAIBOU, N; HADDADI, M; MALEK, A. Modeling of Lead Acid Batteries in PV Systems. **Energy Procedia**, v. 18, p. 538-544, 2012. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212008351>.
- ALASWAD, A.; BAROUTAJI, A.; ACHOUR, H.; CARTON, J.; AL MAKKY, A.; OLABI, A. G. Developments in fuel cell technologies in the transport sector. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 37, p. 16499-16508, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/52cience/article/pii/S0360319915315810>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- AMARAL, E. G. **Veículo elétrico com sistema energético híbrido: Célula de combustível/baterias eletroquímicas.** 1998. 139f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 1998. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260737>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- ANDERSEN, R. L. **Sistema de interligação entre módulos geradores de energia a partir de células a combustível do tipo PEM e um banco de baterias.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89397>. Acesso em: 24 jul. 2018.
- ATWOOD, P., GURSKI, S., NELSON, D., WIPKE, K. Degree of Hybridization Modeling of a Hydrogen Fuel Cell PNGV-Class Vehicle. **SAE Technical Paper**, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2002-01-1945>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- BAI, Y.; MURALIDHARAN, N.; SUN, Y.; PASSERINI, S.; WHITTINGHAM, M. S.; BELHAROUAK, I. Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: concept of battery identity global passport. **Materials Today**, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702120303060>. Acesso em: 08 out. 2020.
- BARBIR, F. PEM Fuel Cells. In: BARBIR, F. **Theory and Practice**, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fuel-cell-efficiency>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- BECHERIF, M. Passivity-based control of hybrid sources: fuel cell and battery. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 39, n. 12, p. 585-590, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015336867>. Acesso em: 02 nov. 2019.

BECHERIF, M.; CLAUDE, F. HERVIER, T.; BOULON, L. Multi-stack Fuel Cells Powering a Vehicle. **Energy Procedia**, v. 74, p. 308-319, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215013818>. Acesso em: 02 nov. 2019.

BECHERIF, M.; AYAD, M. Y; MIRAOU, A. Modeling and Passivity-based control of hybrid sources: Fuel cell and Battery. **41st Industry Applications Conference**, p. 1134-1139, IEEE-IAS, USA, v. 1; 2006.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. **Relatório anual do Departamento de Energia dos Estados Unidos**, 2019. Disponível em: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/2019-htac-annual-report.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2019.

FRAGIACOMO, P.; FRANCESCO, P. Energy performance of a Fuel Cell hybrid system for rail vehicle propulsion. **Energy Procedia**, v. 126, p. 1051-1058, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217338262>. Acesso em: 04 nov. 2019.

GARRIGÓS, A.; SOBRINO-MANZANARES, F. Interleaved multi-phase and multi-switch boost converter for fuel cell applications. **International Journal of Hydrogen Energy**. V. 40, n. 26, p. 8419-8432, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915010708>. Acesso em: 10 nov. 2020.

GUAITOLINI, S. V. M. Desenvolvimento de modelo elétrico e termodinâmico para célula a combustível a óxido sólido tubular no *software* PSCAD. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Vitória, 2019.

GUILBERT, D.; GAILLARD, A.; MOHAMMADI, A.; N'DIAYE, A.; DJERDIR, A. Investigation of the interactions between proton exchange membrane fuel cell and interleaved DC/DC boost converter in case of power switch faults. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 1, p. 519-537, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914029127>. Acesso em: 12 nov. 2020.

GUILBERT, G.; NASSIF, S.; DE ALMEIDA, C.A. Impact of powertrain hybridization on the performance and costs of a fuel cell electric vehicle, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 41, p. 21722-21737, 2020. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920319406>. Acesso em: 08 nov. 2020.

GREEN OPTIMISTIC. **Arquitetura de um veículo elétrico híbrido**. 2021. Disponível em: <https://i1.wp.com/www.greenoptimistic.com/wp-content/uploads/2015/02/SS1423331371.jpg?fit=1032%2C591&ssl=>. Acesso em: 16 mar. 2021.

HYUNDAI. **Modelos híbridos**. 2021. Disponível em:
<https://www.hyundai.com/nl/modellen/nexo.html>. Acesso em: 14 mar. 2021

KIRCHEV, A. **Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing**, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/battery-capacity>. Acesso em: 04 nov. 2019.

LARMINIE, J.; DICKS, A. **Fuel Cell Systems Explained**. West Sussex: WILEY, 2003.

MA, S.; LIN, M.; LIN, T.; LAN, T.; LIAO, X.; MARÉCHAL, F.; HERLE, J. V.; YANG, Y.; DONG, C.; WANG, L. Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, 2021. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212030410X>. Acesso em: 10 out. 2020.

Manual Técnico UNIPOWER Série UP Bateria Chumbo-Ácida Selada Regulada por Válvula. Departamento Técnico da Unicoba, São Paulo, Manual Técnico, 2003.

MATALLANA, A.; IBARRA, E.; LÓPEZ, I.; ANDREU, J.; GARATE, J.I.; JORDÀ, X.; REBOLLO, J. Power module electronics in HEV/EV applications: new trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 113, 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304721>. Acesso em: 10 fev. 2020.

MCNICOL, B.; RAND, D.; WILLIAMS, K. Fuel cells for road transportation purposes - yes or no?. **Journal of Power Sources**, v.100, n.1-2, p. 47-59, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301008825>. Acesso em: 27 mar. 2021.

MEBARKI, N.; REKIOUA, T.; MOKRANI, Z.; REKIOUA, D.; BACHA, S. PEM fuel cell/battery storage system supplying electric vehicle. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 45, p. 20993-21005, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916309600>. Acesso em: 10 out. 2020.

NASSIF, G.; DE ALMEIDA, S. Impact of powertrain hybridization on the performance and costs of a fuel cell electric vehicle, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 41, p. 21722-21737, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/54cience/article/pii/S0360319920319406>. Acesso em: 10 out. 2020.

PEDE, G.; IACOBACCI, A.; PASSERINI, S.; BOBBIO, A.; BOTTO, G. FC vehicle hybridisation: an affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train. **Journal of Power Sources**, v. 125, n. 2, p. 280-291, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775303008395>. Acesso em: 10 out. 2020.

REDDY, K. J.; NATARAJAN, S. Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications – A review. **International Journal of Hydrogen Energy**,

v. 43, n. 36, p. 17387-17408, 2018. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918322304>. Acesso em: 10 out. 2020.

REUTERS. **Protesto de fazendeiros holandeses**. 2019. Disponível em:
<https://www.reuters.com/article/us-netherlands-farmers-protests/tractors-snarl-dutch-roads-in-emissions-protest-idUSKBN1WG2XD>. Acesso em: 02 nov. 2019.

REVOREDO, T. C. **Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Rio de Janeiro, 2007.

REVOREDO, T.C. Estratégia de minimização do consumo equivalente aplicada ao gerenciamento de potência de veículos elétricos híbridos de célula a combustível. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 23, n. 2, p. 03-21, 2019.

REZK, H.; NASSEF, A.; ABDELKAREEM, M.; ALAMI, A.; FATHY, A. Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 8, p. 6110-6126, 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919344180>. Acesso em 15 mar. 2021.

SINGH, H. S.; BOCCA, R.; GOMEZ, P.; DAHLKE, S.; BAZILIAN, M. The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy system. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, 2019. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300756>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

SIQUEIRA, J.; **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. 2005. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Botucatu, 2005.

SORRENTINO, M.; PIANESE, C.; MAIORINO, M. An integrated mathematical tool aimed at developing highly performing and cost-effective fuel cell hybrid vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 221, p. 308-317, 2013. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312012591>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SOUMEUR, M.; GASBAOUI, B.; ABDELKHALEK, O.; GHOUILI, J.; TOUMI, T.; CHAKAR, A. Comparative study of energy management strategies for hybrid proton exchange membrane fuel cell four wheel drive electric vehicle, **Journal of Power Sources**, v. 462, p.1-10, 2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775320304705>. Acesso em: 15 mar. 2021

VICTRON. **Baterias gel e agm**. 2021. Disponível em:
<https://www.victronenergy.com/batteries/gel-and-agm-batteries>. Acesso em: 16 mar. 2021.

WANG, F.; PENG, C. The development of an exchangeable PEMFC power module for electric vehicles. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 8, p. 3855-3867, 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913031200>. Acesso em: 10 out. 2020.

YING YONG, J.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; MIAO TAN, K.; MITHULANANTHAN, N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 365-385, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004001>. Acesso em: 29 mar. 2020.