



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

PMC-581 – Projeto Mecânico II

G.O. (none)
R. B. Salvagni
07/01/2002

Adequação de Sistemas Agregados para Veículos com Célula de Combustível

Orientador: Ronaldo de B. Salvagni
Coordenador: Edson Gomes
Alunos: André F. P. Nogueira (No. USP 2368939)
Antonio B. Franzoni (No. USP 2377220)

Novembro de 2001



Estrutura de Tópicos

1	INTRODUÇÃO	3
2	OBJETIVOS	5
3	HISTÓRICO	6
3.1	Necessidade de Mudança do Sistema de Motor a combustão.....	6
3.2	Alternativas Desenvolvidas ou em Desenvolvimento.....	7
3.2.1	Combustíveis Alternativos.....	8
3.2.2	Híbridos	9
3.2.3	Motores Elétricos com Bateria Eletrolítica.....	11
3.2.4	Motores Elétricos com Célula de Combustível	12
4	A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL	14
4.1.1	O Princípio de Funcionamento	14
4.1.2	Histórico	17
5	ESCOLHA DE UM VEÍCULO VIÁVEL	19
5.1	Tipo de Combustível	20
5.2	Tipo de Aplicação	21
5.3	Definição da Célula de Combustível.....	22
5.4	Chassi	24
6	SISTEMAS AGREGADOS.....	27
6.1	Organização dos Sistemas Agregados.....	28
6.2	Agregados Primários	29
6.2.1	Sistema Elétrico	30
6.2.2	Sistema de Controle	31
6.2.3	Sistema de Refrigeração	31
6.2.4	Motor Elétrico de Tração.....	32
6.2.5	Conjunto de Células de Combustível	34
6.2.6	Admissão de Ar	35
6.2.7	Admissão de Combustível	35
6.3	Agregados Secundários	36

7	PRIMEIRA FASE: ADAPTAÇÃO	37
7.1	Transmissão	37
7.2	Direção	39
7.3	Freios	42
7.4	Ar Condicionado	47
7.5	Outros	49
8	SEGUNDA FASE: DESENVOLVIMENTO	51
8.1	Transmissão	52
8.2	Direção	55
8.3	Freios	56
8.4	Ar condicionado	59
9	CONCLUSÕES	61
	LISTA DE FIGURAS	62
	LISTA DE TABELAS	63
	BIBLIOGRAFIA	64

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, no setor automotivo, muito se fala sobre veículos movidos por célula de combustível. No entanto, a grande parte da atenção é voltada ao desenvolvimento da célula em si, e não do automóvel como um todo. Este trabalho visa apresentar uma visão geral de como os sistemas agregados a tal célula e ao veículo podem ser projetados ou adaptados para funcionarem num veículo com célula de combustível e motor elétrico.

Um veículo desse tipo não está distante da realidade, com diversos protótipos, tanto de veículos comerciais como de passeio e, inclusive, frotas de ônibus em teste. O enfoque deste texto será o nicho que está mais desenvolvido, com um lançamento no mercado previsto para 2002: os ônibus urbanos.

Para este trabalho foi realizado um estudo sobre as diversas maneira de fornecimento alternativo de energia para o veículo. Chegou-se à conclusão que, com o desenvolvimento da célula de combustível, a tendência é que esta substitua o motor de combustão nas aplicações automotivas. Isso causaria grande mudança na indústria automotiva. Esse novo sistema não fornece diretamente energia mecânica, na forma da rotação do motor, mas sim energia elétrica. Dessa forma, muitos dos sistemas agregados do automóvel atual, acionados mecanicamente, teriam que ser adequados para sua utilização num veículo que utiliza a célula de combustível com motor elétrico para tração.

Este trabalho visa um estudo da otimização desses sistemas agregados ao automóvel com célula de combustível. O projeto será focado em alguns dos itens do veículo que acabarão sofrendo a necessidade de tal adequação, como a direção assistida, a transmissão, o freio a ar servo-assistido, o ar-condicionado e o sistema de refrigeração.

Serão duas etapas. A primeira, consiste em estudar-se as soluções mais imediatas para a indústria automotiva. Ou seja, considerando-se os sistemas agregados existentes atualmente, serão analisadas possíveis adaptações dos mesmos para a utilização da nova fonte de energia do automóvel. Esta análise envolverá o estudo de viabilidade e o projeto básico dos sistemas agregados considerados, buscando-se escolher no mercado sistemas já existentes que sirvam para tais funções.

A segunda etapa, de aplicação não tão imediata quanto a primeira, é o estudo de uma readequação total dos sistemas para sua utilização num veículo com célula de combustível; ou seja, a definição de novos conceitos para que os agregados exerçam suas funções no veículo, aproveitando-se diretamente da energia elétrica produzida pela célula. Dentro do possível, os sistemas estudados na segunda etapa serão comparados com aqueles da primeira. Os resultados serão apresentados de forma esquemática, uma vez que os sistemas para a fase 2 ainda estão em fase de desenvolvimento.

Como todo trabalho voltado para o futuro, os estudos aqui contidos certamente irão tornar-se ultrapassados com o passar do tempo. E, considerando-se a situação atual de desenvolvimento, é muito provável que a célula de combustível venha a ter, em breve, participação significativa no mercado automotivo e que as possibilidades aqui mostradas tornem-se realidade muito mais rapidamente do que se prevê. Concretizando-se ou não, o método de engenharia aqui utilizado é universal podendo inclusive servir para outros casos mais adiante na escala da evolução automotiva.

2 OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho são:

- conhecer e entender o funcionamento do sistema de propulsão de veículos por célula de combustível e motor elétrico;
- entender as entradas e saídas do sistema, assim como o funcionamento de seus agregados primários;
- numa primeira etapa de adaptação, estudar a viabilidade de se utilizar sistemas comerciais existentes para servirem como agregados, definindo suas características básicas de projeto;
- numa segunda etapa de adaptação, estudar as melhorias possíveis para reduzir as perdas de energia dos sistemas agregados, idealizando as soluções específicas para veículos com células de combustível.

3 HISTÓRICO

3.1 Necessidade de Mudança do Sistema de Motor a combustão

Na segunda metade do século passado, a preocupação com os efeitos da poluição sobre as condições ambientais motivou a criação de legislações de controle de emissão de poluentes para veículos automotores. Estas legislações, criadas regionalmente e baseadas em tratados ecológicos internacionais, eram inicialmente brandas, com altos limites de emissão de gases poluentes. Estes limites, porém, foram sendo progressivamente reduzidos, principalmente na Europa e nos EUA. Reduções ainda mais severas destes limites estão previstas para os próximos anos. Entre estas futuras exigências temos inclusive a de que parte da frota comercializada tenha emissão zero de poluentes, como no caso do estado da Califórnia, Estados Unidos, que possui uma das legislações mais severas.

Entre a população consumidora dos veículos, a consciência ambiental não só está presente, como é levada muito a sério em algumas regiões do mundo como, por exemplo, na Europa. Para esta significativa parcela dos consumidores o quanto um produto degrada o meio ambiente é importante a ponto de influir nas suas decisões, podendo com isso destinar um produto mais danoso ao fracasso. Estes consumidores estão dispostos a escolher um determinado tipo, modelo, ou marca de produto em virtude deste ser “ecologicamente correto”, mesmo que para isso tenham que gastar mais dinheiro.

O iminente esgotamento das reservas de petróleo, apesar de prorrogado pelas recentes descobertas de novas reservas, é fato que não pode ser ignorado, e a dependência do petróleo fornecido pelos países associados da Organização dos Países Exportadores de

Petróleo (OPEP) tem preocupado organizações político-econômicas internacionais e os dirigentes dos países mais desenvolvidos. Não apenas pela dependência econômica causada, mas também pela importância política e estratégica conquistada pelos países da OPEP. Este fato tem motivado a busca de soluções que reduzam essa dependência do petróleo.

Estas são as principais razões pelas quais a indústria automotiva se viu obrigada a investir grandes recursos no desenvolvimento de soluções para a dependência do petróleo e a redução da poluição.

O desenvolvimento do motor a combustão está hoje bastante avançado, chegando próximo ao limite prático, tanto de rendimento energético, quanto de emissão de poluentes. Os motores de alto rendimento, como os motores à gasolina com injeção direta, exigem sistemas de controle sofisticados, materiais mais nobres e fabricação mais elaborada, que oneram o custo do motor. Este desempenho contudo fica bastante aquém do que pode ser considerado bom sob o ponto de vista ecológico.

Tais fatos justificam que, na última década, o interesse em alternativas para abandonar o sistema de propulsão tradicional dos veículos tenha deixado de ser apenas uma curiosidade, passando a receber grandes investimentos e esforços em pesquisas de universidades, órgãos governamentais e de grandes empresas; entre elas todas as grandes montadoras de automóveis.

3.2 Alternativas Desenvolvidas ou em Desenvolvimento

Várias alternativas estão em estudo ou desenvolvimento para substituição do sistema convencional de tração, que utiliza hidrocarbonetos de origem fóssil como combustível, em geral gasolina ou diesel, em motores de combustão interna.

Neste tópico será apresentada uma breve descrição e análise de cada uma das alternativas que mais se destacam atualmente ou destacaram-se num passado recente.

3.2.1 Combustíveis Alternativos

A solução mais simples é a substituição da gasolina ou diesel por outro combustível; porém esta é também a alternativa de resultado menos satisfatório. Esta opção, em geral, consegue atender adequadamente apenas ao problema da dependência do petróleo.

Vários combustíveis vêm sendo testados há muitos anos, e alguns inclusive já utilizados em alguns países como o gás natural, o GLP e o etanol.

O gás natural vem sendo usado em algumas regiões, porém com uso ainda muito restrito. Em geral são utilizados em ônibus e veículos de frota. Esses veículos são, em quase sua totalidade, veículos convencionais que recebem adaptações para utilizarem também o gás natural, ficando portanto híbridos, ou seja, podendo utilizar tanto o gás natural quanto o combustível original.

Com a utilização do gás natural e do GLP ocorre boa redução de emissão de poluentes, mas não é possível sua total eliminação. Estes combustíveis apresentam também uma vantagem econômica, pois o custo por quilômetro rodado é menor que o da gasolina, e, também, as diferenças em relação ao veículo convencional são mínimas.

Os veículos movidos a GN e GLP enfrentam, contudo, problemas. O maior dentre eles é o armazenamento do gás. Como este é muito volumoso e não pode ser armazenado sob pressões excessivamente elevadas – uma vez que isto acarretaria em grandes riscos de vazamentos e acidentes, além de custo elevado –, são armazenados em cilindros de aço muito volumosos e pesados. Além disso, mesmo com este pesado equipamento a autonomia desses veículos, quando operam com o gás, é aproximadamente metade daquela conseguida com a gasolina.

É importante ressaltar, também, que essa alternativa não melhora o rendimento energético do sistema, apresentando muitas vezes um rendimento até inferior ao do motor a combustão utilizando gasolina. Esta redução no rendimento é decorrente da utilização de motores híbridos adaptados, que não têm características otimizadas para o gás.

Outro grande problema para estes veículos é a escassa rede de distribuição para abastecimento. Por isso, o uso deles acaba restrito aos veículos de frota, sendo inviáveis para o consumidor comum. Para popularizar a utilização destes veículos, seria necessário um pesado investimento na rede de distribuição, para torná-la comparável a atual rede abastecimento de gasolina.

O GLP tem ainda uma característica não desejável: mantém a dependência do combustível fóssil não renovável.

O etanol é também utilizado como combustível alternativo em alguns países. Ele e o GN apresentam como maior vantagem eliminar a dependência do petróleo, podendo ser produzidos de fontes renováveis. Permitem também uma redução na emissão de poluentes, porém, pouco significativa, principalmente face aos últimos avanços do motor a gasolina nesta área.

O etanol, particularmente, tem seu uso difundido no Brasil. Foi introduzido no país como combustível através do programa Pró-Álcool, idealizado como solução para a dependência nacional do petróleo importado por ser produzido a partir da cana-de-açúcar.

A utilização de combustíveis alternativos pode, então, apenas eliminar a dependência do petróleo e amenizar, em alguns casos, a emissão de gases poluentes, não melhorando o baixo rendimento energético do motor de combustão interna.

3.2.2 Híbridos

São chamados de híbridos os veículos com mais de uma fonte de energia. Esse tipo de automóvel utiliza, geralmente, motores elétricos, baterias eletrolíticas e motor a combustão alimentado por gasolina ou outro combustível. Busca ser uma solução intermediária entre o sistema convencional e o veículo elétrico.

Esse tipo de veículo tem por princípio básico de funcionamento a utilização do motor a combustão em torno do seu ponto de maior rendimento energético, em regime estacionário, acoplado a um transformador para fornecer energia a uma bateria eletrolítica, que, por sua vez, alimenta um ou mais motores elétricos.

Os veículos híbridos podem ser divididos em dois tipos básicos, que embora pareçam ser muito semelhantes à primeira vista, têm em sua composição aspectos de funcionamento bastante distintos.

Para o primeiro tipo desenvolvido, com funcionamento mais simples, o movimento do veículo dá-se exclusivamente pelo motor elétrico, alimentado pela bateria. O motor a combustão opera, então, acoplado ao gerador elétrico, para suprir a energia consumida da bateria pelo motor elétrico. Este tipo exige um motor elétrico de elevada potência e

torque, capaz de fornecer toda a energia necessária mesmo nos momentos de grande solicitação. O motor a combustão, por sua vez, pode ter uma capacidade muito reduzida em relação a um motor convencional para o mesmo tipo de veículo, uma vez que trabalha em torno do seu ponto de melhor rendimento e deve ter capacidade de fornecer apenas a média de potência necessária ao longo do tempo, e não o pico máximo. Já a bateria deve ter capacidade de fornecer toda a demanda de corrente necessária ao motor elétrico e também possuir razoável capacidade de armazenamento para uniformizar o consumo de energia.

No segundo tipo mais moderno e complexo, mas também muito mais versátil, ambos motores, elétrico e a combustão, podem ser utilizados para tracionar o veículo. Os motores elétricos são ora alimentados pela bateria, ora pelo gerador acoplado ao motor a combustão, ora pelos dois simultaneamente. Esta configuração permite utilizar motores elétricos de menor capacidade, que são menores também em dimensões, mais leves e de menor custo, uma vez que nos momentos de maior exigência de desempenho o motor a combustão complementa com a potência necessária. As baterias podem ser, também, de menor capacidade, uma vez que não há necessidade de fornecer picos de corrente tão elevados, funcionando como um equalizador de energia, que acumula a energia excedente produzida pelo gerador quando o veículo está com baixa solicitação para fornecê-la ao motor elétrico nos momentos de maior carga, quando a potência do motor a combustão é direcionada para a tração em vez do gerador. O motor a combustão não precisa apresentar maior potência e torque com relação ao tipo anterior, pois para fornecer os picos de potência necessários o motor é apenas acelerado, saindo do seu ponto de máximo rendimento para um ponto de maior desempenho, tendo porém como inconveniente aumento do consumo de combustível.

Esse tipo, apesar de mais versátil, é mais complexo e caro, devido ao elaborado sistema de controle necessário e ao complexo sistema de transmissão para combinar a potência e o torque do motor elétrico com os do motor a combustão, de forma variável e controlada.

Esses veículos se apresentam como uma boa alternativa, principalmente para o usuário, por serem muito práticos e confortáveis, transmitindo satisfação a quem o dirige. Sob ponto de vista técnico eles oferecem um aproveitamento um pouco melhor do combustível, pois o motor a combustão trabalha, na maior parte do tempo, no seu ponto de ótimo, com conseqüente redução na emissão de poluentes.

Estas alternativas, porém, esbarram num elevado custo, principalmente para o segundo tipo, que, mesmo em larga escala de produção, dificilmente será reduzido a um patamar comparável ao dos veículos convencionais. Também, não eliminam a poluição, apesar de reduzi-la significativamente.

Um bom exemplo destes fatos é o veículo híbrido de passeio chamado Prius, da Toyota, que apresenta performance excelente para um veículo da categoria, com a utilização de um sofisticado sistema de tração, freios regenerativos e um sistema de controle que desliga o motor a combustão quando o veículo permanece parado por alguns segundos, porém o veículo é pesado demais e custa mais que o dobro de um veículo convencional equivalente, mesmo com subsídios governamentais.

3.2.3 Motores Elétricos com Bateria Eletrolítica

Esta é a alternativa mais simples e que em uma primeira análise rápida parece ser mais viável, e por isso fica evidente a razão desta ter recebido os maiores esforços e investimentos desde o começo da busca por novos propulsores até pouco tempo atrás.

Como pontos fortes, esta solução apresenta a simplicidade de conceito e aplicação, a total ausência de emissão de poluentes e a independência do petróleo. Apresenta também, como vantagens adicionais, baixíssimos níveis de ruído e vibração em operação, que associados à curva de torque elevada e plana dos motores elétricos conferem grande satisfação a quem dirige e máximo conforto a todos os passageiros.

O único, e grande, problema desta alternativa é as baterias eletrolíticas, que fornecem a energia elétrica para o motor. Mesmo com todos os avanços tecnológicos conseguidos, inclusive com ampla disponibilidade de capital, a densidade de energia por massa e por volume destas baterias ainda é bastante desfavorável, a ponto de praticamente inviabilizar a utilização desta solução, uma vez que a demanda por energia para tracionar o veículo é muito elevada. Os avanços tecnológicos conseguiram reduzir significativamente o volume e um pouco a massa das baterias desde os primeiros protótipos, porém aumentaram varias vezes o seu custo e os resultados ainda não são satisfatórios. Além disso as perspectivas para o futuro não são animadoras.

Mesmo com a utilização das melhores, e caríssimas, baterias disponíveis, estes veículos possuem peso elevado, pois carregam mais de 500 kg de baterias, e possuem baixa autonomia, no máximo 200 km. Este fato desagrada muito aos consumidores, sendo ainda agravado pelo lento tempo de recarga e baixa durabilidade das mesmas.

Apesar de ser muito boa teoricamente, esta alternativa acabou esbarrando no problema da bateria, destinando ao fracasso todos as tentativas de lançamento deste tipo de automóvel no mercado, o que fez com que pelo menos por um bom tempo as montadoras reprimissem os investimentos em pesquisas e desenvolvimento neste sentido.

3.2.4 Motores Elétricos com Célula de Combustível

A célula de combustível apareceu como uma solução para resolver o problema do armazenamento de energia a bordo.

A célula de combustível é, em princípio, um reator que, quando alimentado com oxigênio e hidrogênio, provoca a reação destes, produzindo somente água, energia elétrica, e calor.

Desta maneira a energia é acumulada nas ligações químicas do hidrogênio, que pode ser armazenado na forma de líquida ou comprimida, resultando em uma elevada densidade de energia por massa, e permitindo, ainda, um reabastecimento rápido. Além disso a célula de combustível teve seu tamanho várias vezes reduzido apenas na última década, e tende a diminuir ainda mais, de maneira que todo o sistema ocupe um volume semelhante ou até mesmo menor que o sistema motor a combustão com tanque de combustível.

O tamanho do sistema célula de combustível com tanques de armazenamento de hidrogênio é hoje menor e mais leve que um conjunto de baterias para armazenar quantidade equivalente de energia, e é capaz de produzir igual autonomia ao veículo. Outra vantagem da célula é que esta produz eletricidade continuamente enquanto abastecida de hidrogênio e oxigênio. O reabastecimento do veículo é então feito rapidamente com hidrogênio comprimido, de maneira semelhante ao de gasolina, em alguns poucos minutos. Enquanto isso, para reabastecer as baterias eletroquímicas é

necessário reverter o processo, fornecendo corrente elétrica à mesma, o que embora possa ser feito na garagem de casa, leva diversas horas.

Existem duas maneiras de fornecer o hidrogênio para a célula. A mais simples é armazená-lo diretamente no veículo, comprimido ou na fase líquida; porém esta oferece maior risco em um acidente e necessita da implementação de uma rede de abastecimento específica. A segunda alternativa, mais complexa e cara, é armazenar combustíveis como metanol, etanol ou gasolina e utilizar um reformador para extrair o hidrogênio destes através de combustão seletiva; tem, porém, como grande vantagem a utilização de combustíveis convencionais, com rede distribuidora já instalada. O sistema com reformador de combustível tem como desvantagens, além do maior custo, a liberação de gases poluentes como o CO e o CO₂, e menor eficiência energética, pois não aproveita a energia da queima do carbono, produzindo, portanto, mais calor.

Embora essa tecnologia esteja bastante avançada, continua hoje restrita a protótipos, por exigir ainda um custo elevado e alta tecnologia. Estes protótipos, porém, já estão em fase final de desenvolvimento, com os primeiros lançamentos comerciais previstos para 2003, quando a DaimlerChrysler pretende lançar o ônibus urbano Citaro, e 2004, quando várias montadoras prometem lançar veículos de passeio.

Muitos aspectos indicam esta opção como sendo a mais viável, não só em médio prazo, como tecnologia alternativa, como também em longo prazo, como tecnologia dominante, por reunir conveniências do sistema motor a combustão – facilidade de abastecimento, boa autonomia – com os do motor elétrico – ausência total de poluição, níveis de ruído e vibração muito baixos. A confiança nas razões claras aqui apresentadas, de que esta será a tecnologia que substituirá os motores a combustão nos veículos automotores num futuro não muito distante, foi o grande fator motivante para o desenvolvimento deste trabalho.

4 A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Neste item será apresentado o princípio de funcionamento da célula de combustível, bem como os seus tipos, e um breve histórico do seu desenvolvimento. Como o conhecimento sobre as células de combustível é muito pouco difundido mesmo entre os engenheiros mecânicos, foi dedicado em esforço um pouco maior que apenas o necessário para este trabalho. A principal razão disto é que a utilização das células de combustível em veículos automotores só muito recentemente começou a parecer real. Também, até pouco tempo atrás, não eram encontradas publicações de engenharia sobre o tema e mesmo hoje estas são muito restritas. Assim sendo o conhecimento um pouco mais detalhado sobre o estado da arte no seu desenvolvimento está, em geral, restrito as empresas desenvolvedoras.

4.1.1 O Princípio de Funcionamento

A célula de combustível pode ser comparada, ou confundida, com uma bateria eletroquímica. Porém, a única semelhança entre elas é que ambas são utilizadas com fonte de energia elétrica, retirando esta de reações químicas. A principal diferença sob ponto de vista de operação é que a bateria eletrolítica é na verdade um acumulador de cargas elétricas, operando em ciclos de carga e descarga, não podendo fornecer energia continuamente. Assim, para sua recarga é necessária uma outra fonte de energia elétrica. Enquanto isso, a célula de combustível propicia a reação entre o combustível e o oxigênio liberando energia elétrica, podendo, então, operar continuamente, produzindo energia enquanto for fornecido o combustível.

A célula de combustível pode ser classificada como um reator químico que consome hidrogênio e oxigênio, tendo como produtos água, calor e corrente elétrica, no qual ocorre a seguinte reação:

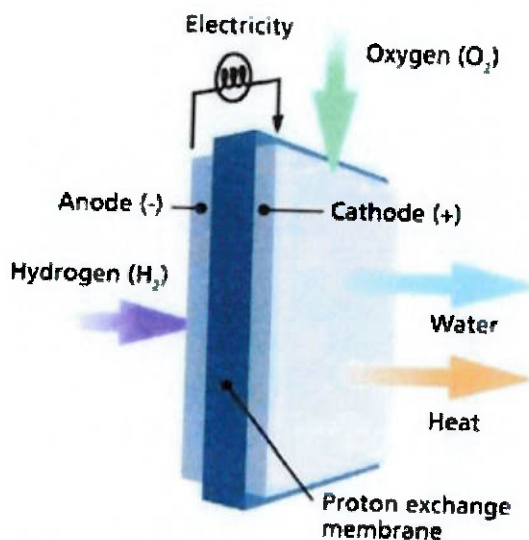
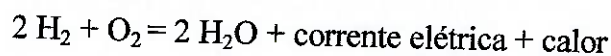


Figura 1: Funcionamento da célula de combustível

A célula de combustível é composta por duas placas metálicas ou de carbono – o cátodo e o ânodo da célula – que levam o combustível e o oxigênio até o catalisador. Em sua superfície é estimulada a reação, e o hidrogênio do combustível desassocia-se em prótons e elétrons. Os prótons atravessam o eletrólito e combinam-se com o oxigênio do ar, consumindo elétrons. A movimentação do elétron dá-se por um circuito externo, fornecendo potência a este. É desta forma que a célula produz energia. Uma célula unitária de combustível produz em torno de 0,7 volts e, portanto, são utilizadas associadas em série, na forma de pilhas ou stacks (esta designação é preferida neste trabalho para evitar confusões com a pilha eletroquímica) para atingir a tensão desejada. O princípio de funcionamento é mostrado na figura 1.

Teoricamente, as células de combustível têm uma eficiência energética de 80%, variando um pouco conforme o tipo, muito superior aos 40% do motor a combustão. Isso confere uma enorme vantagem ao sistema, por necessitar de menos combustível, além de ser ecologicamente mais adequado por não desperdiçar tanta energia, principalmente na

forma de calor. Por ter um princípio de funcionamento bastante simples, é provável que se chegue a valores de rendimento muito próximos ao máximo teórico.

Existem alguns tipos principais de células de combustível que são apresentados na tabela abaixo:

Tipo (*)	Eletrólito	T (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
PEMFC	Polímero condutor de prótons	20-120	Alta densidade de potência Operação flexível Mobilidade	Custo da membrana. Contaminação do catalisador com CO	Veículos, Espaçonaves, Unidades estacionárias, pequena potência.
PAFC	Ácido Fosfórico 90-100% (H_3PO_4)	160-220	Maior desenvolvimento tecnológico. Tolerância a CO (até 1%)	Vida útil limitada pela corrosão.	Unidades estacionárias.
AFC	KOH concentrado	70-80	Cinética de redução de oxigênio favorável	Vida útil limitada por contaminação do eletrólito com CO_2 .	Unidades estacionárias. Veículos
MCFC	Carbonatos fundidos (CO_3^{2-})	550-660	Tolerância a CO/ CO_2 Eletrodos à base de Ni. Reforma interna.	Corrosão do cátodo. Interface trifásica de difícil controle	Unidades estacionárias Cogeração de eletricidade / calor
SOFC	ZrO_2 (zircônio dopado)	850-1000	Alta eficiência (cinética favorável). Reforma interna	Problemas de materiais. Expansão térmica	Unidades estacionárias Cogeração de eletricidade/calor. Veículos.

Tipo (*) PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), AFC (Alkaline Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) e SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

Tabela 1: Apresentação dos principais tipos de célula de combustível.

Pelas características das células e da aplicação o primeiro tipo, PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, ou seja, Célula de Combustível de Membrana Intercambiadora de Prótons), é o mais adequado para ser utilizado como fonte de energia elétrica para propulsão em automóveis.

A membrana intercambiadora de prótons é o coração do sistema, pois serve como eletrodo sólido da célula que permite a passagem do próton de um lado para outro. O material da membrana é geralmente um polímero orgânico poliperfluordulfônico, com dois centésimos de milímetro de espessura, revestida com catalisadores.

4.1.2 Histórico

O jurista e físico amador inglês William R. Grove propôs, em 1839, a idéia de que o hidrogênio poderia ser combinado com o oxigênio, sem combustão, através da utilização de um eletrólito para produzir eletricidade. Assim, construiu o experimento mostrado na Figura 2, para demonstrá-lo.

O experimento de Grove utilizava quatro células compostas por um recipiente com água, cada uma com um par de eletrodos de platina dentro de dois tubos de ensaio, um com oxigênio e outro com hidrogênio. As células eram ligadas em série com um recipiente pequeno onde ocorria eletrólise da água com a energia produzida pelo conjunto. Este experimento fez com que William Grove seja reconhecido como o inventor da célula de combustível.

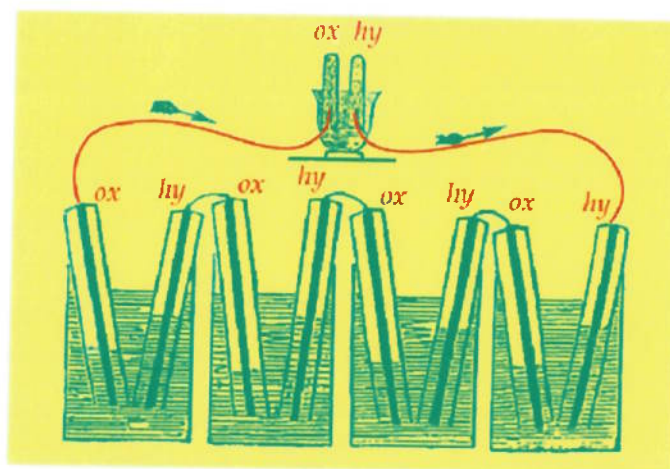


Figura 2: Experimento de Grove para provar a possibilidade de se combinar o hidrogênio com o oxigênio produzindo tensão elétrica.

Só após quase um século, na década de 1950, a célula de combustível foi utilizada pela primeira vez, nas missões espaciais norte-americanas Gemini e Apollo. Foi utilizada a bordo como fonte de energia e água. O custo da célula para estas missões foi em torno de US\$ 500.000,00, em valores da época.

Em automóveis a célula de combustível foi utilizada pela primeira vez em 1967 pela General Motors, que construiu um veículo experimental denominado Electrovan. Este veículo era uma van de grande porte que tinha todo o compartimento traseiro ocupado pela célula, que produzia apenas 5kW; como seus acessórios restavam apenas os bancos dianteiros. Por ser altamente custoso e não haver ainda legislações rigorosas anti-poluição o projeto não seguiu adiante, faltando estímulo.

Somente em 1990, a célula de combustível reapareceu como uma solução para construção de veículos limpos, após muito empenho e pesquisa investidos nas baterias eletroquímicas, que não apresentaram o resultado esperado.

A partir de 1990, a evolução das células e dos sistemas associados foi espantosa. Em poucos anos, passou-se para um sistema que ocupava toda a traseira de uma van, de tamanho semelhante ao da Electrovan da GM, porém com 50kW e autonomia de 100km, para um sistema de tamanho comparável ao do sistema convencional de propulsão, com 75kW e autonomia de 400km, mas com custo de US\$ 500,00 por kW.

Para os próximos 10 anos espera-se reduzir ainda mais o tamanho, melhorar a autonomia, e reduzir o custo a US\$ 50,00-60,00 por kW.

Quando a célula de combustível atingir bons níveis de produção em escala, estima-se que o seu custo caia para valores em torno de US\$ 20,00 / kW comparável a um motor a combustão atual.

5 ESCOLHA DE UM VEÍCULO VIÁVEL

Dado o grande número de veículos com célula de combustível existente em testes atualmente, é preciso escolher um dos tipos para a realização de um estudo de seus sistemas agregados.

Conforme foi citado nos itens anteriores, o primeiro veículo movido por célula de combustível a ser lançado comercialmente será um ônibus. Atualmente, algumas frotas urbanas já estão utilizando o sistema, em fase de testes, para obter-se dados de melhoria do produto.

Devido ao maior avanço no desenvolvimento, este trabalho será baseado exatamente nos ônibus movidos à célula de combustível.

Uma vantagem que esses veículos levam sobre os veículos de passeio é que há menor limitação espacial para os sistemas agregados. Estes podem ficar na periferia do habitáculo dos passageiros, conforme vemos na figura a seguir.

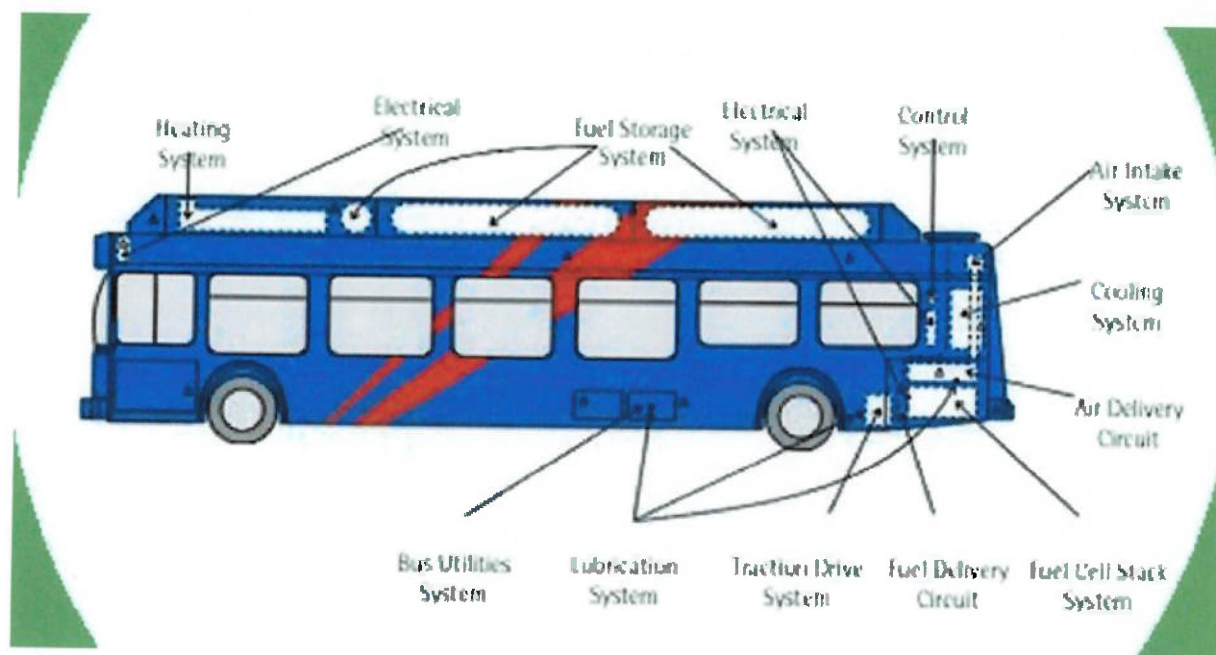


Figura 3: Posicionamento dos sistemas agregados num ônibus movido a célula de combustível.

Considerando-se este fato, determinar a carroceria do ônibus não é importante, ao menos para a etapa de definições iniciais do projeto. Basta saber que o volume ocupado pela célula de combustível é aproximadamente o mesmo de um motor a combustão. No entanto, no final deste capítulo será definido um chassi, para permitir a melhor escolha de alguns dos agregados.

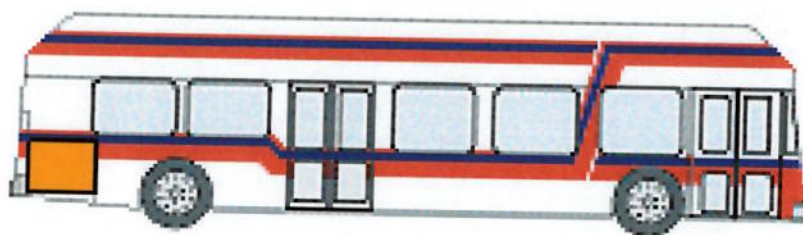


Figura 4: Compartimento para conjunto célula de combustível mais motor elétrico.

5.1 Tipo de Combustível

Outro ponto importante a citar é qual o tipo de combustível utilizado. No caso deste trabalho, não há diferença se a energia elétrica, proveniente das reações químicas da célula de combustível, é gerada através de hidrogênio em tanques pressurizados ou proveniente de algum outro tipo de combustível formado por hidrocarbonetos, como o metanol, o etanol ou a gasolina. No entanto, para determinar-se o espaço a ser ocupado pelos sistemas agregados, é necessário levar-se isso em conta, uma vez que o tipo de armazenamento ou produção de hidrogênio promove uma diferença no posicionamento desses sistemas no ônibus. Assim, para este trabalho será escolhido o sistema mais viável atualmente, que será o mesmo a ser lançado comercialmente pela XCELLSiS em 2002, ou seja, utilizando-se hidrogênio comprimido.

Cabe ressaltar que no caso de frotas de ônibus, não é necessário criar uma rede de abastecimento de hidrogênio pressurizado. Basta haver um posto de abastecimento

próprio do frotista. Inclusive este é um dos motivos pelo qual o ônibus com hidrogênio pressurizado pode ser considerado mais viável que um automóvel, se comparados proporcionalmente. Aliás, cabe notar que em grandes cidades, como São Paulo, há um número significativo de ônibus movido a gás e à energia elétrica, apesar de ambos necessitarem de uma infra-estrutura de abastecimento específica.

5.2 Tipo de Aplicação

Assumido que o combustível é hidrogênio pressurizado, falta definir seu posicionamento. Isso depende das aplicações. Nesse caso, os tubos de hidrogênio são posicionados no teto dos ônibus urbanos e na parte inferior dos ônibus turísticos. No primeiro caso (ônibus urbano), o mais importante não é a estabilidade do veículo, que tráfegará em baixas velocidades. A prioridade é o acesso a cabine por parte dos passageiros. Por isso ela deve estar mais baixa, diminuindo-se o degrau entre a mesma e a calçada. No segundo caso (ônibus rodoviário), a estabilidade passa a ser mais importante, devido a maior velocidade adquirida pelo veículo. A entrada e saída de passageiros são menos freqüentes. Assim, para esse tipo de ônibus os cilindros de armazenamento de combustível geralmente são colocados na parte inferior do veículo, sob a cabine.

Para este trabalho, será escolhido o ônibus urbano, principalmente porque o mesmo torna-se cada vez mais viável, conforme os governos e populações de grandes centros urbanos passam a exigir uma redução da poluição do ar. Na verdade, é a inviabilidade de se continuar com ônibus a diesel, poluidores, que gera essa necessidade de troca do sistema.

5.3 Definição da Célula de Combustível

Outro ponto significativo para o projeto de agregados é a determinação de qual célula de combustível será utilizada. Neste caso, também foi escolhida a célula mais desenvolvida atualmente, que é produzida pela Ballard Power Systems. Esta célula é posicionada num sistema em forma de bloco, com motor elétrico, dutos de refrigeração, bombas de pressão (para o ar de admissão) e válvulas de despressurização (para o hidrogênio dos tanques), formando o conjunto XCELLSiS XCS-HY-205, cujas características são apresentadas a seguir.

Item	Característica
Emissão de CO, NOx, HC, SO ₂ , CO ₂ e particulados	Zero
Potência máxima no eixo	205kW (275HP) @ 2100 rpm
Torque máximo no eixo	1100 N·m @ 800 rpm
Eficiência energética média	37 a 44%
Combustível	Hidrogênio gasoso à temperatura ambiente
Pressão de fornecimento de combustível (mínima)	1200 kPa
Vazão da admissão de combustível (mínimo)	5 g/s
Vazão da admissão de ar (máximo)	350 g/s
Temperatura de operação de célula	70 – 80°C
Temperatura ambiente de operação	(-20) – 40°C
Temperatura ambiente de armazenamento	(-20) – 50°C
Pressão de operação do sistema (nominal)	207 kPa
Voltagem gerada	600 – 900 V DC
Sistema de controle	Processador RISC, 32 bits, 24 MHz
Interface de comunicação	CAN Bus (ISO 11898)
Interface de transmissão	Flange SAE 1
Frenagem dinâmica	Retardador na transmissão

Tabela 2: Características do motor movido por célula de combustível, pacote XCELLSiS XCS-HY-205

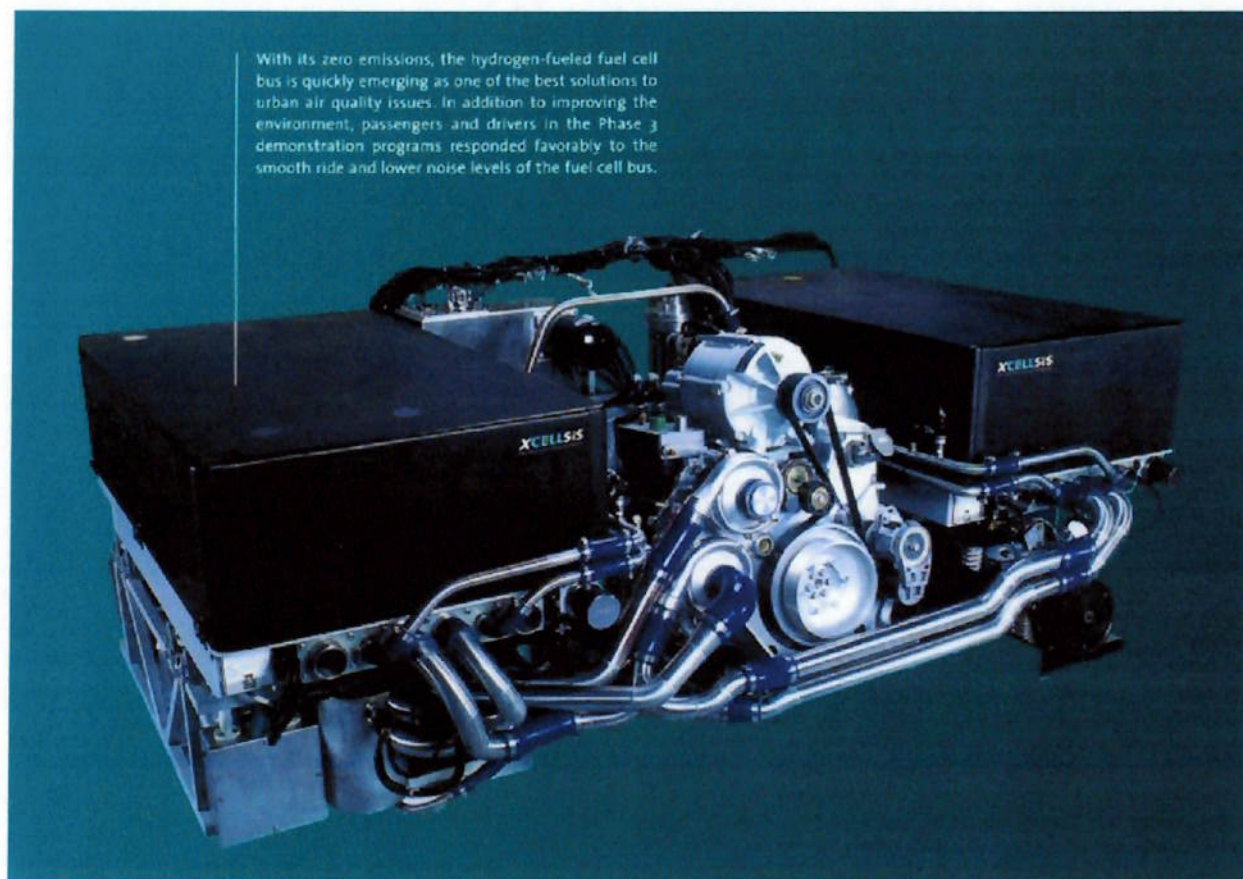


Figura 5: Foto de catálogo do conjunto célula de combustível e motor elétrico, formando o pacote XCELLSiS XCS-HY-205

5.4 Chassi

Algumas facilidades, principalmente com relação a escolha de muitos dos sistemas agregados, como sistemas de freio e transmissão, são conseguidas ao definir-se um chassi. Como o ônibus em questão é para aplicações estritamente urbanas, o chassi escolhido é do estilo “low-entry”, com o assoalho próximo ao chão, facilitando a entrada e saída de passageiros. No mercado nacional, o único chassi propriamente deste tipo é o Mercedes-Benz O 500 U, da DaimlerChrysler. O motor utilizado por tal chassi seria substituído pelo pacote XCELLSiS XCS-HY-205 citado na seção anterior. Tal substituição exigiria um acordo com a DaimlerChrysler para que fosse viável

economicamente para ambas partes a comercialização apenas do chassi. O escopo deste trabalho não é definir tal negociação, mas sim mostrar a possibilidade de se utilizar sistemas (ou parte de sistemas) disponíveis hoje no mercado para a adequação de uma célula de combustível. Uma montadora que comercializa um chassi com motor a combustão hoje, pode passar a oferecê-lo com célula de combustível e motor elétrico.

As figuras a seguir representam o chassi escolhido.



Figura 6: Chassi Mercedes-Benz O 500 U, na forma com é comercialmente encontrado, com motor, transmissão, suspensão, direção e freios, pronto para receber uma cabine.

(Fonte: DaimlerChrysler)

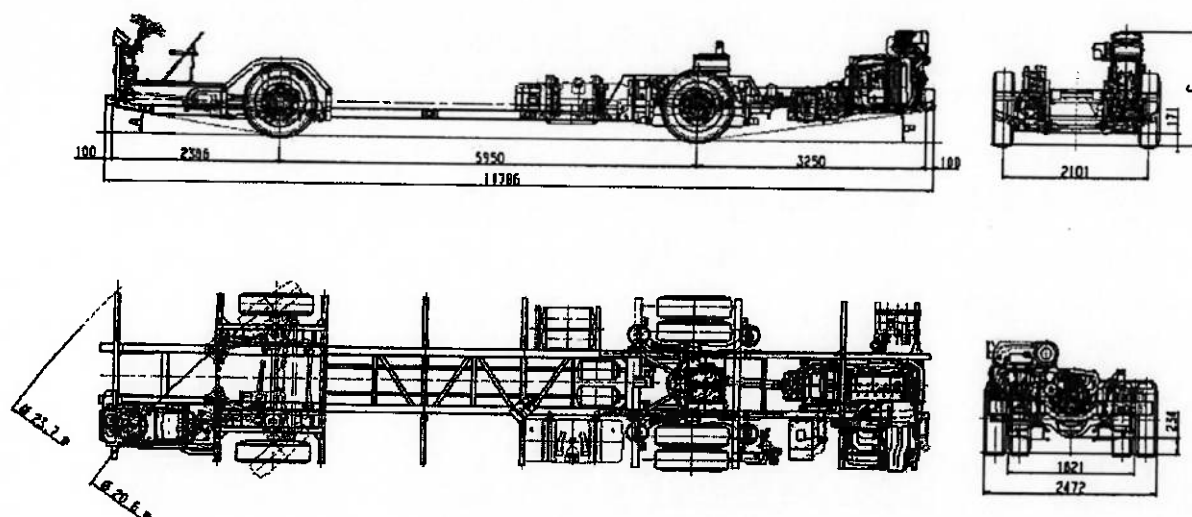


Figura 7: Vistas lateral e superior do conjunto O 500 U. É importante notar que o chassi permite fácil adaptação do pacote XCELLSiS XCS-HY-205, devido ao amplo compartimento do motor.

6 SISTEMAS AGREGADOS

Sistemas agregados, conforme nomenclatura comum em grande parte do setor industrial automotivo, são todos aqueles que exercem uma função no veículo que não seja meramente estrutural ou de motorização. Assim, por exemplo, o chassi do veículo não é um sistema agregado, mas o seu sistema de direção é. Mais especificamente, para um veículo com célula de combustível, tudo o que não for o conjunto chassis-cabine (separados ou em monobloco), a célula de combustível ou o motor elétrico, pode ser considerado um sistema agregado.

Uma vez que o motor de um veículo passa a ser um conjunto célula de combustível com motor elétrico, imediatamente seus sistemas agregados poderão ser repensados para a nova forma de “geração” de energia motora, visando otimizar o uso da energia disponível dentro do automóvel.

Analisando o que existe atualmente, para motores a combustão, é possível notar que os sistemas agregados utilizam-se primariamente do torque de eixo do motor, que é, na verdade, a única saída aproveitável. Assim, através de correias ou outros tipos de transmissões mecânicas, diversos agregados utilizam-se do torque gerado no virabrequim para seu acionamento, entre eles: a bomba da direção hidraulicamente assistida, o compressor do ar condicionado, a bomba de vácuo ou de pressão do servo-freio.

Para esse tipo de agregado acionado mecanicamente, num primeiro momento, o sistema a ser utilizado num veículo com célula de combustível poderia ser uma mera adaptação. Ou seja, aproveitar-se-ia do torque de saída do eixo do motor elétrico para acionar os agregados de forma semelhante ao que já é feito para motores a combustão. Dessa forma, os sistemas não necessitariam de muitas adaptações para o novo tipo de motor.

Isso poderia ser significativamente vantajoso ao pensar-se na economia financeira que seria feita, uma vez que não teria que ser investido em projetos ou técnicas de fabricação novas.

No entanto, o veículo como um todo não estaria sendo otimizado, uma vez que há transformações desnecessárias de energia. Como exemplo temos o caso da direção assistida. Ao utilizar-se do sistema que já existe atualmente, hidraulicamente assistido, a energia química do combustível seria transformada em energia elétrica na célula, em energia mecânica pelo motor elétrico, seria transportada mecanicamente para a bomba, onde seria transformada em energia “hidráulica” (ou fluidomecânica), que acionaria o mecanismo para virar as rodas. Em cada uma dessas transformações ou transportes, há perda de energia.

Um sistema melhor, energeticamente falando, seria aquele que evitasse algumas dessas transformações. Por exemplo, uma direção eletricamente assistida. Nesse caso, a energia química do combustível seria utilizada para gerar energia elétrica, a qual alimentaria um sistema de controle, que através da própria energia elétrica enviaria as devidas informações para atuadores mecânicos, que virariam as rodas.

Os problemas dessa segunda fase de desenvolvimento dos agregados é que os sistemas ainda não são muito bem desenvolvidos, por terem sido pouco estudados. Na etapa inicial do presente trabalho, foram estudados os sistemas e os dados necessários (entradas e saídas) para que seja efetuado um projeto básico. A partir daí, soluções foram geradas e são aqui apresentadas, tanto para a primeira, como para a segunda fase, donde serão descritos projetos básicos.

Neste capítulo serão mostrados os agregados mais relevantes ao veículo. O desenvolvimento de alguns deles será explanado em detalhes nos capítulos 7 e 8, que abordam, respectivamente, sua primeira (aplicação imediata) e segunda (aplicação em médio prazo) fases de adaptação.

6.1 Organização dos Sistemas Agregados

Os sistemas agregados de um veículo movido à célula de combustível englobam duas categorias, que serão chamadas neste texto de primários e secundários. Os agregados primários são aqueles que funcionam ligados diretamente ao funcionamento da célula,

garantindo seu funcionamento. Os secundários são aqueles que exercem outras funções no veículo que não seja o suporte da célula.

6.2 Agregados Primários

Os sistemas agregados primários são os seguintes:

1. elétrico;
2. sistema de controle;
3. refrigeração;
4. motor elétrico de tração;
5. conjunto de células de combustível;
6. admissão de ar;
7. admissão de combustível.

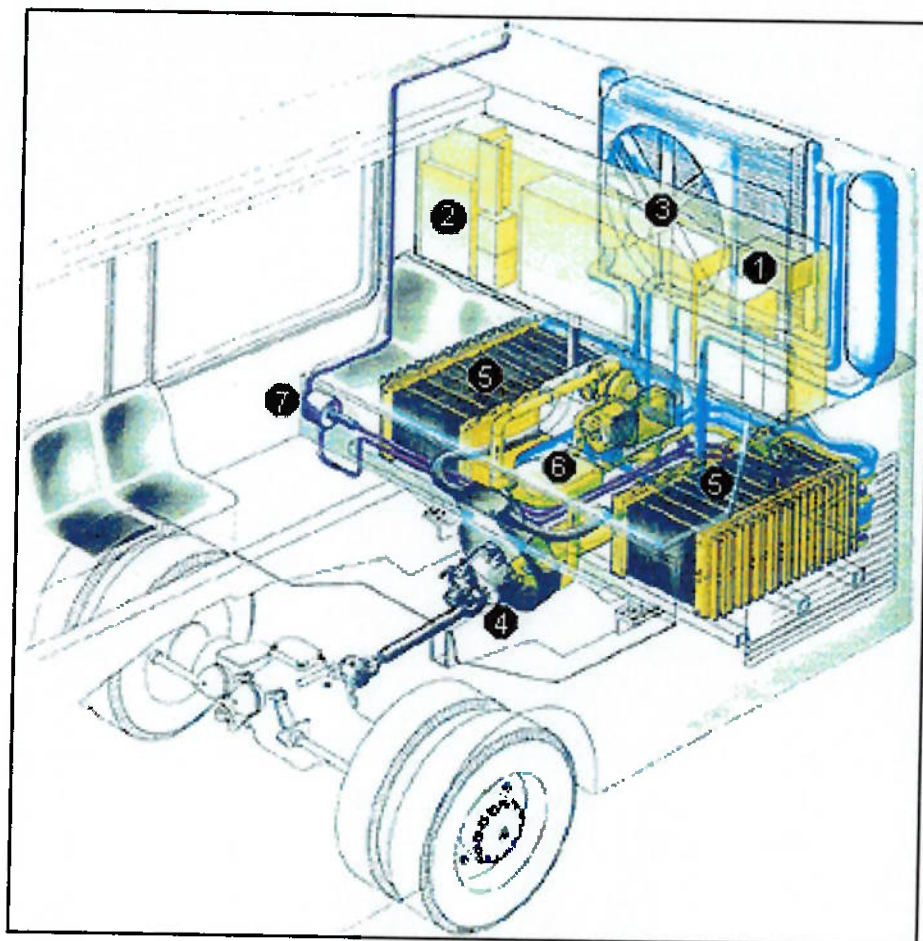


Figura 8: Sistemas agregados primários da célula de combustível.

Cada um desses sistemas será apresentado nos itens a seguir, juntamente com as características técnicas necessárias para sua acomodação num sistema funcional como o da XCELLSiS.

6.2.1 Sistema Elétrico

O sistema elétrico garante a interface entre a célula de combustível e todos os equipamentos elétricos do veículo, inclusive o motor. A voltagem e corrente relativamente altas fazem com que muitos de seus componentes apresentem potência elevada. Para evitar um volume maior de construção, a troca de calor desses componentes é geralmente feita com líquido de resfriamento.

Características básicas:

Voltagem primária: 650-750V DC

Voltagem auxiliar: 460/208V AC; 24/12V DC

Bateria para iniciar a célula: 12V DC (normalmente de Chumbo-Ácido)

6.2.2 Sistema de Controle

Os sistemas mecânicos, de processamento e de força elétrica são coordenados através de um sistema que permite o controle dos módulos de combustível, admissão de ar, propulsor e qualquer outro item necessário. Hoje em dia, com a disponibilidade de Controladores de Lógica Programável (*Programmable Logic Controllers*, ou PLC) de alta capacidade, a custos relativamente baixos, é possível centralizar essa operação em um módulo só. Caso ocorra algum problema com o sistema principal, pode haver um sistema auxiliar que só funcione com as funções básicas.

Características básicas:

Hardware: PLC

Software: Programação por "lógica de diagrama de escadas"

6.2.3 Sistema de Refrigeração

O motor deve operar numa temperatura em torno de 90°C. Para isso, um sistema de refrigeração composto por um radiador e ventiladores devem manter a temperatura do sistema. Se for usada água para a refrigeração, a mesma pode ser usada para umedecer os fluxos de entrada de ar e combustível, facilitando sua reação. Um sistema auxiliar deve

operar em torno de 60°C, para resfriar os sistemas elétricos de maior potência e os condensadores do sistema de escapamento.

Características básicas:

Temperatura de operação:

- Sistema 1 (refrigeração da célula de combustível): 90°C
- Sistema 2 (refrigeração dos sistemas elétricos e condensadores): 60°C

Fluidos: Água (sistema 1) e qualquer fluido (sistema 2)

Capacidade do motor/bomba: 375 L/min

Capacidade de troca de calor: 1,3 MBTU/h @ 90°C

Características adicionais: deve aquecer a água quando a temperatura ambiente for abaixo de 0°C, não permitindo o congelamento do motor; um filtro iônico deve ser usado para não permitir que a água transforme-se em condutora de eletricidade.

6.2.4 Motor Elétrico de Tração

O sistema XCELLSiS XCS-HY-205 integra um motor elétrico que opera continuamente, de forma semelhante a um motor a combustão. Essa condição de operação foi definida com o propósito de permitir que os demais sistemas, inclusive a tração, pudessem também operar de forma semelhante a se estivessem num veículo convencional. Com isso, garante-se maior simplicidade no desenvolvimento e operação desses, uma vez que podem ser usados os sistemas disponíveis atualmente no mercado, com mínimas alterações.

É certo que, por operar desta forma, o motor elétrico não obtém o seu máximo rendimento. Porém, este é o preço a se pagar pelo benefício citado anteriormente: o foco de seu desenvolvimento sustentável economicamente, visando uma viabilidade dos

veículos com célula de combustível em curto prazo. Isso tudo converge com o foco deste trabalho, daí a escolha de tal sistema de propulsão.

Características básicas:

Motor: Elétrico, DC, sem escovas, resfriado por líquido

Controlador: Inversor, resfriado por líquido

Voltagem de entrada: 100-800V DC

Eficiência do conjunto motor controlador: >90%

Potência de saída (contínua): 205 kW (275HP)

Torque de saída: 3390 N·m

Velocidade do motor: 1000 rpm base, 7000 rpm máximo;

Redutor: para aplicação urbana, em torno de 2,5:1

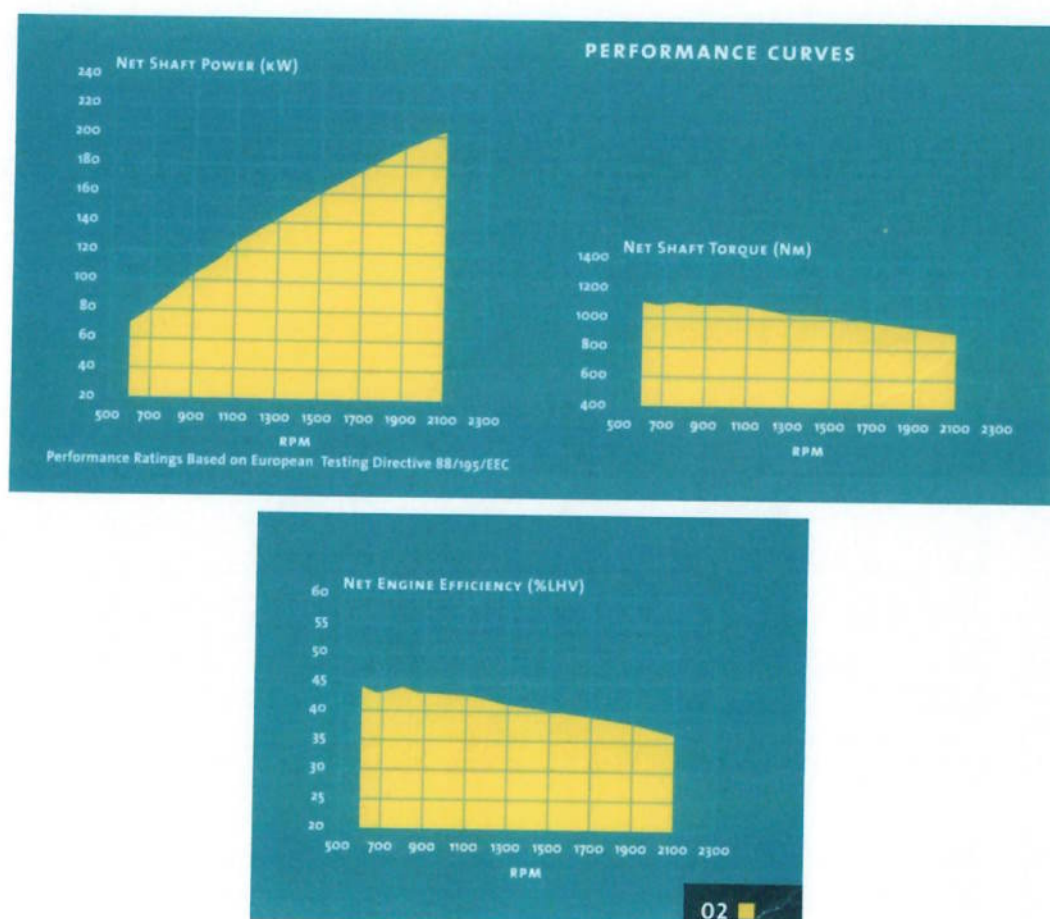


Figura 9: Curvas de potência, torque e eficiência global do sistema em função do número de rotações por minuto (Fonte: Catálogo XCELLSiS XCS-HY-205).

6.2.5 Conjunto de Células de Combustível

A geração de eletricidade é feita por diversos grupos de células de combustíveis individuais, do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*), produzida pela Ballard, conforme determinado no capítulo 5.

Características básicas:

Potência das pilhas de geração de combustível: aproximadamente 13kW cada (total 205kW)

Voltagem gerada: 450-750V DC

Pressão de entrada (combustível e ar): 207 kPa

Temperatura de operação: 90°C

6.2.6 Admissão de Ar

As células de combustível produzem mais energia se a pressão e o fluxo de ar for aumentada, até atingir seu limite de operação. A célula da Ballard obtém sua potência máxima com 207 kPa de pressão de admissão. O ar externo, após a passagem pelo filtro, passa por um compressor. Normalmente há também um turbocompressor, que se utiliza da energia do escapamento, fazendo com que o sistema tenha 2 estágios para atingir a pressão de operação do sistema.

Características básicas:

Pressão de saída: 207 kPa

Capacidade de vazão mássica: 0.3 kg/s

6.2.7 Admissão de Combustível

No tipo de veículo selecionado para este trabalho, o gás hidrogênio é armazenado em cilindros de alta pressão (mais do que 20 MPa). Assim, é preciso reduzir esta pressão até 207 kPa, o que normalmente é feito através de dois estágios. Este sistema não precisa de acionamento externo, pois a energia potencial do gás comprimido já permite seu funcionamento.

Características básicas:

Combustível: gás hidrogênio comprimido

Pressão de saída: 207 kPa

Pressão de entrada: 25 MPa máximo*

*alguns sistemas em desenvolvimento já atingem até 70 Mpa

6.3 Agregados Secundários

Por abrangerem todos aqueles sistemas que não compõem o grupo primário, os agregados secundários são inúmeros. A tentativa de listar todos acabaria gerando uma lista por demais extensa, e não seria possível estudar mais a fundo as características de nenhum deles. Neste trabalho, o intuito é observar aqueles sistemas que são mais significativos, para que inclusive um projeto básico possa ser efetuado. Nos capítulos a seguir serão tratados os agregados secundários de maior interesse para este texto: transmissão, direção, freios e ar condicionado.

7 PRIMEIRA FASE: ADAPTAÇÃO

O intuito de adaptar-se sistemas agregados já existentes para veículos de motor a combustão é promover a evolução gradual dos veículos com célula de combustível, permitindo sua entrada no mercado de forma economicamente viável. A seguir são mostradas as características básicas de alguns desses sistemas: transmissão, direção, freios e ar condicionado. Por características básicas entende-se dados de projeto que permitam a seleção das opções de sistemas a serem utilizados. Para cada item, a partir desse projeto básico, será selecionado um sistema adequado existente no mercado.

7.1 Transmissão

A escolha pelo sistema XCELLSiS XCS-HY-205, que integra o motor elétrico para tração simulando o funcionamento de um motor a combustão convencional, implica na utilização de um sistema de transmissão do mesmo tipo. O sistema utilizado teve, portanto, como ponto de partida o sistema original do chassi Mercedes-Benz O 500 U.

A maior diferença entre os motores elétrico e a combustão, está na curva de torque. O motor elétrico apresenta uma curva plana ou seja todo o torque esta disponível em praticamente qualquer rotação, inclusive para as mais baixas. Já o motor a combustão apresenta um ponto de máximo torque bem definido, que gera necessidade de um maior número de relações (marchas) de transmissão para obter-se melhor aproveitamento deste torque. Para simplificar o desenvolvimento, fabricação e manutenção, optou-se por manter a caixa de transmissão original com as mesmas relações que serão redundantes para o motor elétrico.

Outra consideração importante deve-se a natureza do torque produzido pelos motores: enquanto no motor a combustão o torque gerado oscila em pulsos e com elevada vibração, uma vez que o motor opera em ciclos de queima, no motor elétrico o torque é praticamente constante e livre de vibrações, pois a origem da força é eletromagnética. O torque constante e livre de vibração do motor elétrico contribui sensivelmente para a durabilidade de todo o sistema de transmissão, pois a solicitação à fadiga é muito menor. O sistema dimensionado para o motor a combustão certamente terá maior durabilidade se trabalhar com o motor elétrico, podendo até mesmo trabalhar com alguma sobrecarga.

A caixa de cambio ZF 4 HP 500, original do chassi adotado, não é adequada para o sistema XCELLSiS XCS-HY-205 pois não suporta torques maiores que 1 kN.m. Mesmo que esta suportasse o torque máximo não seria escolhida por ser automática com rendimento até 10% menor que o sistema manual, o que representaria uma queda significativa na autonomia do veículo. A caixa de transmissão escolhida foi o modelo ZF S 6 -1550 / 6,98, manual de seis velocidades, com reduções variando entre 6,98 e 1,00, adequada a torque de até 1,5kN.m, utilizada em conjunto com a embreagem MZF 430.

Será utilizado o mesmo conjunto eixo-diferencial do chassi O 500 U, o modelo MB HO4/08 DCL-11,5. Porém com a redução do par coroa e pinhão alterados de 6,14 (43/7) para a redução 4,3 (43/10) devido ao maior torque máximo do motor elétrico do sistema XCELLSiS XCS-HY-205 (1100 N.m contra 900 N.m do motor OM-906 LA original do chassi adotado), e da maior redução da caixa de mudanças adotada ZF S 6 - 1550 / 6,98, de 6,98, resultando em uma faixa de relação de transmissão final entre 30,1 e 4,3.

Resumo das características do sistema de transmissão:

- Caixa de câmbio:
 - modelo: ZF S 6 – 1500 / 6,98;
 - relações de transmissão: 6,98/4,06/2,74/1,89/1,31/1,00, ré = 6,43;
 - torque máximo: 1500 N.m;
 - acionamento: manual por alavanca;
- Embreagem:
 - modelo: MZF 430;
 - torque máximo: 2300 N.m;
 - diâmetro: 430 mm (nominal);
 - tipo: monodisco seco;
- Eixo diferencial:

- modelo: MB HO4/08 DCL-11,5;
- redução: 4,30.

7.2 Direção

A direção de um ônibus, hoje em dia, conta com algum tipo de assistência além da redução mecânica, para diminuir a força necessária para acioná-la. Normalmente, o sistema utilizado é a assistência hidráulica. A adaptação desse sistema no veículo movido a célula de combustível é viável. Para isso, é preciso utilizar-se da potência do eixo do motor elétrico para acionar a bomba de pressão. Outra possibilidade é utilizar um segundo motor elétrico para acionar a bomba. Uma terceira opção, que seria já para uma segunda fase de evolução dos sistemas agregados, seria a substituição do sistema hidráulico por um sistema eletricamente assistido. A viabilidade dessas opções será discutida neste e no próximo capítulos deste trabalho.

Para a primeira fase, a escolha de menor custo, e que necessita de menor tempo de desenvolvimento, é a utilização de um sistema de assistência hidráulica convencional. A bomba do sistema seria alimentada pelo motor elétrico. O conjunto de célula de combustível com motor elétrico XCELLSiS XCS-HY-205 permite a utilização de tal sistema, pois mesmo sem o veículo estar em movimento, um motor elétrico estará 100% do tempo em funcionamento, permitindo manobras de estacionamento ou até mesmo o esterçamento com o veículo parado, em casos extremos.

Assim, é necessário escolher um sistema adequado, do catálogo de fabricantes. Como o chassi utilizado será o O 500 U da DaimlerChrysler, e as características de utilização são semelhantes ao ônibus com motor a combustão, a escolha pode ser feita da mesma forma.

Os seguintes modelos foram analisados: ZF 8097, DaimlerChrysler LS 6BK e TRW TAS 65. Todos esses modelos foram considerados compatíveis pela DaimlerChrysler para utilização no chassi em questão, sendo que todos atingem o torque

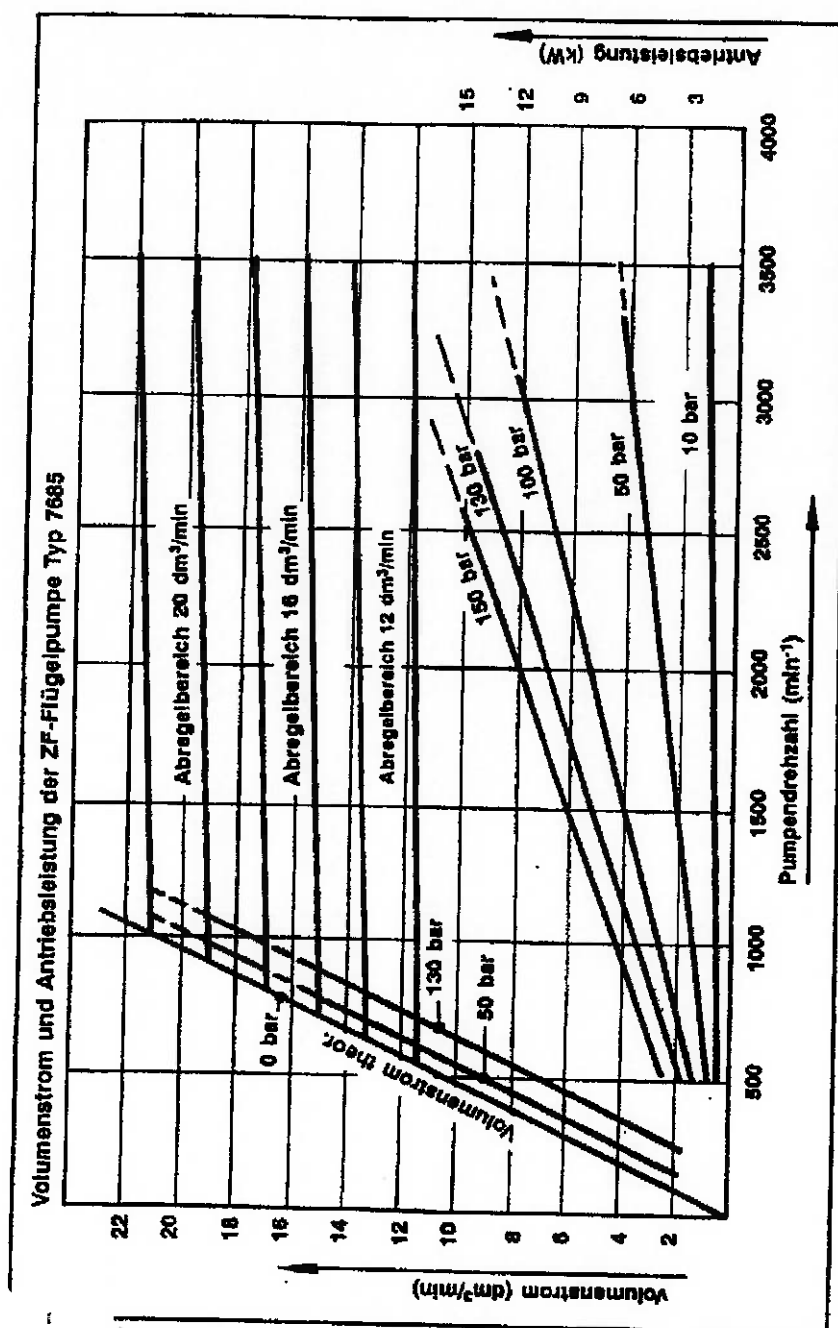
hidráulico máximo desejado (5700 N·m) para que a força no volante esteja dentro dos padrões de conforto exigidos pelas normas da empresa.

O preço dos sistemas é bastante semelhante. Uma vez que a bomba hidráulica alcance o torque desejado, a escolha resume-se ao peso dos sistemas. Um resumo dos resultados de comparação é mostrado a seguir.

Fabricante	Modelo	Pressão máxima de trabalho (bar)	Torque hidráulico para pressão máxima (N·m)	Peso do sistema (kg)
ZF	8097	160	6532	32
DaimlerChrysler	LS 6BK	150	6430	37
TRW	TAS 65	160	5760	33

Tabela 3: Escolha do sistema de assistência de direção do veículo

Assim, o sistema de direção ZF é o escolhido, por apresentar o menor peso. É importante lembrar que o consumo de energia dos sistemas é muito semelhante, com o sistema ZF apresentando uma ligeira vantagem com relação aos outros. Na figura a seguir é mostrado o consumo energético do sistema ZF 8097 (que é idêntico ao Typ 7685, mostrado na figura). Para que o sistema seja inteiramente dimensionado, observa-se também a vazão volumétrica da bomba, na mesma figura.



FN 3.1 AND FN 4 PUMPS FLOW RATE AND POWER ABSORPTION

ETD
4/99
GER.I.PPT

Figura 10: Consumo energético do sistema de direção ZF e vazão volumétrica em função da rotação. (Fonte: Catálogo ZF)

Para o cálculo exato do consumo máximo de potência, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$P = q \cdot n \cdot p \cdot 10^{-5}$$

onde: P é o consumo de potência (kW);

q é o fator de fluxo de vazão (dado de catálogo);

n é a rotação da bomba para pressão de trabalho máxima (rpm);

p é a pressão de trabalho máxima (bar).

No caso da bomba em questão, o fator q é 3,5 e n é igual a 2700 rpm. Como o torque máximo atingido é superior ao desejado, pode-se baixar a pressão máxima e utilizar o sistema com 150 bar. Dessa forma, calcula-se o consumo máximo de energia como sendo exatamente 14,2 kW.

É importante lembrar que este valor só será utilizado no caso de utilização extrema do sistema, ou seja, condições de atrito crítico e máximo ângulo de escorregamento (“slip angle”) do pneu. Tais condições ocorrem para velocidades próximas de zero, quando a potência total do veículo (205 kW) não precisa ser usada para movimentá-lo contra a principal resistência dinâmica externa ao veículo: a força aerodinâmica. Apesar disso, o sistema toma quase 7% da capacidade total de geração instantânea de potência.

7.3 Freios

O sistema de freios de veículos modernos utiliza-se da assistência de um multiplicador da força exercida no pedal, além do fator conseguido hidraulicamente, conhecido como servo-freio. Para o servo-freio funcionar, ele necessita de uma bomba de vácuo ou de pressão (dependendo do sistema). No caso do ônibus estudado, que dispõe de freio acionado pneumaticamente, o servo-freio é acionado por uma bomba de pressão. Novamente, como no caso da direção hidráulica, a bomba poderia ser adaptada. Ou, uma solução para a segunda fase seria o sistema “brake by wire”, em que o sinal de frenagem

seria eletronicamente transmitido para os atuadores, que freariam o veículo, como será mostrado na seção 7.3. É importante lembrar, ainda, que o sistema pneumático necessita de um compressor de ar, o qual também toma potência do motor.

O projeto básico de um freio envolve determinar-se a força de frenagem a partir da desaceleração a ser obtida. A equação elementar para isso é¹:

$$\frac{W}{g} \cdot D_x = -F_{xf} - F_{xr} - D_A - W \cdot \sin \theta$$

onde: W é o peso do veículo;

g é a aceleração gravitacional;

D_x é a desaceleração linear (eixo x) do veículo;

F_{xf} é a força de frenagem no eixo dianteiro;

F_{xr} é a força de frenagem no eixo traseiro;

D_A é o arrasto aerodinâmico;

θ é o ângulo de inclinação da rampa.

A desaceleração mínima é determinada por normas. Uma norma que serve como base para a criação das diversas outras existentes no mundo é a norma norte-americana Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) número 121. São definidos alguns níveis de efetividade do freio a ar, inclusive para casos de falha. Atendendo-se a FMVSS, atende-se também às normas européias em vigor, tendo-se um veículo que pode transitar em qualquer região do mundo (considerando-se apenas o sistema de freios).

A distribuição da força de frenagem, para um projeto básico, pode ser estimada como sendo 65% na dianteira e 35% na traseira, uma vez a distribuição de peso depende da transferência de peso da traseira para a dianteira, a qual só poderá ser determinada com exatidão depois da determinação da suspensão.

A desaceleração devido ao arrasto aerodinâmico pode ser considerada como sendo 0,03 g (valor usualmente utilizado em cálculos para veículos comerciais em velocidades urbanas, ou seja, por volta de 50 km/h) ou simplesmente desprezada, dimensionando-se o sistema para a segurança.

¹ Gillespie, 45

Normalmente as normas definem a frenagem para o plano, mas cada montadora possui seu padrão de projeto de freios, podendo ser consideradas algumas situações mais críticas de descida. No caso deste projeto básico será apenas considerado o terreno plano.

Observando-se essas normas, como o peso do veículo é o de um ônibus comum, chega-se a um sistema de freio equivalente ao utilizado pela DaimlerChrysler no chassi O 500 U ou no O 500 M. Devido à relação custo benefício, é mais vantajoso utilizar o sistema vendido com um desses chassis. A única diferença fica por conta do sistema: o primeiro é a disco, o segundo a tambor.

Como este ônibus está sendo projetado para entrar em operação em 5-10 anos, é importante seguir uma tendência do mercado de veículos comerciais de substituir os freios a tambor por freios a disco. Essa substituição está ocorrendo pelo fato de os sistemas a disco permitirem maior aplicação de torque, permitindo menores distâncias de frenagem (ao serem utilizados em conjunto com os pneus de hoje em dia). No entanto, o sistema de freio a disco exige maior esforço de atuação, necessitando, no caso de um ônibus, de um compressor de ar de maior capacidade. Isso gera maior gasto de energia. Surge assim a necessidade de se tomar a decisão.

Para efeito de comparação, são considerados os dois sistemas de freio, disco e tambor, numa matriz de decisão.

Item considerado	Peso	Freio a Disco		Freio a Tambor	
		Nota	Nota × Peso	Nota	Nota × Peso
Baixo consumo de energia	4	2	8	4	16
Custo/facilidade de manutenção	2	4	8	3	6
Facilidade adaptação de freio de estacionamento	1	2	2	4	4
Desempenho de frenagem	4	4	16	2	8
Facilidade adaptação ABS	2	4	8	3	6
Peso do sistema	3	4	12	2	6
Disponibilidade no mercado	3	4	12	4	12
Modernidade do produto (fator de marketing)	1	3	3	1	1
Total			69		59

Tabela 4: Matriz de decisão para escolha do sistema de freio.

Assim, foi escolhido o freio a disco, o mesmo vendido com o chassi O 500 U. O mesmo já atende às normas para sistemas de freio, inclusive a FMVSS 121. Suas características são mostradas a seguir.

Posição	Característica		Valor
Eixo Dianteiro	Área efetiva de frenagem (cm ²)		784
	Espessura da pastilha (mm)		21
	Diâmetro do disco (mm)		430
	Área do cilindro de freio (in ²)		20
Eixo Traseiro	Área efetiva de frenagem (cm ²)		784
	Espessura da pastilha (mm)		21
	Diâmetro do disco (mm)		430
	Área do cilindro combinado de freio (in ²)		20/24
Geral	Pressão de operação dos freios (bar)		10
	Tipo		Ar comprimido, 2 circuitos
	Reservatórios (L)		30 (x2), 40 (x2) e 5
	Compressor	Modelo	Wabco, c/ 2 cilindros, acionado por engrenagens, resfriado a ar
		Diâmetro × Curso (mm)	85 × 56
		Cilindrada (cm ³)	636
		Vazão (L/min)	980 @ 2500 rpm @ 10 bar de contrapressão
		Rotação máxima de trabalho (rpm)	3000
		Relação de rotação motor/compressor	1:1,15

Tabela 5: Características do sistema de freio

No caso, para calcular a força de frenagem pode-se utilizar a equação apresentada no início desta seção, de forma a checar o dimensionamento. O peso total W utilizado nos cálculos é o peso bruto total (PBT) do veículo admitido pelas leis brasileiras. É importante lembrar que para esse caso não existem normas internacionais, e para cada país que o ônibus for veicular é preciso checar se é permitida maior capacidade de carga. A desaceleração utilizada é aquela imposta pela FMVSS, ou seja, $18,0 \text{ ft/s}^2$ ($5,49 \text{ m/s}^2$).

$$\frac{W}{g} \cdot D_x = -F_{xf} - F_{xr} - D_A - W \cdot \sin \theta$$

$$16000 \cdot 5,49 = -F_x$$

$$F_x = -87,8 \text{ kN}$$

O sistema de freio do veículo fornece 10 bar (1000 kPa) de pressão p . Sabe-se, também, o raio dinâmico do pneu ($r_D = 0.507 \text{ m}$) e o diâmetro do disco de freio ($d = 430 \text{ mm}$), donde calcula-se a área de contato necessária através do equilíbrio dos momentos com relação ao eixo do veículo.

$$F_x \times r_D = p \times A \times \frac{d}{2}$$

$$-87800 \times 0.507 = -1000000 \times A \times \frac{0,430}{2}$$

$$A = 0,207 \text{ m}^2 = 2070 \text{ cm}^2$$

Conforme definimos, a dianteira será determinada como crítica, ficando com 65% da frenagem (no caso qualquer um dos eixos pode ser considerado crítico, não interferindo nos cálculos). Assim, teria que ficar com 65% da área calculada acima, ou seja 1345 cm^2 por disco. A área de frenagem efetiva de cada uma das pastilhas deve ser a metade desse valor, ou seja, 673 cm^2 . O freio em questão excede à norma pois a área efetiva de frenagem de cada pastilha é maior que esse valor (784 cm^2).

Cabe lembrar que as forças aerodinâmicas e de inércia do motor ("freio-motor") foram desconsideradas nesse exemplo, tornando-se o resultado ainda mais favorável à segurança.

7.4 Ar Condicionado

O sistema de ar condicionado do veículo tem por objetivo propiciar conforto térmico aos seus passageiros, garantindo uma temperatura adequada em todo o interior do

veículo. O ar condicionado convencional para veículos desta categoria é composto por um condensador, um evaporador, ventiladores e difusores de ar e um compressor ligado ao motor. O compressor serve para comprimir o fluido de refrigeração (que sai do evaporador, onde absorve calor do ar, resfriando-se), e bombeá-lo ao condensador (no qual irá liberar o calor antes absorvido).

A necessidade de adaptação do ar condicionado para o veículo com célula de combustível se faz necessária, pois o compressor no sistema convencional é acionado diretamente pelo movimento do eixo do motor a combustão. O pacote XCELLSiS XCS-HY-205 escolhido permite, contudo, que seja utilizado um sistema convencional, uma vez que utiliza um motor elétrico central acionado todo o tempo que o veículo estiver ligado, “simulando” o funcionamento motor a combustão.

São possíveis, então, duas soluções para o sistema de ar condicionado: utilizar-se um sistema convencional encontrado pronto no mercado, ou utilizar-se um condensador e evaporador convencionais, porém com um compressor elétrico acionado diretamente pela energia produzida na célula de combustível.

O sistema que utiliza o compressor de acionamento elétrico pode parecer mais eficiente por supostamente utilizar uma conversão de energia a menos, mas na verdade ocorrem as mesmas conversões em ambos os casos, uma vez que o compressor acionado eletricamente é um conjunto composto por um motor elétrico mais compressor. O pacote compressor mais motor elétrico consegue, contudo, atingir um rendimento um pouco maior que o sistema com o compressor convencional acoplado ao motor elétrico do sistema de tração, uma vez que se tem controle da rotação do motor no primeiro caso, enquanto que no segundo ela varia dentro de uma faixa, de acordo com a velocidade e relação de transmissão.

O sistema convencional apesar de perder um pouco em eficiência energética no compressor apresenta como vantagens menor custo de aquisição, manutenção mais fácil e barata, por utilizar itens padrões de mercado.

A utilização do sistema convencional, com um compressor ligado por correia ao motor principal do sistema de tração, é a preferida na primeira etapa de comercialização dos veículos com célula de combustível por não exigir qualquer adaptação além de suportes resultando em um sistema simples, de rápida implementação e sem onerar o veículo em comparação a um convencional.

Por ser o sistema que demanda mais energia depois da tração, é importante que o tenha um controle eletrônico para aproveitar melhor a energia evitando desperdícios como operação desnecessária ou acima da potência requerida.

O sistema, escolhido em catálogos de fabricantes, está descrito abaixo:

- Fabricante: Carrier;
- Modelo: RF 50Slim;
- Potência de refrigeração: 110000 Btu/h;
- Potência elétrica: 2 kW;
- Vazão de ar no evaporador: 3000m³/h;
- Massa: 235 kg;
- Fluido refrigerante: R-134a;
- Compressor: Carrier 05G – 6 cilindros com comando eletrônico;
- Faixa de trabalho do compressor: 500-2200 rpm;
- Peso do compressor: 61kg.

A razão mais forte para a escolha deste sistema é que este minimiza o consumo de energia elétrica com a utilização de um controlador eletrônico, que comanda os ventiladores e o compressor, com os dados de temperatura externa e interna, de forma a manter a temperatura do habitáculo dentro do especificado, com menor consumo. O compressor pode variar, através de comando eletrônico, o número de cilindros atuantes (varia entre 2, 4 e 6), maximizando o rendimento energético e compensando as variações de rotação e carga do compressor.

7.5 Outros

Qualquer acessório acionado eletricamente num veículo com motor a combustão, desde o computador de bordo até os faróis, utilizam a energia de um alternador, que carrega uma bateria. No caso da célula de combustível, os sistemas podem ser acionados diretamente pela energia produzida na célula. A liberdade para colocar elementos

elétricos no veículo aumenta, uma vez que a eficiência desse sistema é maior que a do alternador. Vários sistemas podem ser repensados para otimizar essa mudança, mas isso será primordialmente realizado na segunda fase da introdução dos sistemas agregados. Através da forma de raciocínio apresentada neste trabalho, todos os sistemas agregados podem evoluir, melhorando seu rendimento e estando economicamente adequados para um futuro em que os veículos com célula de combustível já dominem um mercado significativo.

Este texto não entrará em maiores detalhes com relação a esses sistemas, mas é certo que a célula de combustível já está influenciando os mesmos. Os caminhões Freightliner, fabricados nos Estados Unidos, já utilizam um pacote de célula de combustível auxiliar, que serve para acionar os sistemas utilizados pelo caminhoneiro quando parado à beira da estrada para descansar. A BMW também já está incorporando essa característica em seus modelos de luxo.

Com uma geração contínua e independente de carga de bateria, os agregados ganham a possibilidade de funcionar de formas diferentes de tudo o que existe hoje, permitindo funções cujo consumo de energia antes descarregaria uma bateria rapidamente. Como exemplos temos a utilização de computadores laptop plugados no veículo ou, ainda, o acionamento automático do ar condicionado quando o automóvel ficar estacionado sob o sol, mantendo a temperatura interna num patamar agradável para quando o motorista voltar.

8 SEGUNDA FASE: DESENVOLVIMENTO

O objetivo da segunda fase de adaptação, conforme já foi citado, é reduzir o número de conversões energéticas de cada sistema, otimizando-o para a célula de combustível. Em muitos casos é possível utilizar a energia proveniente diretamente das células para pôr os sistemas em funcionamento. Dependendo da quantidade de sistemas que sejam desenvolvidos para funcionar simultaneamente dessa forma, será necessário armazenar energia elétrica de alguma forma. A solução mais promissora parece ser um capacitor de alta armazenagem, ao invés de uma bateria. Alguns protótipos de veículos já utilizam tais sistemas, como o Honda Civic movido a célula de combustível, uma vez que os mesmos são bem mais leves que baterias convencionais.

Um dos objetivos da segunda fase de adaptação é, também, acabar com a necessidade de se ter o motor elétrico rodando permanentemente, como se estivesse simulando um motor a combustão. Com todos os agregados dessa fase desenvolvidos, isso será possível. Mas se um agregado não estiver adequadamente desenvolvido, não será possível implementar isso. Daí a necessidade de se pensar desde já no assunto.

Como a grande maioria dos componentes das soluções para a Fase 2 de adaptação ainda está em desenvolvimento, não é possível entrar em muitos detalhes do projeto básico, pois não existem dados disponíveis. Mas, partindo-se do princípio que as entradas e saídas não se alteram com relação à Fase 1, pode-se traçar alguns diagramas, conforme serão mostrados nas seções seguintes. São vistos os diagramas para a Fase 1, seguidos pelos da Fase 2, para permitir a comparação.

8.1 Transmissão

Para a primeira fase de adaptação, apresentada no capítulo anterior, o sistema possui operação idêntica ao sistema do ônibus convencional, e utiliza os componentes disponíveis no mercado. A grande vantagem, a simplicidade do desenvolvimento, tem como preço um sistema menos eficiente.

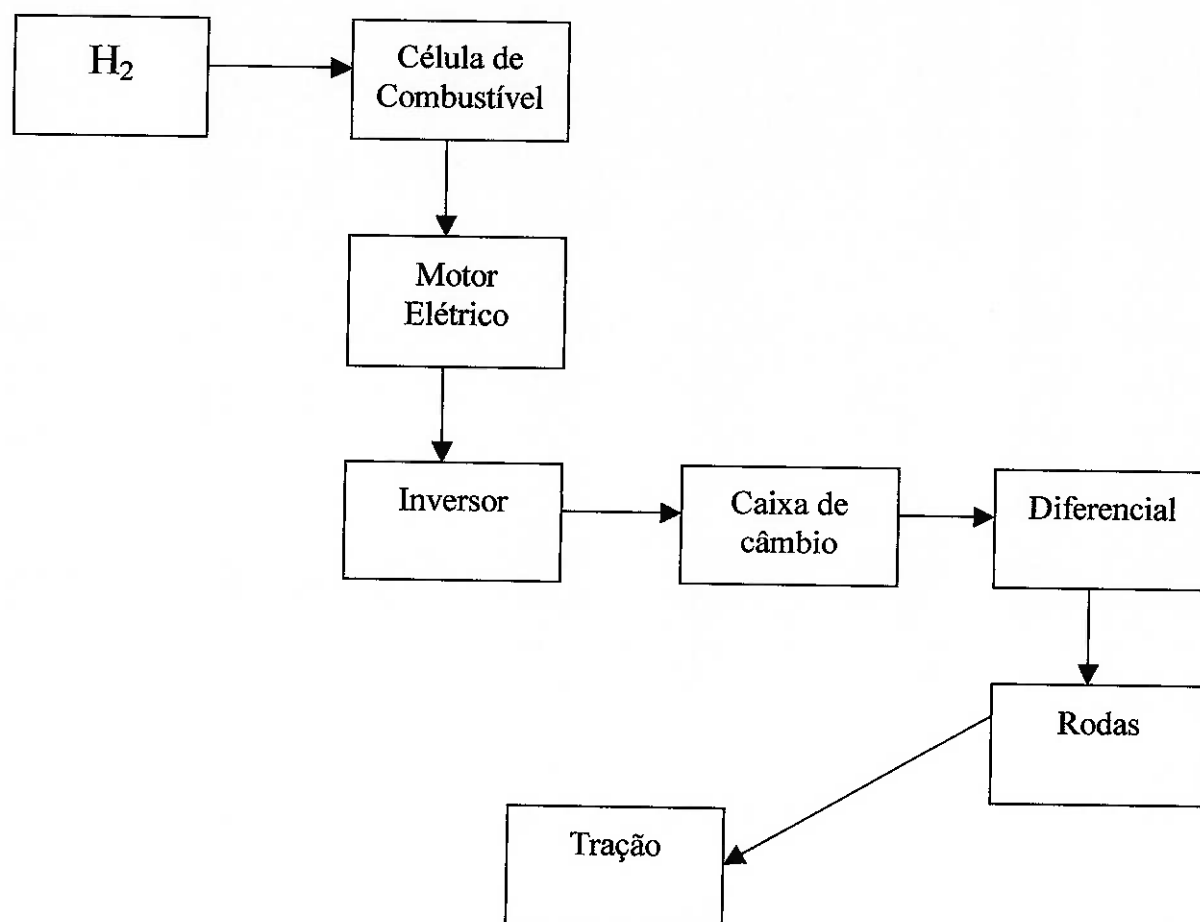


Figura 11: Diagrama de transmissão para Fase 1 de adaptação

Um sistema totalmente novo, sem nenhum componente igual ao sistema do ônibus convencional. Isso é o que é proposto para a fase 2, e pode trazer significativos ganhos de rendimento. Neste sistema, a energia produzida pela célula é retificada e

alimenta um conjunto de tração para cada roda. Estes conjuntos são compostos por um inversor que alimenta um motor de corrente alternada, que, por sua vez, aciona um pequeno redutor, movendo a roda. Os inversores são controlados eletronicamente, conforme a carga sobre o acelerador, velocidade e ângulo de esterçamento.

Com este sistema, a energia da célula é aproveitada ao máximo, aumentando a autonomia do veículo, devido à maior eficiência. O melhor aproveitamento energético é conseguido eliminando-se vários itens mecânicos da transmissão. O único item mecânico utilizado é um redutor simples na saída de cada motor para conseguirmos o torque necessário com um conjunto pequeno e leve.

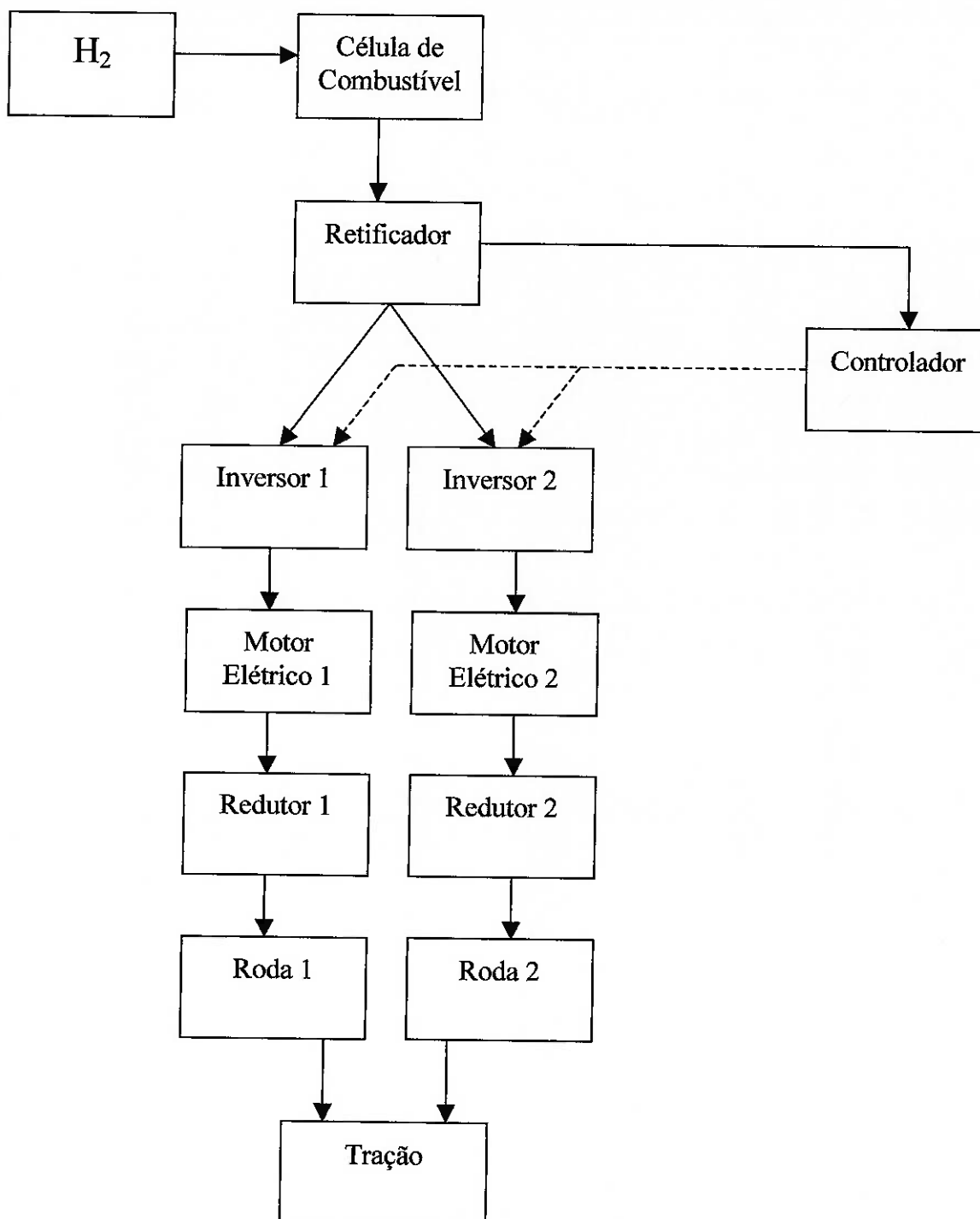


Figura 12: Possível diagrama de transmissão para Fase 2 de adaptação

8.2 Direção

Conforme visto na seção 6.2, a primeira fase de adaptação envolvia apenas a utilização do motor elétrico para acionar a bomba hidráulica, que assistirá no esterçamento. É um sistema facilmente adaptável.

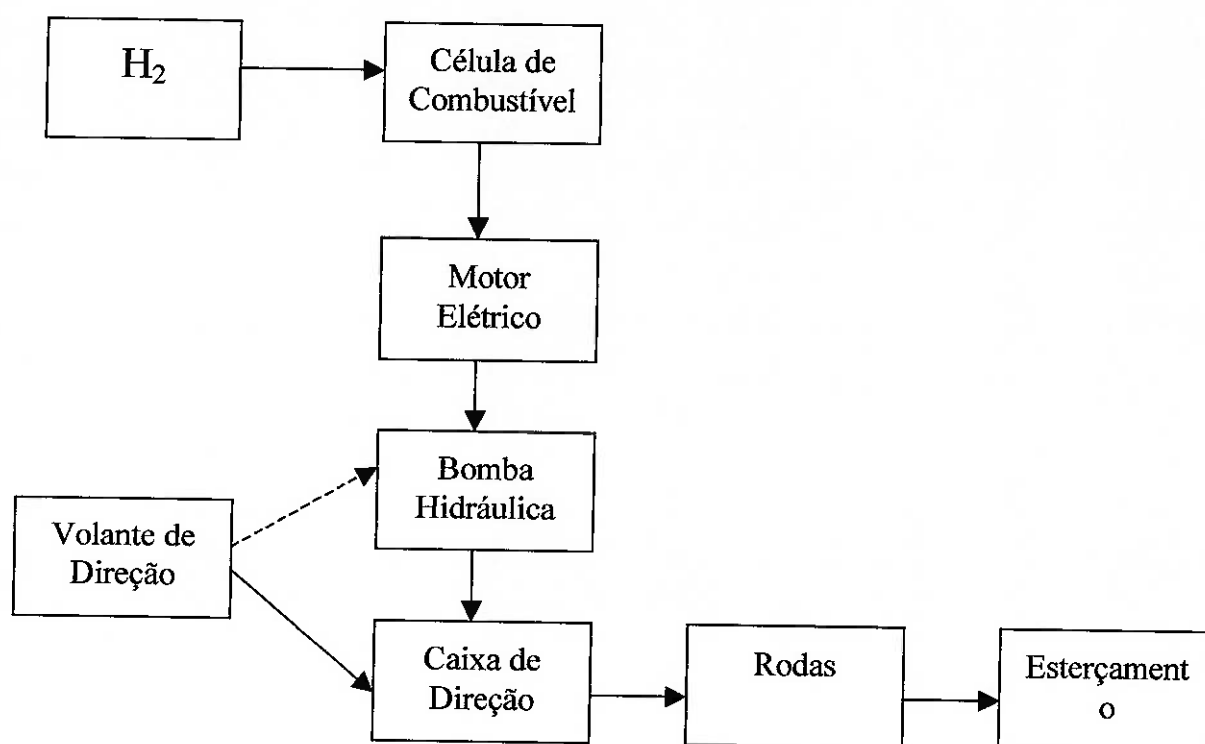


Figura 13: Diagrama de direção para Fase 1 de adaptação

Para reduzir o número de conversões energéticas, passa-se a utilizar diretamente a diferença de potencial resultante das reações na célula de combustível. Assim, o sistema hidráulico é substituído por um sistema eletricamente assistido. Dos sistemas aqui citados, a direção é talvez o que apresente maior possibilidade de já entrar em funcionamento em breve. Grandes fabricantes de sistemas veiculares, como a Delphi, a Visteon e a TRW já apresentam sistemas bastante confiáveis.

Os atuadores eletromagnéticos receberiam entradas de um controlador. Este último se encarregaria de amenizar as oscilações do sistema devido a entradas provenientes da estrada (ondulações, buracos, mudanças de pavimento). No caso de um sistema sem coluna de direção diretamente ligada com a caixa, o controlador teria que oferecer também a sensação de “feedback” para o motorista, e o atuador faria toda a força de esterçamento. Mas, para os sistemas de veículos com célula de combustível, é mais interessante utilizar a força do motorista no volante, para economizar mais energia.

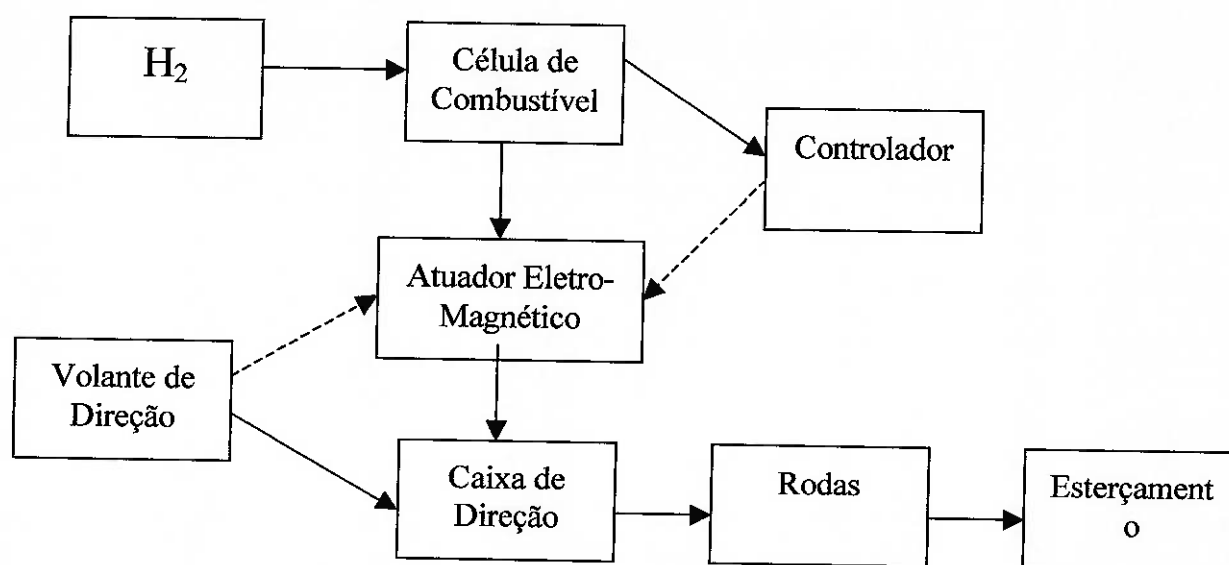


Figura 14: Possível diagrama de direção para Fase 2 de adaptação

8.3 Freios

De maneira semelhante ao que ocorre para a direção, a primeira fase de adaptação é muito parecida ao sistema já existente para veículo com motor a combustão. Também

depende da utilização de um motor elétrico acionado continuamente para permitir seu funcionamento adequado.

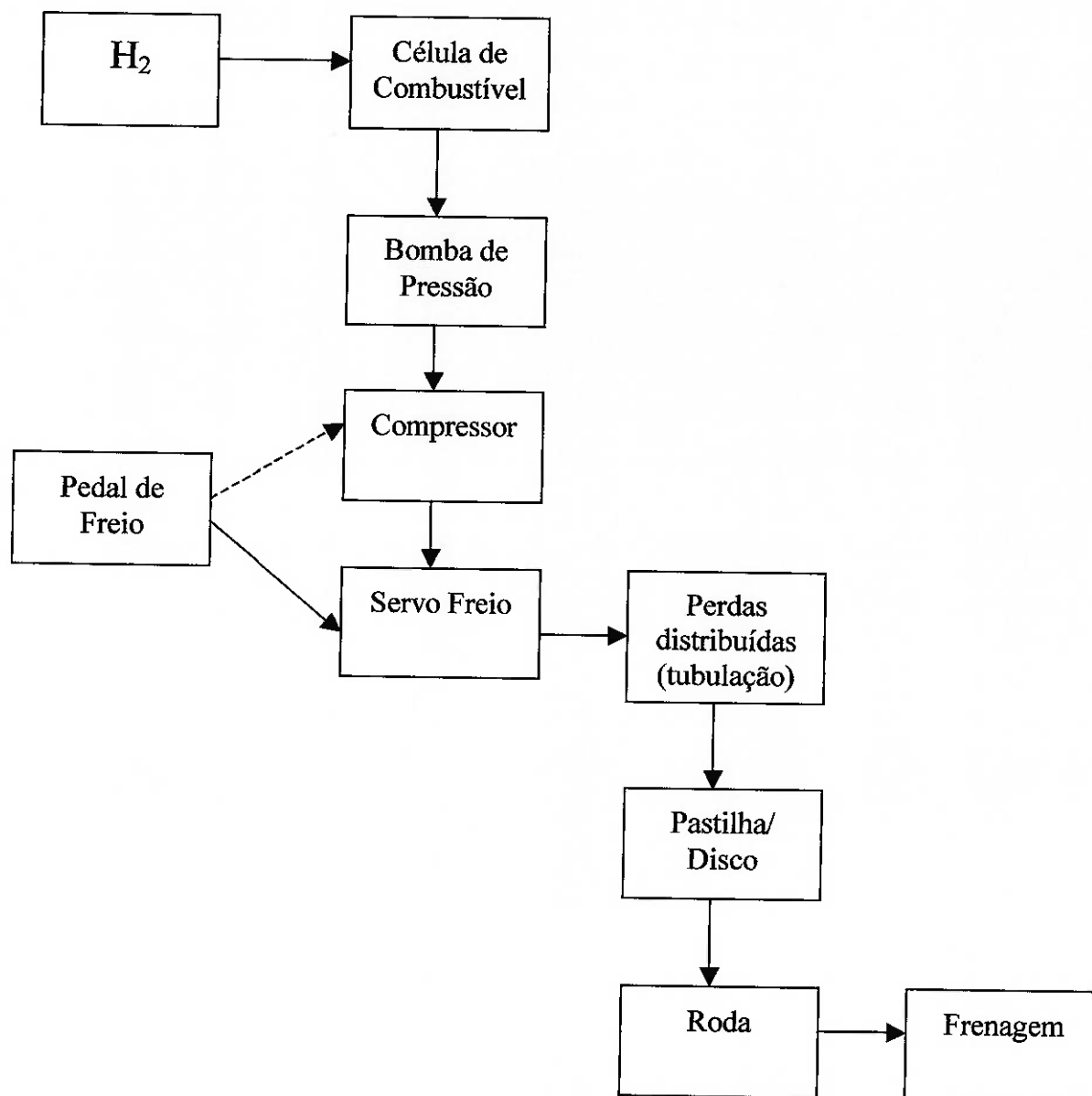


Figura 15: Diagrama de freio para Fase 1 de adaptação

Para a segunda fase, todas as tubulações de fluido são substituídas por fios, que acionarão atuadores eletro-magnéticos. Nesse caso, a posição do pedal do freio é

simplesmente uma entrada do sistema de controle. As perdas de energia são menores do que na fase 1. A redução de peso no veículo também será significativa.

Aliás, sempre que se fala sobre célula de combustível para automóveis, é preciso lembrar que muito do peso que o veículo ganha pela existência da própria célula, motor elétrico e armazenagem de combustível pode ser compensado com melhorias nos sistemas agregados, que antes (com o motor a combustão) não seriam possíveis.

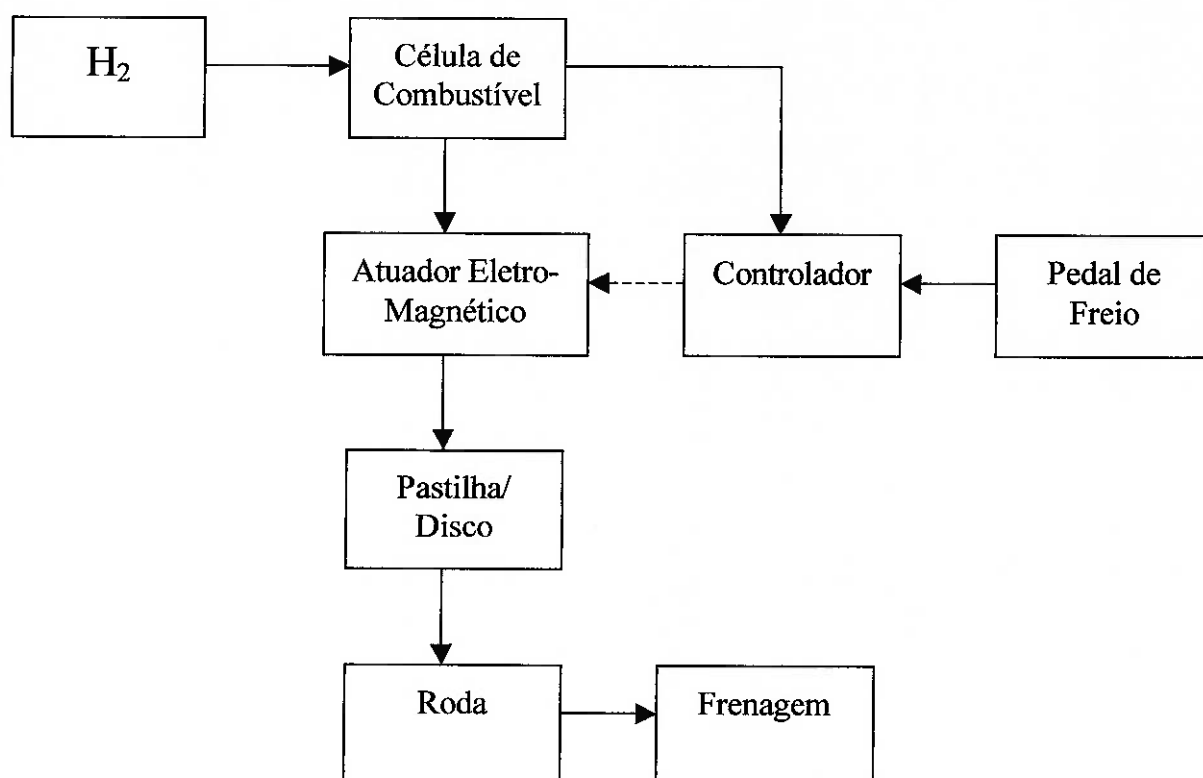


Figura 16: Possível diagrama de freio para Fase 2 de adaptação

8.4 Ar condicionado

Para a fase 1, o sistema é idêntico ao sistema do ônibus convencional sendo o compressor acionado pelo motor elétrico central. O gás R-0134a comprimido passa então pelo condensador perdendo calor para o ambiente e após passar por um redutor de pressão este absorve calor no condensador resfriando o ar que é insuflado para dentro da carroceria pelo sistema de ventilação.

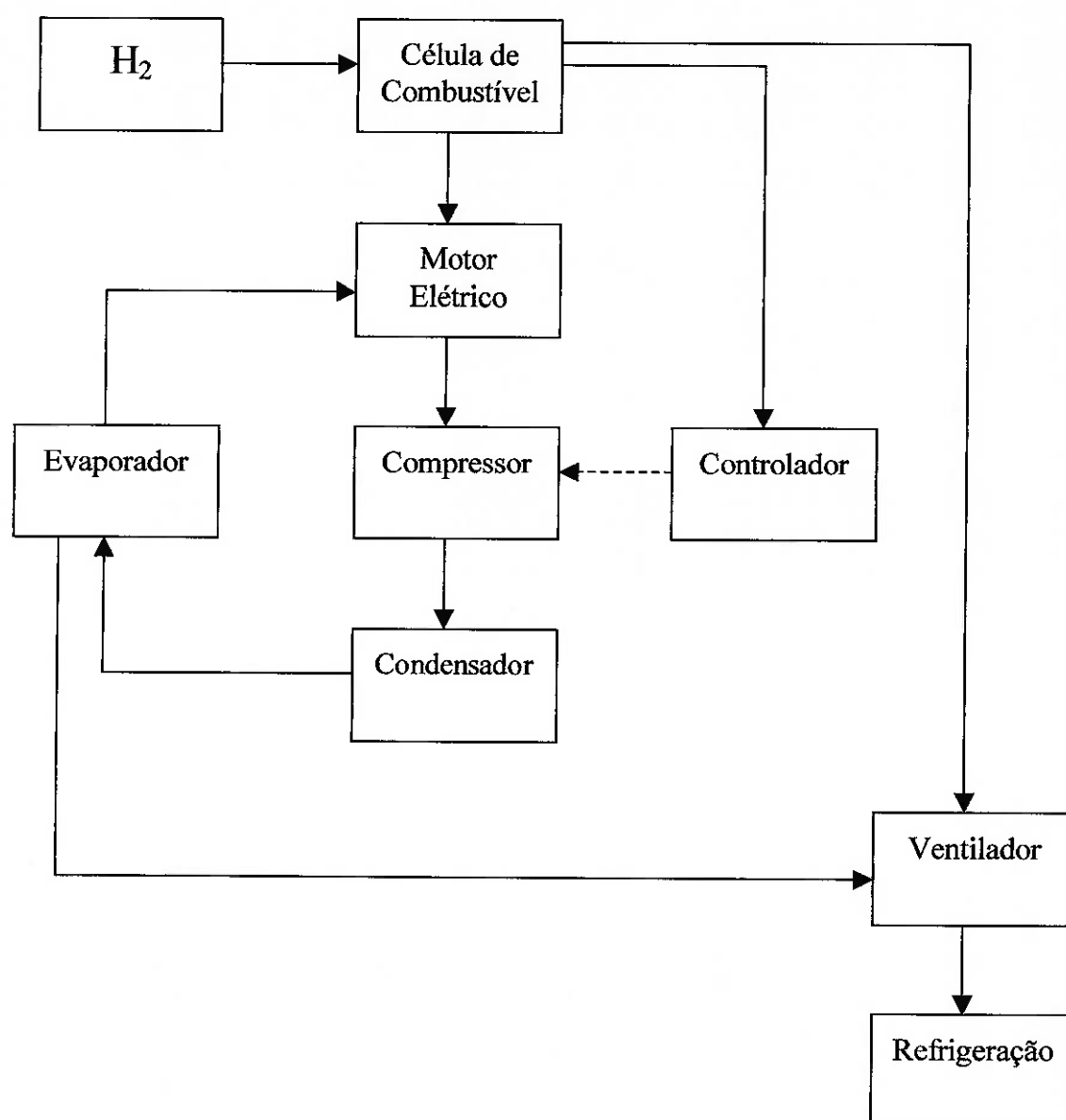


Figura 17: Diagrama de ar condicionado para Fase 1 de adaptação

Para a fase 2, é muito semelhante ao sistema da 1ª fase, a única alteração é que o compressor não é ligado ao motor central (que não existe nesta segunda fase), e sim montado em um encapsulamento com um motor elétrico dedicado. Tendo como vantagem um menor peso e uma maior eficiência do compressor pois a rotação do motor é definida e não variável.

A manutenção conjunto requer também menos manutenção pois todas as partes móveis estão dentro de um encapsulamento blindado utilizando o próprio fluido R-134a como lubrificante e refrigerante.

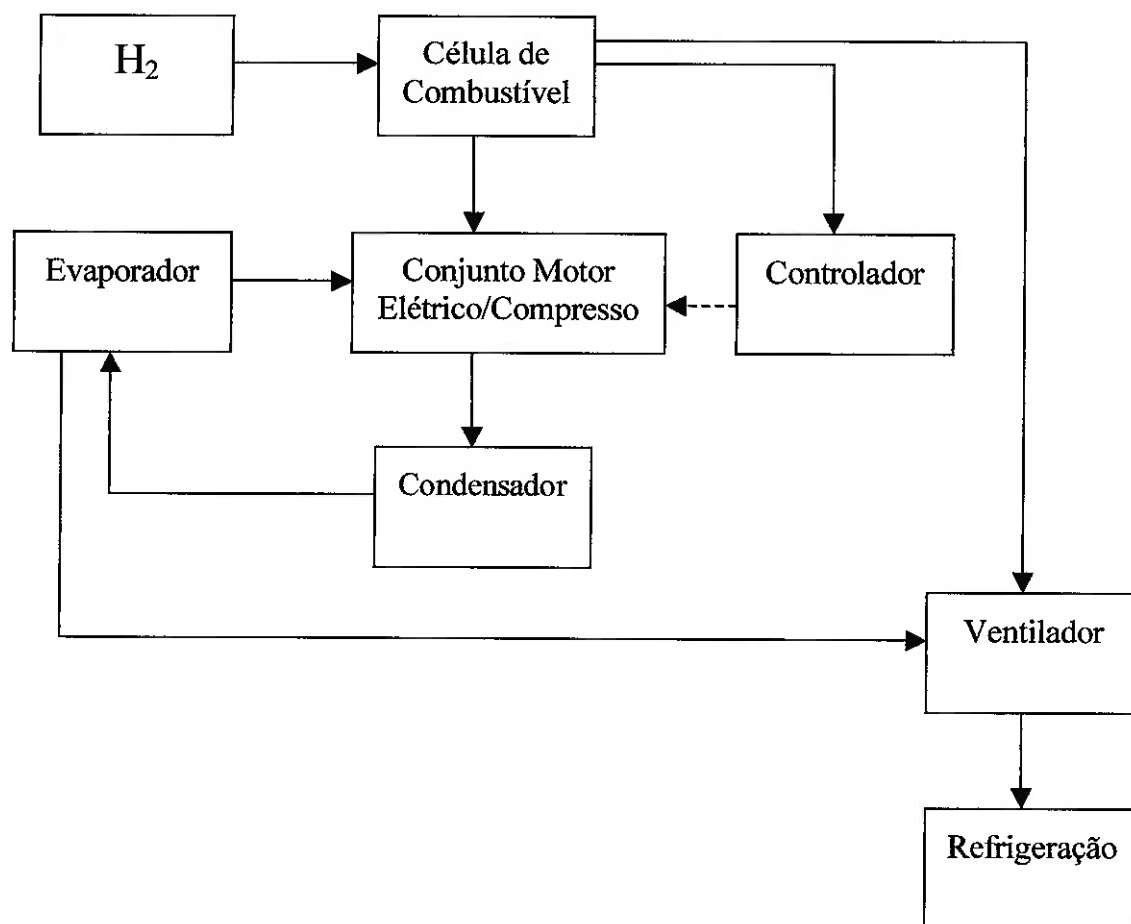


Figura 18: Possível diagrama de ar condicionado para Fase 2 de adaptação

9 CONCLUSÕES

Deste trabalho, conclui-se que as células de combustível serão uma alternativa viável para mover os veículos terrestres no futuro. A questão que resta é sobre qual combustível será utilizado como entrada para o sistema: hidrogênio líquido, metanol ou etanol. Citando uma frase do Presidente da XCELLSiS, Dr. Ferdinand Panik, “ainda é muito cedo para tomar uma decisão sobre um combustível de longo prazo”. Em 4 ou 5 anos deve-se ter uma definição.

Independentemente disso, nota-se que as frotas de ônibus urbanos, ao incorporarem a alternativa da célula de combustível, tendem a utilizar o hidrogênio líquido como combustível. A viabilidade desse sistema ocorrerá, de início, em grandes centros urbanos do mundo.

Deste trabalho, conclui-se também que é possível criar um veículo com célula de combustível utilizando agregados semelhantes aos de um veículo com motor de combustão. Isso permite a implementação desde já dos veículos com tais sistemas.

Com o desenvolvimento de sistemas agregados específicos para a célula de combustível, ganha-se em rendimento energético e reduz-se o peso do veículo. Essa redução de peso compensa parte do que foi obtido ao utilizar o conjunto do stack, motor elétrico e sistema de armazenagem de hidrogênio.

Se todos os sistemas específicos para célula de combustível tiverem sido viabilizados, não será mais preciso manter o motor elétrico funcionando permanentemente. No entanto, se apenas um sistema não atingir o grau de evolução dos outros, o motor ainda terá que continuar simulando o funcionamento de um motor a combustão. É importante, então, que o desenvolvimento dos agregados ocorra em todas as frentes.

Se tudo isso ocorrer, o veículo movido a célula de combustível e motor elétrico poderá ter uma vida tão longa quanto ao movido por motor de combustão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Funcionamento da célula de combustível	15
Figura 2: Experimento de Grove para provar a possibilidade de se combinar o hidrogênio com o oxigênio produzindo tensão elétrica.....	17
Figura 3: Posicionamento dos sistemas agregados num ônibus movido a célula de combustível.	19
Figura 4: Compartimento para conjunto célula de combustível mais motor elétrico.....	20
Figura 5: Foto de catálogo do conjunto célula de combustível e motor elétrico, formando o pacote XCELLSiS XCS-HY-205.....	24
Figura 6: Chassi Mercedes-Benz O 500 U, na forma com é comercialmente encontrado, com motor, transmissão, suspensão, direção e freios, pronto para receber uma cabine. (Fonte: DaimlerChrysler)	25
Figura 7: Vistas lateral e superior do conjunto O 500 U. É importante notar que o chassi permite fácil adaptação do pacote XCELLSiS XCS-HY-205, devido ao amplo compartimento do motor.	26
Figura 8: Sistemas agregados primários da célula de combustível.	30
Figura 9: Curvas de potência, torque e eficiência global do sistema em função do número de rotações por minuto (Fonte: Catálogo XCELLSiS XCS-HY-205).....	34
Figura 10: Consumo energético do sistema de direção ZF e vazão volumétrica em função da rotação. (Fonte: Catálogo ZF)	41
Figura 11: Diagrama de transmissão para Fase 1 de adaptação	52
Figura 12: Possível diagrama de transmissão para Fase 2 de adaptação	54
Figura 13: Diagrama de direção para Fase 1 de adaptação	55
Figura 14: Possível diagrama de direção para Fase 2 de adaptação	56
Figura 15: Diagrama de freio para Fase 1 de adaptação.....	57
Figura 16: Possível diagrama de freio para Fase 2 de adaptação	58
Figura 17: Diagrama de ar condicionado para Fase 1 de adaptação.....	59
Figura 18: Possível diagrama de ar condicionado para Fase 2 de adaptação	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Apresentação dos principais tipos de célula de combustível.....	16
Tabela 2: Características do motor movido por célula de combustível, pacote XCELLSiS XCS-HY-205.....	23
Tabela 3: Escolha do sistema de assistência de direção do veículo	40
Tabela 4: Matriz de decisão para escolha do sistema de freio.....	45
Tabela 5: Características do sistema de freio	46

BIBLIOGRAFIA

Ashley, Steve; *Fuel cells start to look real*; Automotive Engineering International; Society of Automotive Engineers; março, 2001.

Ballard Power Systems; *Maintenance Guide for a Fuel Cell Vehicle*; Vancouver, BC, Canadá, 2000.

Birch, Stuart; *Ford's Focus on the Fuel Cell*; Automotive Engineering International; Society of Automotive Engineers; junho, 2001.

Brooke, Lindsay; *Green Machines –The New Powertrains*; Automotive Industries; American Business Press; EUA; Janeiro, 2001.

Carrier Transicold; *Catálogo de Produto RF40/50 Slim*; Caxias do Sul, RS, Brasil.

Celanese AG; *Ticona Product Portfolio*; Kronberg, Alemanha; 2001.

Dynatek Industries Ltd.; *Advanced Lightweight Fuel Storage Systems*; Calgary, Canadá; 2001.

Electrocell; <http://www.electrocell.org>

Gillespie, T. D.; *Fundamentals of Vehicle Dynamics*; Society of Automotive Engineers, Inc.; Warrendale, PA, EUA; 1992.

International Fuel Cells; <http://www.ifc.com>

Jones, J. C.; Maxwell, T. T.; *Alternative Fuels*; Society of Automotive Engineers; Warrendale, PA, EUA; 1995.

Kaminski, Paulo C.; *Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade*; Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; Rio de Janeiro, RJ; 2000.

Los Alamos National Laboratory; *Fuel Cells Green Power*; Los Alamos, CA, EUA; 2001

Millennium Cell; *Company and Product Information Portfolio*; Eatontown, NJ, EUA; 2001.

NAVC – Northeast Advanced Vehicle Consortium & M. J. Bradley and Associates; *Future Wheels*; Agreement No. NAVC 1099-PG030044; Boston, MA, EUA; 2000.

Panik, Dr. Ferdinand; *Células a Combustível; conferência apresentada no Congresso SAE Brasil 2001; São Paulo, SP; Novembro, 2001.*

Panik, Mônica S.; *A Revolução da Célula a Combustível*; apresentado no seminário SAE Brasil “As Novas Tecnologias Automotivas”; São Paulo, SP; Março, 2001

Samuels, Clifford L.; *Automotive Air Conditioning*; Prentice Hall; New Jersey, NJ, EUA; 1981.

U.S. Fuel Cell Council, *Fuel Cell Power for Vehicles*, EUA 2001

U.S. Fuel Cell Council, <http://www.usfcc.com>

XCELLSiS Fuel Cell Engines Inc.; *Heavy Duty Fuel Cell Engine XCS-HY-205*; catálogo do fabricante; Burnaby, BC, Canadá; 2001.

XCELLSiS Fuel Cell Engines Inc.; *Cleaning up: Zero-Emission Buses in Real-World Use – A Report on the XCELLSiS/Ballard Phase 3 Fuel Cell Program*; Chicago, IL, EUA; 1999.

ZF Sistemas de Direção; *Servocom S1*; Catálogo; 1999.