

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEMIC – Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

**Veículo Elétrico com Sistema Energético
Híbrido:
Célula de Combustível/Baterias Eletroquímicas**

Eduardo Gurgel do Amaral

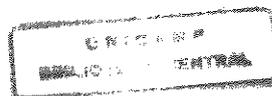
Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por EDUARDO GURGEL DO AMARAL e aprovada pela Comissão Julgada em 23 / 10 / 1998

[Assinatura]
Orientador

Tese apresentada ao DEMIC/FEE/UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas – SP
Outubro de 1998.



066376

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	F/JUN/AM/P
V.	Ex
T. N.º BC/	36451
PROD.	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	03/02/97
N.º CPD	

CM-00120649-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Am13v

Amaral, Eduardo Gurgel do
Veículo elétrico com sistema energético híbrido: célula de combustível/baterias eletroquímicas. / Eduardo Gurgel do Amaral.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Ennio Peres da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Veículos elétricos. 2. Células a combustível. 3. Meio ambiente. 4. Baterias elétricas. I. Silva, Ennio Peres da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Índice

I - Dedicatória	<i>i</i>
II - Agradecimentos	<i>ii</i>
III - Abstract	<i>iii</i>
IV - Resumo	<i>iv</i>
V - Objetivo	<i>v</i>
1- Introdução	1
1.1. Veículos Elétricos: Perspectivas	5
1.2. A Importância Tecnológica dos Veículos Elétricos	8
1.2.1. A Importância dos Sistemas de Suprimento Energético	8
2- Os Veículos Elétricos	11
2.1. Histórico dos Veículos Elétricos	11
2.2. Características dos Veículos Elétricos	13
2.2.1. Estrutura do Veículo	14
2.2.2. Tecnologia do Sistema de Propulsão	16
2.2.3. Tecnologia das Baterias	17
2.3. A Aplicação dos Modernos Conceitos Tecnológicos em Veículos Elétricos	19
2.3.1. O Veículo Elétrico da General Motors - IMPACT/EV-1	20
2.3.2. O Veículo Elétrico da Nissan - FEV	22
2.4. Sistemas de Suprimento de Energia para Veículos Elétricos	24
3- A Experiência com o Protótipo VEGA	25
3.1. Histórico	25
3.2. Características do Projeto	26
3.3. Características do Veículo	28
3.4. Desempenho do Protótipo	33
4- As Células de Combustível	36
4.1. Definição de uma Célula de Combustível	37
4.2. Histórico das Células de Combustível	38
4.3. Sistema de Funcionamento de uma Célula de Combustível H ₂ - O ₂	41
4.4. Combustíveis Utilizados em Células de Combustível	45

4.5. Tipos de Células de Combustível	47
4.5.1. Células de Combustíveis Gasosos	47
4.5.1.1- Agente Oxidante Gasoso	47
4.5.1.2. Agente Oxidante Líquido	49
4.5.2. Células de Combustíveis Líquidos	49
4.5.3. Células de Combustíveis Sólidos	50
4.5.4. Células de Combustível Regenerativas	51
4.5.5. Células e Outros Processos Químicos Combinados	52
4.6. Classificação das Células de Combustível Segundo o Eletrólito	53
4.6.1. Célula de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)	54
4.6.2. Célula de Combustível Alcalina (AFC)	55
4.6.3. Célula de Combustível de Eletrólito de Polímero Sólido (SPEFC)	56
4.6.4. Célula de Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)	57
4.6.5. Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)	57
4.7. Classificação das Células por Temperatura de Trabalho	58
4.8. Análise de Perspectivas das Células de Combustível	59
5- As Células de Combustível para Aplicação em Veículos Elétricos	61
5.1. As PEMFCs como Opção Energética para Uso em Veículos	63
5.1.1. Características do Sistema de uma PEMFC	63
5.1.1.1. O Eletrólito de Polímero das PEMFCs	65
5.1.1.2. O Catalisador do Eletrodo	68
5.1.1.3. A Estrutura do Eletrodo	68
5.2. O Aspecto Comercial do Desenvolvimento Tecnológico de uma PEMFC	69
5.2.1. Perspectivas para Aplicação Comercial das PEMFCs	75
6- Dimensionamento de um Veículo Elétrico	78
6.1. Forças Atuantes do Deslocamento de um Veículo	78
6.2. Considerações Básicas sobre as Perdas no Sistema	79
6.2.1. Força de Resistência Inercial	79
6.2.2. Força de Resistência ao Rolamento	80
6.2.3. Força de Resistência Aerodinâmica	80
6.2.4. Força Necessária para Superar Aclives	80
6.3. Potência	81
6.4. Perfil de Percurso	82
6.5. Definição das Características do Veículo	82
6.5.1. Massa do Veículo	83

6.5.2. Massa do Sistema Energético	83
6.5.3. Massa Bruta do Veículo	84
6.5.4. Energia Disponível no Veículo	84
6.5.5. Coeficiente de Resistência Aerodinâmico	84
6.5.6. Coeficiente de Resistência ao Rolamento	84
6.5.7. Área Frontal do Veículo	84
6.5.8. Aceleração do Veículo	84
6.5.9. Potência do Motor	86
6.6. Simulação do Desempenho do Veículo Através de Programa Computacional	89
6.6.1. Descrição do Programa Computacional	89
6.6.2. Considerações Sobre o Resultado dos Cálculos Efetuados pelo Programa	95
7- Dimensionamento do Sistema Híbrido de Suprimento de Energia	98
7.7.1. Dimensionamento dos Componentes	99
7.1.1. Massa de Hidrogênio	100
7.1.2. Massa dos Componentes do Sistema da Célula de Combustível	100
7.1.3. Massa das Baterias	106
7.2. Resumo dos Resultados	106
7.3. Dimensionamento Termodinâmico dos Componentes de Potência	107
7.3.1. Conceituação Teórica	107
7.3.2. Dimensionamento Termodinâmico do Tanque de Hidreto Metálico	111
7.3.3. Dimensionamento Termodinâmico da Célula de Combustível	111
7.3.4. Dimensionamento Termodinâmico do Motor Elétrico	111
7.4. Considerações Finais	112
8- Análise de Casos	114
8.1. Variação da Potência de Pico	114
8.2. Variação da Massa do Sistema Energético	116
8.3. Análise dos Resultados	128
9- Conclusão	132
10- Bibliografia	135

I - Dedicatória

Ao grande amigo, companheiro, incentivador e instrutor, este trabalho é reflexo do grande esforço e dedicação que teve para comigo durante o tempo de sua vida que pudemos compartilhar neste plano de existência. Exigiu um grande esforço, porém é apenas uma pequena amostra das possibilidades que o seu exemplo e seus ensinamentos me propiciaram. A humildade do seu Ser foi sempre tão marcante que mais uma vez não permitiu que eu possa te dizer isto pessoalmente e menos ainda me deu a oportunidade de retribuir. Mas ainda que eu não possa vê-lo, posso senti-lo e sei com toda a certeza que é o responsável direto por mais esta vitória em minha vida. Como forma de reconhecimento e gratidão eu dedico este trabalho a você, e procurarei fazer jus a seu exemplo de dedicação e abnegação que sempre teve por todos, lutando para levar adiante com muito empenho, toda obra que contribua de alguma forma para o benefício e crescimento dos demais, como forma de agradecimento e retribuição à dádiva divina que foi tê-lo como pai nesta vida.

II - Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Bernard Waldman pelo respeito, apoio e amizade que sempre demonstrou durante todo o tempo que esteve como responsável pela orientação desta Tese.

Ao Prof. Dr. Ennio Peres da Silva pelo auxílio voluntário na orientação deste trabalho desde o seu início, pela solidariedade e apoio durante o seu curso, e por ter aceitado assumir a orientação oficial no seu final, assim como, por todo o esforço empregado para a sua viabilização e conclusão.

Ao Prof. Dr. Christiano Lyra Filho meus especiais agradecimentos pelo grande apoio, consideração e empenho ao solucionar junto a CPG, com tanta presteza e em tão pouco tempo, todas as questões, neste caso atípicas, referentes ao encaminhamento necessário para a defesa desta tese.

Ao aluno de graduação Fernando Farina Nunes Vieira pelo grande auxílio e empenho referente a atualização e execução do programa computacional utilizado neste trabalho.

Ao Engenheiro Oscar Franco pelo grande apoio e auxílio técnico em toda a parte computacional relativa à equipamentos, suporte de programas e aplicativos.

À minha família, em especial à minha mãe Maria Annita e minha irmã Vera Maria pela dedicação e paciência ao dar o suporte necessário para a realização deste trabalho.

À minha esposa Ana Lúcia, companheira de todas as horas, que além de todo o apoio, carinho e dedicação, renunciou à momentos importantes de sua vida permanecendo solidária durante todo o tempo de realização deste trabalho.

À todos que em nome da *FORÇA MAIOR*, amorosamente prestaram seu imprescindível auxílio em tantos momentos de dificuldades.

E finalmente à CAPES, órgão governamental responsável pelo seu financiamento, sem o qual esta Tese não se viabilizaria, e à FAEP, pelo apoio no final do trabalho..

III – Abstract

Zero emission vehicles are indicated as an ideal solution to minimize the environment problems at the large urban cities. At the present only the electric vehicles hold at this category. To viability this kind of vehicle must be defined the energy supply. The most used energy often are the batteries, but the advanced technology of this kind of system limits this utilization of competitive way with the conventionally cars.

Fuel Cells are indicate as promissor way for this finnality, but its required a technology advanced and attuality, the cost is very expensive. The advantage of this system is that it converts a fuel directly of electricity.

This work gives the propouse the study of viabilization of a fuel cells / batteries - hybrid system to demand of energy in electric vehicles like a way to turn it more attractive to adapted this vehicles.

IV - Resumo

O agravamento dos problemas ambientais em todo mundo tem exigido medidas corretivas urgentes. Nos grandes centros urbanos o setor de transportes contribui com uma parcela expressiva da poluição atmosférica devido a queima de derivados de petróleo como combustível em veículos. Entre as medidas possíveis de serem adotadas em resposta à esta premente necessidade, a viabilização de veículos com propulsão elétrica é uma das mais cogitadas, por ser considerada, diferentemente das outras, como uma solução de propulsão automotiva com característica de emissão zero de poluentes. Em contraste com o grande avanço tecnológico que boa parte dos componentes de potência destes veículos tiveram, o sistema de armazenamento de eletricidade, ainda baseado fortemente nas baterias eletroquímicas, em especial nas de chumbo-ácido, não apresentaram um avanço significativo. Um meio muito promissor e com características interessantes para o fornecimento de energia elétrica e que pode também ser usado em veículos elétricos é a célula de combustível. Esta forma agrega as vantagens da conversão de um combustível diretamente em eletricidade sem gerar poluição. Porém, além de necessitar de um grande avanço tecnológico, ela possui atualmente uma grande limitação em relação ao seu elevado custo. Uma forma de alcançar patamares de custo menores é atingir determinadas escalas de produção. Para isso é preciso encontrar aplicações viáveis tanto a nível técnico como de custo. A célula de combustível como fonte de energia para veículos elétricos deverá ter um grande mercado uma vez resolvidos estes problemas. Uma forma de introduzi-las e até viabilizá-las é através de sistemas híbridos onde células com uma pequena potência e conseqüentemente menor custo, daria suporte energético para proporcionar autonomia para o veículo, enquanto outro sistema, como um banco de baterias eletroquímicas, forneceria a energia de pico para os momentos que exigir maior potência.

Este trabalho faz um rápido levantamento dos avanços tecnológicos dos veículos elétricos, descreve o sistema de funcionamento das células de combustível, destaca os principais tipos e, entre estes aponta o mais apropriado atualmente para aplicações automotivas. Dentro deste panorama, propõe um arranjo do sistema energético híbrido para um veículo hipotético, que possa suprir as necessidades técnicas para que os veículos elétricos possam vir a ser mais competitivos e atraentes para o usuário dentro das limitações inerentes ao atual estado de evolução das tecnologias envolvidas.

V - Objetivos

O objetivo desta Tese é prestar uma contribuição para a mais rápida viabilização de veículos elétricos com suprimento energético híbrido a células de combustível, em função das grandes vantagens ambientais que estes dispositivos proporcionam.

O objetivo do trabalho é mostrar as vantagens da utilização de células de combustível junto com baterias eletroquímicas, como meio de proporcionar aos veículos elétricos características similares aos veículos com motor de combustão interna, em especial em relação à forma de abastecimento e à possibilidade de aumento da autonomia dos veículos elétricos só a baterias; e provar, que mesmo a utilização de uma célula de combustível com pequena potência já é suficiente para proporcionar as vantagens necessárias para aumentar a competitividade dos veículos elétricos, o que possibilitará a implementação de células de combustível para fins automotivos em pequenas escalas de produção industrial, que permitirá a redução gradativa do seu alto custo, viabilizando assim sua progressiva penetração mercadológica.

1 - Introdução

Nos países industrializados a questão ambiental têm tido uma ênfase cada vez maior. Já nos países emergentes a preocupação e o empenho ainda que existam, não se igualam aos níveis dos países industrializados, talvez em razão das prioridades impostas pela condição de desenvolvimento em que se encontram. Nestes países a preocupação com as necessidades básicas da população e com a manutenção de taxas de crescimento econômico ascendentes tem provocado um retardamento na adoção de políticas ambientais mais severas e mais abrangentes. Por outro lado, com a globalização do mercado e a conseqüente maior interdependência dos grandes mercados consumidores, políticas que visam o equacionamento das questões ambientais já fazem parte do protocolo de intenções entre nações, como condição básica para futuros acordos comerciais e de cooperação mútua, como é o caso do recente acordo firmado entre o Brasil e os EUA (outubro de 1997). A razão principal deste tipo de imposição é que alguns poluentes como os compostos de carbono tem ação local e global, especialmente com relação ao efeito estufa.

No final da década de 80 como conseqüência das pressões dos ambientalistas, alguns países, principalmente os da Europa, procuraram taxar as emissões de dióxido de carbono. Alemanha e Holanda adotaram este procedimento, porém não estabeleceram um valor, o que protelou a eficiência de tal medida. A Suécia, através da "Commission of Economic Instruments in Environmental", adotou em 1990 uma taxa equivalente a US\$ 42.00 por tonelada emitida, enquanto que na Finlândia a taxa adotada corresponde a apenas 15 % deste valor [1].

No início da década de 90, a política de energia foi norteadada principalmente por dois fatores: o primeiro foi o movimento verde, o qual apontava para a necessidade da melhoria da qualidade do ar e de uma redução significativa no efeito estufa, causado pela emissão de gases oriundos das atividades humanas, para valores no ano 2005 20% abaixo dos obtidos nos anos oitenta. Isto poderia ser alcançado, pelo menos parcialmente, impondo-se taxas sobre a emissão de carbono. Isto também refletiu no declínio geral da utilização do carvão e a elevação da utilização de gás natural, cujas emissões de carbono são aproximadamente 41% menores que as provenientes de carvão.

O aumento da eficiência da grade de fontes energéticas europeias resultaram na maior aplicação de esquemas de cogeração, e melhoria na eficiência na distribuição de energia. A utilização de novas tecnologias foram programadas. O segundo fator foi a privatização do setor de produção e a conversão de energia que exigiu uma grande otimização na sua eficiência [2].

Na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro em junho 1992, 153 países assinaram um tratado que previa o controle do clima global através das reduções das emissões de dióxido de carbono no ano 2000 para os mesmos níveis de 1990. O tratado se tornaria aplicável depois da ratificação de 50 nações signatárias. Após seis meses desta conferência, cada nação ficou obrigada a submeter um plano de redução de emissões de dióxido de carbono às Nações Unidas [1; 2].

Em 1993 o Reino Unido insistiu na sua posição prévia de que uma redução de 20% do nível de emissões de CO₂ de 1990 para 2005 e a imposição de um imposto sobre emissão de carbono eram economicamente irrealistas. Em função disto houve o arquivamento do assunto. Os países da comunidade europeia ratificaram o Tratado de Mudança de Clima Global que finalmente foi efetivado em 1994. A primeira rodada de negociações dentro de um programa de dois anos, para tentar chegar a um acordo em relação a adoção de medidas por todos os participantes já a partir de 1997, começou em Genebra, em 21 de agosto de 1995. Os resultados foram inconclusivos, embora a Aliança dos Estados de Pequenas Ilhas (composta de 38 nações de pequenas ilhas, inclusive Fiji e Madagáscar, que podem estar sujeitas a sofrer inundações catastróficas em consequência do efeito estufa) ainda insistiram nos níveis mais baixos de redução [2].

Na maioria dos países do mundo o transporte terrestre utiliza combustíveis exclusivamente derivados de petróleo e, conseqüentemente, fica subordinado à vulnerabilidade, à provisão e à volatilidade de preços do mercado de óleo mundial. Por exemplo, no Brasil mais da metade do petróleo consumido é utilizado no setor de transportes, sendo 85% deste total despendido para veículos rodoviários [3].

O setor de transporte tem contribuído para a degradação do meio ambiente tanto de forma localizada como global, contribuindo para o aumento do efeito estufa. Apesar de ter havido reduções significativas durante as últimas duas décadas, veículos com motores a combustão são responsáveis ainda, em alguns casos, por até 70% do total das emissões de poluentes urbanos [4]. A emissão de poluentes como monóxido de carbono

(CO), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), além do dióxido de carbono (CO₂), grande responsável pelo efeito estufa, provenientes da queima de derivados de petróleo no sistema de transportes, representa uma parcela expressiva da poluição atmosférica, sendo que em relação às emissões globais este setor é responsável por 50% da emissão de hidrocarbonetos [5] e em até 30% das emissões de gás carbônico da energia total utilizada [6].

Diversas medidas já foram propostas e muitas já efetivamente adotadas: rodízios de veículos com diferentes critérios de seleção; pedágio eletrônico em determinados locais da cidade; controle rigoroso do nível de emissão dos motores da frota com pesadas multas para veículos fora de especificação; imposto adicional proporcional ao nível de emissão do veículo. Algumas medidas são bastante radicais, como a lei aprovada no estado da Califórnia, EUA proposta pelo “California Air Resources Board” (CARB), que prevê a obrigatoriedade dos fabricantes de veículos automotivos que participam daquele mercado de designarem 2% do total de carros de suas vendas globais, a partir de 1998, para serem veículos com características de emissão zero (ZEV – zero emission vehicles) [7]. A partir de 2003 esta porcentagem passaria a 10%. A Figura 1 mostra a redução gradativa de poluentes planejada para o Estado da Califórnia.

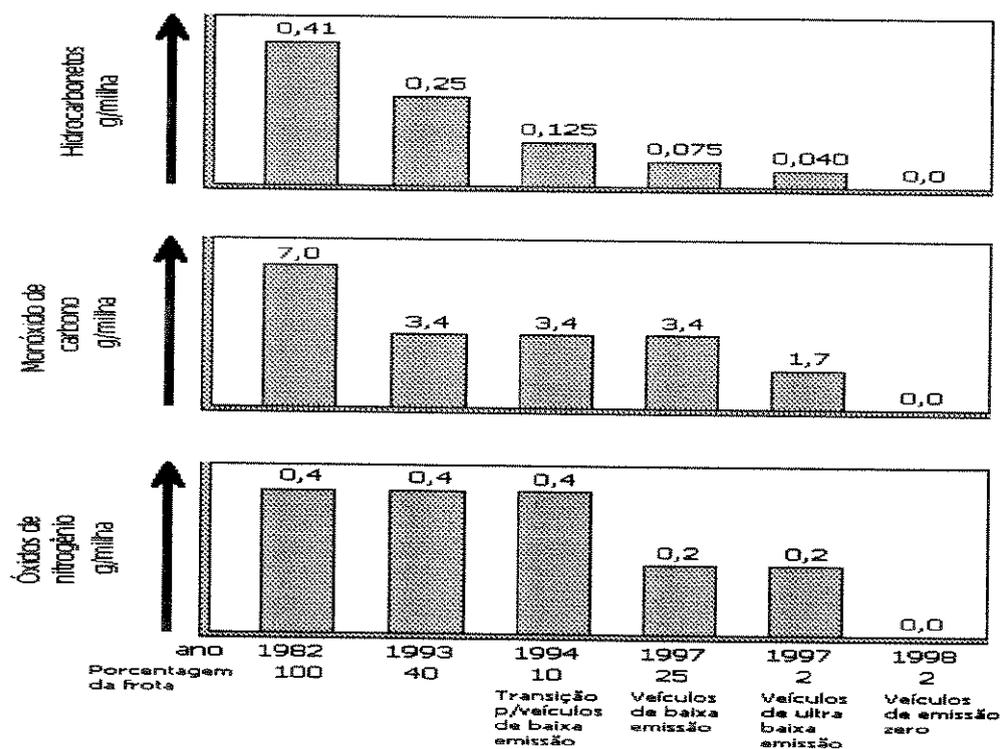


Figura 1 – Regulamento para redução de emissões de veículos em relação ao tempo no Estado da Califórnia [8].

Esta medida provocou um grande impulso no esforço já existente para o desenvolvimento de veículos elétricos, principalmente em relação às mais importantes e maiores montadoras de automóveis do mundo. Além do desafio, o tamanho do mercado do Estado da Califórnia e o posicionamento das empresas por uma fatia deste mercado foram fatores decisivos para a implementação nos esforços em pesquisa e desenvolvimento. Outra razão para o grande empenho das indústrias do setor é que o Estado da Califórnia normalmente é logo seguido pelos outros estados americanos, assim como por outros países de grande expressão em relação ao mercado. Na verdade, este empenho não se limitou apenas às indústrias automobilísticas, mas envolveu também agências governamentais, instituições acadêmicas, centros de pesquisa e a indústria ligada ao setor elétrico e eletrônico, envolvendo todas as áreas da engenharia com maior destaque para a Mecânica, Elétrica e Química.

Qual a importância prática destas medidas? A efetiva redução de poluentes de veículos automotores exige mudanças radicais no conceito da motorização e suprimento energético. A substituição da gasolina e do óleo diesel, que são os combustíveis mais amplamente hoje utilizados, por combustíveis alternativos fósseis, como é o caso do gás natural, são paliativos que tem a capacidade de obter uma determinada redução nos índices de alguns poluentes, porém não solucionam e nem ao menos melhoram de forma significativa o atual quadro ambiental. Nem mesmo utilizando o hidrogênio como combustível em um motor à explosão, que é considerado o mais limpo dos combustíveis e não emite compostos de carbono, teríamos índices de emissão considerados nulos. Isto se deve às elevadas temperaturas geradas dentro da câmara de combustão que provocam reações químicas entre o nitrogênio e o oxigênio do próprio ar, formando compostos do tipo NOx. Atualmente o único veículo que atende as exigências de níveis de emissão zero é o veículo elétrico, entendendo-se aqui as emissões do sistema de propulsão do veículo durante o seu uso, ou seja, o conceito de veículo *ZEV* não considera as emissões não associadas ao suprimento de energia do veículo (hidrocarbonetos emitidos pelo sistema de lubrificação; material particulado proveniente dos freios e pneus, etc.), nem aquelas eventualmente ocorridas durante as etapas anteriores de geração de energia ou posteriores de reciclagem dos materiais (baterias, por exemplo).

Os veículos elétricos tem muitas características vantajosas, devendo-se ressaltar entre elas, devido a sua grande importância estratégica, a variedade de formas possíveis de se obter energia elétrica, principalmente porque muitas destas fontes são renováveis e

não poluentes como a fotovoltaica, a eólica e a hidráulica. Mesmo para os países que geram eletricidade através de termoelétricas a carvão, petróleo ou energia nuclear, é possível ter um maior controle de emissões através de filtros e tratamentos de afluentes e evita-se a concentração de poluentes atmosféricos nos grandes centros urbanos, uma vez que estas termoelétricas podem ser localizadas distantes das grandes cidades. Apesar da geração de eletricidade a partir do petróleo ser menos eficiente que o emprego direto dos combustíveis nos motores devido às perdas no processo de conversão, a eficiência energética total pode ser em parte compensada pela maior eficiência do veículo elétrico.

Para viabilizar a implantação de veículos elétricos é preciso antes de tudo torná-los atraentes, competitivos e práticos. O desenvolvimento das diversas tecnologias que envolvem um veículo elétrico, o ganho de eficiência global, a adequação dos sistemas utilizados para proporcionar benefícios equivalentes a um veículo convencional, contribuirão para torná-lo competitivo e ganhar economia de escala.

1.1. Veículos Elétricos: Perspectivas

Desde 1990, quando o CARB divulgou sua determinação em adotar o plano que exigia a comercialização de veículos de emissão zero, que na prática atualmente significa veículos com propulsão elétrica, houve uma grande mobilização em relação ao desenvolvimento de tecnologias que contribuissem para viabilizar a introdução destes veículos no mercado pelas indústrias do setor. Ainda que as investigações tecnológicas já viessem ocorrendo há muitos anos, a iniciativa do CARB contribuiu para reforçar o interesse e estimular uma aceleração nos esforços empregados. Os analistas acreditavam que com esta medida, por volta de 2004 cerca de um milhão de veículos elétricos estariam circulando nos Estados Unidos. No início de 1996 esta medida, que entraria em vigor no ano de 1998, foi protelada, permanecendo ainda a exigência de 10% da frota comercializada em 2003, como veículos de emissão zero.

Com este fato, muitos dos entusiastas de veículos elétricos acreditaram que o interesse pela indústria automobilística diminuiria. O editor do Green Car Journal, o boletim da indústria em Upland, Califórnia - EUA, Ron Cogan declarou: “O que acontece na Califórnia, normalmente influencia diretamente o mercado automotivo em geral, um fato que se aplica especialmente aos veículos elétricos” [9].

Realmente este fato de imediato provocou incerteza no mercado, não só nos EUA mas em todo o mundo, quanto ao futuro da indústria dos veículos elétricos. Porém nos meses subsequentes houve mais atividade de destaque em veículos elétricos do que nos dois ou três anos anteriores, segundo Cogan, que apontou para um aumento no número de pedido de patentes e da intensificação nas atividades governo/indústria em consórcios de Pesquisa e Desenvolvimento de veículos elétricos. Cogan destaca também que cresceu significativamente o número de alianças internacionais entre fabricantes automotivos e empresas de desenvolvimento de componentes para veículos elétricos. Calcula-se em 135 o número de fabricantes de veículos elétricos entre grandes fabricantes automotivos e pequenas empresas de adaptação de veículos, dados da Electric Transportation Coalition. Ainda assim estima-se que em 1994 no mundo todo havia apenas 10.000 veículos elétricos; dos quais 1.300 veículos elétricos no Japão, 2.800 nos EUA, 4.400 na Alemanha e 1.700 na França [9].

Acredita-se que em breve possa haver uma maior penetração de veículo elétricos nos mercados da Europa, devido aos preços da gasolina e do diesel que são bem maiores que nos EUA, e no asiático, através da comercialização de lambretas elétricas, em função da receptividade do mercado em diversos países deste continente e à transição que normalmente ocorre entre o uso de bicicletas e lambretas a gasolina [9].

Veículos elétricos já são produzidos em massa e estão sendo vendidos na Europa pela Fiat, Renault e Peugeot, sendo esta última a primeira a destinar uma de suas linhas de produção exclusivamente para a montagem de veículos elétricos. O Smart, veículo da Micro Car AG, uma joint venture entre a Daimler-Benz e o fabricante de relógios Swatch SMH, terá uma rede de concessionárias que já está sendo desenvolvida e o lançamento do veículo no mercado, tanto europeu como americano, está planejado para 1998.

Um plano com o objetivo de popularizar veículos elétricos e que pretende colocar 200.000 veículos elétricos nas ruas no ano 2.000, foi planejado pelo Conselho de Veículos Elétricos, um grupo de orientação do MCII - Ministério do Comércio e Indústria Internacionais do Japão. O MCII também patrocina um programa avançado de pesquisa de baterias, no qual 11 empresas japonesas partilharão US\$ 125 milhões durante um período de 10 anos, com a finalidade principal de desenvolver baterias de lítio para uso em veículos elétricos e produtos eletrônicos de consumo. A Tabela 1 mostra o plano de popularização de veículos elétricos no Japão.

Tabela 1 – Plano de popularização de veículos elétricos no Japão (valores em milhares de unidades) [9].

Ano	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000
Produção	0,3	0,6	1,4	4	7	10	14	25	55	100
VEs em uso	1,1	1,5	2,7	6,5	13	23	36	60	110	200

Nos EUA a GM, Ford, Chrysler, Nissan, Honda, Mazda e a Toyota se dispuseram a trabalhar na comercialização de veículos elétricos, como parte do acordo com o CARB. Faz parte deste acordo parcerias tecnológicas com o intuito de colocar mais de 3.500 veículos rodando no Estado da Califórnia a partir de 1998. A Chrysler e a Ford devem oferecer versões elétricas de veículos de linha e a General Motors Corporation deve produzir uma pick-up da série S versão elétrica, que pretende colocar no mercado a exemplo de seu veículo elétrico o EV-1 (versão avançada do IMPACT), que está disponível para o público americano desde meados de 1997 [9].

As parcerias e associações inclusive internacionais são resultados positivos fruto do mercado de veículos elétricos. O Smart será produzido na França com 80% dos componentes supridos por outros países da Europa. Porém, ainda que muitos avanços técnicos tenham sido alcançados e a intensificação das atividades em torno dos veículos elétricos permanece alta, o sucesso na aplicação destes veículos depende prioritariamente do desenvolvimento de tecnologias de suprimento de energia elétrica "on board".

Existem várias tecnologias de baterias em desenvolvimento. A maioria dos projetos de primeira geração utilizam baterias de chumbo ácido com tecnologia moderna; prevê-se que para o futuro serão adotadas baterias mais avançadas, hoje muito caras, tais como hidreto metálico-níquel e de ferro-lítio, estas últimas mais a longo prazo.

Entre as demais tecnologias para geração de energia elétrica existentes, as células de combustível, enfoque principal deste trabalho, são consideradas uma das mais importantes opções de suprimento de energia para veículos elétricos e serão analisadas em detalhes no Capítulo 4.

1.2. A Importância Tecnológica dos Veículos Elétricos

O desenvolvimento da indústria de veículos elétricos provocará uma mudança no perfil de produtos da indústria automobilística devido ao aumento da escala de produção. Produtos como baterias, geradores, motores elétricos, semicondutores, transformadores e produtos de fibra de carbono podem ter um aumento de consumo de 1.000% [9].

Outro ponto importante que merece ser destacado, a exemplo das corridas de automóveis que são utilizadas como laboratórios para o desenvolvimento e teste de novas tecnologias e soluções ousadas, os veículos elétricos podem vir a ser um excelente campo para teste e desenvolvimento de novas tecnologias para vários novos componentes e subsistemas. Como exemplo pode-se destacar a direção eletro-hidráulica, sistemas de frenagem regenerativa, materiais mais leves, pneus com baixos coeficiente de rolamento, novos sistemas de assentos entre outros.

Os veículos elétricos proporcionam também um grande desafio para a indústria eletrônica, pois exigem o desenvolvimento de várias tecnologias para que estes veículos sejam mais competitivos, eficientes e simples. O que as empresas buscam, apesar do avanço já obtido nas diversas linhas de pesquisa, é tornar os veículos elétricos competitivos em relação aos veículos a combustão normalmente utilizados hoje, em função sobretudo das enormes vantagens em relação ao meio ambiente proporcionadas pelos veículos elétricos. O maior entrave para se atingir este objetivo é o sistema de suprimento de energia destes veículos.

1.2.1. A Importância dos Sistemas de Suprimento Energético

O sistema energético utilizado atualmente nos veículos elétricos baseia-se quase que exclusivamente no uso de baterias eletroquímicas. Os sistemas híbridos desenvolvidos por algumas das grandes indústrias automobilísticas, como o Aachen Car¹ [10], apenas para citar um dos inúmeros exemplos de veículos com estas características, por um lado possibilitam, graças a propulsão elétrica, que o veículo possa trafegar em

1 - O Aachen Car utiliza um motor a combustão de 50 kW de potência e um motor elétrico de 30 kW ligado a um banco de baterias de níquel-cádmio com capacidade energética de 7 kWh; foi desenvolvido sobre a plataforma de um *Escort station wagon*, pela Universidade de Aachen, EUA, em conjunto com duas divisões da Ford, uma americana e outra alemã.

alguns trechos urbanos sem gerar poluição; mas ao utilizar o motor a combustão para impulsionar o veículo, o gasto de combustível será maior pois ele estará carregando o peso de todo o sistema elétrico inativo. Com isso a redução de emissões durante o tempo total de funcionamento do veículo não justificaria a adoção deste sistema, podendo ser apenas uma solução paliativa para as cidades que adotarem uma legislação rigorosa a ponto de exigir veículos com emissão zero de poluentes dentro de seu perímetro urbano.

Para que os veículos elétricos possam vir a ser competitivos em relação aos veículos a combustão interna sem perder uma das suas mais importantes e desejáveis características que é a emissão zero de poluentes, seria necessário que tivessem um meio de suprimento energético contínuo que não gerasse poluição. É exatamente esta a grande vantagem da célula de combustível. Porém, em função do seu atual estado de desenvolvimento tecnológico, como será discutido posteriormente, o seu preço ainda é muito elevado, principalmente para aplicações automotivas.

Através de um sistema híbrido célula de combustível/baterias eletroquímicas pode-se aumentar as vantagens dos veículos elétricos, mantendo-se um sistema compacto de conversão combustível/eletricidade que não gera poluição, com uma melhor relação energia armazenada/peso do veículo e um custo melhor ou igual aos sistemas de suprimento energético compostos apenas por baterias. A questão fundamental é: qual a proporção ideal entre um e outro sistema? Existem alguns veículos experimentais utilizando este sistema híbrido, como é o caso do Green Car [11] (que será mais detalhado posteriormente) e o LaserCell [12]. Nestes dois casos, entretanto, foi maximizado o uso das células de combustível o que acabou tornando os veículos mais caros e com uma relação espaço útil/espaço total desfavorável, sendo que no caso do Green Car o espaço ocupado pelas células excedeu a linha de desenho do veículo.

Na literatura disponível (acadêmica/científica), até o momento nenhum trabalho foi encontrado que tenha sido realizado com o intuito de equacionar esta questão, que vem de encontro ao interesse da indústria ligada ao setor, no sentido de viabilizar as células de combustível através de nichos mercadológicos que possibilitem determinadas escalas de produção que permitiriam reduzir os seus custos. A Daimler-Benz, posicionada como a 15ª maior indústria automobilística do mundo, investiu 145 milhões de dólares na compra de um quarto da empresa canadense Ballard Power Systems, líder

mundial na tecnologia de células de combustível, e está investindo outros 150 milhões para criar um novo veículo a célula de combustível. Através de uma "joint-venture" com a própria Ballard, pretende produzir 100.000 células de combustível por ano a partir de 2005 [13].

A Ballard trabalha para a maior parte das indústrias do setor automobilístico que desenvolvem veículos alternativos. A Toyota é uma das raras exceções e investiu sozinha neste segmento 700 milhões de dólares em um ano, em desenvolvimento de tecnologia em sua própria casa. O engenheiro da Toyota, Bill Reinert, diz que a Daimler-Benz tem uma história de grande conservadorismo empresarial no que diz respeito aos grandes negócios e segundo ele, estes já são considerados uma das mais conservadoras atividades do mundo. Sendo assim, ele afirma que quando uma Daimler-Benz coloca centenas de milhões de dólares numa tecnologia, deve-se levá-la muito a sério [13].

Além dos veículos já citados tem-se conhecimento da existência de alguns outros protótipos, como uma nova van híbrida da Daimler-Benz, mas nestes casos não há literatura técnica disponível, o que é compreensível quando se considera a atual "corrida" tecnológica nesta área e as quantias importantes já investidas por estas empresas.

Por esta razão a proposta desta Tese é contribuir no sentido de se criar um mecanismo de escolha adequada para a proporcionalidade ideal entre os dois sistemas; baterias e células, utilizando como referência um veículo idealizado de acordo com as características selecionadas entre modernos veículos elétricos existentes.

2 - Os Veículos Elétricos

Os veículos elétricos tiveram destaque do final do século passado até meados da segunda década deste século, quando ocorreu um maior desenvolvimento de carros com motor a combustão interna [14], que foram ganhando mercado de forma acelerada, enquanto os veículos elétricos deixaram de ser vendidos nos anos 30 por serem mais caros e mais lentos. Com o agravamento dos problemas ambientais, os veículos elétricos voltaram a ser considerados principalmente para serem utilizados nas grandes cidades, como uma alternativa aos veículos com motor a combustão.

2.1. Histórico dos Veículos Elétricos

Em 1870 David Salomon motorizou uma carruagem com um sistema elétrico. O lançamento do primeiro veículo elétrico ocorreu em 1881 pela Paris Onibus Company, possibilitado a partir do aparecimento das baterias de chumbo-ácido. Em 1888 Londres já contava com seu primeiro ônibus elétrico. Em 1891 W.Morrison foi o primeiro a construir um veículo elétrico que recebeu especial atenção na América. Em 1895 o carro de Morrison participou de uma corrida de mais de 80 km de percurso, entre Chicago e Evanston, não vencendo devido a uma forte nevasca que caiu durante a prova. W. A. Bersey construiu para a London Electric Cab. Co. Ltd., em 1897, os primeiros táxis elétricos, que chegaram a operar por dois anos.

Na França do final do século XIX, um veículo movido por um motor elétrico alimentado por bateria alcançou o primeiro recorde de velocidade. Já em 1898, durante um percurso de mil metros, atingira-se 63 km/h de velocidade média. No ano seguinte o belga Camille Jenatzy superou esta marca com a velocidade de 106 km/h com o veículo chamado “Le Jamais Contnt”, que possuía a forma de um torpedo. Em 1902 a marca de 137 km/h era alcançada pelo americano Charles Baker graças aos avanços tecnológicos implementados em seu veículo, quase alcançando o recorde mundial da época, sendo impedido por um problema mecânico que o tirou da competição [14].

As características dos veículos elétricos tais como o baixo nível de ruído, a baixa trepidação, a não emissão de poluentes, principalmente a espessa fumaça em forma de fuligem emitidas pelos veículos com motor a combustão da época, proporcionavam maior conforto aos seus usuários como também evitavam assustar os animais de tração que ainda eram muito utilizados naqueles tempos e faziam dos veículos elétricos a

opção das classes sociais mais altas. A maior facilidade de controle e condução e a menor necessidade de alavancas e comandos era outra característica exclusiva dos veículos elétricos em relação aos a vapor e a gasolina, que permitia aos fabricantes de veículos elétricos trabalharem para proporcionar um aspecto mais nobre, graças à possibilidade de ocultar motor e baterias, obtendo-se um estilo mais requintado e exclusivo. A Figura 2 mostra um modelo de veículo fabricado em 1914, que foi de Henry Ford. Este veículo tinha uma autonomia de 50 km e alcançava aproximadamente 32 km/h de velocidade.

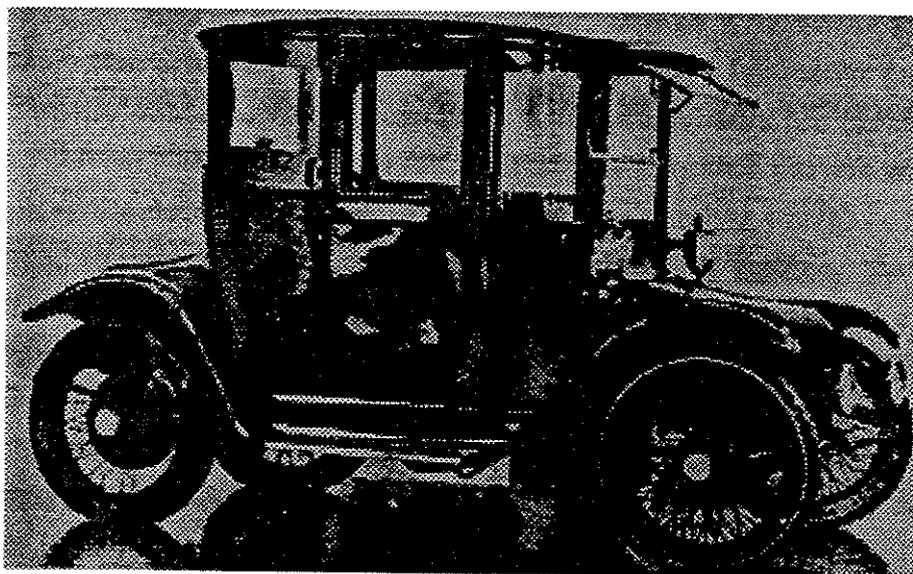


Figura 2 – Veículo elétrico produzido em 1914, de uso pessoal de Henry Ford [15].

A produção de veículos elétricos começou a entrar em declínio pouco antes do final da década de vinte, em consequência principalmente da ascensão do petróleo como vetor energético, quando todos os seus derivados passaram a ser consumidos em larga escala, somada ao rápido desenvolvimento do motor a combustão interna. Este fato fez com que o carro com tração elétrica fosse perdendo competitividade, enquanto os veículos a combustão interna tinham seu volume de vendas rapidamente aumentado, ultrapassando a marca de um milhão de veículos, como mostra a Tabela 2.

A limitação da autonomia, o grande peso das baterias e a dificuldade de recarregá-las, somados às características de aceleração, acarretaram a falta de competitividade dos veículos elétricos como automóveis, deixando-os restritos a

algumas aplicações, como por exemplo trolebus, metrô, veículos comerciais de entrega (utilizados na Inglaterra até hoje), empilhadeiras de uso industrial, etc.

Tabela 2 - Produção de veículos de passageiros de 1889 a 1933 nos EUA [14; 15].

ANO	ELÉTRICO	VAPOR	GASOLINA
1889	1.575	1.681	936
1904	1.425	1.568	18.699
1909	3.826	2.374	120.393
1914	4.669		564.385
1919	2.489		1.649.127
1924	391		3.185.490
1929	757		4.454.421
1933	0		1.560.599

2.2. Características dos Veículos Elétricos

Há grandes diferenças entre um veículo normal adaptado para utilizar um sistema elétrico e outro projetado para este fim. O primeiro aspecto é o próprio *design* do veículo. Este deve possuir diversas características próprias, específicas para melhorar o desempenho, a funcionabilidade e reduzir o consumo de energia. O peso é um fator fundamental. Como a grande barreira dos veículos elétricos é exatamente o suprimento de energia, que exige um volume e peso maior para uma pequena e limitada capacidade energética, torna-se premente compensar esta limitação reduzindo ao máximo o peso de todos os demais componentes do veículo, sem com isso perder em resistência e funcionabilidade. Pelo contrário, é preciso até aumentar a resistência de partes estruturais da carroceria e demais componentes como suspensão e freios, devido ao maior esforço que o aumento de peso provocado pelos sistemas de acúmulo de energia elétrica acarreta. Para garantir uma autonomia mínima aceitável, assim como um nível de potência satisfatória do veículo, torna-se necessário utilizar um grande número de baterias ou combinar dois ou mais sistemas de fornecimento de energia elétrica. No caso das baterias eletroquímicas em especial, as mais utilizadas são as de chumbo-ácido, devido às suas características de funcionabilidade, devendo-se normalmente dimensionar um número suficiente de baterias para praticamente o dobro da energia

desejada, pois para se preservar sua durabilidade não é recomendável descarregá-las mais do que 50% de sua capacidade de carga total. Como consequência, torna-se imprescindível no caso dos veículos elétricos determinar com exatidão a aplicação e o desempenho esperados do veículo, para que se possa encontrar o ponto ideal de maior eficiência entre a quantidade de baterias utilizadas em relação ao peso total e o desempenho do veículo [16].

A segurança e o conforto dos passageiros de um veículo elétrico têm merecido especial atenção. É desejável que um veículo elétrico ofereça os mesmos itens de conforto que um veículo comum de mesma categoria. A direção hidráulica e o ar-condicionado são equipamentos quase que obrigatórios, não só pela questão de maior comodidade mas no caso da direção hidráulica também pela segurança, pois devido ao acréscimo de peso a dirigibilidade de um veículo elétrico normalmente se torna mais difícil, provocando a necessidade de se empregar um maior esforço para manobras.

2.2.1. Estrutura do Veículo

A carroceria dos modernos veículos elétricos é projetada utilizando-se uma estrutura em ligas especiais de duralumínio que conferem grande resistência e baixo peso, sendo as partes externas normalmente feitas de plástico injetado. O sistema de suspensão é dimensionado para ser simples e leve, com a resistência adequada para o tamanho do veículo.

Todos os pontos que contribuem para o aumento do desempenho e a redução do consumo de energia são criteriosamente estudados. A aerodinâmica do veículo é um fator importantíssimo. Sua influência é significativa apenas a partir de velocidades médias para altas, aumentando a influência quanto mais rápida for a velocidade. Mede-se sua eficiência através do coeficiente de arrasto. Como base para comparação, um Ford modelo A fabricado em 1930 tinha um coeficiente de arrasto na ordem de 0,83; os veículos de passageiros da década de sessenta possuíam este coeficiente na ordem de 0,60 sendo que, os veículos esportes experimentais da mesma época alcançavam valores na faixa de 0,25 [15]. Atualmente os modernos veículos de passeio com *design* mais avançado já estão com valores próximos a este último. O coeficiente de arrasto de dois recentes e modernos veículos elétricos projetados com propósitos comerciais, que são o FEV da Nissan japonesa e o Impact posteriormente rebatizado como EV1 da

General Motors americana, que serão citados no final deste Capítulo, alcançaram valores na faixa de 0,19, e são os mais baixos índices alcançados nesta categoria atualmente [17]. A Figura 3 mostra um estudo de design de um veículo elétrico.

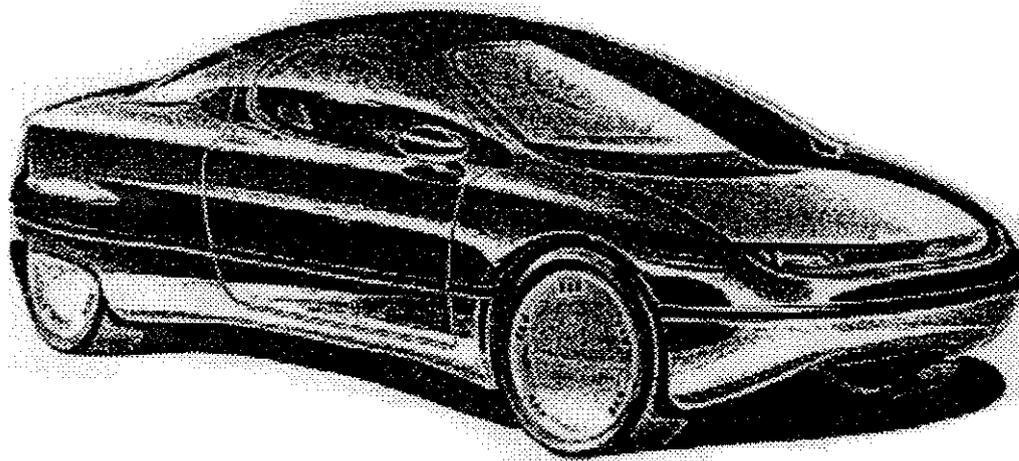


Figura 3 - Estudo de *design* de um veículo elétrico [18].

A resistência de rolamento, provocada principalmente pelo atrito dos pneus com o solo, tem uma influência oposta ao do coeficiente de arrasto aerodinâmico, pois tem uma influência maior no desempenho do veículo na faixa de velocidade mais baixa. Pneus com nova composição de polímeros, capazes de trabalhar com maior pressão interna, tem sido desenvolvidos pela indústria como meio de reduzir a resistência de rolamento provocada. Os pneus desenvolvidos para serem utilizados no FEV e no EVI possuem uma resistência de rolamento de aproximadamente 0,005, valor este que praticamente equivale a metade do valor alcançado para os pneus convencionais. A Figura 4 mostra a foto e o esquema de composição do pneu utilizado pelo FEV.

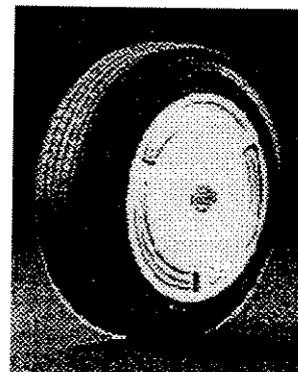
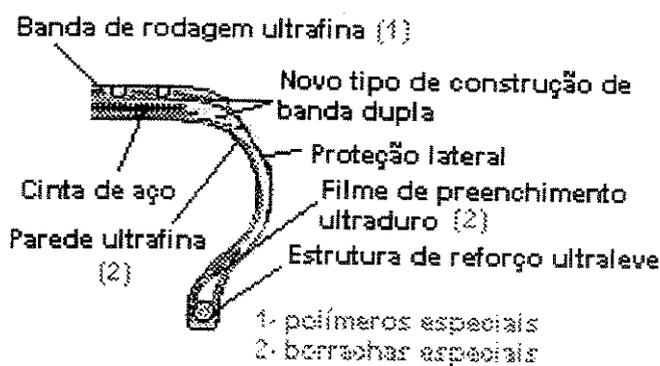


Figura 4 – Esquema das principais características de um pneu de baixa resistência de rolamento.

Foto de um pneu de baixa resistência de rolamento [18].

2.2.2. Tecnologia do Sistema de Propulsão

Diversos fatores devem ser considerados para a adoção de um sistema de potência para um veículo elétrico: [14,17]

- quantidade de motores;
- tipo e quantidade de caixas de transmissão;
- tipo de conversor e controle, e os valores de máxima corrente e voltagem;
- características do motor em relação à velocidade e torque;
- tipo de sistema de suprimento de energia e capacidade de potência;
- esquema das baterias e/ou abastecimento no caso de veículos híbridos;
- relação da redução do eixo do veículo.

A tecnologia no sistema de propulsão elétrica do veículo possui três áreas principais: motor, controle e eletrônica de potência.

O controlador envia sinais para o conversor, estes são ampliados por um *driver* que comanda os dispositivos de potência do conversor, cuja função é transferir e regular, com alta eficiência, a eletricidade da principal fonte energética para o motor. O funcionamento da parte de eletrônica de potência depende da técnica de controle utilizada e do hardware implementado. A Figura 5 apresenta o sistema de energia e o diagrama de blocos do FEV que será apresentado a seguir.

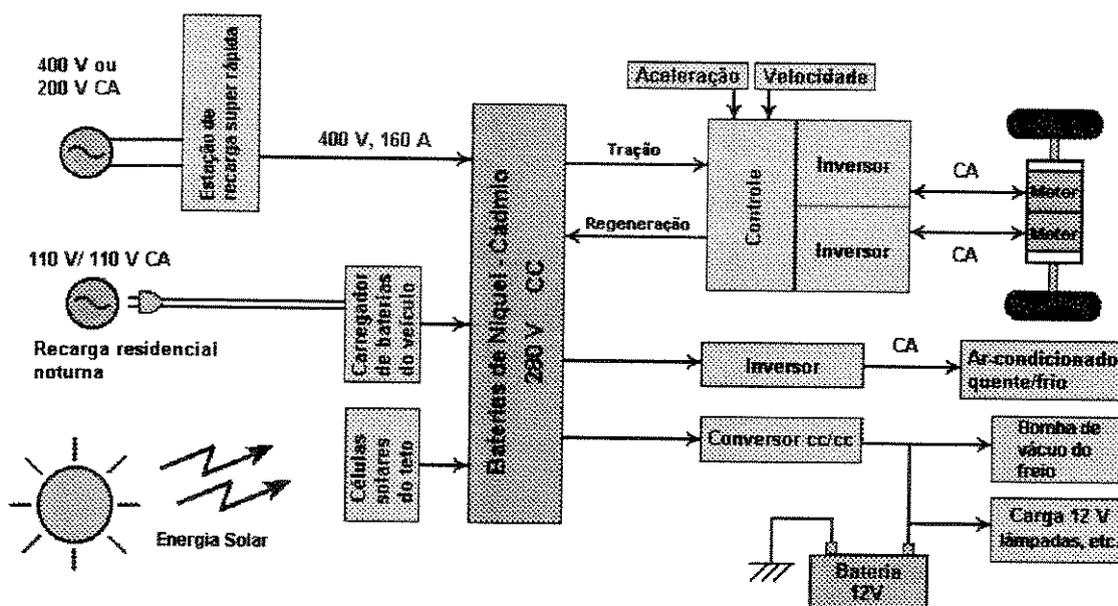


Figura 5 - Sistema múltiplo de energia e diagrama de blocos do FEV. [17, 18]

2.2.3. Tecnologia das Baterias

Atualmente o único tipo de bateria economicamente viável, disponível e tecnologicamente madura para aplicação em veículos elétricos ainda é a de chumbo-ácido. Mesmo que versões modernas tenham alcançado maior tempo de vida útil e menor custo, o desempenho e a autonomia das baterias de chumbo ácido não melhoraram muito. As baterias disponíveis no mercado hoje para aplicações automotivas podem alcançar aproximadamente 750 ciclos, considerando-se ciclos de descarga profunda. A densidade de energia e densidade de potência de pico, considerando descargas de até o máximo de 50 % de sua carga total, são respectivamente 33 Wh/kg e 93 W/kg. A maioria das baterias de tecnologias avançadas proporcionam desempenho, potência e tempo de vida útil significativamente maior que as baterias de chumbo ácido [19].

As baterias com tecnologia baseada em níquel receberam um grande interesse ultimamente. As baterias níquel-ferro (Ni-Fe), níquel-cádmio (Ni-Cd) e níquel-hidreto (Ni-MH), que trabalham à temperatura ambiente, possuem alta potência e alta densidade energética. Porém estes sistemas apresentam diferenças fundamentais entre si em relação aos seguintes aspectos: toxicidade de material, possibilidade de trabalhar selada, densidade de energia, densidade de potência, ciclos de vida, etc. [20].

As baterias de Ni-Fe possuem uma densidade energética de 50 Wh/kg, a vida útil está limitada em apenas cerca de 300 ciclos, a densidade de potência de pico é de aproximadamente 100 W/kg. Porém, além da curta vida útil o sistema requer manutenção excessiva. A eficiência de energia é tão baixa que 50% de sobrecarga pode ser necessário. Se o sistema projetado for aquoso, haverá o problema da remoção segura de hidrogênio e oxigênio, especialmente em função da sobrecarga exigida.

As baterias Ni-Cd atingem 55 Wh/kg de densidade energética através da utilização de um eletrodo de hidróxido de níquel e a não utilização de baterias seladas. A densidade de potência de pico é de 190 W/kg, porém o grande problema das baterias Ni-Cd é a toxicidade do cádmio. Esta é uma deficiência fundamental que as desqualificam como uma solução racional para o problema de poluição ambiental.

Já as baterias Ni-MH despontam como mais promissoras para aplicação em veículos elétricos. A densidade de energia está na faixa de 54 Wh/kg, a densidade de potência de pico é de 174 W/kg e a vida útil é relativamente longa. São baterias que utilizam materiais seguros em relação aos aspectos ambientais, sendo hermeticamente

selada e livre de manutenção. Suportam bem sobrecargas e sobredescargas, tornando-as interessantes para produção em série. Outra grande vantagem das baterias de Ni-MH é a não utilização de cádmio.

A bateria de zinco-bromo (Zn-Br) tem uma tecnologia relativamente madura, porém ainda há alguns obstáculos técnicos difíceis de serem superados. A densidade energética é bastante alta, da ordem de 72 Wh/kg, o que torna o sistema atraente. Mas a baixa densidade de potência de pico, que está por volta de 53 W/kg, é bastante inferior às outras baterias, tornando-a imprópria para aplicação em veículos elétricos.

As baterias de Sódio-Enxofre (Na-S) foram consideradas as de melhor potencial. Porém as pesquisas tem trabalhado com densidades de energia de mais de 150 Wh/kg, quando na prática esta densidade de energia está por volta de 80 Wh/kg e a densidade da potência de pico alcança os 100 W/kg. A temperatura de operação destas baterias está na faixa de 350° C, que somada à alta reatividade do sódio requer que elas sejam construídas com grande robustez e segurança.

Baterias mais avançadas como monossulfeto de ferro-lítio, dissulfeto de ferro-lítio, e polímero de lítio tem recebido grande empenho em pesquisa e desenvolvimento, por possuírem menor peso, alta densidade energética, alta densidade de potência de pico. Maiores detalhes sobre as baterias eletroquímicas podem ser obtidos na dissertação de mestrado do autor [21].

A Tabela 3 mostra a comparação entre baterias avançadas e a de chumbo-ácido convencional com descarga limitada a 50% de sua capacidade [22].

Tabela 3 – Comparação das baterias mais avançadas em relação à bateria chumbo-ácido.

Baterias	Densidade energética relativa	Densidade de potência relativa	Tempo de vida útil	Eficiência Energética (%)
Pb-H ₂ SO ₄	1,0	1,0	1,0	78
Ni-Fe	1,5	1,2	2,0	58
Ni-Cd	1,6	1,9	2,1	80
Ni-MH	1,7	2,1	2,3	76
Zn-Br	2,2	0,6	2,1	75
Na-S	2,5	1,1	3,4	91
Li-FeS ₂	4	4	4	80
Li-Polímero	4	3,5	4	85

2.3. A Aplicação dos Modernos Conceitos Tecnológicos em Veículos Elétricos

A pesquisa e o desenvolvimento tecnológico nas diversas áreas da engenharia que envolvem o projeto de veículos elétricos não tem se restringido à experimentos com protótipos, nem tão pouco tem se limitado a laboratórios ou centros de pesquisas. As grandes montadoras de veículos do mundo tem trabalhado seriamente no desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos, com um empenho nunca antes visto, e tem alcançado resultados muitas vezes surpreendentes. As Figuras 6 e 7 mostram respectivamente os veículos elétricos compactos produzidos pela japonesa Honda e pela francesa Peugeot.



Figura 6 - Veículo elétrico urbano produzido pela Honda [23].



Figura 7 - Veículo elétrico urbano produzido pela Peugeot [9].

Existem inúmeros exemplos de veículos elétricos, entre eles o Impact/EV-1 da americana General Motors e o FEV da japonesa Nissan, já mencionados anteriormente terão algumas de suas características apresentadas a seguir, por que estas serão utilizadas como referência no Capítulo 6.

2.3.1. O Veículo Elétrico da General Motors - *IMPACT/EV-1*

O Impact, mostrado na Figura 8, foi desenvolvido pela General Motors Corporation como um protótipo de veículo elétrico cujo objetivo era servir de base para um veículo a ser lançado no mercado americano. Em setembro de 1997 uma versão deste veículo foi colocada à venda com o nome de EV-1. O Impact acelera de 0 a 100 km/h em apenas 8,5 segundos. A capacidade de aceleração do veículo mostra claramente a preocupação da montadora com a performance e o apelo esportivo dos futuros veículos elétricos.

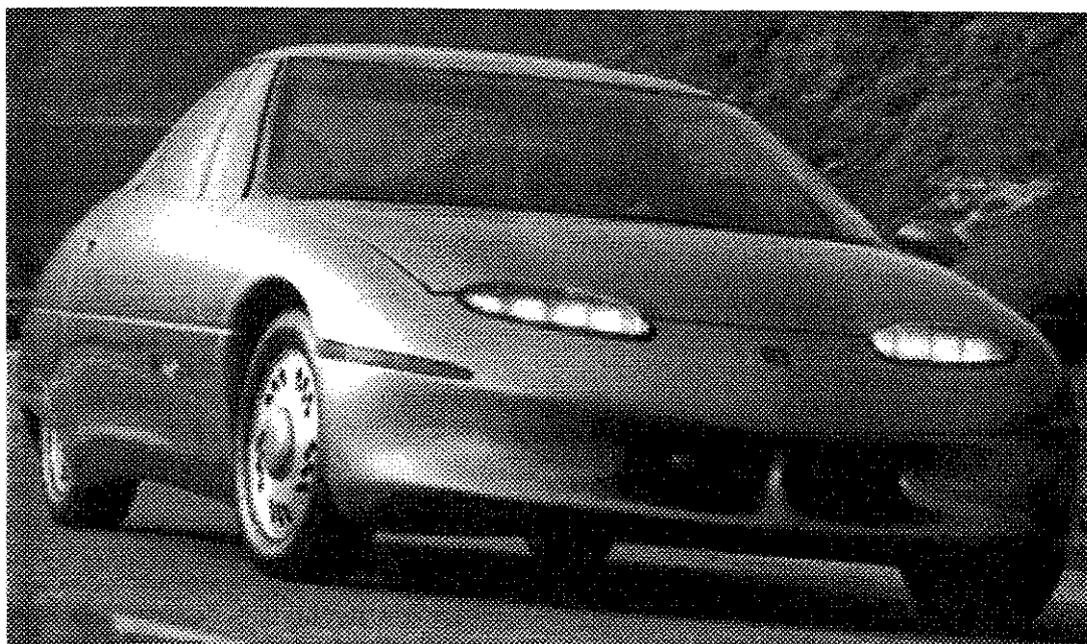


Figura 8 - Foto do Impact/EV-1 [24].

O Impact foi projetado com todos os cuidados a nível de segurança que se exige de um veículo avançado. Os avanços técnicos desenvolvidos e adotados em seu projeto visavam não só a aplicação em veículos elétricos mas também aos veículos convencionais do futuro. Entre estas tecnologias destacam-se as aplicadas nas seguintes partes: chassi e carroceria, motor e inversor, baterias, sistema de carga para as baterias, sistema de direção, sistema de suspensão, pneus e rodas, sistema de freios e interior do veículo. A Ficha técnica do EV-1 é apresentada na Tabela 4. O motor e as baterias serão rapidamente comentados pois serão utilizadas como referência no Capítulo 7.

A Tabela 4 apresenta a Ficha técnica do EV-1 [25].

Carroceria	Coupê/ 2 portas/ 2 passageiros
Dimensões: Comprimento	4.140 mm
Largura	1.732 mm
Altura	1.207 mm
Distância entre eixos	2.422 mm
Peso	1.368 kg
Potência máxima	102 kW
Pico de potência reaproveitada através da frenagem regenerativa	71 kW
Bateria / quantidade / tipo	27 baterias Chumbo-ácido / recombinação de gases
Sistema de baterias / voltagem	312 V
Sistema de baterias / capacidade	16,8 kWh
Sistema de baterias / peso	500 kg
Direção	Pinhão / cremalheira Acionamento Eletro-hidráulico
Pneus	175 / 65 R-14 Goodyear
Aceleração	0 a 100 km / h em 8,5 s
Autonomia	130 km
Velocidade máxima (Eletronicamente Limitada)	130 km / h

a- Motor:

Este veículo na sua versão mais recente passou a utilizar um único motor de 102 kW no lugar dos dois de 54 kW do primeiro protótipo. Este novo motor possui sistema de refrigeração por fluido líquido e é um motor de corrente alternada acoplado às rodas dianteiras do veículo. O inversor principal alimenta o motor com corrente alternada. Outros dois módulos de inversores de alta voltagem estão ligados de maneira subordinada ao inversor principal, sendo que um deles fornece eletricidade para movimentar o motor da bomba da direção hidráulica e o outro fornece 12 V para alimentar os acessórios do veículo e 48 V para suprir o sistema de climatização [25].

b- Baterias:

Na última versão deste veículo utilizam-se 27 baterias chumbo-ácido de 12 V, com pressão controlada e recombinação de gás. Elas são dispostas em um suporte em forma de 'T', que é instalado na parte inferior do veículo, sendo que 12 baterias ficam dispostas entre os bancos e o restante na parte de trás dos bancos. Uma das baterias fornece energia para os acessórios de baixa voltagem e as outras 26 baterias fornecem energia para a unidade motriz do veículo. Elas foram especialmente projetadas para fornecer altas densidades de corrente por curtos espaços de tempo. Noventa e oito por cento dos componentes das baterias podem ser reciclados. O total de energia disponível nas baterias equivale ao que proporcionaria 5,7 litros de gasolina. A vida útil destas baterias é estimada em uma faixa média de 40.000 km. A Tabela 5 descreve as especificações das baterias do EV-1.

Tabela 5 - Especificações da bateria utilizada no EV-1 [26].

Voltagem	12 V
Capacidade inicial à taxa de 25 A para 10,5 V a 48° C	47,8 Ah
Capacidade de Pico à taxa de 25 A	52,8 Ah
Peso do monobloco	17,8 kg
Volume do monobloco	7,43 l
Potência obtida a taxa de 400 A por 10 s com carga total a 48° C	4,10 kW
Energia estocada de pico à taxa de 25A	0,626 kWh
Energia específica de pico à taxa de 25A	35,2 Wh/kg

2.3.2. O Veículo Elétrico da Nissan - FEV

O FEV, mostrado na Figura 9, possui apenas 900 kg de massa de acordo com a ficha técnica do fabricante apresentada pela Tabela 6. Isto em parte se deve ao fato que este veículo utiliza baterias de níquel-cádmio, que possuem maior densidade energética

do que as de chumbo-ácido, possibilitando que apenas 200 kg de baterias armazenem 11,6 kWh de energia, com a vantagem que pode-se utilizar praticamente 100 % desta carga sem prejuízo para as baterias. Porém, estas baterias são bem mais caras que as de chumbo-ácido (cerca de 10 vezes) e tem a grande desvantagem de utilizar o cádmio, elemento muito tóxico, que no caso de um acidente poderia causar danos ao meio ambiente, o que restringe a sua aplicação em veículos elétricos que tem como principal apelo serem ecologicamente corretos.

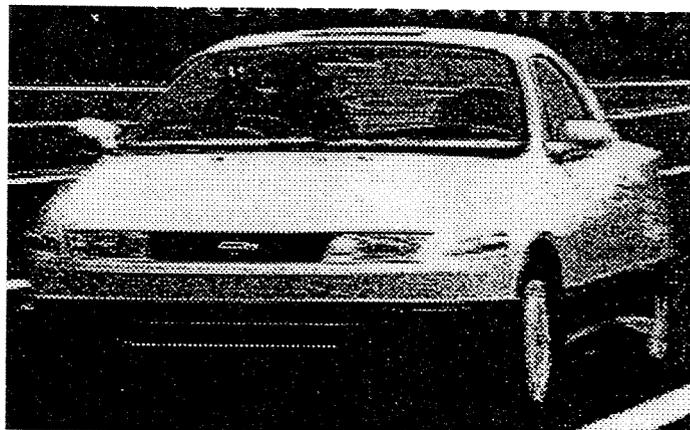


Figura 9 - Foto do FEV [18].

A Tabela 6 apresenta a Ficha técnica do FEV [18].

Tipo de Carroceria	Coupê/ 2 portas/ 2 passageiros		
Dimensões:	Comprimento	3.995 mm	
	Largura	1.698 mm	
	Altura	1.290 mm	
	Distância entre eixos	2.436 mm	
Peso	900 kg		
Potência máxima nominal	40 kW (2 motores de 20 kW)		
Sistema de baterias / voltagem	280 V		
Sistema de baterias / capacidade	11,6 kWh		
Sistema de baterias / peso	200 kg		
Aceleração	0 a 400 m	em	20,0 s
	0 a 40 km / h	em	3,6 s
Autonomia por carga de bateria	40 km / h (constante)	250 km	
	trânsito urbano	100 km	
Velocidade máxima	130 km / h		

2.4. Sistemas de Suprimento de Energia para Veículos Elétricos

A fonte de energia de um veículo elétrico tem sido usualmente, até os dias atuais, um banco de baterias; porém ela pode ser também híbrida, com uma fonte de força elétrica e um motor a combustão, ou uma turbina, ou um volante (sistema eletromecânico), ou duas ou mais fontes diferentes de energia elétrica.

Segundo o Technical Committee 69 (Electric Road Vehicles) of the International Electrotechnical Commission [27], "um veículo é considerado híbrido quando a energia de propulsão, durante uma aplicação operacional específica, é proveniente de duas ou mais qualidades ou tipos de energia estocada, fontes ou conversores, sendo pelo menos um conversor ou fonte armazenadora instalada no próprio veículo."

Ainda, "um veículo elétrico híbrido (VEH) é um veículo híbrido no qual pelo menos uma das energias armazenadas, fontes ou conversores podem derivar de energia elétrica."

Na UNICAMP, a experiência mais recente em veículos elétricos com sistema energético híbrido foi realizada através do Projeto VEGA, que será apresentado a seguir no Capítulo 3. Entre as opções de sistema de fornecimento de energia para veículos elétricos, as células de combustível tem recebido grande atenção devido à sua potencialidade e suas grandes qualidades como meio gerador de eletricidade, principalmente pela possibilidade de atender as características do que se convencionou denominar de veículo ZEV. Uma explanação geral de sua tecnologia será apresentada no Capítulo 4. As características e o atual estágio tecnológico do tipo de célula mais utilizado em veículos elétricos serão discutidos no Capítulo 5.

3 - A Experiência com o Protótipo VEGA

3.1. Histórico

O Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP, juntamente com o Laboratório de Motores da Faculdade de Engenharia Mecânica e o Laboratório de Dinâmica de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia Elétrica, também ambos da UNICAMP, com o apoio de inúmeras empresas, vem desde 1992 trabalhando no projeto de um veículo ZEV, híbrido elétrico/hidrogênio, denominado VEGA, para uso nos grandes centros urbanos que apresentem problemas graves de poluição atmosférica. O Projeto VEGA foi idealizado inicialmente para ser um veículo dentro do conceito ZEV integralmente, ou seja, como proposta o protótipo utilizaria a energia gerada por um sistema Solar-Hidrogênio que proporciona uma energia limpa e renovável desde a fonte primária até a energia final utilizada para impulsionar o veículo [28]. O sistema Solar-Hidrogênio é composto por painéis fotovoltaicos como geradores primários de energia, um sistema de eletrólise para produzir hidrogênio, que é o energético utilizado como armazenador de energia, e tanques de hidretos metálicos para armazenagem do hidrogênio no local da geração. No veículo, além do sistema normal utilizado por um veículo elétrico - motor, controle e baterias - são instalados tanques de armazenagem de hidrogênio e um outro sistema para conversão deste energético em eletricidade, que pode abastecer as baterias ou fornecer energia diretamente para o motor elétrico do veículo.

A proposta do projeto, ambiciosa e abrangente, envolvia muitas áreas de estudo que normalmente são restritas a poucos países no mundo, dos quais destacam-se EUA, JAPÃO, CANADÁ e ALEMANHA. A primeira questão a ser superada foi a viabilização técnica e financeira do projeto. A questão técnica foi equacionada dividindo-se o projeto em etapas, para que fosse possível o estudo e o gradativo domínio da tecnologia de cada área abrangida. A questão financeira foi em parte contornada com o apoio de mais de quinze empresas do setor privado que, através da doação de equipamentos, peças e/ou serviços, possibilitou uma mudança radical no projeto inicial do protótipo para uma outra proposta bem mais elaborada, que teve por

objetivo e justificativa acelerar a viabilização técnica das etapas posteriores através da maior divulgação, que contempla:

- 1- A importância do aspecto educativo na questão ambiental, que depende da conscientização da população para mudanças mais significativas na sua prevenção.
- 2- O incentivo ao apoio, por empresas da iniciativa privada, de projetos de pesquisa, mostrando também que o marketing social pode trazer um grande retorno para as empresas, compensando com vantagens os investimentos.
- 3- A contribuição para a projeção da universidade e suas realizações, não só nos meios acadêmicos mas também para toda a sociedade.

A primeira etapa deste projeto, que consistiu na construção e testes de um protótipo inicial não otimizado, foi concluída no início de 1995.

3.2. Características do Projeto

O projeto foi idealizado para ser executado em quatro etapas. A primeira objetivava a construção de um protótipo que procurasse atender às características básicas de um veículo para uso urbano, utilizando como fonte de propulsão um sistema híbrido hidrogênio/eletricidade, ambos produzidos a partir da energia solar. As metas iniciais foram: o estudo da aplicação do sistema Solar-Hidrogênio como fonte de energia para veículos [21]; a aquisição da tecnologia básica dos veículos elétricos e do carregamento das baterias no próprio veículo; o estudo do processo de conversão do hidrogênio em eletricidade no próprio veículo. O primeiro protótipo utilizou um conjunto motor-gerador adaptado ao consumo de hidrogênio para o carregamento das baterias. A adaptação deste motor, originalmente a gasolina, para o uso de hidrogênio exigiu extensos estudos [29;30;31] que não serão abordados aqui por não serem pertinentes ao tema deste trabalho.

As etapas subsequentes do projeto VEGA tinham por objetivo o aperfeiçoamento dos subsistemas através do aprofundamento dos aspectos científicos e o desenvolvimento tecnológico das principais áreas envolvidas. Na sua versão final previsto para a quarta etapa, objetivava-se construir um veículo elétrico dentro dos mais avançados conceitos tecnológicos, que utilizaria um sistema energético híbrido com baterias e uma célula de combustível alimentada por hidrogênio armazenado em um

tanque de hidretos metálicos. O hidrogênio seria produzido por eletrólise da água a partir de energia solar fotovoltaica.

As características que nortearam o projeto do protótipo na sua primeira etapa foram:

a- Pequena autonomia:

Uma grande autonomia para o uso do veículo em meio urbano foi considerada desnecessária, uma vez que a maior cidade do Brasil, São Paulo, possui uma área de aproximadamente 1500 km², o que equivale a um círculo de 44 km de diâmetro. Se o veículo tivesse uma autonomia entre 80 e 100 km, seria suficiente para percorrer diariamente duas vezes este círculo de um lado a outro (ida e volta).

b- Baixa velocidade:

A linha de raciocínio adotada na época era que para o tráfego em perímetro urbano a velocidade limite é de 80 km/h (vias de trânsito rápido), sendo que a maioria das vezes a velocidade máxima é de 40 km/h (vias secundárias). Portanto concluiu-se que 80 km/h satisfaria como velocidade máxima aos veículos urbanos.

c- Pouca aceleração:

Acreditava-se que no perímetro urbano das cidades não haveria a necessidade de elevadas taxas de aceleração, uma vez que as velocidades máximas são reduzidas e as ultrapassagens são muito limitadas, exceto nas avenidas e vias expressas. Esta idéia foi reforçada com base na norma SAE 227 Ja - D (que será apresentada no Capítulo 6), que estipula o tempo de 28 s para acelerar um veículo elétrico de 0 a 72 km/h.

d- Baixa potência:

Como considerava-se que no caso de veículos urbanos as velocidades e acelerações seriam reduzidas, então a potência desenvolvida não necessitaria de valores elevados. A exceção ficaria por conta das ladeiras onde, dependendo da inclinação e da velocidade de subida, a potência requerida poderia ser mais significativa. Como exemplo considerou-se o caso de uma ladeira bastante íngreme, com 30° de inclinação, percorrida a uma velocidade de 20 km/h por um veículo de 0,8 tonelada, quando a potência efetiva mínima necessária calculada foi de 22kW (29 HP).

Definiu-se uma potência de 15 kW para a primeira fase do protótipo, valor este baseado no seguinte raciocínio: um veículo convencional que faz 10 km/l de gasolina a 80 km/h, ou seja, que consome 8 litros de gasolina a cada hora, consome uma energia equivalente a 72,3 kW (o poder calorífico inferior da gasolina é de 10.500 kcal/kg e sua densidade 0,740 kg/litro). Como os motores convencionais apresentam uma eficiência em torno de 20%, a potência efetiva desenvolvida pelo veículo é de 14,5 kW.

e- Peso reduzido:

A quase totalidade dos veículos urbanos se refere ao transporte de passageiros, em geral de duas pessoas. Imaginava-se inicialmente que nestes casos não haveria a necessidade de grande quantidade de recursos e acessórios, sendo desejável uma massa reduzida do veículo, a fim de possibilitar uma maior eficiência do conjunto, menores custos de compra, uso e manutenção.

Uma massa reduzida é sempre desejável, porém neste primeiro protótipo esta característica foi sacrificada, uma vez que os recursos do projeto foram bastante limitados, e a maioria dos componentes do veículo não foi projetada especificamente para esta finalidade.

3.3. Características do Veículo

Os principais componentes do protótipo, mostrados esquematicamente na Figura 10, são descritos a seguir:

a - Chassi / Carroceria

Chassi adaptado de um veículo normal, do tipo utilitário (perua Kombi), de onde foi retirada e aproveitada a plataforma com o assoalho, a suspensão dianteira e traseira.

Fornecedor: Laboratório de Hidrogênio da Unicamp.

Carroceria do tipo “pick-up” (dois passageiros), desenvolvida exclusivamente para o protótipo, com partes em fibra de vidro e outras em chapa metálica.

Executada no Laboratório de Hidrogênio da Unicamp.

Empresas colaboradoras no fornecimento de peças, acessórios e /ou serviços: Aerodina, Delco, Cedros, GPC, Falantão, Fanavid, Rodão, 3M, K.S.recuperadora, Vidrocar.

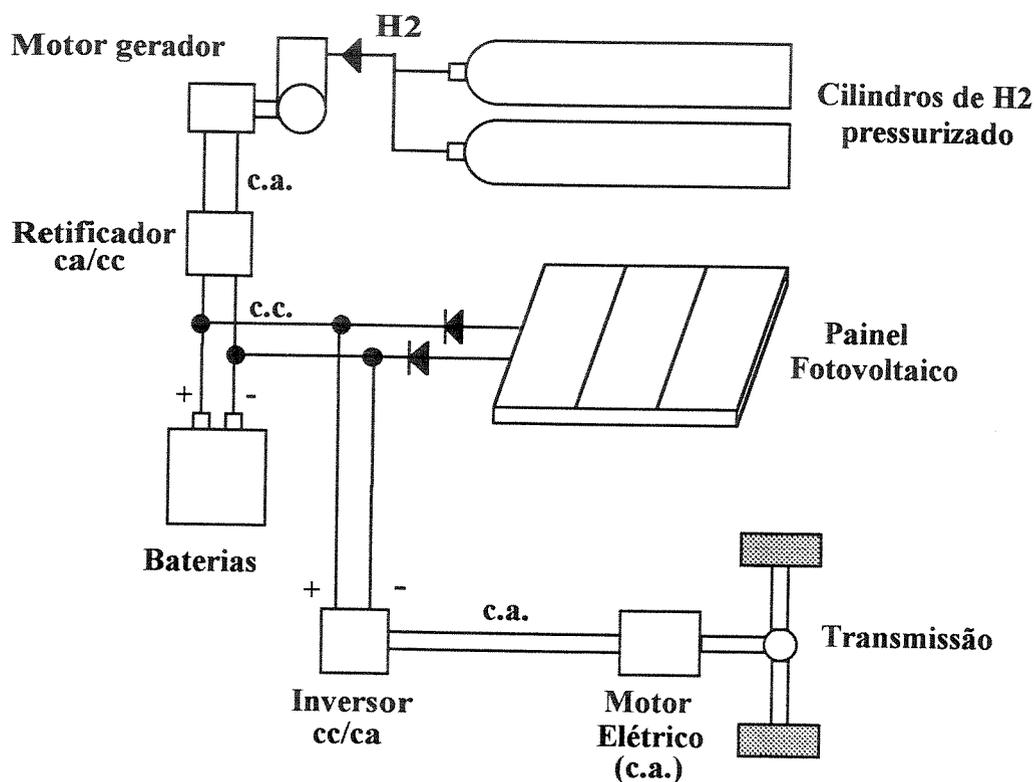


Figura 10 - Principais componentes do protótipo do veículo de tração híbrida solar-hidrogênio-elétrica.

b - Motor Elétrico

Tipo corrente alternada trifásico (gaiola de esquilo), potência de 15 kW (20 HP), 75 V, 60 Hz, massa 120 kg.

Fornecedor: WEG Motores

c - Inversor

Conversor de frequência série CFW-03, modelo 88/380, corrente nominal 135 A, potência 88 kVA., dimensões em mm 1080 x 410 x 370, massa 102 kg.

Fornecedor: WEG Automação

d - Baterias

Modelo DELCO 2000, tipo chumbo-ácido, com grades de liga chumbo-cálcio, laminados-expandidos e placas de grande espessura e alta densidade. Tensão nominal de 12 V, capacidade nominal 115 Ah (em 100 h a 25° C até 10,5 V). Número de baterias: dez para tração e duas para a parte elétrica do veículo, massa de cada uma: 27,3 kg.

Fornecedor: Delco Remy (atual Delphy Systems)

e - Painel de Células Fotovoltaicas

Módulos de células de silício monocristalino, totalizando uma área de aproximadamente $2,0 \text{ m}^2$, tensão de saída 12 V e potência máxima 200 W.

Fornecedor: Heliodinâmica

f - Motor-Gerador

Motor monocilindro de quatro tempos, originalmente a gasolina, com potência do gerador de 2500 W (3,3 HP) adaptado ao uso de hidrogênio.

Fornecedor: Yanmar do Brasil

g - Cilindros de H₂

Dois cilindros de 0,25 m de diâmetro e 1,55 m de altura, incluindo as válvulas. A capacidade é de 6 Nm^3 de hidrogênio a 150 kgf/m^2 , a massa é de 60 kg, para cada cilindro.

Fornecedor: Laboratório de Hidrogênio

Os detalhes sobre os itens acima estão na dissertação de mestrado do autor [21], apenas a parte estrutural será novamente abordada neste trabalho pela sua relevância em relação às considerações referentes ao desempenho do veículo efetuadas no Capítulo 6.

- Chassi / Carroceria

As limitações impostas ao projeto (financeiras, de pessoal, de equipamentos, de tempo, entre outras) não permitiram o desenvolvimento e execução de um chassi próprio, obrigando a utilização de uma plataforma adaptada, extraída de um veículo do tipo perua (Kombi), pertencente ao Laboratório de Hidrogênio. Dentre as opções possíveis na época, era a mais imediata e a única completamente disponível, razão pela qual foi escolhida, mesmo com prejuízo do desempenho, devido ao atraso tecnológico e dimensionamento inadequado deste chassi, que impossibilitou a execução de um projeto moderno e racional, envolvendo estudos de ergonomia, “*design*”, desempenho das partes estruturais e mecânicas, dentro de um padrão mais técnico.

Inicialmente o protótipo foi montado de forma despojada, pois a sua utilização, limitada pela carência de recursos e prejudicada pela utilização de equipamentos inadequados para aquele fim (os componentes doados para o projeto eram produtos comerciais desenvolvidos para outras aplicações), estava restrita à experimentos básicos, sem grande compromisso com um bom desempenho. Sendo assim, a primeira versão da estrutura foi construída apenas com tubos fixados sobre a plataforma, que teriam a finalidade de sugerir uma forma, como as linhas gerais de um desenho num papel. O resultado pode ser visto nas Figuras 11 e 12.

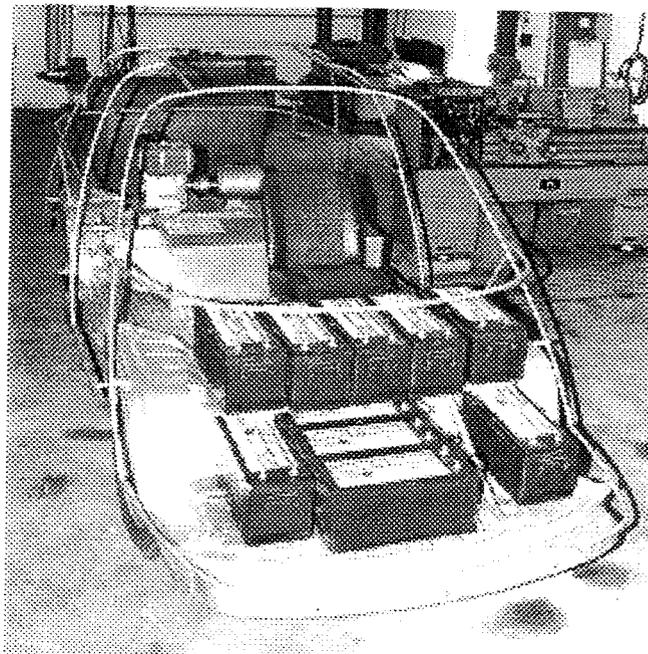


Figura 11 - Fase inicial da construção do protótipo (vista frontal).

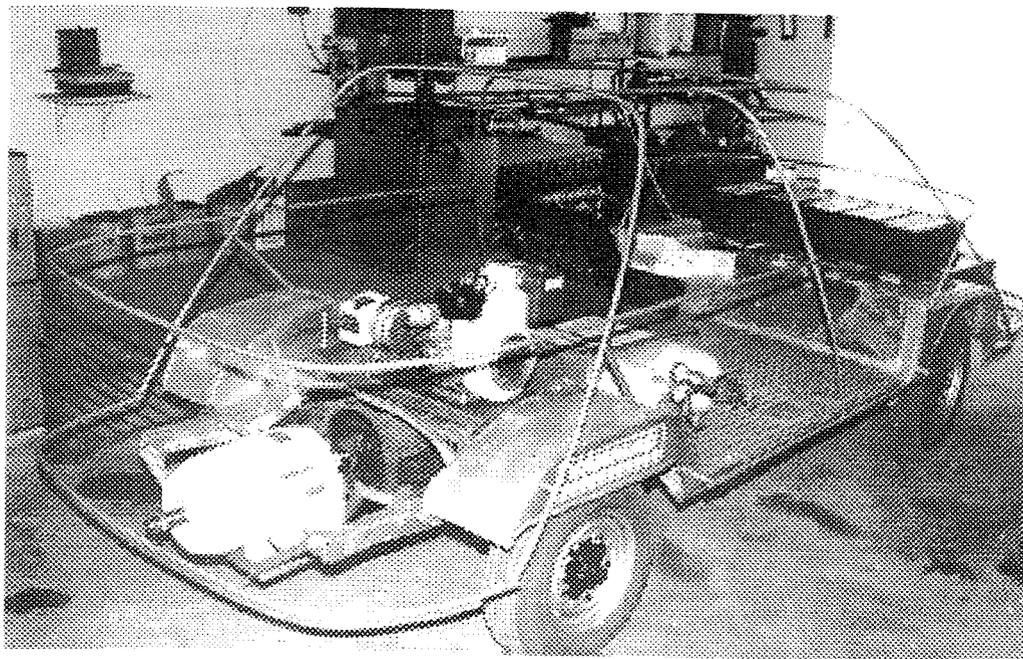


Figura 12 - Fase inicial de construção do protótipo (vista lateral posterior).

Com o crescente interesse das primeiras empresas em apoiar o projeto e a adesão de novas empresas, foi possível mudar radicalmente a proposta inicial e investir num projeto mais elaborado. A transformação foi gradativa, sendo implementada conforme aumentava a confiança e a flexibilidade em relação ao apoio oferecido inicialmente. A Figura 13 mostra uma foto do veículo no início da sua transformação e a Figura 14 mostra o veículo depois de concluído.

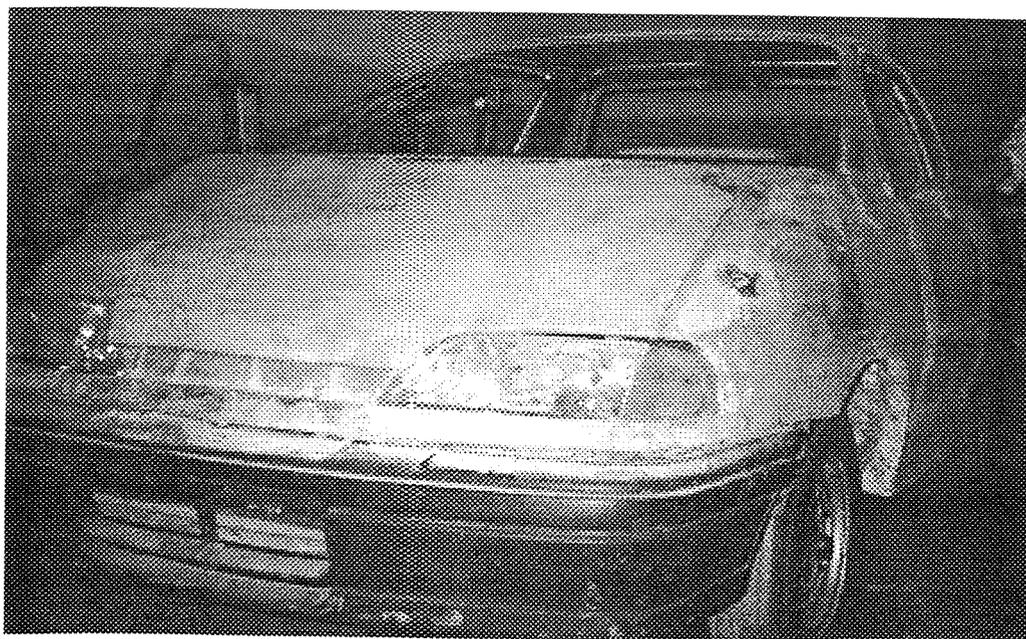


Figura 13 - Fase intermediária da reestruturação do veículo.

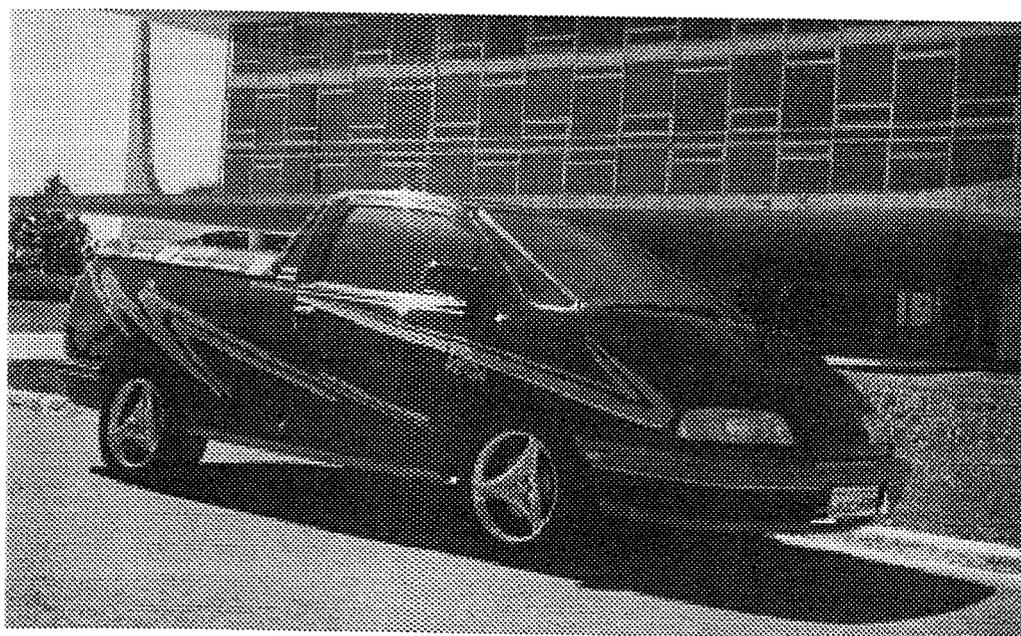


Figura 14 - O Protótipo com a sua parte externa já concluída.

3.4. Desempenho do Protótipo

Os testes realizados com o protótipo VEGA na pista mostraram que os valores de aceleração e a capacidade de superar rampas, previamente calculados para a potência esperada do motor, não foram atingidos. A velocidade máxima alcançada também foi bastante modesta. Em relação à autonomia, os valores precisaram ser estimados devido ao uso intermitente do veículo nos testes, uma vez que, em função dos ajustes necessários nos equipamentos, em especial no inversor, foi impossível o uso contínuo do veículo.

O inversor, que sofreu pouquíssimas modificações para ser instalado no VEGA (foi o único equipamento que não foi doado para o projeto mas, apenas emprestado por um período de dois anos), causou diversos problemas, entre eles, dois tipos em especial atrapalharam bastante os testes do veículo. O primeiro foi em relação aos buracos ou valetas pois, toda vez que o protótipo recebia um pequeno solavanco o inversor desligava-se automaticamente; o outro foi em relação à velocidade da aceleração do veículo, ou seja, se o acionamento do sistema de aceleração fosse muito rápido, positiva ou negativamente, o inversor também desligava-se, tornando a condução do veículo difícil e até perigosa.

Inicialmente foi previsto que o protótipo não precisaria de câmbio porque, através do inversor, esperava-se garantir o torque necessário em toda faixa de condução do veículo. Na prática isto não ocorreu, porém só foi constatado depois que o veículo estava pronto, e o motor já havia sido adaptado no chassi sem a embreagem, não sendo viável uma nova adaptação para incluí-la. Então, uma alavanca foi adaptada para que fosse possível a utilização das duas primeiras marchas do câmbio, que não havia sido retirado porque a sua carcaça é o suporte dos eixos de transmissão traseiro do veículo. Posto isto, os valores alcançados foram os seguintes:

- Velocidade máxima (2ª marcha): 50 km/h
- Autonomia (estimada): 50 km
- Inclinação máxima superável (1ª marcha): 15°

Nos cálculos de desempenho feitos previamente foram considerados as eficiências acumuladas dos componentes de potência do veículo pelo limite inferior, porém em relação à estrutura do veículo não era possível obter nenhum valor como parâmetro, por

que o protótipo era completamente diferente dos demais veículos; o chassi utilizado estava bastante desgastado e recebeu grandes modificações, sendo que apenas através de laboratórios especializados seria possível fazer este tipo de medição. Na verdade, o que precisava ser determinado, que neste caso influenciou de forma marcante o funcionamento previsto, é a força de resistência ao rolamento, devido às características desfavoráveis dos sistemas de transmissão e rolamentos e também em função dos pneus utilizados, que eram muito largos para um veículo elétrico. Esta diferença entre os valores estimados e os realmente obtidos evidenciou a importância do projeto do chassi e suas partes móveis, assim como da carroceria (devido ao coeficiente de arrasto aerodinâmico) e também de cada equipamento separadamente em função da necessidade de redução de massa e da eficiência do equipamento, uma vez que, a quantidade de energia no veículo é muito limitada e deve ser direcionada para o sistema de potência. A massa do chassi e carroceria do VEGA é de aproximadamente 780 kg.

A massa total do VEGA, subtraindo-se o sistema energético (baterias, motor-gerador, cilindros de hidrogênio), equivale a aproximadamente 1.000 kg, que se comparada com a massa do veículo FEV (700 kg), exposto no Capítulo 2, apresenta uma diferença de 300 kg em termos de valores absolutos, mas na verdade em termos de valores relativos é muito maior, pois deve-se lembrar que o protótipo VEGA é completamente despojado, não possui nenhum tipo de acessório e, muitos dos equipamentos necessários em um veículo normal não foram instalados por falta de recursos e/ou por serem desnecessários para um veículo experimental em uma fase primária de desenvolvimento.

Enfim, em um veículo elétrico o projeto da carroceria e de todos os acessórios é fundamental para o bom desempenho do conjunto e interfere de forma significativa nos resultados finais. Por isto que os fabricantes dão tanta atenção para os detalhes, conforme foi comentado no Capítulo 2.

Na continuidade do projeto VEGA uma nova configuração do protótipo foi preparada já sem o motor-gerador, como fase intermediária para a construção de um novo veículo que já será equipado com uma célula de combustível e tanques de hidretos metálicos.

As características destes novos componentes foram inicialmente estimadas com base na experiência obtida na primeira fase do projeto. A utilização de uma célula de combustível e de um tanque de hidretos metálicos exigiram também a compatibilização

e a otimização de trocas térmicas e o consumo de gás, associadas à potência (elétrica) desenvolvida pelo veículo.

A estrutura do veículo deverá ser leve para não comprometer o peso total, proporcionar boa acomodação para dois passageiros mais bagagem, comportar todos os componentes que compõem o sistema de tração (tanques de hidrogênio, baterias, motor elétrico, célula de combustível, etc.), e os demais sistemas de um veículo convencional (sistema de freio, suspensão, luzes, etc.).

Como foi observado com o VEGA, é extremamente desejável que o veículo não seja um veículo convencional comercial, de maneira a não relacioná-lo diretamente com um dos fabricante tradicionais, provocando uma confusão das entidades e/ou empresas participantes do projeto com o fabricante, permitindo uma melhor divulgação do projeto, de seus objetivos e intenções. Por outro lado, o uso de chassi, componentes e peças de veículos convencionais é muito interessante, pois significa uma grande economia de recursos e tempo na construção da estrutura, como também ficou comprovado no caso do VEGA.

Portanto, a carroceria do veículo deverá ser projetada e desenhada baseando-se em um chassi convencional, utilizando-se de componentes e peças também comerciais, de forma a abrigar todos os equipamentos, o sistema energético, além de acomodar confortavelmente dois passageiros, com espaço para suas bagagens, porém apresentando um design exclusivo e, de forma a expressar a modernidade da proposta do veículo, futurista. Uma experiência que pode ser aproveitada foi a realizada com o VEGA, onde utilizou-se laterais de um veículo convencional (dessa maneira evitou-se problemas de portas, vidros, etc.), apresentando-se na frente e traseira, feitas em fibra de vidro, o design exclusivo do veículo.

O dimensionamento correto das principais características do veículo, assim como dos componentes de potência, é básico para a execução deste novo protótipo. O objetivo inicial desta Tese era o projeto e construção deste novo protótipo, mas devido aos atrasos no projeto aqui será apresentado apenas os cálculos dos principais componentes, que entretanto já representam uma contribuição original ao tema. Por outro lado, este trabalho vem de encontro com a necessidade de se determinar uma proporcionalidade mais apropriada entre o sistema energético híbrido: célula de combustível/ baterias eletroquímicas, para que o uso racional das células facilite a sua introdução no mercado, conforme será discutido no Capítulo 5.

4 - As Células de Combustível

A energia elétrica é, entre as formas de energia exploradas pela humanidade, uma das mais importantes, limpa, conveniente e largamente utilizada. No presente, os sistemas mais usuais de geração de eletricidade são o hidroelétrico, o térmico e o nuclear. Todos estes sistemas produzem eletricidade através de geradores rotativos que convertem energia mecânica em energia elétrica. Porém, para determinadas aplicações a sua utilização é limitada devido à impossibilidade de acúmulo como energia elétrica, sendo preciso transformá-la em um outro tipo de energia que seja armazenável. Entre as formas possíveis de se armazenar a energia elétrica, as baterias, dentro do tema deste trabalho, são as mais conhecidas e empregadas. Quando carregadas possuem energia química armazenada em seus reagentes (eletrólito e eletrodos) obtida através de uma corrente elétrica recebida de uma fonte externa. Quando solicitadas por uma carga, liberam energia elétrica através da reação química inversa de seus reagentes. A capacidade de armazenagem das baterias está diretamente ligada às suas dimensões e seu peso; portanto não se apresentam adequadas para o acúmulo de grandes quantidades de energia elétrica.

Uma outra forma de armazenamento de energia elétrica é a geração de hidrogênio via eletrólise e sua (re)conversão em eletricidade através de células de combustível. Uma célula de combustível é um sistema estático para geração de energia elétrica que opera através da conversão da energia química de reagentes em eletricidade. Porém, diferente de uma bateria eletroquímica, esta energia química se apresenta na forma de um combustível, contido num tanque externo à célula, e um oxidante, que suprime a célula quando solicitados. Não há mudanças nos eletrodos quando ela está em funcionamento e sua capacidade de geração é diretamente proporcional à potência de conversão e a disponibilidade de suprimento de combustível. Pode-se compará-la neste aspecto a um motor à explosão que utiliza a energia química de um combustível (gasolina, diesel, álcool, gás, etc.), que é queimado na câmara de combustão juntamente com o oxigênio retirado do ar e tem sua capacidade de gerar trabalho limitada pela sua potência e a disponibilidade de combustível fornecida. Todavia, quanto à forma de trabalho ela difere do motor, pois converte energia química em energia elétrica sem a passagem intermediária pela energia térmica.

Tem-se então um meio contínuo de geração de energia elétrica, que a exemplo de uma bateria eletroquímica converte energia química diretamente em energia elétrica.

Uma célula de combustível isoladamente não é um meio armazenador mas sim um conversor de energia.

4.1. Definição de uma Célula de Combustível

Uma célula de combustível é uma célula galvânica na qual a energia química de um combustível é convertida diretamente em energia elétrica por meio de processos eletroquímicos. O combustível e o agente oxidante são contínuo e separadamente fornecidos aos dois eletrodos da célula nos quais eles sofrem reações.

Células de combustível são células primárias que geram eletricidade à medida que forem sendo alimentadas de materiais ativos ou reagentes. Em contraste, células primárias tradicionais, como os elementos das baterias eletroquímicas, fornecem energia elétrica através de materiais ativos armazenados em eletrodos sólidos, sendo conseqüentemente de capacidade limitada. Esta limitação aplica-se igualmente para células secundárias, ou acumuladores que, depois da descarga, requeiram regeneração do material do eletrodo ativo através de uma fonte externa de corrente elétrica. As células podem operar com diversos tipos de combustíveis como carvão, hidrocarbonetos, alcools, aldeídos e hidrogênio [32].

Estes conversores de energia têm diversas vantagens: peso e volume relativamente baixos, ausência de partes móveis, são silenciosos e possuem capacidade para resistir a sobrecargas. A eficiência situa-se entre 30 e 75% e, em contraste com o desempenho de máquinas térmicas ou máquinas de combustão interna, aumenta com o decréscimo da carga. Além de alguns problemas tecnológicos não solucionados, a grande desvantagem prática das células de combustível é que os combustíveis mais baratos, como carvão ou gás natural, são particularmente difíceis de serem utilizados eletroquimicamente de forma direta, havendo necessidade de convertê-los em outros combustíveis, principalmente hidrogênio.

Porém as células possuem propriedades vantajosas que as qualificam para muitas aplicações, aumentando em número com os avanços de seu desenvolvimento tecnológico. Algumas destas aplicações, já implementadas ou em fase de

implementação, são: como fonte de geração de eletricidade para veículos espaciais; propulsão submarina e tração de uma variedade de veículos de superfície; para a geração em fontes elétricas auxiliares de emergência (para hospitais, hotéis, *shoppings centers*); para fornecimento de energia em localidades distantes e não assistidas por rede elétrica; usada em associação com processos técnicos eletrolíticos para economizar energia e para a utilização de combustíveis de origem biológica de baixo grau.

4.2. Histórico das Células de Combustível

Em 1839 Grove fez um experimento que pode ser considerado como a primeira reação eletroquímica de um combustível com oxigênio em uma célula galvânica. Ele obteve hidrogênio e oxigênio através da eletrólise de ácido sulfúrico com dois eletrodos de platina, e percebeu que eles eram eletroquimicamente ativos e haviam estabelecido uma voltagem de circuito aberto entre os eletrodos de cerca de 1 volt. Porém, a densidade de corrente que esta célula eletrolítica poderia prover era tão pequena que nenhuma aplicação prática foi encontrada [32].

Ostwald, co-fundador da nova ciência Físico-Química, junto com Van't Hoff e Arrhenius, deu uma conferência em 1894 para o *Bunsengesellschaft* (a sociedade nacional alemã dedicada a novos assuntos). Nesta, eles profetizaram que o próximo século seria um futuro onde máquinas poderiam trabalhar dentro dos princípios da nova ciência, ao invés de trabalhar sob leis regidas pelas mudanças de volume de gases sob a influência das trocas de calor, que tinham sido estabelecidas recentemente pela física. As novas máquinas trabalhariam sem a necessidade de caldeiras a vapor, chamas, fuligem e fumaça e outras formas de poluição. Elas converteriam a energia química de combustíveis diretamente em trabalho, em lugar de ter de convertê-las antes em calor através de um ciclo térmico ineficiente. Ostwald claramente acreditava que a máquina a vapor, com seus 10% de eficiência na época, seria substituída por uma máquina eficiente e não poluente que geraria eletricidade diretamente de fontes de energia química e que poderia iniciar uma nova civilização no século posterior. O primeiro e mais importante passo para o trabalho de desenvolvimento prático que uma célula de combustível teve foi dado por Ostwald nesta reunião inaugural do *Bunsengesellschaft* de 1894. Ele substituiu a máquina térmica por uma célula de

combustível na qual o carbono reagia com o oxigênio para produzir gás carbônico. Uma melhor eficiência na obtenção de energia elétrica só poderia ser conseguida evitando-se a limitação de eficiência do ciclo de Carnot; deste modo uma melhora sensível seria feita utilizando-se o carvão como matéria-prima. Nos anos seguintes Nernst, Haber e especialmente Baur e seus seguidores, desenvolveram esta idéia [33].

A Figura 15 ilustra uma célula desenvolvida por Baur e Preiss para a reação com carbono e oxigênio do ar para formar gás carbônico, operando a 1.100°C . A alta temperatura era necessária por causa da baixa reatividade do carbono. Apenas baixas densidades de correntes foram alcançadas e a vida útil da célula era muito pequena.

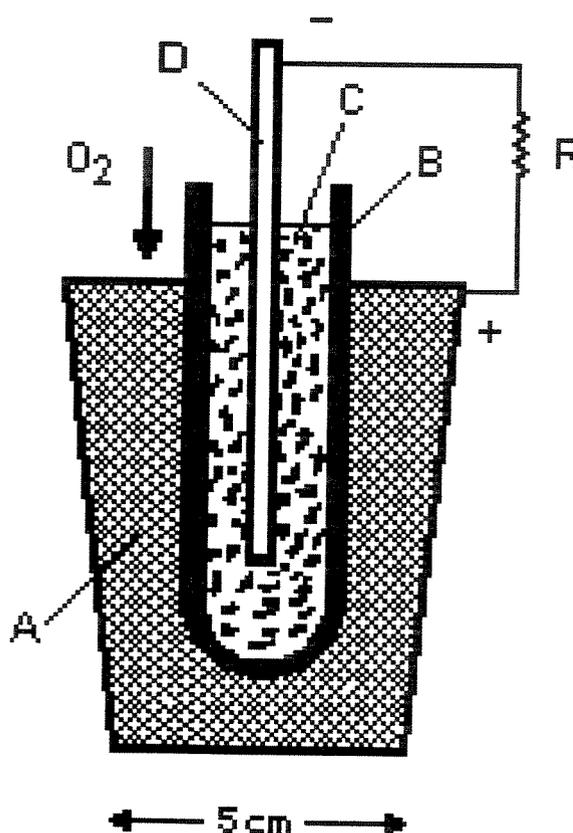


Figura 15 - Célula Carbono/Oxigênio de eletrólito sólido. A) Magnetita; B) Eletrólito sólido; C) Carbono em pó; D) Haste de carbono [32].

Diversos sistemas foram pesquisados com eletrólitos de sal fundido e aquoso, assim como sólidos; os resultados destes estudos prévios foram sintetizados em uma revisão por Bauer e Tobler. Além do carbono, combustíveis como hidrogênio,

monóxido de carbono, acetileno, gás de carvão, petróleo e açúcar foram usados. A visão geral era que o tipo mais desejável de sistema seria aquele que operasse à temperatura ordinária e usasse um eletrólito alcalino, um eletrodo de carbono-ar, e um eletrodo de metal (para reação de combustível gasoso ou líquido), com um potencial próximo ao do eletrodo de hidrogênio. Estas características ainda hoje são desejáveis.

Bons eletrodos de gás já eram conhecidos antes de 1933. O chamado eletrodo de difusão para hidrogênio foi desenvolvido por Schmid em 1923. Era feito de carbono com a superfície coberta por uma fina camada porosa de metal nobre. A idéia principal era prover o gás por um lado da placa do eletrodo (ou por dentro do eletrodo tubular) permitindo com isto o contato com o eletrólito do outro lado. A menos que o gás fosse fornecido ao eletrodo de difusão sob pressão, era essencial fazer o eletrodo hidrofóbico para evitar o encharcamento do sistema poroso com eletrólito. Este problema já tinha sido resolvido para o eletrodo de difusão de carbono em 1930, em relação à célula alcalina zinco-ar. O método mais simples é tratar o eletrodo de carbono com parafina. Em 1889 já havia sido estudado uma outra forma para se evitar o encharcamento do eletrodo de metal poroso. Envolve o uso de um "portador de eletrólito" do seguinte modo: Mond e Langer construíram uma bateria de combustível de hidrogênio-oxigênio com peneiras de platina cobertas com platina negra. O eletrólito de ácido sulfúrico foi colocado em um diafragma poroso (gesso ou amianto) intercalado entre cada par de eletrodo. Sobre a superfície posterior do eletrodo os reagentes gasosos foram colocados em circulação como mostra a Figura 16. Sob condições estacionárias, 0,73 volts a 3,5 mA cm² (2,5 watts por célula) foram obtidos. A oxidação de um anodo do combustível dissolvido em eletrólito também tinha sido previamente estudada (Taitelbaum, 1910; Muller, 1928). Nenhuma das diversas tentativas, porém, resultaram em uma célula de combustível economicamente satisfatória [32].

Após a Segunda Guerra Mundial as pesquisas de células de combustível tiveram um novo impulso. Ficou claro que o uso direto do carbono ou carvão apresentava grandes dificuldades técnicas e a atenção foi focalizada no grupo de células de combustível indireto, que usava substâncias derivadas do carvão, como hidrogênio, monóxido de carbono, ou álcool. Para estas substâncias os processos eletroquímicos inerentes realizavam-se com velocidades que propiciavam resultados práticos (densidades > 10 mA cm⁻² à temperatura ambiente).

O uso de combustíveis reativos, somados com os avanços alcançados no conhecimento da cinética dos eletrodos e catálise heterogênea, conduziu na década de

sessenta a alguns tipos tecnicamente interessantes de células. A maioria delas tinha em comum o uso do hidrogênio, direta ou indiretamente, isto é, a reação potencialmente determinante do eletrodo de combustível consiste na ionização do átomo de hidrogênio.

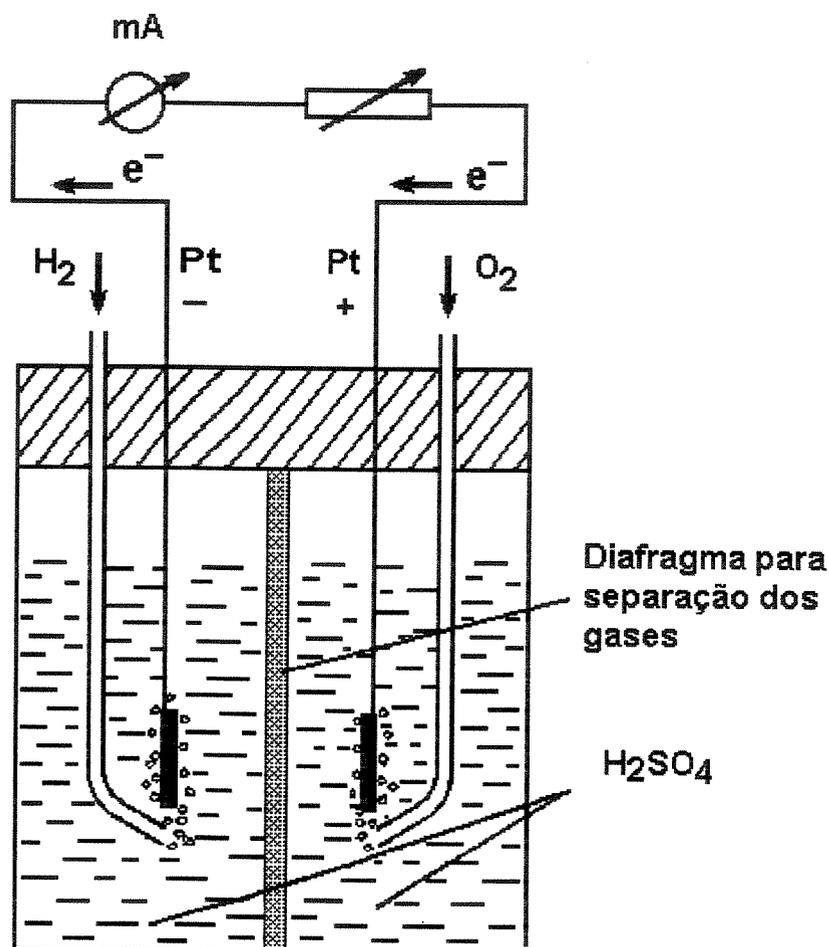


Figura 16 - Princípio de funcionamento de uma célula de combustível H_2/O_2 [32].

4.3. Sistema de Funcionamento de uma Célula de Combustível $H_2 - O_2$

Basicamente uma célula de combustível é o oposto de um eletrolisador. O processo de eletrólise consiste em introduzir uma corrente elétrica contínua entre dois eletrodos submersos num meio aquoso onde um ácido, base ou sal foi dissolvido para tornar a água mais condutiva, provocando-se a quebra das moléculas de água em seus dois constituintes, hidrogênio e oxigênio. Numa célula de combustível do tipo hidrogênio - oxigênio, o hidrogênio introduzido em um eletrodo e o eletrólito reagem

na presença de um catalisador formando ions H^+ , enquanto o oxigênio introduzido no outro eletrodo reage com as moléculas de água do eletrólito, formando ions OH^- . No eletrólito ocorre a combinação do H^+ com o OH^- formando água. O eletrodo do hidrogênio se torna negativo em função da liberação de elétrons, enquanto que o eletrodo do oxigênio se torna positivo em função da absorção de elétrons. O processo é contínuo quando há o consumo de uma carga resistiva ligada ao circuito elétrico externo, que permite o fluxo da corrente simultaneamente à alimentação da célula de combustível pelo combustível e o oxidante. Quando a carga é desligada o processo para, não havendo consumo de hidrogênio nem de oxigênio assim como, ao se interromper o fornecimento dos mesmos, deixa-se de gerar a corrente elétrica.

A conversão direta da energia química do combustível em energia elétrica nas células de combustível evita as grandes perdas, na forma de energia térmica inerentes dos meios de conversão indireta, como por exemplo na conversão de eletricidade através de um gerador movido por um motor a explosão. As leis da termodinâmica determinam que nesta conversão a energia livre de Gibbs, ΔG , que acompanha a oxidação do combustível à temperatura absoluta T é definida pelas correspondentes variações de entalpia e entropia, ΔH e ΔS , descritas pela expressão,

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

a qual determina que a máxima força eletromotriz (fem) E possível na célula é

$$E = - \Delta G/nF$$

onde F é a constante de Faraday (96.493 coulomb) (g equivalente)⁻¹ e n é o número de elétrons por átomo transferidos no decorrer da reação para a qual ΔG está relacionada.

Combustível e oxidante são introduzidos nos eletrodos apropriados com a necessária atividade eletroquímica, estabelecendo potenciais entre eles; os eletrodos do combustível e do oxidante se tornam respectivamente o terminal negativo e o positivo da célula. Se os terminais são conectados por um circuito externo ligado a uma carga elétrica, elétrons liberados do eletrodo do combustível passam pelo circuito para o outro eletrodo de polaridade oposta.

A força eletromotriz de uma única célula de combustível teoricamente é da

ordem de 1,23 volts. Porém na prática se obtém apenas 1 volt. Diversas células são conectadas em série para gerar uma voltagem terminal útil. Esta combinação de células é chamada de módulo. Um número satisfatório de módulos em série ou em paralelo, dependendo do modo de aplicação, constitui o chamado *stack* da célula de combustível. A Figura 17 mostra esquematicamente um stack com destaque de um módulo. A geração elétrica de uma reação eletroquímica depende da transferência de carga por etapa da reação. A reação de 1 mol de hidrogênio com meio mol de oxigênio gera 2 Faradays, ou 53,6 Ah. As reações envolvidas, com várias fases de transferência, dependem normalmente da temperatura de funcionamento, da natureza do eletrólito, e do resultado da reação (se é completa ou se divide-se em produtos intermediários). Outras perdas podem acontecer por decomposição não-eletroquímica do reagente, ou por reação química entre combustível e oxidante, problema este bastante reduzido atualmente.

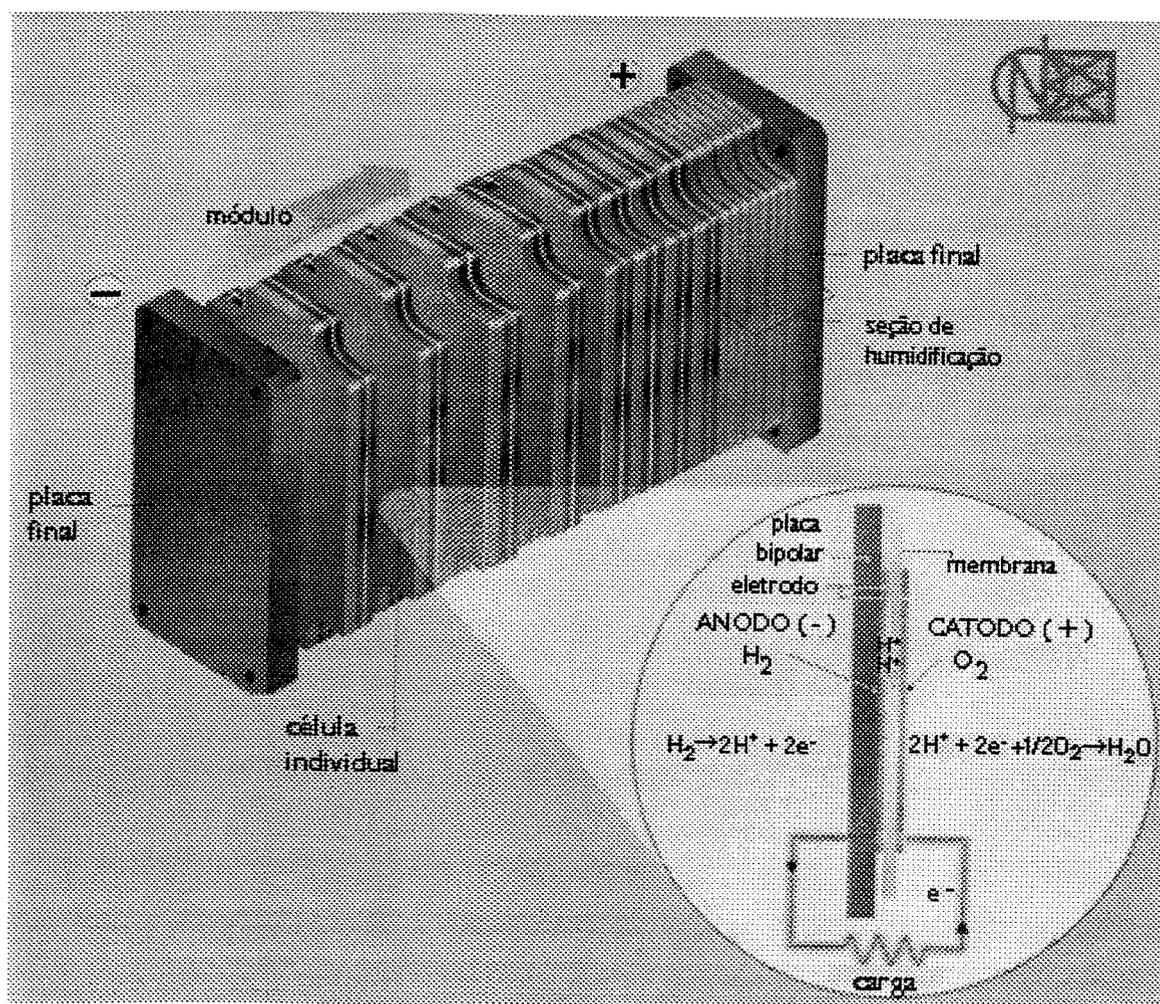


Figura 17 - Conjunto de módulos de uma célula de combustível [34].

A quantidade de energia por unidade de tempo (potência da célula) é determinada efetivamente pela taxa de reação da célula. Isto não depende apenas da reversibilidade do processo de transferência de carga, mas também da transferência de massa dos locais de reação. O fator posterior é complicado pelo fato que a zona de reação é frequentemente situada no interior das ramificações do sistema de finos poros do eletrodo catalisado. Durante a reação podem ser estabelecidos elevados gradientes de concentração nos poros, particularmente para sistemas de duas fases (eletrodo/combustível dissolvido em eletrólito), e se os produtos da reação são pouco solúveis pode ocorrer precipitação e entupimento dos poros [32].

Exceto quando condições extremas de trabalho como altas temperaturas e pressões são utilizadas, a escolha do material do eletrodo cataliticamente ativo é um fator decisivo na obtenção de altas densidades de corrente. A composição do eletrólito pode facilitar ou dificultar a reação do eletrodo, e a construção do eletrodo deve ser tal que possibilite uma área de grande superfície de contato na zona de reação, e simultaneamente garanta uma reação do gás ativo a mais completa possível.

Para a utilização prática de células de combustível é preciso contar com todo um sistema. Além do *stack* da célula é necessário um sistema para alimentação do combustível e do oxigênio em seus respectivos eletrodos. Esta alimentação é feita de forma homogênea e controlada para todas as células simultaneamente, verificando-se a pressão e a vazão.

Quando o oxidante é retirado do ar diretamente, se faz necessário proceder à sua purificação e introduzi-lo na célula na pressão apropriada. Quando se utiliza um hidrocarboneto como combustível, se faz necessário um pré estágio para a transformação deste hidrocarboneto em hidrogênio utilizando-se vapor como reagente, uma vez que é possível a oxidação direta do hidrocarboneto porém esta não é vantajosa em função da baixa velocidade de reação, se comparada com a que ocorre com o hidrogênio. Após a reação o hidrogênio é introduzido na célula também sob pressão apropriada.

Quando a célula está em funcionamento alimentando uma carga, ocorrem perdas que se apresentam na forma de energia térmica. Faz-se necessário então um sistema que retire este calor das células e promova a dissipação no meio ambiente.

A corrente gerada pela célula precisa ser adequada à aplicação desejada, podendo ser utilizada diretamente como corrente contínua ou ainda transformada em corrente alternada.

Enfim o sistema é formado por vários outros componentes incluindo-se sensores e outros dispositivos que promovam a integração dos constituintes que trabalham em conjunto com o *stack* da célula, como ilustrado na Figura 18.

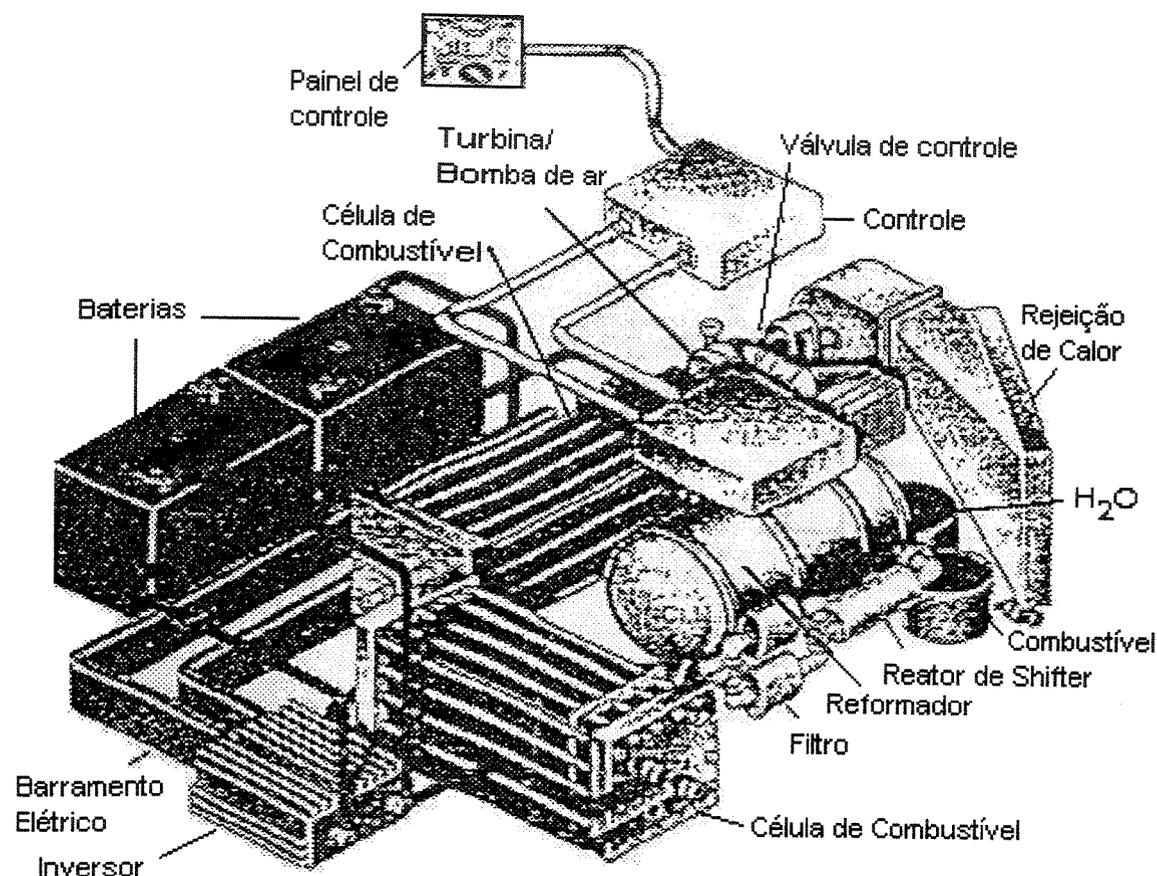


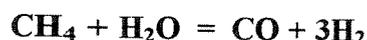
Figura 18 - Ilustração de um sistema de célula de combustível completa tipo hidrocarboneto/ar [35].

4.4. Combustíveis Utilizados em Células de Combustível

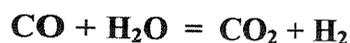
Há vários tipos de combustíveis que podem ser utilizados numa célula de combustível. Considerando-se a facilidade de armazenagem, hidrocarbonetos como o petróleo e o gás natural são mais convenientes, porém são pouco reativos necessitando de temperaturas superiores a 150° C para torná-los reativos. O hidrogênio oxida-se eletroquimicamente com certa facilidade e de forma direta e portanto é considerado o mais importante para este fim.

Uma célula de combustível utiliza o hidrogênio diretamente, sendo que qualquer outro combustível como o carvão, o metanol, o gás natural, etc., para ser empregado em uma célula de combustível, necessita de um pré-tratamento para produção e a separação do hidrogênio. Assim sendo, a grande vantagem de se empregar diretamente o combustível hidrogênio em uma célula é a dispensa da necessidade de, por exemplo, no caso de uma célula a gás natural, prover um sistema de lavagem do gás, um reformador a vapor para converter o gás em hidrogênio e monóxido de carbono combinado com um reator para produzir hidrogênio e dióxido de carbono (reação de shift), conectados com o *stack* da célula de combustível. Neste sistema, o vapor utilizado para processamento do combustível é gerado pelo próprio *stack* da célula e pelo ânodo. Isto requer um mecanismo de realimentação extremamente complexo. Este sistema inclui a purificação e controle de pressão do gás e o aproveitamento do rejeito de calor proveniente da célula. Todo este sistema representa um custo provável de 75 % do custo total da célula a gás natural e aumenta significativamente o seu peso e volume [36].

Para a conversão destes hidrocarbonetos em hidrogênio é interessante efetuar-se a reação na presença de catalisadores de níquel utilizando vapor a 900°C. A reação de reforma do gás metano é a seguinte:



A reação de troca (shift) permite a obtenção de mais H₂ reagindo-se o CO com o vapor a 250°C.



Neste sistema de processamento do combustível utiliza-se, além do calor fornecido pelo *stack* da célula de combustível, o calor da combustão dos gases que provém do ânodo como rejeitos.

Por sua vez uma célula de combustível operando diretamente com hidrogênio utiliza além do próprio *stack* um sistema muito mais simples para a alimentação, que já promove a refrigeração e remoção de água. O sistema de alimentação pode ser projetado de tal forma a utilizar todo o hidrogênio do sistema na célula através de um sistema de retro-alimentação. Comparativamente aos equipamentos utilizados pela

célula de combustível a gás natural, os equivalentes referentes ao hidrogênio são muito mais baratos [36].

4.5. Tipos de Células de Combustível

Há um grande número de tipos de células de combustível. A caracterização das mesmas em grupos distintos, de acordo com as suas características e propriedades, se torna um pouco difícil em razão dos diversos parâmetros que envolvem uma célula, ocasionando que algumas destas particularidades comuns de um grupo intersectam-se com outras também comuns entre um grupo diferente. Uma classificação que distingue claramente os métodos de operação e construção é a que relaciona os estados de agregação dos reagentes. Entre os diferentes tipos de classificação abordados a seguir, destaca-se a classificação pelo tipo de eletrólito, que tem sido a mais utilizada.

4.5.1. Células de Combustíveis Gasosos

Dentro deste grupo uma subdivisão se faz necessária em relação ao agente oxidante, que pode ser líquido ou gasoso.

4.5.1.1. Agente Oxidante Gasoso

O princípio de funcionamento é o seguinte: dois eletrodos de platina são imersos em um eletrólito de grande condutividade, como por exemplo uma solução de ácido sulfúrico ou hidróxido de potássio. Um dos eletrodos é alimentado com hidrogênio gasoso através de um tubo, acarretando o borbulhamento em volta do mesmo. O outro eletrodo é alimentado de forma similar com o oxigênio no estado gasoso. Uma diferença de potencial elétrico de 0,9 a 1,2 volts ocorre quando ambos os eletrodos estiverem ligados a um circuito resistivo. Para cada molécula de hidrogênio consumida dois elétrons passam do eletrodo negativo para o eletrodo positivo, onde eles reagem absorvendo oxigênio. Como oxidante gasoso, além do oxigênio ou do próprio ar do qual este pode ser retirado diretamente, apenas o cloro pode ser utilizado como tal. Já como combustível, muitos gases ou mistura de gases podem ser utilizados

no lugar do hidrogênio. Células que utilizam CO , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , CH_3OH (gás) e uma mistura destes gases com hidrogênio ou com outros gases, já foram experimentados [32].

Dos três tipos de maior destaque de células que utilizam combustível gasosos dois podem ser exemplificados pela Figura 19 o terceiro será mostrado pela Figura 20 no item 4.5.2.

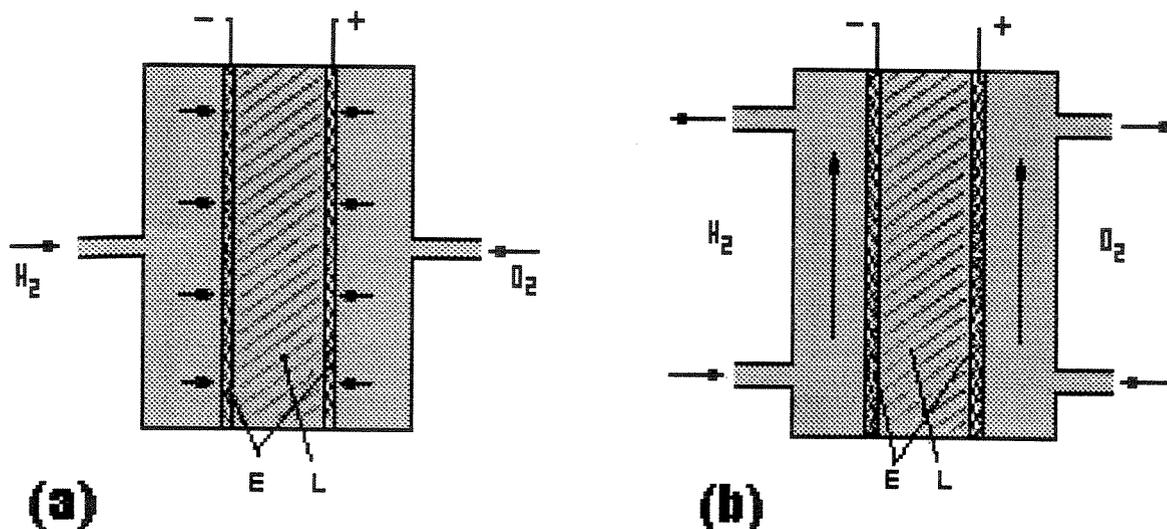


Figura 19 - Esquema de construção de células de combustíveis gasosos. a – Gases sob pressão b – Gases sob pressão normal, E - Eletrodos catalisados, L - Eletrólito [34].

Na Figura 19a os gases são introduzidos sob pressão nos poros do eletrodo, e sofrem ionização nas três fases da junção gás/eletrodo/eletrólito. A reação produz água que dilui o eletrólito do lado do hidrogênio ou do lado do oxigênio, de acordo com o PH do eletrólito, constituindo um dos principais problemas técnicos devido à necessidade da constante remoção da água. A temperatura de trabalho deste tipo de célula pode variar entre a ambiente e 250°C . Seus eletrodos devem ser construídos de tal forma a facilitar o borbulhamento do gás através do mesmo. Como o gás entra sob pressão, impede a migração do eletrólito para o compartimento do gás.

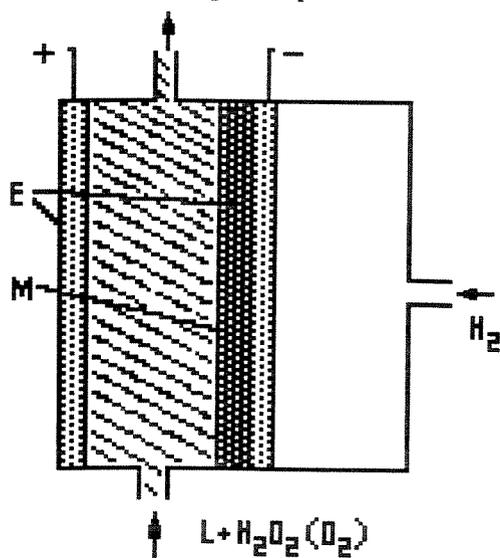
Na Figura 19b os gases são introduzidos sob pressão normal. Para tanto, os eletrodos necessitam de um tratamento que pode ser com parafina, permitindo assim o uso do gás em pressão normal mantendo-o em contato com o eletrodo através da circulação do mesmo.

4.5.1.2 Agente Oxidante Líquido

O combustível é introduzido sob pressão e o oxidante é dissolvido no eletrólito. O oxigênio pode reagir na forma líquida desde que o eletrólito seja continuamente saturado com o oxigênio ou ar. Nesta categoria se encontram as que utilizam peróxido de hidrogênio, cloro e bromo.

4.5.2. Células de Combustíveis Líquidos

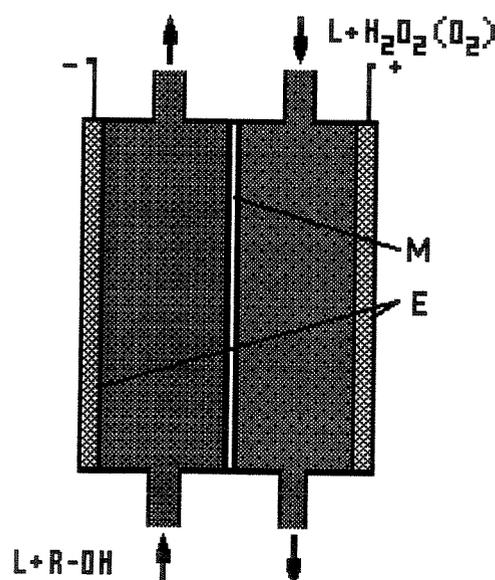
Para um combustível líquido é vantajoso a sua dissolução no eletrólito assim como o é para o oxidante líquido, porém se faz necessário a utilização de um diafragma para separar o compartimento de um eletrodo do outro, quando o metal do eletrodo do oxigênio pode também catalisar a reação do combustível. O agente



oxidante pode ser alimentado através da sua dissolução no eletrólito ou na forma de vapor. As Figuras 20 e 21 demonstram estes processos.

Figura 20 – O componente de oxidação é dissolvido no eletrólito (H_2O_2 ou O_2) M, membrana; L, eletrólito; E, eletrodo [32].

Figura 21 – Esquema de uma célula que utiliza combustível líquido; oxidante dissolvido no eletrólito; M, membrana; E, eletrodo; L, eletrólito [32].



4.5.3. Células de Combustíveis Sólidos

Nas células de combustível sólido o próprio combustível (metal ou carbono), atua como eletrodo. Para a oxidação eletroquímica de metais, como alumínio ou zinco, eletrólitos aquosos à temperatura ambiente são eficientes. Células deste tipo são pouco consideradas devido à inconveniência do abastecimento do combustível na célula, que provoca interrupções constantes no funcionamento. A Figura 22 mostra esquematicamente uma célula de combustível sólido.

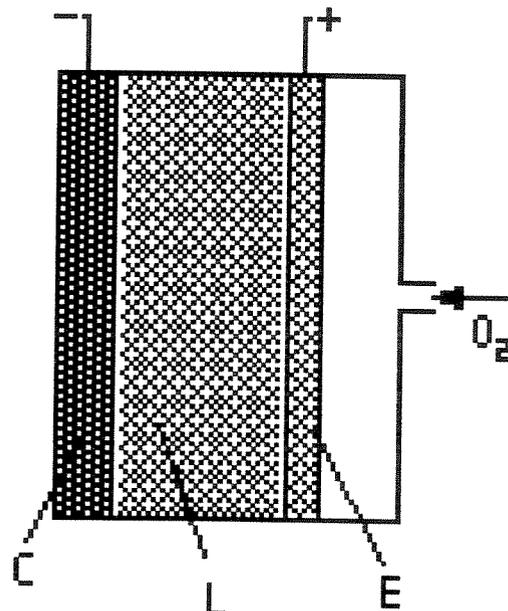


Figura 22 - Célula de Combustível sólido (carbono ou metal). L, eletrólito; E, eletrodo catalisado por oxigênio; C, carbono ou metal [32].

A célula de zinco-ar é tida como uma das primeiras que foram feitas e hoje está completamente descartada. Já a célula do tipo amalgama-oxigênio, devido às suas

características, tem um lugar de destaque. A Figura 23 mostra o esquema da célula Amalgama/oxigênio.

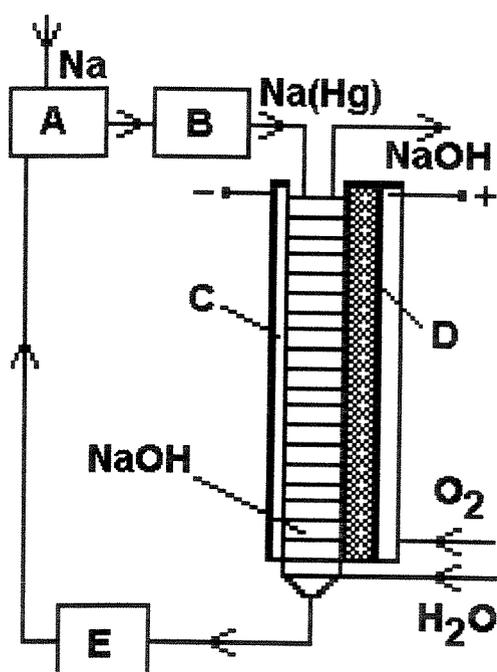


Figura 23 - Célula Amalgama/oxigênio para o uso eletroquímico de metal alcalino (sódio).

- A- Amalgamador;
- B- Trocador de calor;
- C- Ânodo de metal com filme de amalgama;
- D- Poros de difusão de oxigênio;
- E- Bomba [32].

4.5.4. Células de Combustível Regenerativas

São assim denominadas as células que envolvem a contínua regeneração dos reagentes que produzem a reação da célula. Esta célula conta com uma fonte de energia associada a ela que pode ser calor, luz, radiação, energia química, energia elétrica, etc., capaz de dissociar novamente o produto da reação em seus reagentes primários. No caso de uma célula de hidrogênio-oxigênio, a água é o produto da reação e pode ser desmembrada em seus constituintes, que são os reagentes, através da ação da energia elétrica, calor, etc. A Figura 24 mostra o esquema de uma célula de regeneração dos reagentes por radiação.

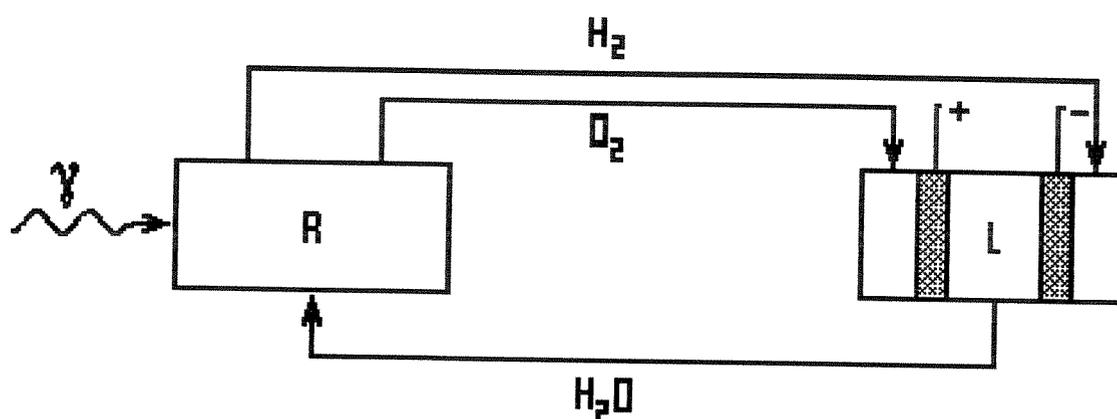


Figura 24 - Célula de reagentes regenerados por radiação (bateria nuclear). γ , radiação; R, regenerador; L, eletrólito [32].

Já as células de combustível conhecidas como *Redox* têm como base a regeneração por processo químico. Neste caso, ambos os reagentes envolvidos no processo eletroquímico tem seu próprio regenerador, como mostra a Figura 25. A substância eletroquimicamente ativa reage na presença do catalisador do eletrodo negativo, retornando para o compartimento de regeneração onde entra em contato com um componente químico apropriado, que se combina com ela resultando no reagente original. No eletrodo positivo ocorre o mesmo processo com outro componente químico próprio para aquele reagente. As reações podem ser expressas da seguinte forma:

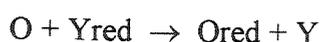
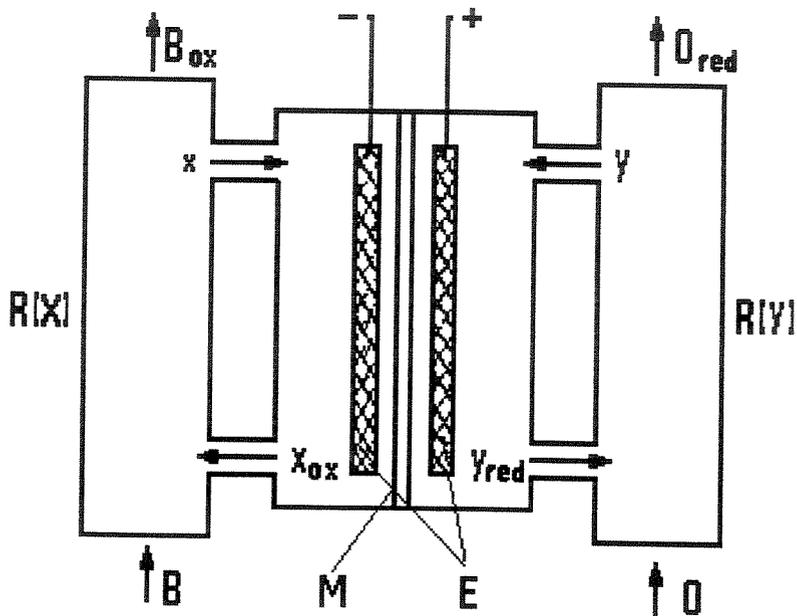


Figura 25 – Esquema da Célula do tipo Redox. C, combustível primário; O, oxidante primário; X e Y, substâncias eletroquimicamente ativas; R(X) e R(Y) regeneradores; E eletrólito; M, membrana [32].



4.5.5. Células e Outros Processos Químicos Combinados

A exemplo do hidrogênio e o oxigênio, que podem ser obtidos por meio de eletrólise da água, muitos outros reagentes poderiam ser regenerados através do processo de eletrólise. Entretanto a combinação de uma célula de combustível e um eletrolisador com a finalidade de regenerar os reagentes utilizados pela célula, não é concebível porque a quantidade de energia gasta para a eletrólise é maior que a quantidade fornecida pela célula, tornando-se inviável a regeneração [32].

De maior interesse neste trabalho pode-se destacar que a utilização de um eletrolisador como meio de armazenar eletricidade na forma química, ou seja, produzindo hidrogênio e oxigênio que é armazenado em tanques, favorece e compatibiliza a utilização de uma célula de combustível, que funcionaria como uma bateria estacionária, para a reconversão dos mesmos em eletricidade, para suprir os momentos que houver demanda, como mostra esquematicamente a Figura 26.

Outros processos combinados podem ser feitos, onde uma célula de combustível pode ser um estágio para recuperação de parte da energia elétrica gasta no processo, como a utilizada na eletrólise cloro-soda, pelo processo de amalgama como mostrado na Figura 27. Células de combustível podem ainda ser utilizadas como reatores químicos, como exemplo para oxidação ou redução de composto orgânicos, com a vantagem de se obter ainda energia elétrica como sobra do processo.

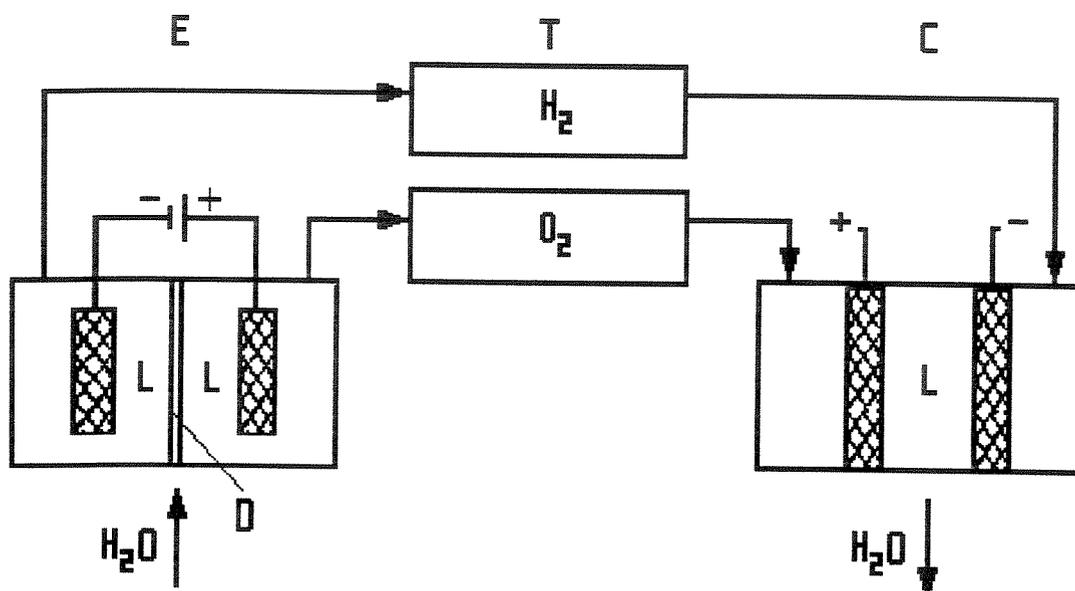


Figura 26 – Acúmulo de energia eletroquímica pela combinação de eletrólise d'água e uma célula de combustível H_2/O_2 . E, eletrólisador; T, armazenagem de H_2 e O_2 ; C, célula H_2/O_2 ; L, eletrólito; D, diafragma [32].

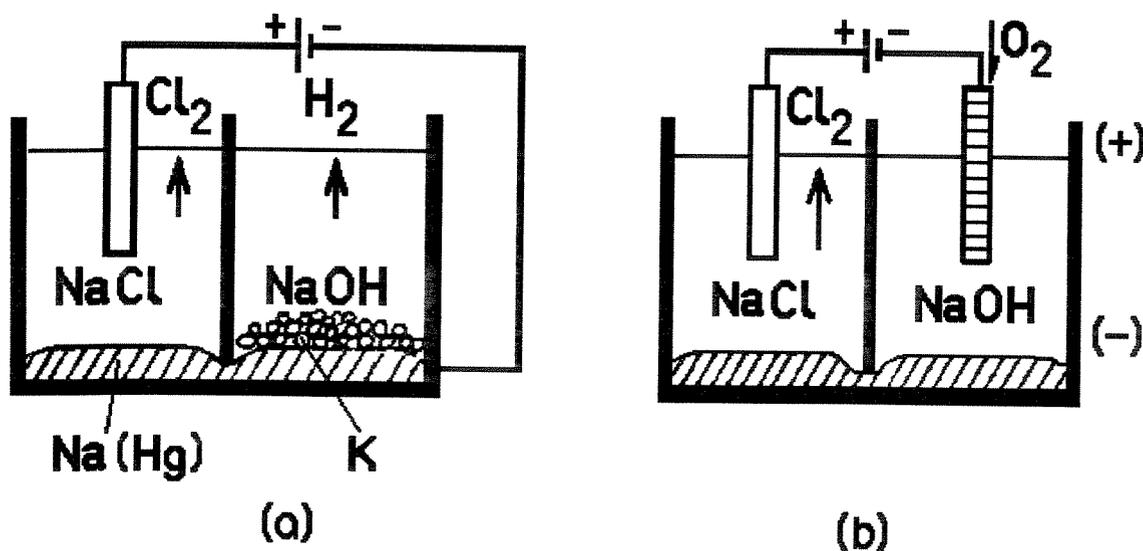


Figura 27 - Processo de amalgama por eletrólise cloro-soda. (a) - Decomposição catalítica da amalgama na célula. (b) - Célula amalgama-oxigênio como uma célula secundária com o propósito de reduzir a voltagem da eletrólise. K - catalisador (grafite ou ferro) [32].

4.6. Classificação das Células de Combustível Segundo o Eletrólito

4.6.1. Célula de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)

A Célula de Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) é a mais madura em termos de avanço tecnológico e disponibilidade para comercialização em curto e médio prazo. Os esforços para desenvolver a PAFC, considerada a mais viável célula de combustível do tipo ácido, se devem às suas características de estabilidade muito superiores às outras células, apesar de suas pobres propriedades iônicas. O principal impulsionador para esta posição de liderança foi a visão propagada nos EUA de que entre as células de baixa temperatura a PAFC é a única que mostra relativa tolerância à reforma de combustíveis do tipo hidrocarbonetos (HC). Neste caso o calor liberado pela célula é usado para a reforma; o CO é removido por uma reação de troca (shift) e a rejeição de CO₂ acontece naturalmente através do ácido.

Melhorias significantes no desempenho, custo, e durabilidade das PAFCs foram obtidas nos últimos 30 anos. A continuidade nos avanços é esperada com aplicações comerciais importantes. Todos os aspectos de desenvolvimento das PAFCs foram aprimorados, da eletroquímica básica até a otimização do sistema global. Importantes aspectos no estabelecimento de PAFCs como um sistema de potência comercialmente aceitável abrangeram a qualificação e utilização de materiais de carbono, como a coluna vertebral do stack da célula de combustível, a redução da quantidade de eletrocatalisadores de platina, a utilização de catalisadores com base em carbono em substituição aos de platina-negras e elevação da temperatura de operação de 60° a 80° C para aproximadamente 200° C, que proporcionou um aumento significativo na eficiência global do sistema. Para PAFCs de potências elevadas, destinadas a aplicações elétricas como cogeração nos sistemas de eletrificação urbanos, o desenvolvimento de sistemas pressurizados melhorará a eficiência e consequentemente o interesse comercial.

Apesar dos significativos avanços na área tecnológica da PAFC, é grande o incentivo para a continuidade e acréscimo das melhorias. Atualmente são projetados PAFCs para estabelecer um nicho significativo no setor elétrico e outras áreas de aplicação, prevendo-se benefícios em termos de economia de combustível, impactos ambientais e localização modular e estratégica. Porém, a completa penetração de mercado para as PAFCs será conduzida através de decisões econômicas mais severas, sendo provável que os avanços tecnológicos tenham um efeito mais significativo na atratividade econômica da implementação das PAFCs em relação aos sistemas

utilizados atualmente. Para aplicações no setor elétrico o EPRI (Electric Power Research Institute - EUA) estimou que uma melhoria de 10% na eficiência das células aumentará a penetração de mercado de aproximadamente 6 - 7% a 16%. De fato já foram alcançadas melhorias de eficiência desta magnitude no passado. Estes mesmos avanços tecnológicos também solidificarão os mercados abrangidos por PAFCs nos primeiros anos de comercialização, enquanto os custos refletem um crescimento na curva de aprendizagem tecnológica [37].

4.6.2. Célula de Combustível Alcalina (AFC)

A Célula de Combustível Alcalina (AFC) teve sua tecnologia desenvolvida no início dos anos sessenta para o programa espacial da NASA. As AFCs eram responsáveis pelo fornecimento de energia aos sistemas da nave Apollo. Para usos terrestre o seu desenvolvimento está menos avançado que os sistemas das PAFCs e os sistemas de células de combustível de alta temperatura, principalmente por causa da sensibilidade do eletrólito para o CO_2 . Apenas um pequeno esforço foi feito recentemente em AFCs nos EUA e Japão, e limitado trabalho na Europa; porém, durante os anos sessenta, havia um esforço mundial significativo. Aplicações terrestres de AFCs estão com uma década ou mais de atraso em relação as PAFCs. As AFCs podem ser consideradas como sistemas complementares ou alternativos em início de ciclo de desenvolvimento.

A operação de AFCs requer o uso de hidrogênio puro ou a remoção do dióxido de carbono dos combustíveis obtidos a partir de hidrocarbonetos. Pesquisas em armazenamento de hidrogênio e em métodos economicamente aceitáveis para a remoção de dióxido de carbono tem grande importância conjuntamente com o desenvolvimento das AFCs.

O incremento da eficiência energética das células de combustível será um incentivo para o seu uso futuro como sistema de fornecimento de energia em automóveis. Qualquer penetração significativa no mercado automotivo requer redução ou mesmo a eliminação de metais nobres, como a platina, utilizados em eletrocatalisadores. Entre os sistemas de baixa-temperatura as AFCs proporcionam a melhor perspectiva para a substituição de metais nobres. As AFCs possuem outras vantagens sobre as PAFCs:

- 1- Baixa temperatura operacional (60° à 90° C) e conseqüentemente melhor tolerância de materiais [38];
- 2- Capacidade de potência e eficiência energética mais altas por causa de elevadas taxas de redução de oxigênio;
- 3- Melhor desempenho, que possibilita a utilização em veículos elétricos sem a necessidade de utilizar baterias para o suprimento principal de energia, além da possibilidade de partida rápida, o que é essencial para aplicações automotivas [37].

4.6.3. Célula de Combustível de Eletrólito de Polímero Sólido (SPEFC)

A Célula de Combustível de Eletrólito de Polímero Sólido foi o primeiro sistema de célula de combustível a ter aplicação prática, sendo utilizada como sistema de fornecimento de energia para a missão orbital terrestre tripulada da nave Gemini em 1963-65. Desde então a SPEFC foi substancialmente aprimorada, particularmente em relação à confiabilidade das membranas e densidade energética. A General Electric Company desenvolveu este sistema para aplicações terrestres que possui as seguintes características:

- 1- Relativa simplicidade, rejeição de dióxido de carbono, voltagens de célula moderadamente altas e densidades de potência aceitáveis ($0,1$ kW/kg). Porém, este sistema possui deficiências que limitam a sua utilização para algumas aplicações, como o alto custo da membrana de polímero do eletrólito (\cong US\$ $400/m^2$ ou US\$ $200/kW$);
- 2- Temperaturas operacionais relativamente baixas ($<100^{\circ}$ C), que restringem severamente o uso do calor da célula para combustíveis que necessitam ser processados para produzir H_2 ;
- 3- Altas cargas de platina utilizada para o cátodo e ânodo (a carga combinada é 8 mg/cm² ou \sim US\$ $450/kW$ apenas para o catalisador); atualmente já se obtém valores em torno de $0,1$ a $0,3$ mg;
- 4- Operação com H_2 com baixa quantidade de CO (≤ 1 ppm).

A baixa tolerância do catalisador de platina do anodo em relação ao monóxido de carbono proveniente da contaminação do combustível hidrogênio seria melhorada se as temperaturas operacionais fossem aumentadas em aproximadamente $150^{\circ}C$, ou se uma alternativa à platina pudesse ser encontrada. As membranas de condutividade de prótons tipo Nafion atualmente usadas perdem quase por completo a condutividade com a pressão do vapor d'água. A pressurização das células permite que elas operem a

temperaturas um pouco mais elevadas, mas para atingir temperaturas de $\sim 150^{\circ}\text{C}$, requerem pressões tão altas que seria impraticável para a maioria das aplicações. Novos materiais da membrana ou a modificação destes seria a melhor solução.

Se as deficiências descritas puderem ser superadas, o sistema das SPEFCs pode vir a ser competitivo com as PAFCs para utilização como sistemas de geração de eletricidade independentes, e se novos catalisadores que não utilizem metais nobres forem desenvolvidos poderão ser utilizadas para aplicações automotivas, incluindo veículos de passeio. A tecnologia do sistema de SPEFC está com uma década de atraso em relação as PAFCs no seu desenvolvimento para uso comercial. Não obstante, a potencialidade para sua aplicação no sistema de transportes justifica a pesquisa deste sistema de célula de combustível [37].

4.6.4. Célula de Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)

A Célula de Combustível de Carbonato Fundido (MCFC) tem recebido um esforço de desenvolvimento muito intenso durante os últimos oito anos e precisará de um período igual de tempo para estar pronta para a fase de comercialização, dependendo da aplicação a ser empregada. Uma importante vantagem da MCFC é a maior simplicidade do sistema global, possível por sua tolerância para aceitar CO e CO_2 como também H_2 ; por esta razão a MCFC tem um custo inicial mais baixo do que o sistema PAFC, com alta eficiência. Outra característica do sistema MCFC é a sua alta temperatura de trabalho (na faixa de 550°C). Esta característica pode abrir um mercado significativo para muitas aplicações de sistemas independentes em diversos locais, graças à possibilidade da reforma interna do gás natural, aliada à possibilidade destes sistemas operarem à pressão atmosférica. Alguns entraves técnicos devem ser solucionados antes da fase de comercialização em relação à melhora da resistência e do desempenho [37].

4.6.5. Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC)

A Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC) tem uma história relativamente longa: o empenho em seu desenvolvimento começou cedo em

laboratórios de pesquisa industriais, em meados dos anos cinquenta. A Westinghouse foi a responsável pela fase de maior esforço de seu desenvolvimento industrial, trabalhando em módulos de demonstração para teste de desempenho e resistência de células simples. Outros esforços em pesquisa e desenvolvimento também estão em curso. O Argonne National Laboratory (ANL) trabalha no desenvolvimento de um projeto avançado de uma célula monolítica que possui alta densidade energética e grande potência específica.

As SOFCs têm várias características que as diferenciam de outras células de combustível. Sua temperatura de 1.000° C é entre as células de combustível a mais alta. Esta característica permite a oxidação eletroquímica do H₂ e CO sem a necessidade da utilização de um catalisador específico. Versatilidade de combustível é uma vantagem significativa no uso de SOFCs para algumas aplicações. O SOFC também oferece a possibilidade de operar com densidades de potência mais altas. Os componentes do SOFC são principalmente cerâmicas. Embora materiais relativamente baratos sejam usados, as técnicas do processo de produção dos materiais empregados, devido à sua composição final, são difíceis de serem implementadas. Recentes avanços no processo de novas técnicas estão sendo obtidas como importante etapa para o avanço da tecnologia de SOFCs para comercialização. A principal necessidade para o desenvolvimento tecnológico está na pesquisa de materiais cerâmicos, tanto em relação ao melhoramento do material como em relação ao processo de produção [37].

4.7. Classificação das Células por Temperatura de Trabalho

Uma outra forma importante de classificar as células, de especial interesse neste trabalho, é em função da temperatura de operação do *stack*, que é o coração eletroquímico da célula de combustível. Pode-se classificar, de acordo com as condições, as células como de alta ou baixa temperatura. Nas consideradas de baixa temperatura incluem-se as de eletrólito ácido como a Célula de Combustível de Ácido Fosfórico e a Célula de Combustível de Eletrólito de Polímero Sólido, também denominada de Célula de Combustível de Membrana de Troca de Prótons, que operam respectivamente de 180° a 210° C e de 80° a 90° C. Também inclusa neste grupo está a de célula de eletrólito alcalino cuja temperatura de operação é de 80° C. Nos sistemas de alta temperatura estão: a Célula de Combustível de Carbonato Fundido, cuja

temperatura de operação está entre 600° e 700° C; a Célula de Combustível de Óxido Sólido (SOFC - Solid Oxide Fuel Cell), com temperaturas na faixa de 800° a 1000° C. O máximo trabalho que cada célula eletroquímica pode alcançar para um determinado combustível é determinado pela segunda lei da termodinâmica [37].

4.8. Análise de Perspectivas das Células de Combustível

A célula de combustível de ácido fosfórico PAFC, em fase de produção estabelecida, teria seu custo para comercialização nos EUA na ordem de US\$ 800/kW. Deste montante vinte por cento corresponderia ao stack da célula, sendo que 50% deste valor corresponde ao custo da platina utilizada nos catalizadores. Um sistema completo de célula de hidrogênio alcalina custaria na ordem de US\$ 100 a US\$120/kW; caso se incluía um conversor CC/CA o custo iria para US\$ 200/kW [39].

Sistemas de células de combustível alcalinos que não utilizem platina são considerados possíveis e poderiam alcançar um patamar de custo da ordem de US\$ 20/kW. Estes sistemas alcalinos poderão no futuro ser utilizados em larga escala no sistema de transportes. Porém a difusão destas células requer a eliminação do uso da platina, não só pelo seu custo mas também pela limitação das suas reservas. Como exemplo, se 25% da platina extraída anualmente fosse utilizada em células de combustível de ácido fosfórico, que requerem 5 g Pt/kW, isto representaria não mais que 4.000 MW ou um número estimado de 100.000 veículos por ano [40].

A evolução na tecnologia de células pode ser notada comparando-se a célula alcalina utilizada na nave Apollo nos anos sessenta com a utilizada, aproximadamente vinte anos depois, na nave espacial Shuttle. A primeira pesava 115 kg e era capaz de produzir 1,5 kW, enquanto que a outra pesava apenas 90 kg e fornecia 18 kW, podendo chegar ao valor máximo de 30 kW [41].

Nesta época já estimava-se que uma versão terrestre de tal célula de combustível, usando componentes semelhantes de baixo peso, que incluem grafite poroso nas placas do reservatório do eletrólito e cátodo revestido de material de tecnologia avançada e sem a utilização de platina, poderia gerar 50 kW provavelmente para os mesmos 90 kg de peso. Isto seria ideal para uso em automóveis, desde que contasse com um sistema comercial de distribuição do hidrogênio e seu armazenamento dentro do veículo fosse bem equacionado. Células de combustível de

US\$ 20/kg de peso do *stack*, utilizando materiais de baixo custo, podem ser aplicadas de maneira satisfatória como dispositivos com vida relativamente pequena para aplicação em automóveis, onde 5.000 horas operacionais com uso intermitente seriam consideradas satisfatórias. Alguns eletrodos que não utilizam platina já apresentam vida útil desta grandeza [42]. O custo atual permanece alto para aplicação em veículos.

Sistemas mais robustos, duráveis e que utilizem matéria prima de baixo custo e de fácil obtenção são necessários para uma aplicação prática das células. Considera-se razoável para outras aplicações que o custo seja da ordem de dez vezes o preço de um sistema específico para automóveis, na faixa de US\$ 200 - 250/kW, já incluído o inversor CC/CA. Unidades com tais características utilizando hidrogênio podem ser capazes de gerar eletricidade de forma mais econômica do que sistemas de células de combustível equipados com um processador de combustível que usa gás natural. Por exemplo, assumindo-se que o custo do gás natural seja US\$ 5.00/GJ, o do hidrogênio extraído de carvão seja de US\$ 8.00/GJ e a célula de combustível a hidrogênio custe US\$ 200/kW, o custo esperado de eletricidade será US\$ 0,059/kWh para a unidade a gás natural e de US\$ 0,055/kWh para a unidade a hidrogênio (considerando uma eficiência para a unidade de gás natural de 45%, 55% para a unidade de hidrogênio e 7000 horas de uso por ano). Este resultado se deve ao baixo custo da unidade de hidrogênio que favorece o menor custo da eletricidade, apesar do custo do combustível inicial ser mais alto [36].

Células de combustível alcalinas avançadas não estão disponíveis, exceto na forma de sistemas que operam com hidrogênio criogênico e oxigênio para fins militares e espaciais. Uma célula de combustível alcalina que opera com gás natural requer sistema de separação de $\text{CO}_2\text{-H}_2$, tornando o sistema até mesmo mais complexo que os sistemas correspondentes de células de ácido fosfórico. Além disso células alcalinas de baixo custo não podem operar a temperaturas elevadas o bastante para produzir vapor para ser utilizado na reforma do gás, o que resulta em perda de eficiência. Por esta razão a célula de combustível alcalina não está sendo desenvolvida atualmente para uso com os combustíveis tradicionais. Porém o seu desenvolvimento deve ser assegurado para que no futuro, quando o hidrogênio alcançar a importância merecida dentro da matriz energética mundial, o seu uso tornar-se viável.

5 - As Células de Combustível para Aplicação em Veículos Elétricos

Quatro tipos de células de combustível - ácido fosfórico, alcalina, membrana de troca de prótons e óxido sólido - poderiam ser usadas em veículos automotores. Atualmente, diversas pesquisas apontam as células de combustível do tipo membrana de troca de prótons, comercialmente disponível dentro de alguns anos [43], como a que melhor se enquadra, em um curto espaço de tempo, para o uso em veículos elétricos. Células de combustível de ácido fosfórico são muito grandes e pesadas para serem usadas em veículos leves, sendo que para veículos pesados podem ser uma alternativa razoável. As células de combustível alcalinas são muito atraentes, devido ao seu funcionamento, temperatura de trabalho e a sua construção que utiliza materiais de baixo custo [44], mas devido à intolerância do eletrólito ao CO_2 , obriga a utilização de oxigênio puro ou a remoção do CO_2 caso se utilizasse o oxigênio retirado do ar. A maioria das pesquisas demonstram que o custo adicional pela exigência do armazenamento de oxigênio puro ou a remoção do CO_2 do ar praticamente inviabilizam a sua utilização em veículos. Porém, caso se encontrem eletrólitos alcalinos tolerantes ao CO_2 , ou ainda métodos de remoção do CO_2 , as células de combustível alcalinas poderiam se mostrar superiores às de membrana de troca de prótons para veículos. As de óxido sólido são células projetadas para ter alto desempenho, mas elas tem a grande desvantagem de trabalharem com altas temperaturas e necessitem de um tempo relativamente longo para alcançar a temperatura operacional necessária ainda que, com o auxílio de baterias, fosse possível dispor da energia necessária à partida.

Todos estes fatores contribuem para que a maioria dos veículos desenvolvidos atualmente à célula de combustível, utilizem células do tipo membrana de troca de prótons.

Hoje em dia muitas empresas estão desenvolvendo células de combustível de membrana de troca de prótons, principalmente para aplicação como sistemas de cogeração, utilizando como combustível o gás natural. Porém, na literatura disponível muito pouco é publicado em razão da tecnologia que envolve as células ser ainda nova, exigindo grandes investimentos e acirrando a competitividade entre as empresas detentoras desta tecnologia. As PEMFCs são mais sensíveis do que as PAFCs em relação à qualidade do combustível. Isto se deve à menor tolerância aos níveis de CO.

Para que não haja saturação no catalisador do anodo da célula é preciso reduzir o nível de CO para partes por milhão. Esta redução pode ser feita através da utilização de um reator com catalisador de oxidação seletiva. O *stack* de uma PEMFC é bastante reduzido em comparação com o *stack* de uma PAFC de mesma potência, mas o restante do sistema será igual ou terá maior peso e volume. Caso uma membrana de baixo custo seja desenvolvida, espera-se que a PEMFC se torne equivalente com a PAFC em relação ao custo. As PEMFCs possuem uma grande vantagem sobre as PAFCs pelas suas características de maior tolerância em relação à diferença de pressão dos reagentes, que pode ser da ordem de 10 ou mais vezes, o que permite grande simplificação nas características do sistema de controle no caso de se operar com um sistema pressurizado. Como os *stacks* das PEMFCs são mais leves e mais compactos do que de outros tipos de células, sua aplicabilidade em veículos automotores é favorecida. Muitos trabalhos tem se desenvolvido para aplicação de PEMFCs em veículos, utilizando metanol ou hidrogênio como combustível. O metanol em relação aos derivados de petróleo é um combustível de fácil decomposição; pode ser cataliticamente reformado a vapor utilizando temperaturas na faixa de 200° C.

Para aplicações em veículos esta célula possui duas grandes vantagens: a primeira é em relação ao tempo de início da reforma, que pode ser bastante rápido; a segunda é em relação ao reformador que pode ser construído com materiais leves. Há a expectativa de que a partir de 1998 haverá uma intensificação no desenvolvimento de veículos experimentais utilizando PEMFCs e poderá já no início de 2004 haver uma penetração no mercado. Além do desenvolvimento técnico necessário para o aprimoramento e a viabilização do sistema de PEMFCs para aplicação em automóveis, é preciso alcançar valores da ordem de US\$ 150/kW para que este sistema de célula de combustível seja compatível com os atuais veículos com motores de combustão interna, o que pelo menos por enquanto será pouco provável que se alcance. Já para aplicação em ônibus urbanos, o maior custo do equipamento pode ser compensado com o ganho em relação à eficiência energética do sistema e as vantagens ambientais proporcionadas, podendo vir a ser a porta de entrada do mercado de PEMFCs no setor de transportes, em algumas regiões específicas, talvez até mesmo antes da virada do milênio. Testes utilizando hidrogênio como combustível tem sido feitos nos EUA e Europa [35] e projetos de utilização de ônibus com células de combustível em grandes cidades estão em andamento, inclusive no Brasil [45].

5.1. As PEMFCs como Opção Energética para Uso em Veículos

Como foi visto no item anterior, atualmente as PEMFCs são as células mais apropriadas para a aplicação em veículos, e seu desenvolvimento é favorecido graças à comercialização de sistemas estacionários de potência. Como também já mencionado, para a viabilização econômica das PEMFCs utilizadas em veículos automotores será preciso uma grande redução de custo de todo o sistema, permitindo uma certa competitividade com os atuais veículos com motores a combustão. Este avanço tecnológico necessário poderá ser assegurado graças ao grande e bem definido nicho de mercado para sistemas de células de combustível de baixa temperatura, o qual será utilizado durante o período compreendido entre 1996 a aproximadamente 2005, para se aperfeiçoar a comercialização, reduzir custos, aumentar o tempo de vida útil, e desenvolver-se características especiais dos sistemas de células de combustível para aplicações em veículos [35].

5.1.1. Características do Sistema de uma PEMFC

A Figura 28 mostra o esquema de uma PEMFC hidrogênio/oxigênio. A Figura 29 mostra as principais características de uma PEMFC metanol/oxigênio. A célula de combustível de membrana de troca de prótons é semelhante ao sistema da célula de ácido fosfórico. Seus eletrodos são do tipo difusão de gás com catalisador de Pt sobre carbono. O eletrólito é um polímero de filme fino que permite condução seletiva de prótons. Estas células podem operar utilizando pressões mais elevadas e temperaturas inferiores a 100° C. A temperatura de operação é limitada porque atualmente os polímeros de condutividade de prótons requerem água para uma condutividade aceitável.

A PEMFC é simples em relação à construção e operação. Embora a operação em baixa temperatura ofereça algumas vantagens significativas comparadas com as de temperatura mais alta, células de combustível de baixas temperaturas tem menor tolerância para o CO e conduzem à uma desigualdade térmica entre o reformador e o *stack*. Caso seja utilizado diretamente o hidrogênio as PEMFCs são consideradas como ideais para aplicações em veículos não só pela baixa temperatura mas também pela facilidade de projeto e a não utilização de materiais perigosos. A Tabela 8 descreve os valores desejáveis para uma PEMFC.

CÉLULA SIMPLES

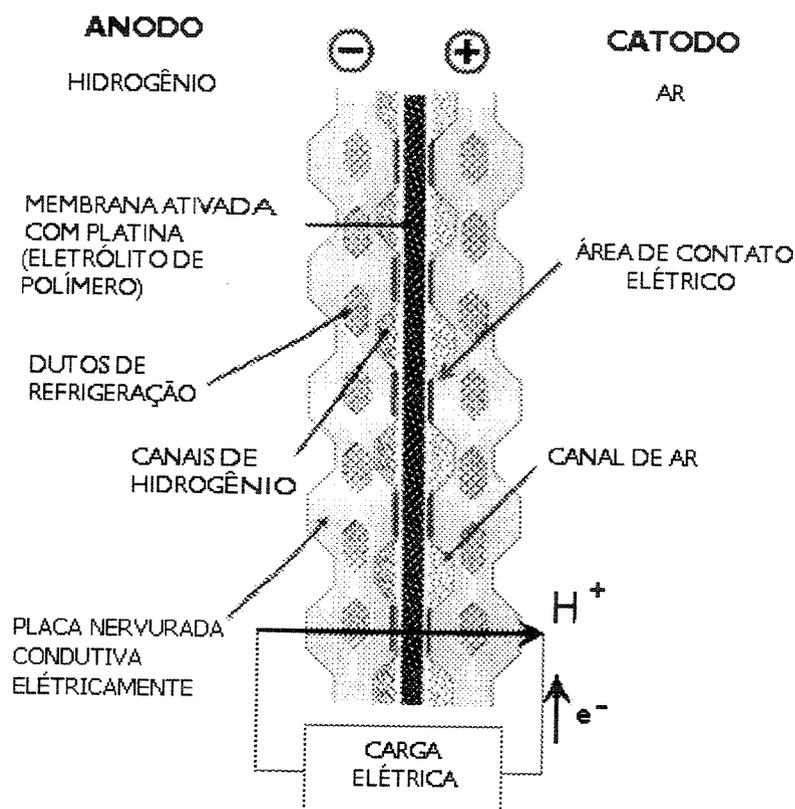


Figura 28 - Esquema de uma Célula simples H_2/O_2 [37].

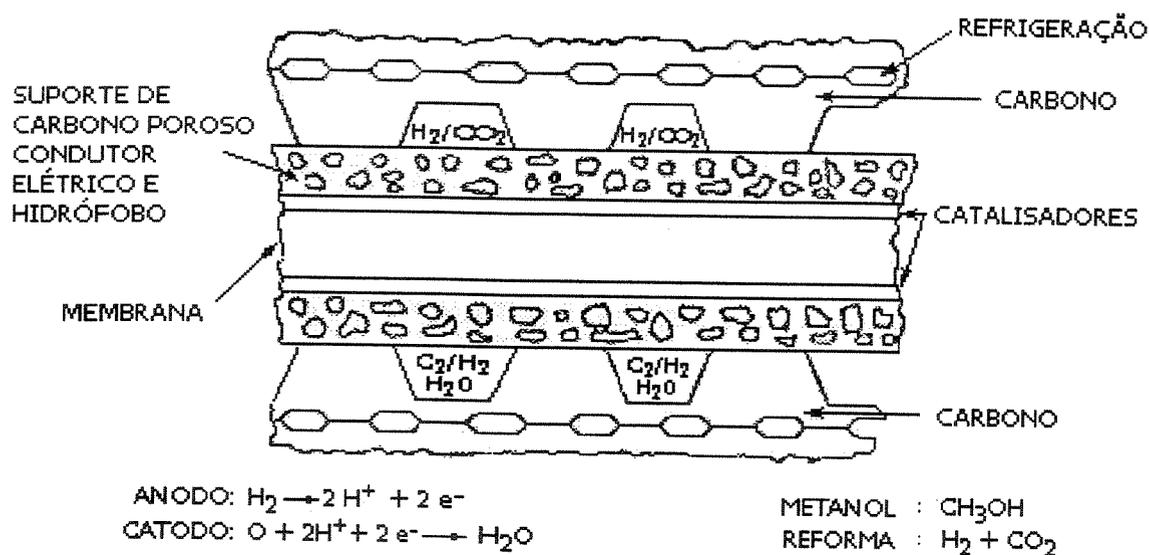


Figura 29 - Esquema de uma Célula de Combustível de Membrana de Troca Prótons que utiliza metanol como combustível [35].

Tabela 7 - Valores esperados para uma PEMFC [35].

Componentes da célula de combustível	Desempenho / Custo
Peso	4 a 5 kg/kW
Volume	3 a 5 l/kW
Custo	US\$ 30 a 40/kW a 10^6 unid./ano
Conversão elétrica	48 a 60% baseado em H ₂
Ciclabilidade	300 a 2.000 ciclos/ano
Tempo de partida	2 a 10 s

O desempenho das PEMFCs têm melhorado com o avanço da tecnologia durante os últimos anos. Células utilizando metanol como combustível para aplicação em veículos tem recebido especial atenção devido às vantagens de se utilizar um combustível líquido de fácil armazenagem. Os esforços tem se concentrado principalmente para o desenvolvimento de um reformador de metanol a vapor que opere a baixa temperatura. Uma única célula utilizando metanol teve um desempenho de $0,26 \text{ W/cm}^2$ a 800 mA/cm^2 [32].

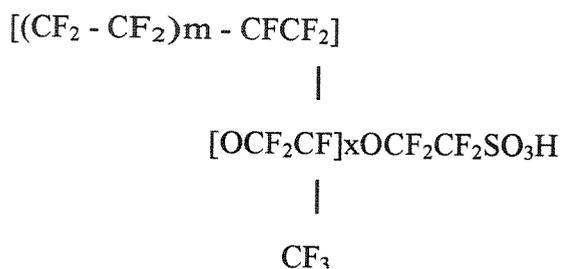
5.1.1.1. O Eletrólito de Polímero das PEMFCs

O eletrólito de uma PEMFC é um condutor seletivo de prótons. O filme de polímero tem que impedir o oxidante e o combustível de atravessarem o ânodo e o cátodo respectivamente, além de manter a neutralidade da carga iônica. A relativa simplicidade no projeto e na operação, o baixo peso e a não redistribuição do eletrólito são as principais vantagens do eletrólito de polímero.

Os eletrólitos de polímero são materiais à base de ácido perfluorosulfônico. As empresas duPont, Dow, Japanese Asahi trabalham no desenvolvimento de membranas. As duas primeiras, gigantes entre as indústrias químicas, investiram mais de cem milhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento destes polímeros para aplicação em células de combustível com fins comerciais. Porém, apesar dos esforços empregados, estas membranas ainda permanecem muito caras para este fim. A seguir são mostradas as estruturas químicas da membrana das empresas duPont e Dow.

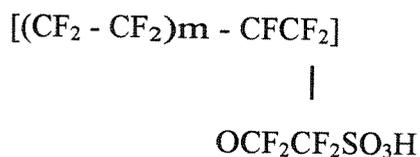
A estrutura de teflon tipo "backbone" proporciona razoável condutividade de prótons e grande estabilidade.

1 - duPont Nafion (1100 EW)



sendo $m=5$ e $x = 2$.

2 - Dow Polymer (800EW)



sendo $m=10,5$.

O Nafion 117 possui 7 milésimos de polegada de espessura e um peso molecular de 1.100g; é o filme mais intensamente estudado e desenvolvido para aplicação em PEMFCs. O polímero dilata por absorção de água e a condutividade da membrana é proporcional a seu conteúdo de água (limitando assim a temperatura em 100° C ou 120° C no caso de se trabalhar sob pressão). Em função disto o movimento de prótons acompanha o deslocamento das moléculas de água. Como consequência, a água é deslocada do lado do ânodo para o lado de cátodo da membrana. Este processo leva à secagem do ânodo e a consequente perda de condutividade, além de bloquear os poros do cátodo por encharcamento. A Figura 30 mostra como é feito o reabastecimento de água do ânodo que acontece pela difusão do cátodo para o ânodo



e/ou pelo transporte de água do combustível. O uso de membranas muito finas ajuda a difusão de água do cátodo para o ânodo. Garantir um equilíbrio de água é um dos maiores desafios no desenvolvimento das PEMFCs.

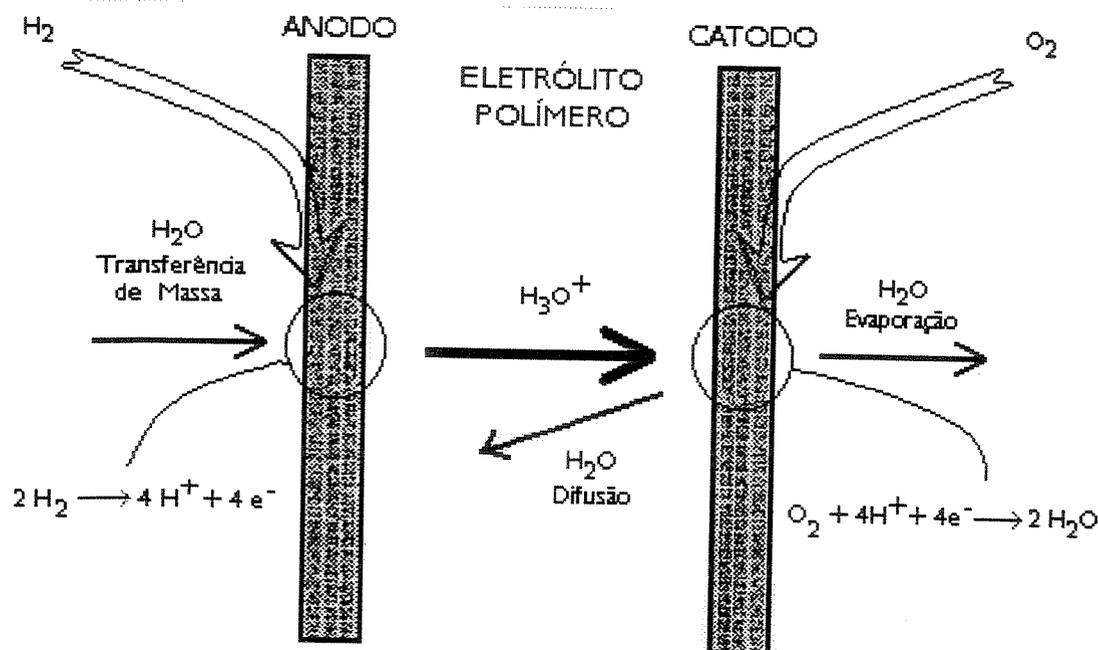


Figura 30 - Transporte de água em uma PEMFC [35].

O Dow 560 é composto de uma pequena cadeia de polímero de ácido perfluorosulfônico, possuindo baixo peso equivalente se comparado com Nafion 117 (560 vs 1100) e provê maior absorção de água. Com a maior retenção de água e membranas mais finas (5 milésimos), as perdas ôhmicas são reduzidas e há o aumento da taxa de difusão do retorno d'água, facilitando assim o seu transporte. Porém este polímero foi desenvolvido apenas em quantidades muito restritas, a nível de laboratório, não podendo ainda, por esta razão, ser empregado em testes com células de combustível.

O grande problema do polímero Nafion é o seu custo que está na ordem de US\$ 400/m². Com um aumento da demanda na ordem de cem espera-se que o preço caia para um décimo deste valor, mantendo as propriedades eletroquímicas e a estabilidade necessária. O desenvolvimento de um polímero para temperaturas mais altas (150° - 200° C) proporcionaria menor suscetibilidade de contaminação por CO. Em acréscimo,

a quantidade de água no polímero se tornaria menos importante para a condutividade de prótons, diminuindo assim a necessidade do equilíbrio de água. A eficiência de todo o sistema aumentaria em função das melhoras alcançadas com o aumento da temperatura [35].

5.1.1.2. O Catalisador do Eletrodo

Devido à baixa temperatura de operação das PEMFCs se faz necessário a utilização de catalisadores de grande atividade. Por esta razão catalisadores de platina são utilizados. No início a quantidade de platina utilizada era da ordem de 2 - 4 mg/cm², após uma melhor compreensão e desenvolvimento do processo de catalisação foi possível uma redução significativa na quantidade empregada.

Os locais ativos pela platina sofrem contaminação por CO eventualmente presente no combustível H₂. Existem alguns métodos para se tentar reduzir a contaminação por CO. Uma forma é através do acréscimo ao combustível de uma pequena quantidade de oxigênio: este oxidará o CO formando CO₂ que então poderá ser removido. Outro método é através da utilização de co-catalisadores, como ligas de Sn/Pt ou Ru/Pt ou uma associação entre elas.

Com combustíveis como o metanol a contaminação do catalisador é mais crítica. Há compostos intermediários que se formam como CHO e COH, tornando-se essencial a utilização de um catalisador para oxidação de CO, sendo que o melhor catalisador encontrado é o que utiliza a liga Ru-Pt [35].

5.1.1.3. A Estrutura do Eletrodo

A estrutura do eletrodo é tal que coloca a partícula condutora do catalisador em contato com o eletrólito de modo a minimizar as limitações da difusão de gás. Nas primeiras versões das PEMFCs a platina era depositada no filme de polímero com níveis altos de metal, cerca de 4mg/cm². Através da utilização de eletrodos de difusão de gás, nos quais foi feita uma composição de Teflon com platina em suporte de carbono, foi possível diminuir significativamente os níveis de platina empregados. Aprimoramentos em eletrólitos, como por exemplo o polímero de condução iônico

disposto na estrutura do eletrodo de forma que uma maior área de catalisador possa entrar em contato com o eletrólito, objetivaram um aumento da eficiência do catalisador e melhor desempenho da célula. Filmes de platina foram pulverizados sobre a face anterior do eletrodo para serem fundidos em um filme de eletrólito de polímero. A Figura 31a mostra o processo inicial. A Figura 31b mostra o avanço mais recente de uma estrutura que mistura uma aplicação de platina aplicada em suporte de carbono com o ionômero sobre um filme de eletrólito de polímero.

Diversos laboratórios trabalham atualmente em busca do aumento da performance, a redução dos custos, aumento da vida útil dos eletrodos entre outros fatores [35].

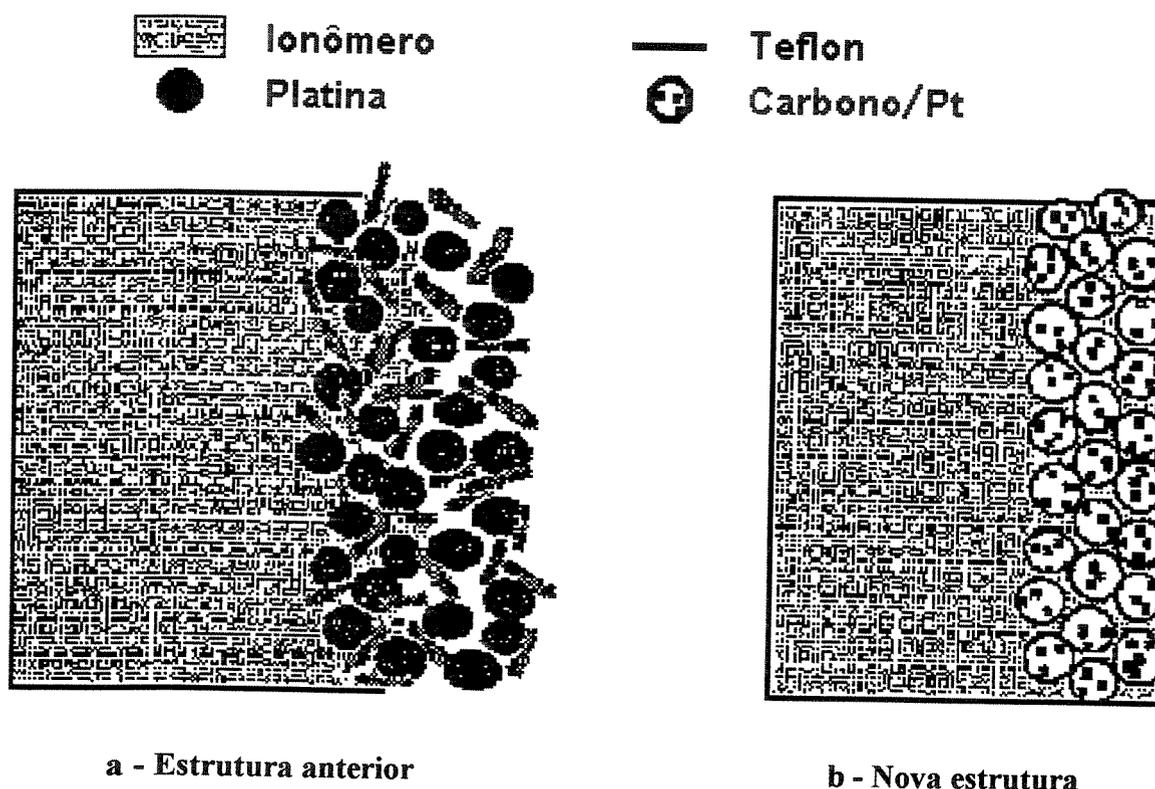


Figura 31 - Otimização de eletrodo Pt/C [35].

5.2. O Aspecto Comercial do Desenvolvimento Tecnológico de uma PEMFC

A partir dos estudos de Los Alamos no final dos anos oitenta [46], as PEMFCs foram consideradas os dispositivos geradores de energia ideais para aplicações em veículos elétricos por operarem a baixa temperatura, pelo seu alto potencial de

desempenho e devido aos intrínsecos aspectos de segurança (ausência de líquidos corrosivos). Por outro lado estudos mais recentes [47] também demonstraram um interesse potencial na aplicação de PEMFCs como geradores estacionários de potência devido à facilidade de operação, o rápido início de funcionamento e às dimensões compactas.

Os trabalhos com veículos elétricos com célula de combustível a hidrogênio tiveram seu desenvolvimento intensificado mais recentemente, em parte porque até pouco tempo as células de combustível eram muito volumosas, pesadas e caras para uso em veículos. Nos últimos anos, porém, com o avanço da tecnologia, as células de combustível (especialmente a PEMFC) obtiveram maior interesse na sua aplicação em veículos. Há vários projetos na América Norte. A Partners Energy da Flórida está projetando e construindo um veículo elétrico com uma célula de combustível à hidrogênio (comprimido) do tipo PEMFC de 20 kW de potência, que trabalha junto com baterias que fornecem outros 20 kW pico [48]. A Ballard Technologies do Canadá está trabalhando em um programa de estudo e demonstração de 30 ônibus que utilizam PEMFC e hidrogênio comprimido [49]. A H-power de New Jersey e a Rolls-Royce se associaram para desenvolver uma PEMFC para veículos. O Departamento de Energia dos EUA está apoiando dois projetos de veículos a célula de combustível: o Georgetown Bus Project, que utiliza como combustível metanol reformado em uma célula de combustível de ácido fosfórico [50], e um projeto da General Motors que está desenvolvendo um veículo a célula de combustível do tipo PEMFC utilizando metanol [51].

Japão e Europa também tem desenvolvido projetos específicos de veículos à célula de combustível. Entre os programas europeus destaca-se a participação e contribuição tecnológica da empresa multinacional italiana De Nora, que acumula 70 anos de experiência no setor eletroquímico, iniciando a sua participação no desenvolvimento de células de combustível do tipo PEMFC com a criação do programa nacional italiano, pela ENEA (Agência de Energia Italiana), que visava incentivar o desenvolvimento de dispositivos geradores de energia não convencionais de baixos índices de emissões de poluentes. A De Nora iniciou seu programa de desenvolvimento de células de combustível do tipo PEMFC em função de suas características e por acreditar que estas serão um meio viável e promissor de geração de eletricidade. Desde 1990 a De Nora participa dos maiores projetos da União Européia visando o desenvolvimento de veículos baseados em células de combustível. A Tabela 8 relaciona os principais programas em andamento.

Tabela 8 - Programas europeus voltados a utilização de células de combustível para aplicações veiculares [52].

Fundos	Programas	Participantes	Meta (kg/kW)	Potência da Célula (kW)	Meta Geral	Período
IT	ENEA (1)		25		Unidade de 5 kW	90 - 93
EC	EQHPP BUS	Ansaldo (IT) Messer Griesheim (D) ASM (IT)	25	40	Ônibus híbrido (Célula + bateria) com LH ₂	92 - 96
EC	FEVER	Renault (F) Air Liquide (F) Ecole des Mines (F) Ansaldo (IT) Volvo (S)	10	30 + 6 (Testes de Laboratório)	Veículo (Laguna) com LH ₂	94 - 96
EC	EQHPP BOAT	Ansaldo (IT) Messer Griesheim (D) Navig. Laghi (IT)		45	Barco híbrido (Célula + bateria) com LH ₂	93 - 97
IT	ENEA (2)	CNR - TAE (IT)	10 - 4	25 - 30	Unidade de 15 kW	94 - 97
EC	HYDRO- GEN	PSA (F) Renault (F) CEA (F) Sorapec (F) CNRS (F) Solvay (B) Ansaldo (IT)	4	30	"monospace" veículo com HP GH ₂	96 - 99
EC	FC-BUS	Ansaldo (IT) Neoplan (D) SAR (D) Air Liquide (F) Univ. Geniva (IT)	10 (baixo custo)	50	Ônibus híbrido (Célula + volante) com "HP GH ₂ "	96 - 98

EC - Comunidade europeia; IT - Itália; F - França; D - Alemanha; S - Suécia ; B - Bélgica.

A tecnologia do stack foi baseada inicialmente no projeto standard da General Electric (GE), que utiliza grafite, ou material baseado em grafite, para as placas bipolares e refrigeradas. Esta tecnologia tem as seguintes desvantagens:

- altos custos de materiais;
- altos custos de produção;

- baixa resistência tanto para o grafite como para compostos de grafite (não apropriado para aplicações móveis onde ficam sujeitas a vibrações e podem ocorrer choques).

A De Nora procurou direcionar esforços para encontrar soluções a fim de desenvolver um stack de nova geração baseado em materiais e tecnologias de produção, que proporcionassem redução de custo industrial e possibilidades de satisfazer a demanda necessária para produção em massa. A idéia básica era escolher um material metálico para a estrutura do stack que permitisse:

- grande resistência no caso de colisão;
- fácil processabilidade, com técnicas básicas de produção em massa;
- adequada resistência à corrosão.

Os materiais escolhidos também teriam que ser:

- de baixo custo;
- recicláveis, para evitar problemas de disposição ao término da vida útil do stack;
- disponíveis comercialmente e não estratégicos, a fim de evitar restrições para a produção voltada ao mercado.

Em 1993 as pesquisas resultaram no desenvolvimento de uma unidade experimental de 1 kW para avaliação, mostrada na Figura 32, e em 8 unidades de 5 kW baseada em uma tecnologia patenteada [53], cujas características são resumidas na Tabela 9. Estas características ajustaram as exigências de uma unidade para produção em massa, porém com a principal desvantagem de possuir uma baixa densidade de potência (0,04 kW/kg).

A confiabilidade da inovadora tecnologia para produção de stacks da De Nora foi demonstrada pela operação de mais de dez unidades de 5 kW. Stacks com diferentes potências foram fornecidos para a Ecole des Mine (França), TNO (Países Baixos) e DLR (Alemanha), com o objetivo de testar esta tecnologia em condições operacionais fora de padrão.

Posteriormente procedeu-se ao desenvolvimento do projeto de segunda geração do stack. Em janeiro de 1996 o primeiro protótipo, mostrado na Figura 33, foi montado e testado com sucesso, alcançando 0,1 kW/kg de densidade de potência (2,5 vezes maior que a unidade de primeira geração).

Mais de 7500 horas de trabalho foram acumuladas nos laboratórios da empresa em mais de 10 unidades de diferentes tamanhos. Stacks com diversas potências somando mais de 90 kW foram fornecidos a terceiros [52].

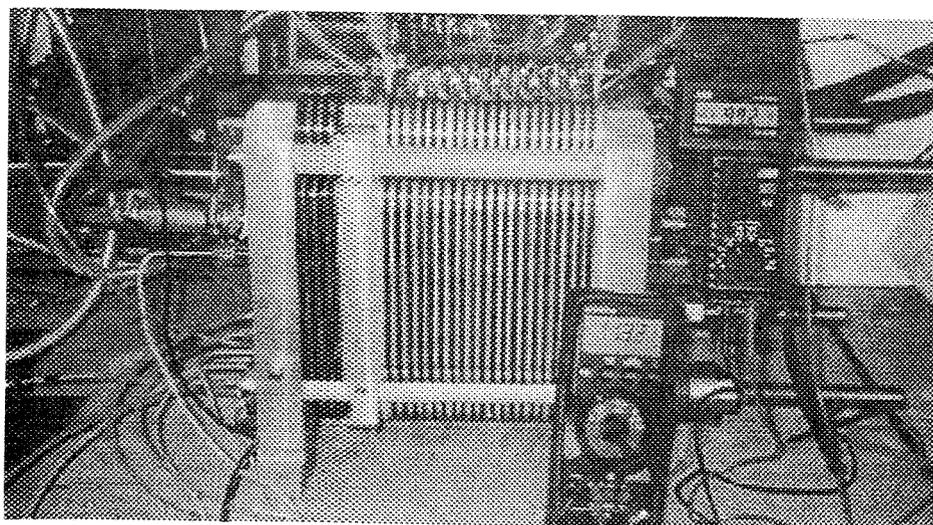


Figura 32 - Módulo de 1 kW (tecnologia standard) desenvolvido pela De Nora [34].

Testes de operação diária intermitente que simulam o funcionamento em um veículo, assim como altas respostas de frequência, foram testadas com sucesso. A capacidade operacional foi comprovada com mais de três anos de testes com operações intermitentes.

Tabela 9 - Características técnicas dos stacks desenvolvidos pela De Nora [34].

<i>PEMFC - De Nora</i>	<i>Modelo standard</i>	<i>Modelo aperfeiçoado</i>	<i>Modelo avançado</i>
Membrana	Nafion 117	Nafion 115	?
Potência (kW)	5	10	30
Voltagem (V)	62	30	60
Corrente (A)	81	333	500
Número de células	100	45	85
Pressão de operação (bar)	3	4	1,5
Temperatura de operação (°C)	70	70	70
Eficiência energética	0,5	0,57	0,57
Humidificação do gás	Integrado ao stack		
Densidade de potência nominal (kW/kg)	0,04	0,10	0,25
Densidade de potência de pico (kW/kg)	0,05	0,13	0,32
Massa específica (kg/kW)	25	10	4
Volume específico nominal (l/kW)	20	7,5	3
Volume específico a potência de pico (kW/l)	0,06	0,17	0,43

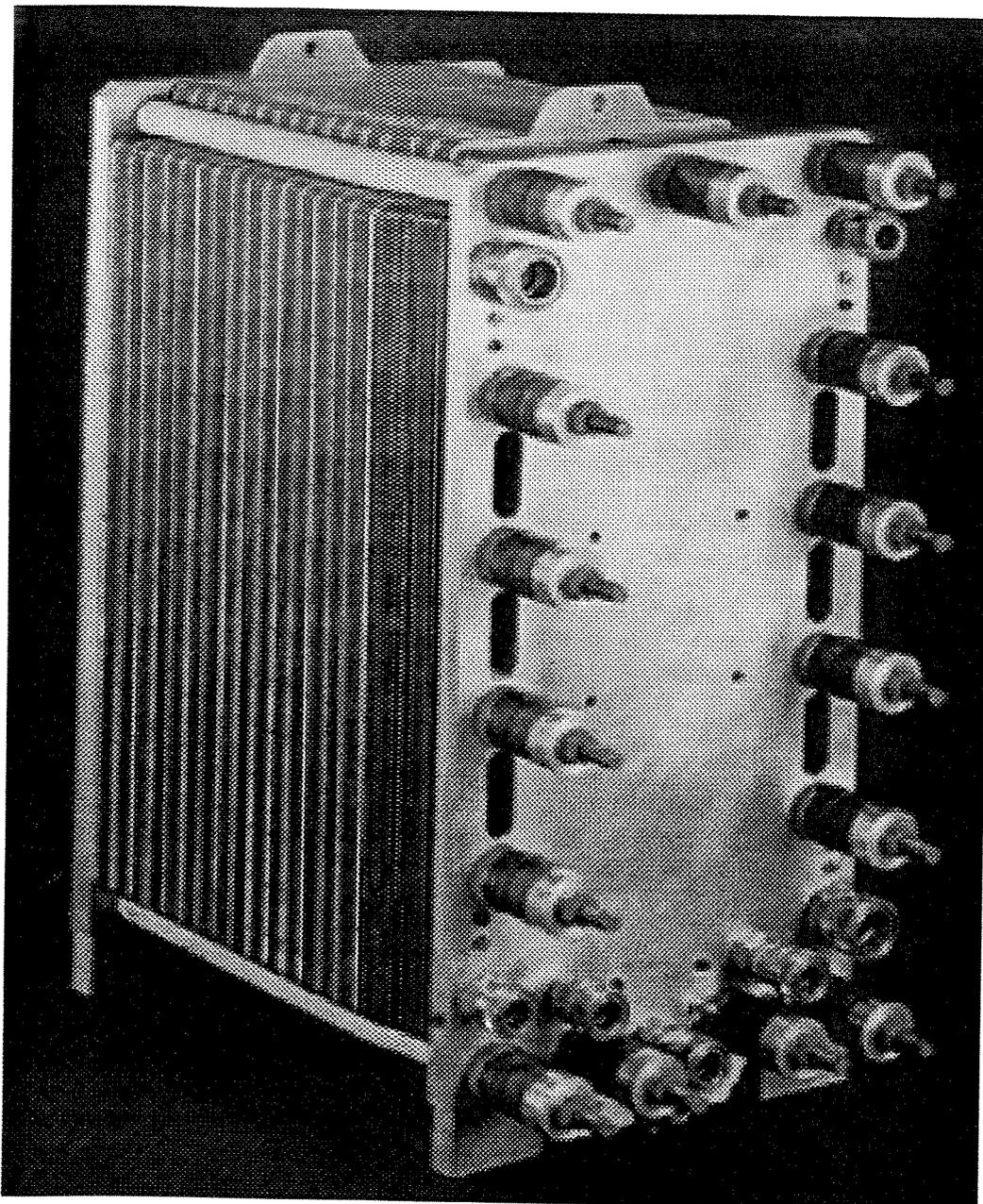


Figura 33 - Foto do stack da célula de 10 kW (tecnologia aperfeiçoada) da De Nora [34].

Atualmente o esforço maior está centrado para se elevar a densidade de potência do stack para 0,25 kW/kg através da melhoria dos componentes internos como eletrodos e membranas, em uma unidade de terceira geração que deverá fornecer 30 kW. A fase inicial do projeto de uma unidade de 50 kW, potência que é considerada essencialmente básica para aplicações estacionárias, está se desenvolvendo a partir da evolução da unidade de 30 kW. A Figura 34 mostra esquematicamente o protótipo da Renault desenvolvido dentro do programa FEVER.

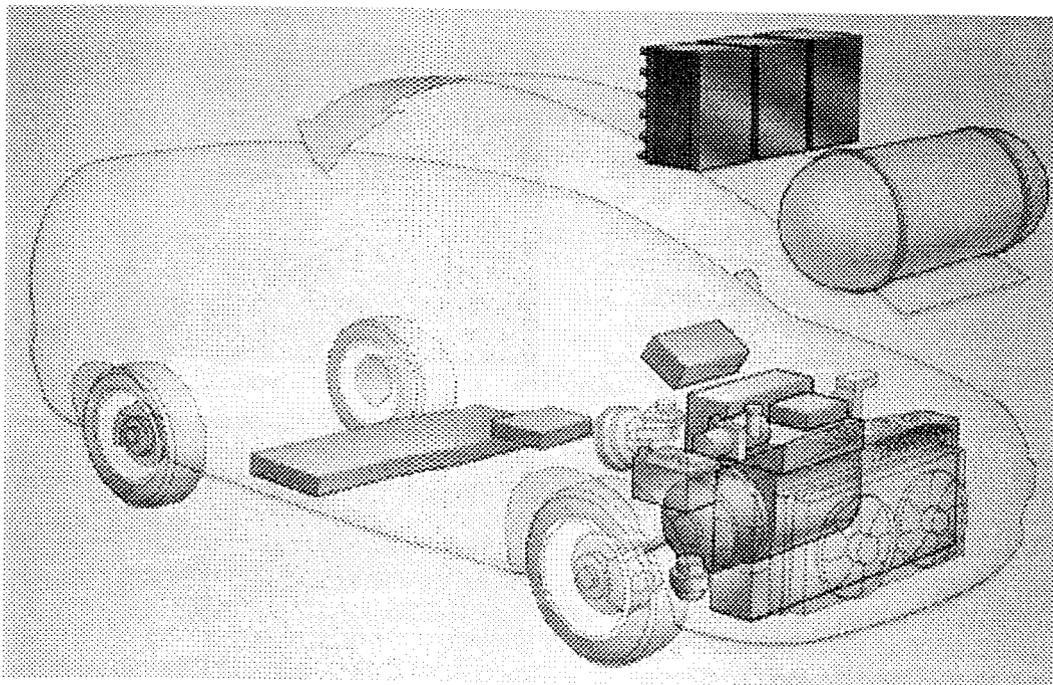


Figura 34 - Esquema do protótipo da Renault, desenvolvido sob a plataforma do Laguna, utilizando um sistema de três células de 10 kW fornecidas pela De Nora, dentro do programa FEVER, da comunidade europeia [34,54].

5.2.1. Perspectivas para Aplicação Comercial das PEMFCs

As PEMFCs podem ser comercialmente utilizadas em aplicações estacionárias e móveis. Como aplicações móveis pode-se dividir em dois grupos de maior interesse: veículos de passageiros e veículos de transporte pesado.

a - Veículos de passageiros

Veículos utilizando células de combustível podem atingir eficiência global de até 40% contra os 17 a 25% dos veículos com motor de combustão interna. Porém para atingir altos índices de aceitação seria preciso alcançar patamares de custo da ordem de 50 a 100 US\$/kW e densidades de potência em torno de 1 kW/kg, valores típicos de um motor de combustão interna, a menos que através de regulamentações ambientais sérias restrições a veículos poluentes sejam impostas, obrigando a adoção de outras alternativas. Altas densidades de potência até poderiam ser garantidas pelos principais fabricantes de células de combustível a curto prazo, porém baixo custo comparável aos

níveis dos melhores motores de combustão interna de baixos índices de emissões seria impossível prever. Estimativas efetuadas pela Daimler Benz [55], prevê níveis de custo para os sistemas de veículos de passeio na faixa de 600 a 700 US\$/kW para o ano 2005, quando deverão ser produzidas quantidades limitadas de veículos.

Inovações em materiais e tecnologias de produção somadas a um aumento da demanda em algumas áreas, onde regulamentos ambientais severos existem, podem conduzir a uma diminuição de custo para patamares na faixa de 150 a 300 US\$/kW para o ano de 2010, prevendo-se futuramente uma redução adicional para 30 a 50 US\$/kW nos anos seguintes devido ao aumento da aceitação no mercado e aos investimentos feitos que possibilitarão a produção em massa.

A General Motors e a Siemens prevêem níveis de custo na faixa de 350 US\$/kW para o ano 2005 ou 60 US\$/kW se o volume de produção alcançasse 100.000 unidades/ano conforme mostra o gráfico da Figura 35.

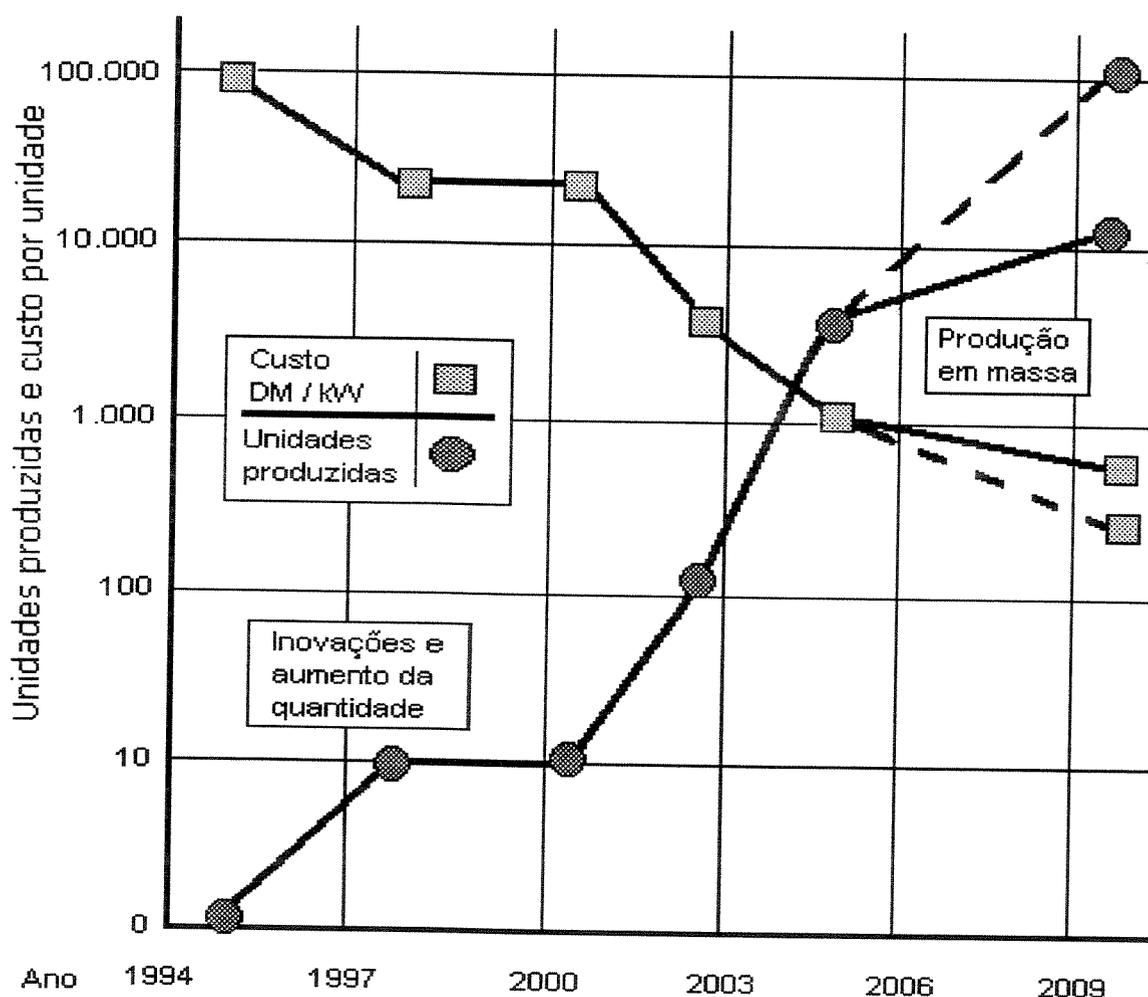


Figura 35 - Curva custo versus unidades produzidas de PEMFCs [52].

Porém para aplicações em larga escala devem ser solucionados ainda os problemas relativos ao combustível empregado e a necessária infra-estrutura para distribuição, armazenagem e abastecimento, assim como a armazenagem no veículo, caso seja utilizado o hidrogênio puro. A manutenção de estações centrais e o abastecimento de hidrogênio podem ser realistas para frotas de ônibus e para reabastecimento de veículos pesados.

Embora tenha havido contínuos e extensos estudos relacionados ao desenvolvimento e a distribuição de hidrogênio puro e facilidades de armazenamento [56;57], a geração a bordo de hidrogênio através da reforma de combustíveis convencionais como o metanol parece ser a opção mais realista para pequenos veículos, furgões e minivans [55].

A este respeito há vários trabalhos de desenvolvimento que mostram ser promissores os esforços para a viabilização de um gerador de hidrogênio compacto, seguro, de partida rápida, que produziria o hidrogênio através da reforma da gasolina, metano, metanol ou outros [58;59].

b- Veículos de transportes pesado

Os ônibus a célula de combustível poderão ter seus custos comparáveis aos dos ônibus elétrico a curto prazo, dentro de uma perspectiva de produção de células em pequena escala. Um nível de custo de 600 a 700 US\$/kW (esperado para os anos 2003/2005 conforme mostrado na Figura 35), e os desempenhos previstos para os próximos sistemas de célula de combustível, tornarão possíveis a utilização de células de combustível em veículos pesados de transporte coletivo. Nesta perspectiva a maioria das atividades internacionais em células de combustível voltadas para o setor de transportes é orientada para o desenvolvimento de sistemas para veículos de transporte coletivo, inclusive no Brasil [52].

6 - Dimensionamento de um Veículo Elétrico

A experiência com o protótipo VEGA, apresentada no Capítulo 3, mostrou que para se dimensionar um sistema energético híbrido de um veículo elétrico é preciso em primeiro lugar conhecer com exatidão as características do veículo que influenciam no seu desempenho e consumo de energia. Para isso é necessário considerar também a massa do sistema energético, porque no caso de veículos elétricos ela assume valores que alteram significativamente os resultados de desempenho.

Neste trabalho propõe-se a metodologia de se dimensionar inicialmente um veículo elétrico tradicional apenas a baterias, o que será feito neste Capítulo, obtendo-se com isto a possibilidade de se comparar os resultados com outros veículos existentes, o que proporciona maior segurança para futura execução do projeto do veículo.

Após a caracterização dos principais itens do veículo, destaca-se o sistema energético e passa-se a projetá-lo na sua forma híbrida separadamente, possibilitando assim determinar com exatidão a sua influência direta no funcionamento do veículo, o que será feito no Capítulo 7. As configurações do sistema energético na sua forma híbrida para os casos propostos dentro dos limites impostos ao projeto, tais como a potência disponível no veículo, o peso total e o volume admissível a ser ocupado pelos componentes do sistema energético, que possam ser mais vantajosas e adequadas, serão avaliadas no Capítulo 8.

6.1. Forças Atuantes no Deslocamento de um Veículo

Iniciando-se então com o dimensionamento de um veículo elétrico somente a baterias, verifica-se que as principais características de um veículo podem ser determinadas a partir da identificação das forças atuantes em seu deslocamento.

A força total (F_t) a ser desenvolvida pelo motor de um veículo e necessária para mantê-lo em movimento é composta de quatro forças distintas que são: a força de resistência inercial (F_i); a força de resistência de rolamento (F_r); a força de resistência aerodinâmica (F_a) e a força necessária para superar um aclave (F_g). A força de deslocamento pode ser expressa na forma de uma equação como segue:

$$F_t = F_i + F_a + F_r + F_g$$

O segundo termo que é a resistência do ar, pode ser expresso como uma função quadrática da velocidade. Os demais termos tem em comum a massa do veículo numa relação linear. Um veículo trafegando em uma rodovia plana a uma velocidade constante está sujeito apenas à resistência do ar e à resistência de rolamento.

6.2. Considerações Básicas sobre as Perdas no Sistema

6.2.1. Força de Resistência Inercial

A resistência inercial é o produto da massa M do veículo pela sua aceleração a , que pode ser expressa pela equação:

$$F_i = M.a$$

6.2.2. Força de Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento dividi-se em duas partes: perdas nas partes móveis do veículo (eixo do motor, câmbio, transmissão, homocinéticas, eixo das rodas, rolamentos) e a perda por atrito do contato dos pneus com o solo. A primeira parte equivale a menos de 15 % do total de perdas, e é uma constante para cada veículo; poderá ser desprezada para efeito de cálculos comparativos.

O atrito por rolamento é uma força que está relacionada com o peso W do veículo e o coeficiente de resistência dos pneus C_p ; tem uma relação direta com a inclinação da pista e as condições da mesma, sendo esta última de forma bastante acentuada. Uma pista de solo arenoso pode dobrar o fator C_p obtido em uma pista de asfalto liso, enquanto 10% de inclinação representa apenas 1% de acréscimo; portanto também será desprezado para efeito de cálculo. Pode-se expressar a força de resistência através de uma equação simplificada:

$$F_r = W . C_p = M . g . C_p$$

onde g é a aceleração da gravidade. Como o produto do coeficiente de resistência dos pneus com a aceleração da gravidade é uma constante para determinado tipo de pneu, então pode-se substituir ambos os termos por uma constante K .

$$F_r = M.K$$

6.2.3. Força de Resistência Aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica é causada pelo atrito da superfície do veículo com a passagem do ar. Pode-se descrevê-la através da seguinte equação:

$$F_a = (0,5 \rho). V^2 . A . C_x$$

onde ρ é a densidade do ar ($= 1,2 \text{ kg/m}^3$ a 1 atm e 25° C), V é a velocidade do veículo (m/s), A é a área frontal do veículo (m^2) e C_x é o coeficiente de arrasto aerodinâmico.

6.2.4. Força Necessária para Superar Aclives

A força necessária para vencer um aclive é diretamente proporcional ao peso e pode ser descrita com a seguinte equação:

$$F_g = W \text{ sen } \theta = W \text{ sen } \text{tag}^{-1} i$$

sendo θ o ângulo de inclinação do aclive e i a porcentagem de inclinação.

6.3. Potência

A potência (P) desenvolvida pelo motor de um veículo e necessária para levá-lo a uma determinada velocidade é fornecida pelo produto do valor desta velocidade pela força total empregada.

$$P = F_t \cdot V$$

A aceleração do veículo divide-se em duas partes: a aceleração da massa total do veículo, que é o ganho de energia cinética, e o aumento da energia cinética de rotação de peças e componentes (rodas, eixos, discos de freio, etc.). A aceleração para levar o veículo a uma certa velocidade é composta de aproximadamente 90% do primeiro tipo. O segundo possui um valor fixo para cada veículo e pode ser desprezado para efeito de cálculo.

6.4. Perfil de Percurso

É necessário fazer a avaliação comparativa de um veículo elétrico utilizando como referência um ciclo de percurso pré estabelecido. O ciclo SAE – J 277 foi criado nos EUA em 1972 com o intuito de se padronizar e facilitar a comparação entre veículos elétricos. Específico para intervalos de aceleração e desaceleração constantes, não foi suficiente para atender à necessidade do grande número de veículos desenvolvidos nos EUA, devido à grande variedade de aplicações a que estes se destinavam. Em consequência disto a SAE desenvolveu o ciclo J 277a – A-B-C-D, descrito pela Tabela 10, que é parametrado pela velocidade máxima de operação do veículo em estudo, enquadrando os veículos em quatro categorias diferentes: o grupo A agrega os veículos para manutenção de cargas; no grupo B se enquadram os veículos de entrega (pão, leite, etc.); no grupo C estão os veículos utilitários para transporte de carga; no grupo D estão os veículos urbanos de passeio, táxis, etc.

O primeiro passo é o enquadramento do veículo idealizado nesta tabela para posterior utilização dos parâmetros como base para a linha de raciocínio proposta neste trabalho. Como pretende-se trabalhar com um veículo de passageiros, a coluna D é a que mais se aproxima das características do veículo desejado. Com o atual estágio da tecnologia de veículos elétricos os valores obtidos para os veículos mais avançados são mais otimizados dos que os propostos pelo ciclo SAE J277a D. Porém, do ponto de vista do autor, é válido utilizar como valores referência os citados na tabela, mesmo que os valores pretendidos para aceleração e velocidade máxima do veículo proposto sejam superiores aos expostos.

Tabela 10 – Ciclos para Veículos Elétricos SAE – J 277a [14].

Parâmetros	Unidades	A	B	C	D
Velocidade Máxima, V	Km/h (+/-1,5)	16	32	48	72
Tempo de Aceleração	S	4 +/- 1	19 +/- 1	18 +/- 2	28 +/- 2
Tempo de Cruzeiro	S	0	19 +/- 1	20 +/- 1	50 +/- 2
Tempo de Costeamento*	S	2 +/- 1	4 +/- 1	8 +/- 1	10 +/- 1
Tempo de Frenagem	S	3 +/- 1	5 +/- 1	9 +/- 1	9 +/- 1
Tempo Parado	S	30 +/- 2	25 +/- 2	25 +/- 2	25 +/- 2
Tempo Total	S	39 +/- 2	72 +/- 2	80 +/- 2	122 +/- 2

* Tempo de Costeamento: tempo em que o veículo fica sem esforço motriz, apenas desacelerando em consequência das perdas.

6.5. Definição das Características do Veículo

Definir com exatidão as características de um veículos elétrico não é tarefa fácil, pois este possui inúmeras variáveis que influenciam no comportamento ou na característica final do veículo. Como o enfoque principal deste trabalho é a fonte energética, e o parâmetro discutido é a quantidade de energia disponível e a forma como ela se apresenta nos dois sistemas de fornecimento, as baterias e a célula de combustível, o veículo pode ser idealizado com base nos já existentes, uma vez que estes já foram testados.

Através dos dois veículos detalhados anteriormente, o FEV da Nissan e o EV1 da General Motors, é possível traçar o perfil de um veículo elétrico moderno e arrojado, com um sistema híbrido de fornecimento de energia elétrica que proporcionaria maior autonomia e versatilidade.

6.5.1. Massa do Veículo

A massa é um fator fundamental no projeto de um veículo elétrico e para estimá-la seria necessário conhecer a massa de cada componente que faria parte do veículo. Como trabalha-se apenas com hipóteses, deduzir-se-á a massa usando como referência os veículos citados.

O FEV possui 900 kg de massa total, sendo que destes 200 kg correspondem à massa das baterias de Níquel-Cádmio; conseqüentemente o veículo completo com todos os equipamentos e acessórios pesa aproximadamente 700 kg. O EV-1 possui aproximadamente 500 kg de massa de baterias, sendo que a massa total do veículo, segundo a General Motors, é de 1368 kg.

Pode-se adotar **1.200 kg** como o valor da massa total do veículo como hipótese pois estaria dentro de parâmetros possíveis e viáveis.

6.5.2. Massa do Sistema Energético

O sistema energético é a incógnita deste trabalho. É exatamente o seu dimensionamento e o balanço entre os dois sistemas - baterias e célula de combustível - que pretende-se definir para que o veículo idealizado possa ganhar autonomia sem perder desempenho, proporcionando maior liberdade ao usuário. Como a massa total do veículo é um dado fundamental para o cálculo das forças atuantes, da potência necessária e da quantidade de energia gasta, utilizar-se-á o equivalente à massa das baterias do EV-1, que é da ordem de **500 kg**, como valor referência. Esta escolha deve-se ao fato que o tipo de bateria utilizado no EV-1 é mais compatível. Elas são do tipo chumbo-ácido, que são as mais utilizadas e de maior viabilidade e larga penetração, enquanto que as utilizadas no FEV, do tipo Níquel-Cádmio, apesar da maior densidade energética e maior potência, são muito mais cara, tem restrições em relação à matéria prima e principalmente aos danos ambientais que podem ser provocados pela toxicidade do Cádmio, tornando incoerente a sua aplicação em veículos do tipo “emissão zero”, porque exigiriam um rígido controle em relação ao destino e reciclagem do material após o término da vida útil das baterias.

6.5.3. Massa Bruta do Veículo

Um veículo elétrico de passageiros normalmente tem capacidade para duas pessoas devido ao espaço e ao peso reservados ao sistema de armazenagem de energia. Considerando-se que a massa média de dois passageiros com a bagagem incluída corresponda a 150 kg, a massa bruta do veículo para efeito de cálculo das forças atuantes será de **1.350 kg**.

6.5.4. Energia Disponível no Veículo

Para os cálculos iniciais utilizar-se-á como parâmetro neste item os dados do EV-1, em função do tipo de bateria adotado. O total de energia disponível no EV-1 com as baterias completamente carregadas perfaz **16,8 kWh** e o pico da densidade energética das baterias utilizadas estaria próximo aos 35 Wh/kg, conforme mostrado respectivamente nas Tabelas 4 e 5 do Capítulo 2. No FEV a energia disponível nas mesmas condições chega a 11,6 kWh para uma massa de baterias de menos da metade, enquanto o pico da densidade energética neste caso seria de 58 Wh/kg, conforme mostrado na Tabela 6 do Capítulo 2.

6.5.5. Coeficiente de Resistência Aerodinâmico

Tanto o FEV quanto o EV-1 possuem coeficiente de resistência aerodinâmico na ordem de **0,19**.

6.5.6. Coeficiente de Resistência ao Rolamento

A resistência de rolamento dos pneus utilizados em ambos os veículos tem valores próximos a **0,005**. Ambos poderão ser adotados como valores referência para o veículo idealizado.

6.5.7. Área Frontal do Veículo

A área frontal pode ser baseada nas medidas do FEV descritas na Tabela 6: largura: 1,698 m; altura: 1,290 m; distância do solo: 0,15 m (estimada); área frontal: **1,94 m²**.

6.5.8. Aceleração do Veículo

A capacidade de aceleração é diretamente proporcional à potência. Como o valor da massa do veículo foi fixado inicialmente em 1.350 kg (700 kg do veículo + 500 kg do sistema energético + 150 kg de carga útil), será preciso determinar um valor de aceleração para que seja possível definir a potência. Neste item novamente tem-se

valores de referência muito díspares. Em um extremo tem-se o EV-1 com uma capacidade de aceleração de 0 a 100 km/h no tempo de apenas 8,5 segundos. Este é um tempo considerado pequeno mesmo para veículos com motor a combustão. No Brasil são poucos os veículos aqui produzidos que tem esta capacidade. Por outro lado pelo ciclo SAE J 277a D, o tempo estipulado para se atingir uma velocidade de 72 km/h é de 28 segundos, "quase uma eternidade" se comparado com o tempo do EV-1. O FEV faz de 0 a 40 km/h em 3,6 segundos. Outra referência pode ser subtraída da Tabela 11, que descreve valores mais realista em relação aos níveis de performance média de veículos elétricos de uma forma geral. Para parametrar a aceleração pode-se fixar um valor desejável e verificar posteriormente a sua viabilidade em relação ao conjunto.

Tabela 11 – Performances médias atualizadas de veículos elétricos [17].

	Veículo de passageiros	Perua Van	Micro onibus	Onibus urbanos
Autonomia (km)	120 a 250	100 a 150	140 a 200	150 a 300
Vel. Máx. (km/h)	100 a 120	80 a 100	80	70
Vel. Cruzeiro (km/h)	100	80	60	60
Aclive máx. (%)	30	20 a 25	15 a 20	12 a 15
Acel. (s) 0 a 50 Km/h	7 a 10	10 a 15	12 a 18	15 a 20

Para valores constantes de aceleração (aceleração média), pode-se calcular o seu valor dividindo a velocidade final alcançada pelo tempo, o que permite deduzir os valores de aceleração para cada caso citado, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparativo da capacidade de aceleração entre tipos de veículos para diferentes faixas de velocidade.

Referência	Aceleração	Velocidade alcançada
EV-1 – General Motors	3,47 m/s ²	100 km/h
FEV – Nissan	3,08 m/s ²	40 km/h
Tabela 11 – Veículos de Passageiros	1,63 m/s ²	50 km/h
Ciclo SAE – J 277 a D	0,71 m/s ²	72 km/h

Com os dados da Tabela 12 é possível fazer uma avaliação quantitativa dos valores de aceleração dos dois veículos referência e os números sugeridos pelas duas tabelas apresentadas, e notar a grande diferença que há entre os números. É claro que a aceleração tem uma relação direta com a velocidade alcançada e a potência disponível. Nota-se que pela tabela o valor da taxa de aceleração do FEV é pouco menor do que a do EV-1, que possui duas vezes e meia mais potência; porém a velocidade alcançada com esta taxa é de apenas 40 km/h, sendo que para alcançar os 100 km/h com a mesma taxa seria preciso dispor de uma potência muito maior; ainda assim é possível avaliar as diferenças entre os diversos exemplos. Estas diferenças se justificam porque o Ciclo SAE J277aD foi idealizado a mais de duas décadas atrás, baseando-se nos veículos da época. A Tabela 11 baseia-se em dados de veículos recentes; porém ela considera os valores médios desta categoria de veículos. Os dois veículos referência, o FEV e o EV-1, podem ser considerados, entre os veículos elétricos, como veículos de alta performance, se enquadrando melhor dentro das considerações citadas no parágrafo anterior.

O tempo do EV-1 pode ser considerado muito rápido para um veículo elétrico, exigindo uma potência muito elevada para o peso do veículo. Pode-se arbitrar um valor para a capacidade de aceleração do veículo idealizado, na faixa de 3 m/s^2 para atingir uma velocidade de 50 km/h.

6.5.9. Potência do Motor

A potência poderá ser calculada segundo parâmetros pré-estabelecidos. Neste aspecto os dois veículos de referência possuem características diversas. O EV-1 possui um único motor de 100 kW de potência, enquanto o FEV possui dois motores com 20 kW cada, totalizando 40 kW. Normalmente um veículo necessita de baixos valores de potência na maior parte do tempo de sua utilização. Potências mais elevadas são necessárias principalmente nas acelerações rápidas e para superar rampas com inclinações mais acentuadas, uma vez que o aumento de peso por excesso de carga, que seria uma situação normal em veículos de motor a combustão, não seria comum no caso de veículos elétricos em função da sua limitação de espaço e carga máxima útil. Porém a potência de um veículo elétrico não pode ser negligenciada por duas fortes razões: uma é a segurança em situações de emergência e a outra é a questão mercadológica, em

função da cultura do mercado consumidor. No primeiro caso, é essencial que os veículos elétricos tenham uma boa capacidade de resposta em ultrapassagens com pequena margem de segurança (muito comum em ruas ou estradas de mão dupla), ou em situações de emergência, como por exemplo quando houver a necessidade de um rápido deslocamento de um ponto a outro, caso que pode ocorrer ao atravessar uma pista ou um cruzamento e um outro veículo surge repentinamente em alta velocidade.

No segundo caso é possível constatar a afirmação pela própria atitude da General Motors ao desenvolver o EV-1. A preocupação com o desempenho do veículo foi sem dúvida muito superior às próprias necessidades normais de um veículo elétrico ou até mesmo de boa parte dos veículos, com motor a combustão, de passeio comuns. O que a General Motors procurou fazer, uma vez que não se tratava apenas de um protótipo sem maiores compromissos e sim de um novo veículo a ser lançado no mercado, foi dar um aspecto esportivo e de alto desempenho no veículo, que são qualidades normalmente desejáveis pelo consumidor mais exigente.

Nos países industrializados a consciência ecológica é muito mais forte do que em outros países, facilitando a introdução de produtos com nova tecnologia que tenham por principal motivação serem ecologicamente benéficos. Porém, por melhor intencionado que seja o comprador de um veículo elétrico, a relação custo benefício permanece. Se o futuro proprietário de um veículo elétrico não tiver um veículo que na medida do possível seja equivalente, em seu conjunto, a um outro veículo similar com motor a combustão, é pouco provável que o número de interessados seja tal que justifique a sua produção numa escala competitiva em termos de custos. O EV-1 já foi lançado no mercado e, segundo a imprensa, a expectativa de venda está abaixo do esperado. A razão alegada é o alto custo para o padrão americano (aproximadamente US\$ 30.000), uma vez que um veículo similar - no sentido da categoria e acessórios - com motor a combustão, custa praticamente a metade. Além do preço a limitação na autonomia e a necessidade de um longo período para recarga das baterias são fatores que somados podem, principalmente na fase de implementação, abalar os planos de uma penetração mercadológica mais incisiva. Portanto o fator potência é um item importantíssimo e, do ponto de vista do autor, considerando-se as tecnologias mais recentes em motores e controle que possibilitam obter altos valores de potência com baixo peso e volume (o motor do EV-1 com 100 kW de potência pesa apenas 78 kg) [25]), deve-se projetar o veículo com possibilidade de se obter uma potência elevada.

Esta questão nos veículos elétricos não é difícil de ser resolvida porque dependendo do projeto do motor é possível obter até duzentos por cento de força a mais em um curto período sem causar danos ao equipamento. O mais usual é motores que possibilitem sobrecarga de cem por cento por um tempo aproximado de 30 s. Esta característica atenderia a necessidade de praticamente todas as situações críticas ou de emergência de um usuário normal, sendo suficiente para proporcionar a sensação de segurança em relação ao torque, que os veículos mais potentes possuem. Isto porque o motor elétrico, dependendo do tipo e da configuração, leva uma grande vantagem em relação ao motor a explosão, pois pode trabalhar com torque elevado mesmo em baixas rotações, enquanto que o outro normalmente fornece o torque máximo em determinada rotação, cuja faixa normalmente é elevada. Em outras palavras, um veículo com motor a explosão de potência elevada oferece maior conforto e segurança para o usuário em baixas velocidades do que um outro do mesmo tipo de pequena potência. No caso do veículo elétrico esta diferença pode simplesmente não existir, razão pela qual a simples reserva de potência já garantiria o equacionamento da questão, podendo-se dimensionar a potência nominal do motor para o regime máximo de operação constante pretendido. Isto posto, a potência do veículo pode ser calculada pela fórmula:

$$P = Ft \cdot Vc$$

onde P é a potência máxima necessária e Vc é a velocidade cruzeiro.

Considerando-se que a velocidade de cruzeiro do veículo seja de 50 km/h (13,89 m/s²), e que a pista possua um aclive com 10% de inclinação, a potência necessária nesta situação para o veículo idealizado será de:

$$P = [(1350 \times 3) + (0,5 \times 1,2 \times 1,94 \times 192,93 \times 0,19) + (1350 \times 0,05) + (1350 \times 9,8 \times 0,01)] \times 13,89$$

ou seja,

$$P = 76.161,37 \text{ W}$$

Para um veículo urbano a potência de 76 kW é um valor bastante razoável que pode ser adotado como valor de potência de pico. Atenderia as necessidades de uma aceleração ainda mais rápida em uma pista plana, proporcionando a sensação de segurança e desempenho de um veículo convencional de excelente performance. É

interessante notar que este é um valor mediano entre as potências máximas dos dois veículos de referência.

6.6. Simulação do Desempenho do Veículo Através de Programa Computacional

O Programa computacional utilizado para simular a performance do veículo dimensionado foi baseado no programa proposto no livro "Veículos Elétricos" [14] que é uma obra bastante abrangente e elucidativa sobre o assunto, que apesar de ter sido editado a quase uma década continua a prestar um importante auxílio aos que se interessam pelo tema.

O Programa original foi escrito em linguagem BASIC. Para este trabalho ele foi atualizado inicialmente em linguagem PASCAL e posteriormente foi aprimorado utilizando-se a linguagem DELPHI para possibilitar também a visualização gráfica dos dados.

6.6.1. Descrição do Programa Computacional

Os principais passos do Programa, incluindo os cálculos por ele efetuados, são mostrados nas Tabelas 13 e 14. Os parâmetros são baseados no ciclo SAE J277a - D. Neste ciclo não é considerado o fator de inclinação da pista; portanto pressupõe-se que a pista é plana. O tempo de aceleração equivale a pouco menos de 30% do tempo total do veículo em movimento; por outro lado, em termos de consumo de energia, neste período são consumidos 80% da energia gasta no ciclo. A velocidade de cruzeiro adotada por este ciclo, que é de 20 m/s (72 km/h), pode ser considerada alta para os limites tolerados dentro do perímetro urbano, exceto em avenidas de grande fluxo (vias expressas), como por exemplo as marginais do rio Tietê e Pinheiros na cidade de São Paulo, que pelo menos por hipótese deveriam ser avenidas de tráfego rápido e fluxo constante, sem paradas. Com os dados fornecidos pelo Programa será possível fazer uma comparação com informações fornecidas por fabricantes de veículos elétricos e avaliar a pertinência em relação à expectativa de autonomia declarada por eles. É certo que a autonomia varia significativamente de acordo com as características do percurso, o número de paradas, a taxa de aceleração, a forma de conduzir o veículo, o estado das baterias, etc. Porém com testes práticos realizados pelos fabricantes, que a exemplo da GM em

relação ao EV-1 submeteu veículos em fase pré industrial a testes com diversas pessoas, com comportamentos distintos e percursos diferenciados para testar a resistência do veículo sob uso contínuo em relação ao aquecimento e a autonomia [26], é possível fazer um paralelo entre os resultados práticos e os obtidos utilizando-se o programa.

As Figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 e 44 mostram as principais telas do Programa Computacional e suas funções.

Tabela 13 - Relação dos dados inseridos no Programa computacional.

	Dados iniciais
Especificações	Massa bruta (kg)
	Massa das baterias (kg)
	Área frontal do veículo (m ²)
	Densidade energética das baterias (Wh/kg)
	Coefficiente aerodinâmico
	Constantes devido à resistência de rolamento (K1)
	Potência do motor (W)

Tabela 14 - Cálculos efetuados no Programa computacional.

	Dados inseridos	Cálculos efetuados
Aceleração	Velocidade inicial (m/s)	Potência necessária (W)
	Velocidade de cruzeiros (m/s ²)	Energia necessária (Wh)
	Tempo gasto para atingir a vel. cruzeiro (s)	Percurso percorrido (m)
Velocidade de cruzeiro	Velocidade de cruzeiros pretendida (m/s)	Potência necessária (m/s)
	Tempo de velocidade de cruzeiro (s)	Energia necessária (Wh)
		Percurso percorrido (m)
Costeamento	Velocidade de cruzeiro (m/s)	Energia restante (Wh)
	Tempo de costeamento (s)	Percurso percorrido (m)
		Vel. após cost. (m/s)
Frenagem regenerativa	Velocidade no início da frenagem (m/s)	Energia recuperada na frenagem (Wh)
	Tempo de frenagem (s)	
	Velocidade após a frenagem (m/s)	Percurso percorrido (m)

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Massa Bruta do Veículo: kg

Massa das Baterias: kg

Energia da Carga Útil das Baterias: Wh

Potência do Motor: Watts

Coefficiente Atrito Rodas: Coef. Resist. Rolamento:

Vel. Máxima do Veículo: m/s Veloc. Máxima do Motor: rpm

Clique aqui antes de passar a próxima página

Calc. Dados Iniciais

MBVEIC	MBAT	EBBAT	PMOT	CAER	CRROL	AFVEIC	VMPLAN	VC
1350,0	500,0	35	76000	0,19	0,050	1,94	35	

Navigation buttons: < << >> > + - ✓ ✕ EXIT

Figura 36 - Dados iniciais.

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Velocidade de Cruzeiro: m/s

Tempo de aceleração: seg.

Potência necessária: Watts

Energia necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso total: metros

Botão: Cálculo

Figura 37 - Cálculo da potência e energia necessárias para a aceleração.

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Cruzeiro: seg.

Potência Necessária: Watts

Energia Necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Distância Percorrida: metros

Percurso total: metros

Figura 38 - Cálculo da potência e energia necessárias durante o tempo de velocidade de cruzeiro.

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Costeamento: seg.

Velocidade após Costeamento: m/s

Energia Cinética restante: Wh

Distância percorrida no costeamento: metros

Percurso total: metros

Figura 39 - Cálculo da velocidade e da distância percorrida após o costeamento.

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento **Frenagem Regenerativa** Tabela / Gráfico

Tempo de frenagem: seg.

Velocidade antes da frenagem: m/s

Velocidade após frenagem: m/s

Energia regenerada: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso percorrido: metros

Percurso total: metros

Figura 40 - Cálculo da energia regenerada e do percurso percorrido durante a frenagem.

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento **Frenagem Regenerativa** Tabela / Gráfico

← → + - %

Gráficos

POTENCIA	EHCC	ERDAT	PTOTAL	BPERC	VPCOST	ECREST	EREGEN	POTI
13437,79								
13538,65								
13619,56								
13682,25								
13728,34								
13759,32								
13776,56	155,07	17344,93	319,1	319,1				
3156,14								3
3156,14								3
3156,14								3
3156,14								3
3156,14								3
3156,14								3
3156,14								3

Figura 41 - Tela de menu dos gráficos.

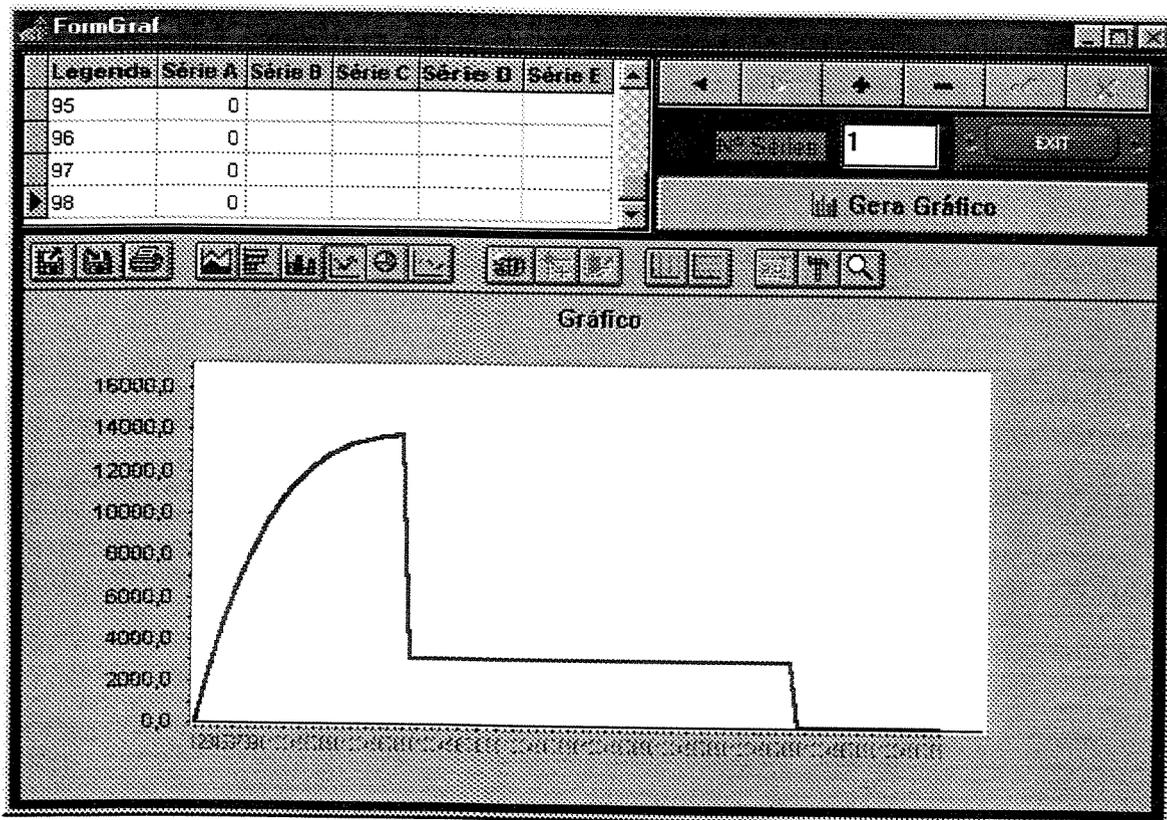


Figura 42 - Gráfico Potência x Tempo (W/s)

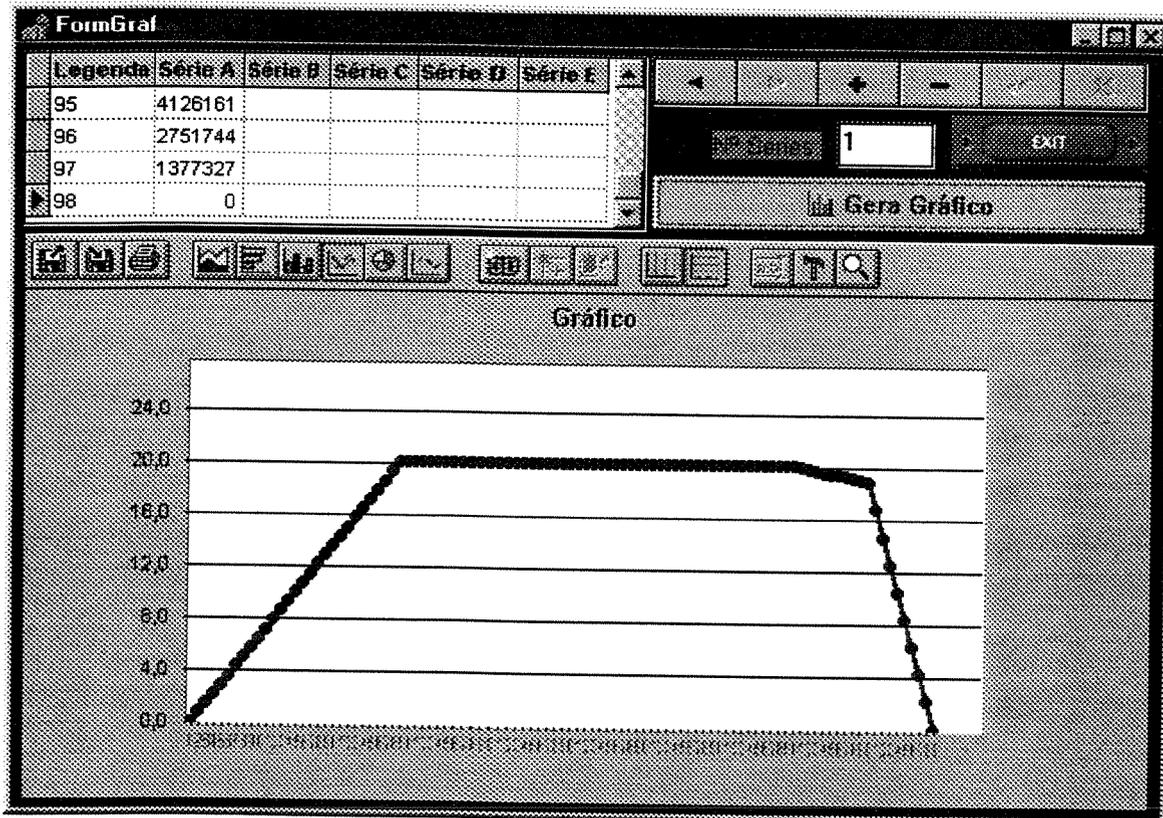


Figura 43 - Gráfico Velocidade x Tempo (m/s)

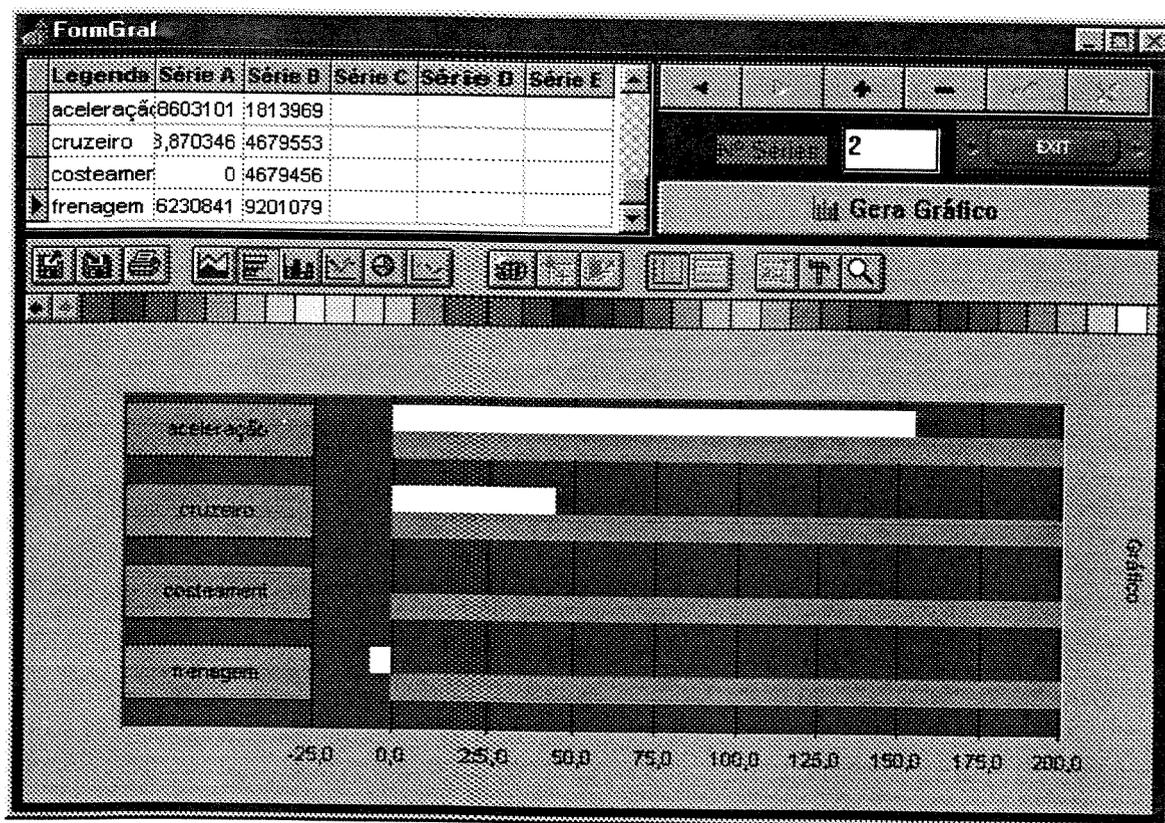


Figura 44 - Gráfico do Consumo de Energia (Wh)

6.6.2 Considerações sobre o Resultado dos Cálculos Efetuados pelo Programa

A Tabela 15 relaciona os resultados dos cálculos efetuados pelo Programa computacional. O tempo total de um ciclo SAE J277a-D é de 122 s, dos quais 97 s é o tempo em que o veículo está em movimento, sendo a distância total percorrida neste intervalo de 1.617,1 m e a energia total despendida neste tempo para fazer este percurso de 192,34 Wh. Utilizando baterias de chumbo-ácido como pressuposto anteriormente, a energia utilizada não deverá ultrapassar o nível de descarga de 50% da capacidade das baterias para não reduzir a sua vida útil. Portanto dos 17.500 Wh armazenados à plena carga apenas 8.750 Wh poderão ser utilizados. Com esta quantidade de energia é possível completar-se 45,49 ciclos de 1.617,1 m, que somados perfazem uma autonomia por carga de baterias de 73,56 km.

Este valor mostra-se pertinente e realista se comparado com as informações fornecidas pelos fabricantes do EV-1 e do FEV no Capítulo 2 desta Tese. A NISSAN prevê para o FEV 100 km de autonomia em trânsito urbano. O FEV utiliza 200 kg de baterias de níquel-cádmio que proporcionam 11,6 kWh de energia, portanto menos que

o EV-1, mas devido ao seu menor peso o gasto de energia também é menor. Aplicando estes dados no Programa computacional obteve-se como resultado que a energia gasta por ciclo é de 162 Wh e o percurso percorrido é de 1.613 m. Como as baterias de níquel-cádmio não sofrem alteração se forem completamente descarregadas [60] pode-se utilizar toda a sua capacidade de carga, mas para que haja uma pequena margem de segurança utilizar-se-á como valor referência 90% do total, o que equivale à 10,4 kWh e permite realizar 64,4 ciclos, totalizando um percurso de 103,8 km, ou seja, praticamente coincide com o valor estimado pelo fabricante para trânsito urbano, conforme mostra a Tabela 6 do Capítulo 2.

Tabela 15 - Cálculos efetuados pelo Programa Computacional.

	Dados inseridos	Cálculos efetuados
Aceleração	Velocidade inicial (0 m/s)	Potência necessária (15.580 W)
	Velocidade de cruzeiros (20 m/s ²)	Energia necessária (155,07 Wh)
	Tempo gasto p/atingir a vel.cruz. (28 s)	Percurso percorrido (319,1 m)
Velocidade de cruzeiro	Vel. de cruzeiro pretendida (20 m/s)	Potência necessária (3.156,14 W)
	Tempo de velocidade de cruzeiro (50 s)	Energia necessária (43,87 Wh)
		Percurso percorrido (1.000 m)
Costeamento	Velocidade de cruzeiro (20 m/s)	Energia restante (65,986 Wh)
	Tempo de costeamento (10 s)	Percurso percorrido (213,7 m)
		Vel. após costeamento (18,7 m/s)
Frenagem regenerativa	Velocidade no início da frenagem (m/s)	Energia recuperada na frenagem
	Tempo de frenagem (9 s)	(6,598 Wh)
	Velocidade após a frenagem (0 m/s)	Percurso Percorrido (84,4 m)
Total		Energia gasta (192,34 Wh)
		Percurso Percorrido (1.617,1 m)

No caso do EV-1 a autonomia prevista pelo fabricante é de 130 km, mas o fabricante não especifica que tipo de utilização permite esta autonomia. Deve-se notar ainda que os cálculos efetuados pelo Programa referem-se às forças atuantes no veículo em movimento retilíneo. Para uma análise mais rigorosa e precisa em relação à energia efetivamente gasta seria necessário considerar as perdas decorrentes do processo de carga e descarga das baterias, o grau de eficiência do motor, acionamento, controle e

transmissão, além do próprio motorista ao conduzir o veículo. Considerando-se a eficiência do condutor em 90%, o processo de carga e descarga das baterias 80% e a transmissão 93% [14], o motor, controle e acionamento, com o avanço da tecnologia devem atingir em conjunto atualmente 90%. Estes valores acumulados resultam numa eficiência global de 60%, que implicaria numa redução ainda maior da autonomia prevista por carga das baterias, tornando os valores alcançados através dos cálculos feitos neste trabalho ainda menores do que os divulgados pelos fabricantes.

Na verdade isto se explica pela metodologia empregada. O ciclo SAE J277aD apesar de não incluir nenhum trecho do percurso com aative, considera o tempo de aceleração - como já comentado anteriormente - em aproximadamente um quarto do tempo de percurso, onde é consumido por volta de 80% da energia total necessária para um ciclo. Se o número de paradas for menor dentro de um determinado trajeto urbano, necessitando conseqüentemente de menos aceleração, a autonomia será sensivelmente ampliada. A autonomia divulgada pelos fabricantes é provavelmente determinada por testes em situações reais. De qualquer forma sempre ter-se-á valores relativos pois o número de variáveis é muito grande; portanto, para o desenvolvimento da linha racional proposta nesta Tese, os valores obtidos nos cálculos do Programa satisfazem por tratar-se de um veículo hipotético além de se mostrarem próximos aos valores reais divulgados pelos fabricantes.

Com a definição das principais características do veículo, pode-se dimensionar com mais segurança o sistema energético na sua forma híbrida. Mostra-se mais conveniente em primeira estância a fixação de parâmetros para a nova configuração energética do veículo, o que será feito no próximo Capítulo, para uma posterior análise de casos.

7 - Dimensionamento do Sistema Híbrido de Suprimento de Energia

Por uma questão de custo, como já comentado anteriormente, é mais viável se utilizar pequenas células de combustível dimensionadas para suprir a necessidade de potência em regimes constantes de marcha, garantindo assim maior autonomia, e utilizar baterias eletroquímicas para garantir os picos de potência necessários, embora tecnicamente uma célula de combustível pudesse ser dimensionada de forma a atender o pico de potência exigido para um veículo [61;62]. Desta forma ter-se-ia um *veículo elétrico híbrido em paralelo*.

O custo de um banco de baterias com alta capacidade de potência e baixa capacidade de energia disponível, se comparado com o custo de uma célula de combustível capaz de fornecer o mesmo pico de potência, é muito menor, tornando-se mais viável utilizar as baterias em conjunto com células de combustível, razão pela qual a maioria dos projetos desenvolvidos baseiam-se nesta lógica.

O dispositivo de potência que um veículo a célula de combustível necessita não teria que ser necessariamente uma bateria eletroquímica; ele poderia ser um ultracapacitor ou um volante. Ultracapacitores tem densidade de potência extremamente alta, mas, até o momento, densidades de energia muito baixas [63]. Porém, se são alcançadas metas de desempenho de energia, então os ultracapacitores serão bastante atraentes como dispositivos de pico de potência para veículos a célula de combustível.

Para que a célula de combustível de um veículo elétrico forneça a potência de pico necessária, ela deverá ter uma densidade de potência muito alta (em W/kg ; W/l). Em um veículo elétrico alimentado apenas por baterias, para que a bateria possa prover tanto a potência de pico como proporcionar a autonomia pretendida para sua utilização, deverá ter alta densidade de potência e também alta densidade de energia (em W/kg e Wh/kg ; Wh/l).

A questão é encontrar um ponto ótimo de equilíbrio entre a potência da célula de combustível a ser utilizada e a capacidade e a massa do dispositivo fornecedor de potência de pico que trabalhará como complemento da célula. Como as baterias eletroquímicas são o meio usual de armazenamento de energia em veículos elétricos, elas são as mais indicadas para fornecer a potência de pico.

7.1. Dimensionamento dos Componentes

Para se dimensionar um sistema híbrido de suprimento energético é preciso fixar alguns parâmetros, sendo estes determinados pelas características desejáveis para o veículo idealizado. Como já foi discutido anteriormente, para que um veículo elétrico seja competitivo em relação a um veículo convencional é necessário que ele se equipare ao máximo em relação às qualidades deste. Portanto o sistema energético híbrido deverá ser capaz de atender as seguintes características:

- a autonomia deverá ser ampliada, tornando-se independente da necessidade de reabastecimento por fonte de energia elétrica externa;
- a potência de pico total do sistema deverá ser maior ou igual à potência de pico do motor;
- o peso do sistema energético híbrido não deverá ser superior ao sistema de referência com baterias;
- o sistema deverá ser tecnicamente dimensionado a fim de preservar a vida útil dos equipamentos;

Portanto, o sistema energético na sua composição híbrida não deverá ultrapassar os 500 kg de massa estipulados inicialmente para o veículo apenas a baterias. Com a energia útil disponível nos 500 kg de baterias chumbo-ácido (8.750Wh) do veículo original, é possível alcançar uma autonomia de 73,56 km pelos parâmetros do ciclo SAE. Adotando-se como referência a célula de combustível de tecnologia aperfeiçoada produzida pela DeNora, pela Tabela 9 do Capítulo 5 pode-se extrair o rendimento, que é da ordem de 57%, e a densidade de potência que é 0,1 kW/kg, considerando-se apenas o stack da célula. Os periféricos e o tanque de hidrogênio serão estimados adiante.

O critério de dimensionamento dos componentes prende-se apenas à densidade energética e/ou de potência, uma vez que o objetivo deste trabalho é prioritariamente estabelecer a melhor proporcionalidade entre os dois sistemas. Considerações técnicas, como por exemplo a compatibilização da tensão e corrente dos diversos componentes, ou ainda, a especificação do tipo mais adequado de cada componente, foram direcionadas no sentido de se estabelecer paralelos com equipamentos já existentes apenas para quantificar e posicionar as hipóteses levantadas e os cálculos efetuados o mais próximo possível de uma situação real. O dimensionamento correto necessitaria de dados mais específicos dos componentes aliado à possibilidade de projetá-los de

acordo com a melhor e mais avançada tecnologia disponível, tarefa que pode vir a ser um tema interessante para novos trabalhos. Paralelamente a esta questão, a compatibilidade termodinâmica entre os componentes de potência do veículo, como será demonstrado adiante, é muito importante, exigindo que se calcule o dimensionamento termodinâmico dos mesmos.

7.1.1. Massa de Hidrogênio

O poder calorífico inferior do hidrogênio corresponde a 33,38 kWh/Kg. Para se obter a mesma quantidade de energia fornecida pelas baterias, através de uma célula de combustível com 57% de rendimento, será preciso 460 g de hidrogênio. Como há a necessidade de se utilizar um conversor elevador de tensão de fluxo unilateral na saída da célula, devido à característica desta (dentro do atual estado de desenvolvimento tecnológico) de trabalharem com baixa tensão, haverá uma perda. Outra questão a ser considerada é a compatibilização e o gerenciamento das energias fornecidas pela célula e pelas baterias, além do carregamento destas últimas, quando a energia gerada pela célula não estiver sendo consumida pelo motor, ou ainda, quando houver regeneração de energia pelo sistema de frenagem. Considerando-se que toda esta operação seja feita por um único equipamento, a exemplo do que é utilizado no Green Car [11], dotado dos circuitos eletrônicos necessários para este fim, como mostra o esquema da Figura 45, pode-se estimar o seu rendimento baseando-se na faixa inferior de rendimento de um conversor convencional, que equivale a 80%. Desprezando-se a perda de eficiência da parcela da energia gerada pela célula, que passa pelas baterias para recarregá-las antes de alimentar o motor, a **quantidade de hidrogênio** necessária passa a ser **575 g**.

7.1.2. Massa dos Componentes do Sistema da Célula de Combustível

Para o dimensionamento de todo o sistema que compõe uma célula de combustível é preciso considerar o peso do stack, das tubulações, equipamentos auxiliares, o peso do tanque de armazenagem do hidrogênio e seus periféricos. O sistema de trocas térmicas pode ser compartilhado entre ambos, como mostra o esquema apresentado na Figura 45.

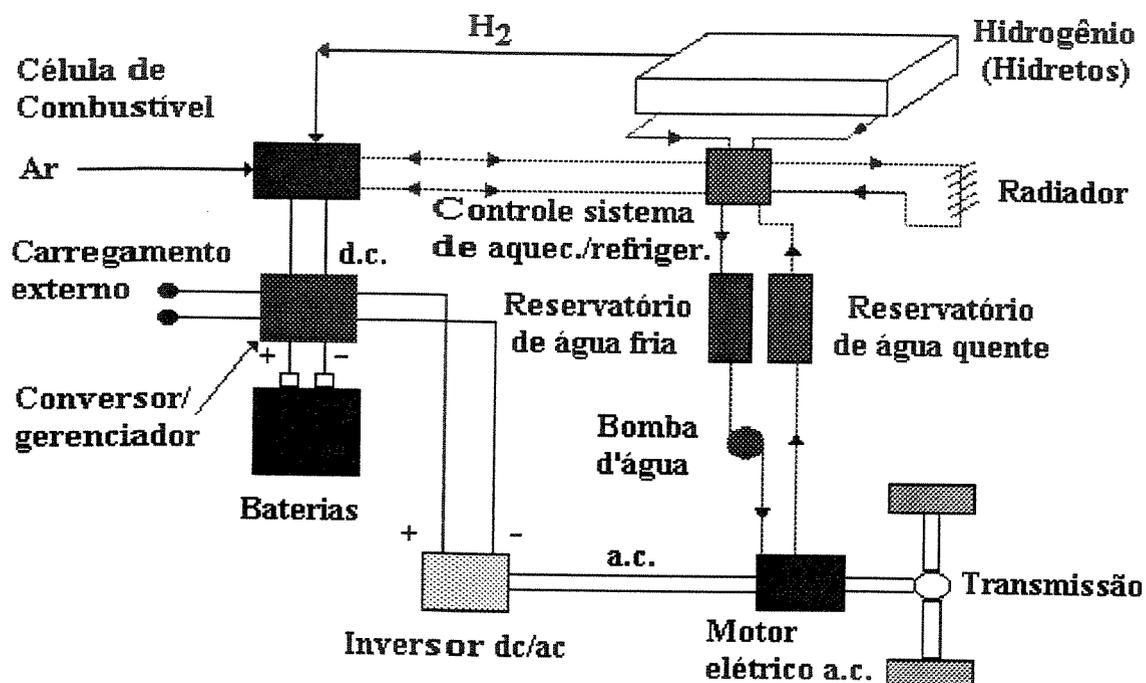


Figura 45 - Esquema geral de um veículo elétrico híbrido baterias/célula de combustível.

a- Stack:

O tempo de funcionamento da célula para gerar a energia necessária capaz de ao menos atender a autonomia acima, deverá ser por hipótese menor ou igual ao tempo total necessário para fazer os 45,49 ciclos SAE correspondentes, que é de 5.549 segundos (\cong 92 minutos). Esta hipótese foi adotada para possibilitar uma comparação mais justa pois, caso fosse considerado o funcionamento da célula fora do período de utilização do veículo que, neste caso tem como parâmetro o ciclo SAE, o número de possibilidades seria maior e o seu dimensionamento dependeria do tempo adicional disponível para a célula recarregar as baterias. Se a célula operar no máximo de sua potência de conversão, ela necessitará de 7,1 kW para gerar a energia necessária em 92 minutos de funcionamento. Porém para que não haja um desgaste excessivo do stack e demais componentes da célula, o que comprometeria a sua vida útil, e para se evitar o regime de trabalho constante no limite de sua capacidade, que acarretaria em perda de eficiência da célula, é necessário utilizar uma célula com uma potência um pouco maior. Como, dos componentes utilizados no sistema energético híbrido o stack da célula é o de maior custo, não é viável sobredimensioná-lo exageradamente. Devido a esta característica, uma célula dimensionada com uma potência nominal 20% superior

deverá ser suficiente para preservar a sua vida útil, ou seja 8,5 kW. Como a referência utilizada é um stack que possui 0,1 kW/kg de densidade de potência, a massa deste stack corresponderá a 85 kg.

b- Tanque de Hidretos Metálicos:

O volume e o peso do sistema de armazenagem do hidrogênio varia de acordo com a forma de armazenagem - gás comprimido, líquido ou compostos intermediários (entre os quais estão os hidretos metálicos) - e a tecnologia empregada na sua construção. Estes aspectos já foram discutidos na dissertação de mestrado do autor [21]. A Figura 46 ilustra os três tipos de tanques citados. A Tabela 16 mostra um comparativo entre o peso, o volume e a capacidade destes tanques, baseado em dados de experiências feitas com estes sistemas de estocagem pela empresa Belga VCST Hydrogen Systems, que foram utilizados em um ônibus a hidrogênio [64].

O uso de hidretos metálicos para a estocagem de hidrogênio em veículos automotivos é grandemente motivada pelas baixas densidades deste gás quando comprimido, mesmo se submetido a altas pressões, o custo e os problemas tecnológicos para liquefazê-lo, além das questões de segurança envolvidas nestas outras duas formas de armazenamento.

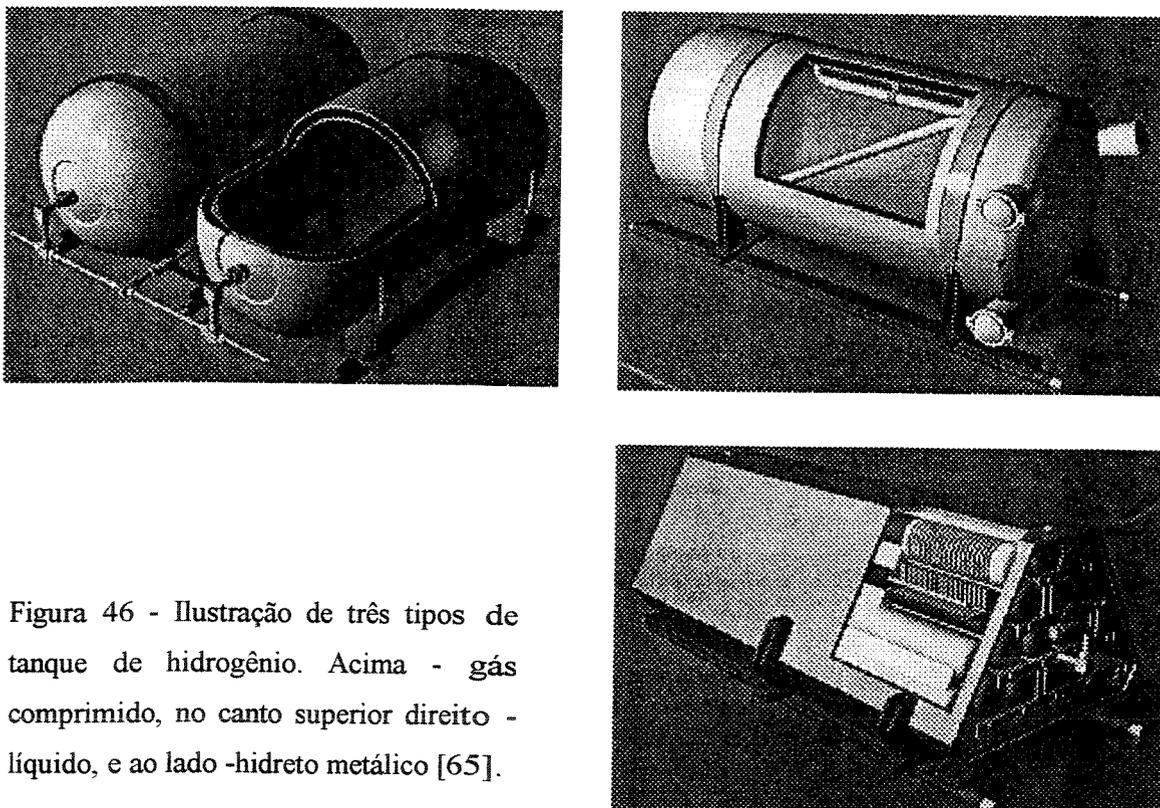


Figura 46 - Ilustração de três tipos de tanque de hidrogênio. Acima - gás comprimido, no canto superior direito - líquido, e ao lado -hidreto metálico [65].

Tabela 16 - Comparativo entre os três principais sistemas de armazenagem de hidrogênio.

	Unidade	Gás comprimido	Hidrogênio líquido	Hidreto metálico
Pressão de operação	Bar	200	5	10
Temperatura de estocagem	°C	Ambiente	-253°	Ambiente
Densidade energética	Nm ³ /kg *	0,20	0,68	0,093
Densidade volumétrica	Nm ³ /l *	0,16	0,40	0,26

* 1 Nm³ = 1m³ a 0° C e 1 atm de pressão.

Ao se adotar hidretos metálicos em veículos automotivos, ou seja, em larga escala, apenas os tipos de hidreto que possuem custos compatíveis com esta aplicação poderão ser utilizados. Neste caso, atualmente somente três categorias de ligas metálicas apresentam esta característica, Fe-Ti, Mg-Ni e La-Ni, cujas principais propriedades estão mostradas na Tabela 17.

Tabela 17- Propriedades termodinâmicas dos principais hidretos comerciais [38].

Hidreto	Concentração de H ₂ (x)	% Peso H ₂	ΔH _f (kJ/molH ₂)	Densidade (g/cm ³)	Temperatura (°C)
FeTiH _x	0,1 - 1,1	1,52	- 28	5,9	0 - 30
FeTiH _x	1,2 - 1,8	1,52	- 25	5,5	0 - 50
LaNi ₅ H _x	1 - 5	1,54	- 31	6,6	0 - 90
MgNiH _x	0,3 - 4,0	3,8	- 64	2,6	200 - 400

Em termos de peso, as ligas do tipo Mg-Ni são as mais indicadas, porém trabalham em temperaturas relativamente elevadas, o que implicaria no emprego de células de combustível de altas temperaturas, que por sua vez dificultariam bastante a operação do veículo. Já as ligas de Fe-Ti operam em temperaturas até 50°C e as ligas de La-Ni até 90°C, temperaturas compatíveis com vários tipos de células de combustível. Como pode-se ver, estes dois tipos de liga possuem características termodinâmicas

semelhantes, sendo as de La-Ni de custos mais elevados, mas que poderá ter esta característica reduzida com os estudos em curso para a utilização de Terras-Raras (T.R., mishmetal) no lugar do lantânio. A massa da liga do tanque de hidreto é facilmente determinada através da quantidade de hidrogênio a ser armazenada. As ligas mais indicadas para utilização em veículos, como comentado acima, possuem uma capacidade de armazenagem de hidrogênio limitada a 1,5% do seu peso.

O Laboratório de Hidrogênio (LH2) da UNICAMP já construiu dois tanques de hidretos metálicos para aplicações automotivas, um com liga de Fe-Ti e outro com liga Mg-Ni [66].

Os tanques de hidreto são construídos de forma a possibilitar o maior contato possível do hidrogênio com a liga, além de permitir uma boa troca térmica; para isso é preciso distribuir a liga em compartimentos, semelhantes aos trocadores de calor clássicos, conforme demonstrado na Figura 46. Um dos tanques do LH2 utilizou 27 kg de liga Fe-Ti com capacidade para armazenar 4,5 Nm³ de H₂; o outro utilizou 16 kg da liga Mg-Ni e tinha capacidade para armazenar 10,4 Nm³ de H₂. A massa total do primeiro tanque incluindo a liga era de 60 kg e do segundo 46,3 kg, sendo que em ambos utilizou-se o aço inox para a sua construção. Os técnicos que desenvolveram estes tanques na época alegam que eles foram super dimensionados em função da disponibilidade do material de construção, e também por precaução, em relação à segurança, por ter sido a primeira experiência realizada com esta finalidade.

Utilizando-se como referência o primeiro tanque (Fe-Ti), em função da liga ser a mais apropriada, e apenas substituindo-se o aço utilizado na sua estrutura ($\cong 7,86 \text{ g/cm}^3$) por alumínio ($2,702 \text{ g/cm}^3$), pode-se reduzir a sua massa estrutural de 33 kg para 11,33 kg, que com os 27 kg da liga somam 38,33 kg com capacidade de 4,5 Nm³, resultando em 8,52 kg/Nm³ ($1 \text{ Nm}^3 = 89,29 \text{ g}$), que corresponde à **capacidade** aproximada de armazenar **1% do seu peso total em hidrogênio**; portanto neste caso o **tanque pesaria 57,5 kg**.

Um sistema completo de armazenagem através de hidretos metálicos é composto além do tanque, de um sistema de troca de calor pois, para o composto liberar hidrogênio é preciso aquecer o tanque. Este sistema, como já comentado, pode ser compartilhado com o sistema de refrigeração do motor elétrico do veículo e o da célula de combustível, sendo o primeiro mais eficiente por trabalhar de forma direta.

As massas do sistema de troca de calor, tanques de água quente e fria, bomba d'água, tubulações e demais equipamentos dependem da tecnologia empregada para sua

execução. Como a literatura disponível (científica/acadêmica) é muito limitada a este respeito pela própria escassez de experimentos com esta configuração, sendo que os poucos realizados ou são protótipos primários dos quais não é possível considerar como parâmetro pelo seu nível de experimentalismo, ou são projetos de empresas em fase avançada de desenvolvimento tecnológico, que envolvem grandes investimentos e igualmente grandes segredos, a única alternativa é estimar estes valores.

c- Sistema de Troca de Calor:

Para uma projeção mais racional de todo o sistema de potência é necessário compartilhar o sistema de troca de calor entre o motor, o tanque de hidreto metálico e a célula de combustível. É importante salientar que o motor elétrico a ser utilizado nesta proposta deve por hipótese ser refrigerado a água. Normalmente os motores de alta rotação utilizados em veículos elétricos adotam este sistema de refrigeração. O motor do EV-1, como já exposto no Capítulo 2, se enquadra neste perfil.

Como os tanques construídos no LH2, mencionados acima, utilizavam o calor gerado pelo motor a combustão do veículo através da água do sistema de refrigeração, pode-se estimar a massa aproximada do sistema de troca de calor utilizando-se como referência um veículo de porte médio. O volume de líquido de arrefecimento utilizado em todo o sistema de refrigeração de um veículo convencional de porte médio, incluindo-se o radiador, as mangueiras e o volume de água do bloco do motor, corresponde a 6,5 litros. A massa de um radiador de alumínio somado ao das mangueiras, neste tipo de veículo, corresponde à aproximadamente 5 kg. No sistema proposto é necessária a utilização de dois tanques, um de água quente e outro de água fria, para possibilitar o melhor gerenciamento das trocas térmicas. Traçando-se um paralelo com um veículo convencional, no qual do volume de 6,5 litros de água do sistema de refrigeração 4,5 litros correspondem ao volume armazenado no bloco do motor, pode-se considerar este último volume como equivalente a um dos dois tanques de água necessários no sistema. Conforme mostrado na Figura 45, ter-se-ia então por hipótese um volume total de água de 11 litros, cuja massa aproximada será 11 kg. Também por hipótese considerar-se-á a massa do segundo tanque e periféricos correspondentes a 5 kg, que equivaleria a um segundo radiador junto com as mangueiras, uma vez que o primeiro já está incluído, como parte do motor do veículo elétrico.

Portanto a massa do sistema de refrigeração e aquecimento (tanques + água + mangueiras) será de 16 kg. Considerando-se ainda que é necessário utilizar válvulas de controle, controladores de temperatura, etc. será adotado um acréscimo como margem de segurança de 30%, que resultará em um valor aproximado de 20 kg, que será o valor utilizado para efeito de cálculo.

Uma bomba d'água auxiliar também se faz necessária para os momentos que o motor do veículo estiver desligado e a célula de combustível estiver funcionando. Esta bomba terá que ter um pequeno motor elétrico acoplado. Uma bomba d'água comum, que não foi projetada para aplicações automotivas, com um motor elétrico comercial de 735 W de potência e 220 V de tensão, tem uma massa aproximada de 15 Kg. Pode-se considerar este número como limite superior para a massa deste conjunto.

Concluindo, o **sistema de troca de calor** completo, considerando os dois tanques, as mangueiras, as válvulas de controle e a bomba d'água, tem a sua massa estimada em **35 kg**.

7.1.3. Massa das Baterias

A massa das baterias pode ser estimada utilizando-se como parâmetro a quantidade mínima de baterias necessárias para, juntamente com a célula de combustível, fornecer a energia para os picos de potência do motor.

O motor pode atingir um pico de potência de 76 kW; como a célula pode fornecer 8,5 kW de potência, as baterias deverão ter a capacidade de fornecer 67,5 kW. A capacidade de uma bateria eletroquímica de fornecer picos de potência varia de acordo com as características técnicas de sua construção. Para este trabalho a bateria utilizada terá como referência a bateria do EV-1 descrita na Tabela 5 do Capítulo 2. Cada bateria do EV-1 pesa 17,8 kg e pode fornecer 4,1 kW de potência a uma taxa de 400 A por 10 s, com carga total a 48° C. Para atender à necessidade de 67,5 kW será necessário o equivalente a 17 **baterias**, cuja massa total corresponde a **302,6 kg**.

7.2. Resumo dos Resultados

Sendo assim, para armazenar 575 g de hidrogênio será necessário um tanque de hidreto metálico de 57,5 kg, mais 35 kg do sistema de trocas térmicas, isto é 92,5 kg.

Então o sistema todo com a célula de combustível (85 kg) mais o tanque de hidreto metálico completo (92,5 kg + 0,575 kg de H₂) terá uma massa equivalente a **178,1 kg**. As baterias tem uma massa de **302,6 kg**, logo a **massa total do sistema híbrido** será de **480,7 kg**.

7.3. Dimensionamento Termodinâmico dos Componentes de Potência

Como todos os componentes estão embarcados no veículo, é necessário haver compatibilização e otimização do suprimento/consumo de calor, para minimizar (ou se possível anular) o gasto de hidrogênio e/ou a carga das baterias para fins de aquecimento destes componentes ou acionamento de sistemas de refrigeração. O dimensionamento termodinâmico se faz necessário nesta etapa porque, se o calor gerado no sistema não for suficiente para atender à demanda do tanque de hidreto, será preciso dispor de uma quantidade adicional de energia para este fim, e neste caso haveria a necessidade do redimensionamento dos componentes dos itens anteriores.

7.3.1. Conceituação Teórica

Nas partidas do veículo tem-se dois componentes a serem aquecidos (tanque de hidretos e célula de combustível) e uma única fonte térmica (o motor elétrico), sendo que depois do veículo entrar em regime de operação tem-se dois componentes que necessitam de refrigeração (o motor elétrico e a célula de combustível), e um único componente a ser aquecido (o tanque de hidretos).

Partindo-se da potência total fornecida ao motor elétrico (**P_t**), sua potência efetiva (**P_m**) e sua eficiência ($\eta_m = P_m/P_t$) para os cálculos termodinâmicos envolvidos, tem-se que a potência térmica (**P_a**) a ser extraída do motor na forma de água aquecida será

$$P_a = P_t.(1-\eta_m) = P_m.(1-\eta_m)/\eta_m$$

A potência do motor varia de acordo com as condições de uso do veículo (maior ou menor velocidade, subida de rampas ou descida de ladeiras, etc.), o mesmo ocorrendo com sua eficiência, que depende da percentagem desta potência utilizada em

relação à potência nominal. Assim sendo, a potência térmica obtida junto ao motor elétrico varia continuamente, exigindo um controle sobre a bomba de circulação de água, de forma que a refrigeração do motor seja eficiente, mas mantenha a temperatura do reservatório de água quente.

Quando da partida do veículo, com todos os componentes à temperatura ambiente, é necessário que todo o calor gerado junto ao motor elétrico esteja disponível para o aquecimento da célula de combustível. Dessa maneira, pode-se dizer que a partida do veículo nestas condições se dará exclusivamente por meio das baterias eletroquímicas. A duração desta etapa dependerá não só da potência do motor mas também das características termodinâmicas da célula de combustível (massa, material, isolamento, etc.), sendo o fator principal sua temperatura de trabalho, o que está diretamente ligado ao tipo de célula de combustível utilizada [38].

Uma vez atingida a temperatura de operação da célula de combustível, está passará de consumidora a produtora de calor, necessitando ser refrigerada. Então, todo o calor gerado poderá ser empregado na dissociação do hidreto metálico do tanque de hidrogênio, iniciando-se o fornecimento de energia elétrica pela célula.

Os hidretos metálicos são compostos produzidos pela reação química do hidrogênio com elementos e ligas metálicas [67]. Para alguns tipos de hidretos metálicos esta reação é termicamente reversível, permitindo que sua dissociação libere o hidrogênio reagido. Dentre esta categoria de hidretos reversíveis, alguns deles possuem a propriedade de ter um calor de formação negativo, porém próximo de zero, e apresentam custos de fabricação aceitáveis, tornando-os meios práticos para o armazenamento do hidrogênio.

Em termos conceituais, a reação de formação dos hidretos metálicos pode ser resumida:



onde **M** representa o elemento metálico ou liga e $\Delta\mathbf{H}_f$ a entalpia de formação do hidreto, normalmente expressa em kJ/mol H_2 .

Portanto, a potência térmica necessária para a dissociação do hidreto metálico (**Ph**) dependerá das características termodinâmicas do tanque de armazenamento, mas fundamentalmente do tipo de hidreto utilizado, ou seja, de sua entalpia de formação. Assumindo-se que a energia liberada na formação do hidreto é a mesma necessária em

sua dissociação (reação reversível), então a potência mínima para a liberação do hidrogênio será

$$P_h = (\Delta H_f \cdot n) / \Delta t = (\Delta H_f \cdot \phi_H) / \mu$$

onde n é o número de moles de hidrogênio liberado em um tempo Δt , ϕ_H a vazão do gás em kg/s e μ a massa molar do hidrogênio ($= 2,016 \times 10^{-3}$ kg).

Analogamente ao caso do motor elétrico, a potência térmica (P_c) liberada pela célula de combustível após entrar em regime de operação depende da potência total fornecida na forma de hidrogênio (P_t), de sua potência específica (P_{cc}) e de sua eficiência (η_{cc}):

$$P_c = P_t \cdot (1 - \eta_{cc}) = P_{cc} \cdot (1 - \eta_{cc}) / \eta_{cc}$$

considerando-se a definição da eficiência da célula de combustível como a razão entre a energia eficaz obtida e a energia a ela fornecida na forma de hidrogênio, ou seja,

$$\eta_{cc} = P_{cc} / P_t = P_{cc} / (CH \cdot \phi_H)$$

sendo CH o poder calorífico superior do hidrogênio ($= 142,12$ MJ/kg). Dessa maneira,

$$P_c = (1 - \eta_{cc}) \cdot (CH \cdot \phi_H)$$

Uma vez que o fluxo de hidrogênio que sai do reservatório de hidretos é o mesmo que alimenta a célula de combustível, é possível determinar-se o valor máximo para o calor de formação do hidreto caso apenas o calor gerado na célula venha a ser utilizado para a dissociação do hidreto, o que requer no mínimo que

$$P_h \leq P_c$$

ou seja,

$$(\Delta H_f \cdot \phi_H) / \mu \leq (1 - \eta_{cc}) \cdot (CH \cdot \phi_H)$$

ou ainda,

$$\Delta H_f \leq \mu \cdot (1 - \eta_{cc}) \cdot CH$$

Portanto, sem considerar-se as perdas térmicas pelo sistema de condução do fluido, reservatórios, bomba, etc., se o calor de formação do hidreto selecionado for inferior ao valor calculado com a expressão acima, apenas o calor produzido junto à célula de combustível será suficiente para a liberação do hidrogênio do tanque de hidretos. Caso contrário, será preciso utilizar-se também do calor gerado junto ao motor elétrico, de forma que no pior caso

$$P_h = P_a + P_c$$

ou ainda

$$(\Delta H_f \cdot \phi_H) / \mu = P_m \cdot (1 - \eta_m) / \eta_m + (1 - \eta_{cc}) \cdot (CH \cdot \phi_H)$$

o que resultará em uma vazão máxima de hidrogênio

$$\phi_H = [P_m \cdot (1 - \eta_m)] / \{ \eta_m \cdot [\Delta H_f / \mu - (1 - \eta_{cc}) \cdot CH] \}$$

lembrando-se que neste caso

$$\Delta H_f \geq \mu \cdot (1 - \eta_{cc}) \cdot CH$$

Deve-se observar que os cálculos acima se aplicam na condição em que o tanque de hidretos já se encontra na temperatura de trabalho (de dissociação do hidreto), sendo que no início de sua utilização uma quantidade não desprezível de calor deverá ser fornecida ao reservatório para que este atinja esta temperatura. A quantidade de calor requerida nesta fase dependerá das quantidades (massas) e calores específicos dos materiais utilizados na construção do tanque e da liga metálica que constitui o hidreto. Este aprofundamento dos cálculos termodinâmicos escapa dos limites para esta Tese.

Enfim, uma vez selecionados o tipo de hidreto e de célula de combustível, deve-se verificar se esta última será suficiente para fornecer energia ao tanque de hidretos. Sendo este o caso, a partir da potência efetiva da célula pode-se determinar o fluxo de hidrogênio requerido, que por sua vez permitirá obter-se a quantidade de hidretos necessária, levando-se em conta a autonomia prevista para o veículo.

7.3.2. Dimensionamento Termodinâmico do Tanque de Hidreto Metálico

As ligas mais indicadas para a utilização em veículos, conforme discutido no item 7.1.2. são as Fe-Ti e as La-Ni. O calor de formação de diferentes ligas multicomponentes baseadas nestes dois sistemas situam-se entre 25 e 35 kJ/mol de H₂ armazenado, de forma que neste trabalho será utilizado um valor médio de 30 kJ/mol de H₂, indicando que qualquer um dos dois sistemas poderá ser empregado no veículo.

7.3.3. Dimensionamento Termodinâmico da Célula de Combustível

Dos vários tipos e modelos de células de combustível, para a aplicação automotiva é conveniente utilizar-se células que operam em temperaturas relativamente baixas (inferiores a 100° C). Como já discutido no Capítulo 4, a célula de combustível de membrana de troca de prótons é atualmente a mais apropriada para esta aplicação, sendo a sua eficiência superior a 50% na conversão de hidrogênio em eletricidade.

Para o veículo hipotético com o sistema energético híbrido, foi calculado a utilização de uma célula de 8,5 kW de potência, sendo que ela deve operar com 80% de sua capacidade. Nesta faixa de potência a célula pode atingir o máximo de 57% de rendimento na conversão de hidrogênio em eletricidade.

Adotando-se os parâmetros descritos acima e considerando as características termodinâmicas do hidrogênio (CH e μ), obtém-se pela equação que determina o valor máximo para o calor de formação do hidreto que se $\Delta H_f \leq 123,2$ kJ/mol H₂ então o calor extraído da célula de combustível será suficiente para aquecer o reservatório de hidrogênio (hidreto), após o veículo ter entrado em regime de operação. Como para os tipos de hidretos selecionados o calor de formação é da ordem de 30 kJ/mol H₂, haverá calor excedente durante a operação normal do veículo, ou seja, parte do calor extraído da célula deverá ser dissipado no sistema de refrigeração, a partir do instante em que o tanque de hidrogênio atingir sua temperatura máxima de trabalho.

7.3.4. Dimensionamento Termodinâmico do Motor Elétrico

O motor idealizado para o veículo hipotético é um motor de corrente alternada trifásico, compacto, leve e refrigerado a água, com uma potência de pico de 76 kW, ou seja, considerando-se 100% de sobrecarga no motor para atingir esta potência pode-se

O peso de ambos equivale. A potência do Green Car é um terço da estimada para o veículo idealizado, prejudicando o aspecto da segurança e da atratividade comercial do veículo. O peso do sistema energético do Green Car é muito maior e, apesar de seu tanque de hidrogênio ser capaz de armazenar quase o dobro de combustível, a autonomia é proporcionalmente menor. O custo do Green Car é muito superior ao que seria o custo do veículo idealizado, em função principalmente do dimensionamento das células utilizadas. Atualmente o preço de uma PEMFC é da ordem de US\$ 5.000/kW, sendo que só o custo do material utilizado no stack ultrapassa US\$ 1.200/kW [68]. E finalmente, o espaço que as células ocupam na carroceria do veículo, como mostra a Figura 47, dificultaria a sua aceitação mercadológica.

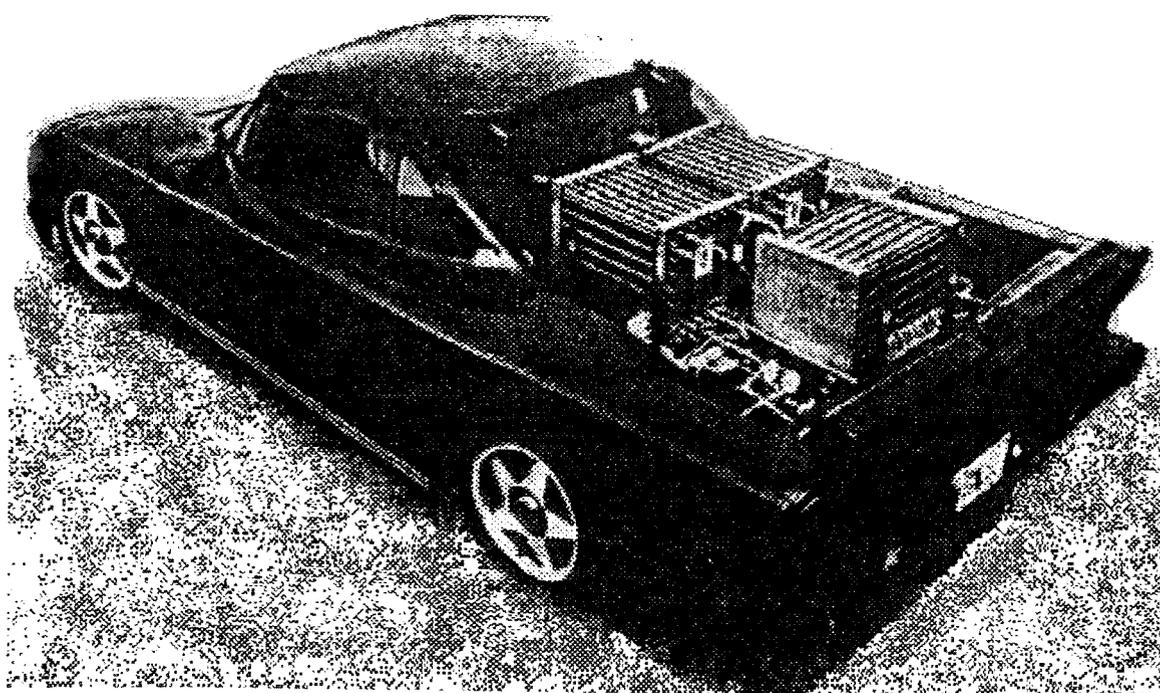


Figura 47 - Foto do Green Car [11].

Portanto caso o arranjo utilizado no Green Car seguisse a lógica proposta neste trabalho o resultado seria uma maior eficiência e racionalidade, com menor custo.

8 - Análise de Casos

No capítulo anterior foi demonstrado que a substituição de uma parte das baterias por um sistema de célula de combustível confere ao veículo, na sua forma híbrida, todas as vantagens de se operar com um sistema contínuo de suprimento de energia sem qualquer prejuízo em relação ao peso, potência ou autonomia. Se a diferença de massa entre os dois sistemas, que é de 19,3 kg, for convertida em tanque de hidretos e acrescida no sistema híbrido, ter-se-ia um aumento de autonomia de 24,42 km. Portanto, dentro dos parâmetros pré-estabelecidos, há na verdade um aumento da autonomia. Considerando-se também a energia armazenada nas baterias poder-se-ia rodar ainda 44,5 km a mais, o que quase dobraria a autonomia em relação ao veículo com o sistema energético só a baterias.

Para uma análise mais ampla, pode-se variar alguns parâmetros e observar a sua influência no comportamento do conjunto. Dentre as quatro características estabelecidas para o sistema energético na sua forma híbrida duas delas, ou seja, a potência de pico e o peso do sistema, podem ser alterados. O dimensionamento da célula deve ser mantido pois, se for reduzido não atenderá as exigências do ciclo SAE e se for expandido acarretará num aumento do seu custo sem que haja um aumento da autonomia do veículo, uma vez que, neste caso, a autonomia está ligada à quantidade de hidrogênio armazenado. O acréscimo no dimensionamento da célula, que visa preservar a sua vida útil, deve ser respeitado em função do seu alto custo.

8.1. Variação da Potência de Pico

A medida que se reduz a potência de pico, pode-se substituir baterias por igual massa de tanque de hidretos. Cada bateria utilizada, por hipótese neste caso, pesa 17,8 kg, tem um volume de 7,43 l e pode fornecer até 4,1 kW de potência de pico, conforme já discutido anteriormente. Esta substituição pode ser feita entre estes dois componentes sem que seja preciso alterar os demais, pois os sistemas auxiliares do tanque não são diretamente proporcionais à sua capacidade de armazenagem. A célula permaneceria com a mesma potência e como a quantidade de calor gerada pela célula possui grande

excedente não haveria alterações termodinâmicas desfavoráveis. Portanto, os limites para esta substituição seriam: a capacidade do banco de baterias de corresponder às exigências dentro das situações normais de trajeto estabelecida neste caso pelo ciclo SAE J 277 aD; o novo patamar da potência de pico; o aumento de volume correspondente do novo tanque.

Para se determinar o limite de substituição entre as baterias e a capacidade do tanque de hidrogênio, isto é, o número mínimo de baterias necessárias para o bom funcionamento do veículo sem que falte energia nos momentos de maior demanda e sem tão pouco prejudicar a vida útil das baterias, seria preciso conhecer uma série de fatores como: a potência máxima necessária em regime constante de operação; a potência de pico desejada; a tensão e a corrente do motor; as características técnicas da bateria tais como a tensão, a corrente de descarga, a simulação da corrente de descarga versus o tempo, a simulação da tensão versus o tempo para um determinado valor de corrente de descarga, etc..

Uma forma simplista de se estabelecer este limite seria através da máxima potência necessária dentro do ciclo SAE J277 aD que é de 15,58 kW. Como a célula de combustível dimensionada para este veículo pode fornecer 7,1 kW, então os 8,48 kW restantes poderiam ser supridos por apenas três baterias, uma vez que a potência de pico de cada bateria neste caso está limitada à 4,1 kW. Porém a experiência com o protótipo VEGA mostrou que este nível de potência máxima não é prático porque limita demais o desempenho do veículo, tornando-o inclusive inadequado para trafegar em trânsito urbano junto com outros veículos e até perigoso em razão da sua lentidão e falta de potência para acelerações mais rápidas. Por outro lado, um número tão pequeno de baterias ocasionaria uma tensão muito baixa sendo mais um motivo para inviabilizar este parâmetro. Enfim, o objetivo desta comparação é estudar o grau de sensibilidade da influência dos componentes em relação ao sistema, sendo que o limite está condicionado a fatores que fogem do alcance e do objetivo desta Tese.

O dimensionamento do tanque de hidretos metálicos realizado no Capítulo 7 mostrou que há uma relação entre o tanque, já com a liga, e a quantidade de gás armazenada da ordem de 1% aproximadamente. Portanto, para cada bateria substituída, 178 g de hidrogênio poderão ser armazenados, o que corresponde a 11,8 kg de liga de FeTi. Pela Tabela 17, pode-se extrair a densidade desta liga que é de 5,9 g/cm³; portanto, o volume correspondente à liga será de 2 litros. Mesmo considerando o invólucro de cada tanque, a tubulação do sistema de trocas térmicas e o espaçamento

necessário entre os módulos dos tanques de hidretos, conforme mostrado na Figura 46, o volume total correspondente, dependendo da tecnologia de construção, não deverá ser significativamente maior que o da bateria substituída. A Tabela 18 relaciona a quantidade de baterias substituídas pelo equivalente em hidrogênio armazenado com a potência de pico disponível e a autonomia obtida. A massa total do sistema híbrido por hipótese permanecerá constante em 500 kg. O número máximo de baterias foi ampliado para efeito de comparação e foi estimado de tal forma que, dentro da massa total do sistema, possibilite a utilização de um tanque de hidretos mesmo que com uma quantidade mínima de hidrogênio.

Tabela 18 - Baterias substituídas pelo equivalente em hidrogênio armazenado.

No de Baterias	Massa de H ₂	Autonomia H ₂	Autonomia Baterias	Autonomia Total	Potência de Pico	Densidade de Potência de Pico
21	0,062 kg	7,93 km	54,99 km	62,92 km	93,2 kW	69,04 W/kg
20	0,238 kg	30,44 km	52,38 km	82,82 km	89,1 kW	66,00 W/kg
19	0,414 kg	52,96 km	49,76 km	102,72 km	85,0 kW	62,96 W/kg
18	0,590 kg	75,48 km	47,14 km	122,62 km	80,9 kW	59,93 W/kg
17	0,766 kg	97,99 km	44,52 km	142,51 km	76,8 kW	56,88 W/kg
16	0,942 kg	120,50 km	41,90 km	162,40 km	72,7 kW	53,85 W/kg
15	1,118 kg	143,02 km	39,28 km	182,30 km	68,6 kW	50,81 W/kg
14	1,294 kg	165,53 km	36,66 km	202,19 km	64,5 kW	47,77 W/kg
13	1,470 kg	188,05 km	34,04 km	222,09 km	60,4 kW	44,74 W/kg
12	1,646 kg	210,56 km	31,42 km	241,98 km	56,3 kW	41,70 W/kg

8.2. Variação da Massa do Sistema Energético

Se a massa do sistema energético for ampliada, pode-se aumentar a quantidade de hidrogênio armazenada sem diminuir o número de baterias do veículo, mantendo

assim a capacidade de fornecer a potência de pico ao motor. Neste caso todos os cálculos precisam ser refeitos, uma vez que aumentando a massa do sistema energético aumentará também a massa total do veículo, e conseqüentemente o consumo de energia deverá aumentar. Como a potência de pico permanecerá constante, a densidade de potência do veículo será menor, reduzindo seu desempenho nas situações que exigir máxima potência.

Através do Programa Computacional utilizado no Capítulo 6, pode-se calcular a energia gasta e a potência requerida para as novas configurações do sistema energético do veículo. A configuração original já foi apresentada no referido capítulo pelas Figuras 36 à 44. As novas configurações serão mostradas pelas Figuras 48 à 67. Na Tabela 19 são apresentados de forma resumida os resultados dos cálculos efetuados para cada configuração. Deve-se salientar que este Programa Computacional foi desenvolvido para trabalhar com veículos elétricos com sistema energético apenas a baterias. Como, para efeito de cálculo, o que importa é a massa do sistema energético, independente do sistema utilizado, a massa total do sistema energético híbrido será considerada nos cálculos do Programa como massa de baterias.

MDEVIC	MBAT	BEBAT	PMOT	CAER	CRDOL	AFVETC	VIMPLAN	VC
1400,0	550,0	35	76000	0,19	0,050	1,94	35	

Figura 48 - Dados iniciais (massa total do sistema energético híbrido 550 kg).

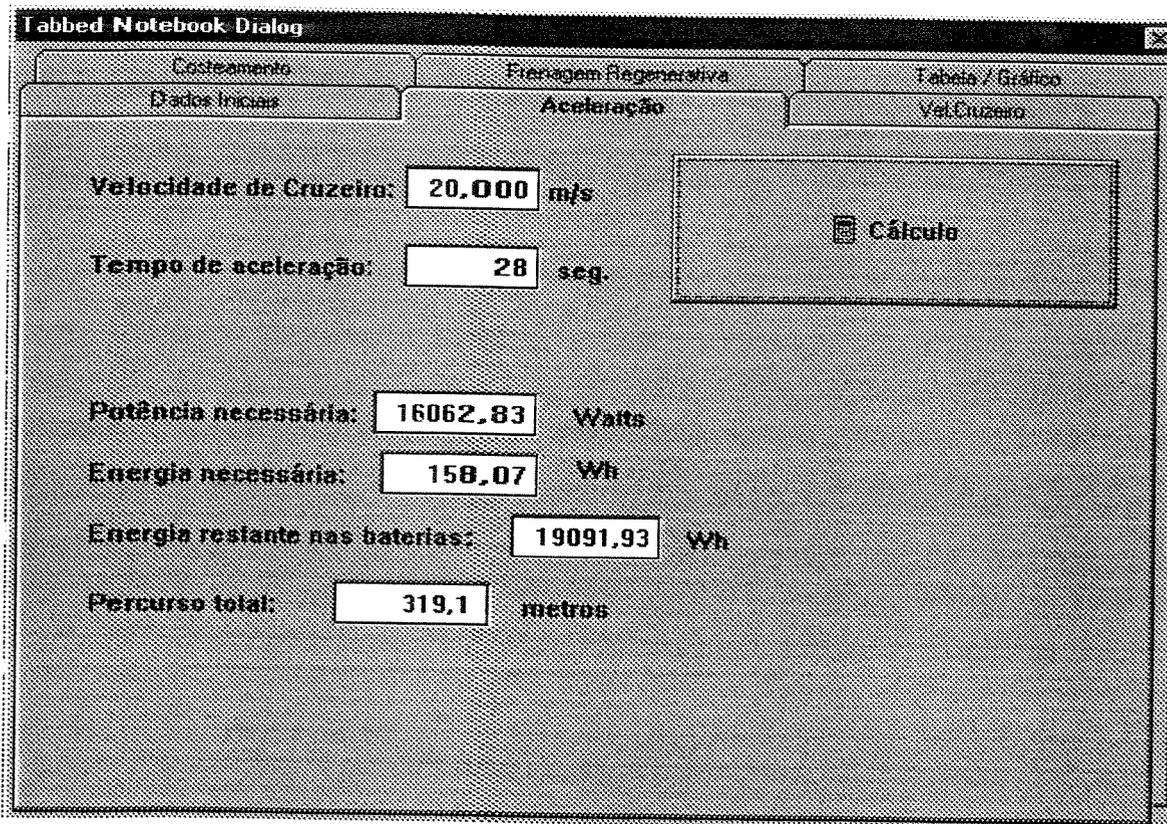


Figura 49 - Cálculo da potência e energia necessárias para a aceleração (massa 550 kg).

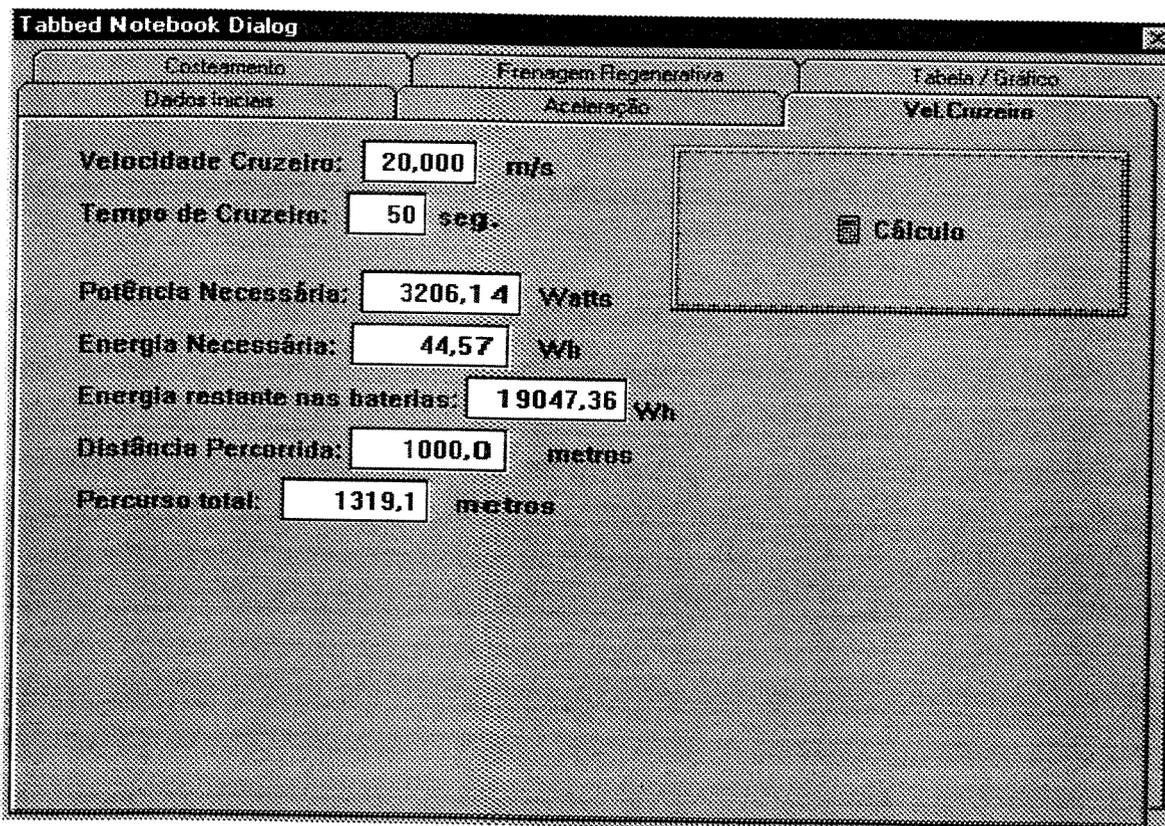


Figura 50 - Cálculo da pot. e energia necessárias durante o tempo de vel. cruz. (massa 550 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Costeamento: seg.

Velocidade após Costeamento: m/s

Energia Cinética restante: Wh

Distância percorrida no costeamento: metros

Percurso total: metros

Figura 51 - Cálculo da velocidade e distância percorrida após o costeamento (massa 550 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Tempo de frenagem: seg.

Velocidade antes da frenagem: m/s

Velocidade após frenagem: m/s

Energia regenerada: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso percorrido: metros

Percurso total: metros

Figura 52 - Cálculo da energia regen. e do percurso percorrido durante a frenag. (massa 550 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Massa Total do Veículo: kg Massa do Jato de Água: kg

Densidade Energia Total das Baterias: Wh/kg

Potência do Motor: Watts

Coeficiente Aerodinâmico: Cond. Resist. Rodagem: m

Aceleração do Veículo: m/s² Vel. Máxima do Motor: rpm

Clique aqui antes de passar à próxima página

Calc. Dados Iniciais

MOVEIC	MBAT	DEBAT	PMOT	CAER	CRRGL	AFVEIC	VMPLAN	VC
1450,0	600,0	35	76000	0,19	0,050	1,94	35	

EXIT

Figura 53 - Dados iniciais (massa total do sistema energético híbrido 600 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Velocidade de Cruzeiro: m/s

Tempo de aceleração: seg.

Potência necessária: Watts

Energia necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso total: metros

Calculo

Figura 54 - Cálculo da potência e energia necessárias para a aceleração (massa 600 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Cruzeiro: seg.

Potência Necessária: Watts

Energia Necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Distância Percorrida: metros

Percurso total: metros

Figura 55 - Cálculo da pot. e energia necessárias durante o tempo de vel. cruz. (massa 600 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Costeamento: seg.

Velocidade após Costeamento: m/s

Energia Cinética restante: Wh

Distância percorrida no costeamento: metros

Percurso total: metros

Figura 56 - Cálculo da velocidade e distância percorrida após o costeamento (massa 600 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzero

Costeamento **Frenagem Regenerativa** Tabela / Gráfico

Tempo de frenagem: seg.

Velocidade antes da frenagem: m/s

Velocidade após frenagem: m/s

Energia regenerada: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso percorrido: metros

Percurso total: metros

Cálculo

Figura 57 - Cálculo da energia regen. e do percurso percorrido durante a fren. (massa 600 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzero

Massa Total do Veículo: kg

Massa das Baterias: kg

Densidade Energética das Baterias: Wh/kg

Potência da Motor: Watts

Coeficiente Aerodinâmico: m

Tempo Médio de Frenagem: s

Área Frontal do Veículo: m²

Veloc. Máxima do Veículo: m/s

Clique aqui antes de passar a próxima página

Calc. Dados Iniciais

MBVEIC	MBAT	DEBAT	PMOT	CAER	CFRCL	AFVEIC	UMPLAN	VC
1500,0	650,0	35	76000	0,19	0,050	1,94	35	

EXIT

Figura 58 - Dados iniciais (massa total do sistema energético híbrido 650 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais **Aceleração** Vel. Cruzeiro

Velocidade de Cruzeiro: m/s

Tempo de aceleração: seg.

Potência necessária: Watts

Energia necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso total: metros

Figura 59 - Cálculo da potência e energia necessárias para a aceleração (massa 650 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração **Vel. Cruzeiro**

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Cruzeiro: seg.

Potência Necessária: Watts

Energia Necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Distância Percorrida: metros

Percurso total: metros

Figura 60 - Cálculo da pot. e energia necessárias durante o tempo de vel. cruz. (massa 650 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzero

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Costeamento: seg.

Velocidade após Costeamento: m/s

Energia Cinética restante: Wh

Distância percorrida no costeamento: metros

Percurso total: metros

Figura 61 - Cálculo da velocidade e da distância após o costeamento (massa 650 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzero

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Tempo de frenagem: seg.

Velocidade antes da frenagem: m/s

Velocidade após frenagem: m/s

Energia regenerada: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso percorrido: metros

Percurso total: metros

Figura 62 - Cálculo da energia regen. e do percurso percorrido durante a fren. (massa 650 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Massa Total do Veículo: kg

Massa das Baterias: kg

Potência Energética das Baterias: kW

Potência do Motor: Watts

Potência das Auxiliares: kW

Loss Roll-Off Polvo: kg

Alt. Centro de Massa: m

Veloc. Nominal Motor: rpm

Clique aqui antes de passar a próxima página

Calc. Dados Iniciais

MBVEIC	MBAT	DEBAT	PMOT	CAER	CRROL	AFVEIC	VMPLAN	VC
1550,0	700,0	35	76000	0,19	0,050	1,94	35	

EXIT

Figura 63 - Dados iniciais (massa total do sistema energético híbrido 700 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Velocidade de Cruzeiro: m/s

Tempo de aceleração: seg.

Potência necessária: Watts

Energia necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percurso total: metros

Cálculo

Figura 64 - Cálculo da potência e energia necessária para a aceleração (massa 700 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Cruzeiro: seg.

Potência Necessária: Watts

Energia Necessária: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Distância Percorrida: metros

Percorso total: metros

Figura 65 - Cálculo da pot. e energia necessárias durante o tempo de vel. cruz. (massa 700 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzeiro

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Velocidade Cruzeiro: m/s

Tempo de Costeamento: seg.

Velocidade após Costeamento: m/s

Energia Cinética restante: Wh

Distância percorrida no costeamento: metros

Percorso total: metros

Figura 66 - Cálculo da potência e da distância percorrida após o costeamento (massa 700 kg).

Tabbed Notebook Dialog

Dados Iniciais Aceleração Vel. Cruzado

Costeamento Frenagem Regenerativa Tabela / Gráfico

Tempo de frenagem: seg.

Velocidade antes da frenagem: m/s

Velocidade após frenagem: m/s

Energia regenerada: Wh

Energia restante nas baterias: Wh

Percorso percorrido: metros

Percorso total: metros

Cálculo

Figura 67 - Cálculo da energia regen. e do percurso percorrido durante a fren. (massa 700 kg).

Tabela 19 - Resumo dos cálculos efetuados para as novas configurações do tanque de hidretos mantendo-se a massa de baterias e a potência de pico do motor em 76 kW.

Massa do tanque de hidretos c/H_2	Massa das baterias	Massa total do veículo	Autonomia H_2	Energia consumida p/ciclo SAE	Potência máxima no ciclo SAE	Densidade de potência de pico
77,4 kg	302,6 kg	1350 kg	97,99 km	192,34 W	15.580 W	56,3 W/kg
127,4 kg	302,6 kg	1400 kg	161,35 km	195,79 W	16.063 W	54,3 W/kg
177,4 kg	302,6 kg	1450 kg	224,68 km	199,21 W	16.548 W	52,4 W/kg
227,4 kg	302,6 kg	1500 kg	288,01 km	202,65 W	17.037 W	50,7 W/kg
277,4 kg	302,6 kg	1550 kg	351,33 km	206,08 W	17.526 W	49,0 W/kg

A Tabela 19 mostra que, com o aumento da massa do veículo a potência de pico fornecida pelo motor, mesmo sendo mantida em 76 kW, passa a ser efetivamente menor na mesma proporção.

8.3. Análise dos Resultados

Tanto reduzindo-se a potência de pico do motor, através da limitação da energia armazenada nas baterias, quanto mantendo-se a mesma faixa de potência mas aumentando-se a massa do veículo através da ampliação da capacidade dos tanques de hidretos, a potência máxima disponível no veículo será menor.

No primeiro caso, através da Tabela 19 observa-se em um extremo uma grande capacidade do sistema energético de fornecer picos de potência (93,2 kW), que não poderia ser útil neste caso porque a potência de pico do motor está limitada em 76 kW, com uma autonomia muito pequena. No extremo oposto, observa-se um grande aumento da autonomia para uma redução da potência de pico do sistema energético proporcionalmente menor. Esta redução não implicaria na redução da potência nominal do motor, pois a limitação está relacionada apenas à quantidade de energia fornecida, sendo assim, tanto pode-se manter a potência nominal do motor em 38 kW, como pode-se dimensioná-la em 50% da potência de pico fornecida pelo sistema energético. A Figura 68 mostra graficamente as curvas referentes aos dados da Tabela 18.

Caso se mantenha a potência nominal do motor em 38 kW o comportamento do veículo em situações normais, que não exigirem um grande desempenho, será exatamente o mesmo, podendo ser uma vantagem importante trocar a potencialidade de um alto desempenho esporádico por uma maior autonomia. Por outro lado, o desempenho do veículo está diretamente ligado à utilização que se pretende dar ao mesmo, ao grau de segurança e principalmente à aceitação do público consumidor em relação à faixa de mercado que ele se enquadraria.

No segundo caso, as baterias e a potência de pico do motor foram mantidas e a capacidade do tanque de hidretos foi ampliada, acarretando num aumento da massa do veículo. A energia consumida por ciclo SAE aumentou, assim como a potência máxima desenvolvida dentro do ciclo. A potência máxima efetiva diminuiu. Neste caso a análise é mais complexa pois envolve diversos parâmetros. É importante lembrar que trabalha-se com hipóteses e o interesse maior deste trabalho é a proporcionalidade relativa do sistema energético. O projeto estrutural do veículo e de seus equipamentos de segurança, como a suspensão e os freios, são desenvolvidos a partir dos esforços que serão submetidos para o uso ao qual o veículo se destina. Com o aumento da massa total do veículo seria preciso redimensionar estes componentes, o que poderia acarretar em

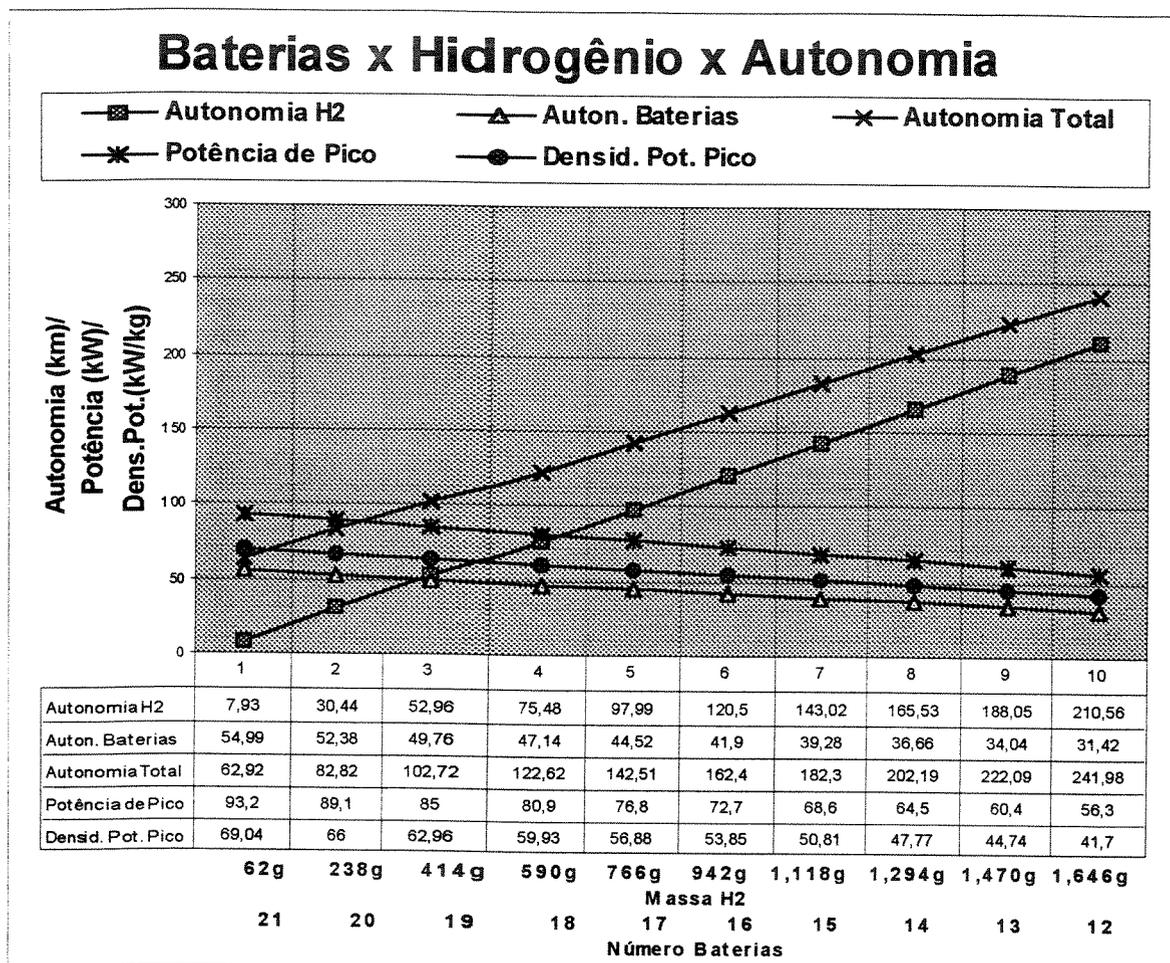


Figura 68 - Gráfico quantidade de baterias versus quantidade de hidrogênio versus autonomia.

um aumento da massa dos mesmos. Este possível aumento de massa foi desconsiderado porque para calculá-lo seria preciso partir de um caso concreto. O aumento da massa dos tanques de hidretos proposto implica numa variação máxima de 15% da massa total do veículo. Este valor está dentro da margem de segurança estrutural considerada em qualquer projeto automotivo; portanto, ao menos como hipótese, pode-se desprezar a variação de massa referente a esta questão.

O aumento da potência necessária para a aceleração dentro do ciclo SAE, quando ela assume os maiores valores dentro do circuito normal, não causaria problemas pois, mesmo com 200 kg a mais de tanques, que provocaria o maior aumento da massa total entre os casos citados na Tabela 19, a potência necessária atingiria valores proporcionalmente menores e estaria ainda em um patamar abaixo da metade da potência nominal do motor. A energia consumida por ciclo neste caso aumentaria apenas 7%, contra 12% da potência máxima e 15% do aumento da massa do veículo. Isto se deve ao fato que parte da energia consumida dentro do ciclo não depende

diretamente da massa do veículo, sendo que em relação à frenagem regenerativa, quanto maior a massa do veículo maior será a energia regenerada. A Figura 69 apresenta as curvas da autonomia, energia consumida e a potência máxima requerida dentro do ciclo SAE, e a densidade de potência referentes ao aumento da massa do tanque de hidretos.

A desvantagem maior neste caso seria em relação à necessidade de potência instantânea, já que a densidade de potência diminui porque há um aumento da massa total e a potência de pico é mantida constante. Porém, a autonomia para uma mesma faixa de densidade de potência é maior do que no primeiro caso, quando as baterias foram substituídas por hidrogênio, mostrando que esta alternativa pode ser mais interessante que a outra, por trazer maiores vantagens, caso o redimensionamento do veículo não acarrete em um aumento significativo de massa.

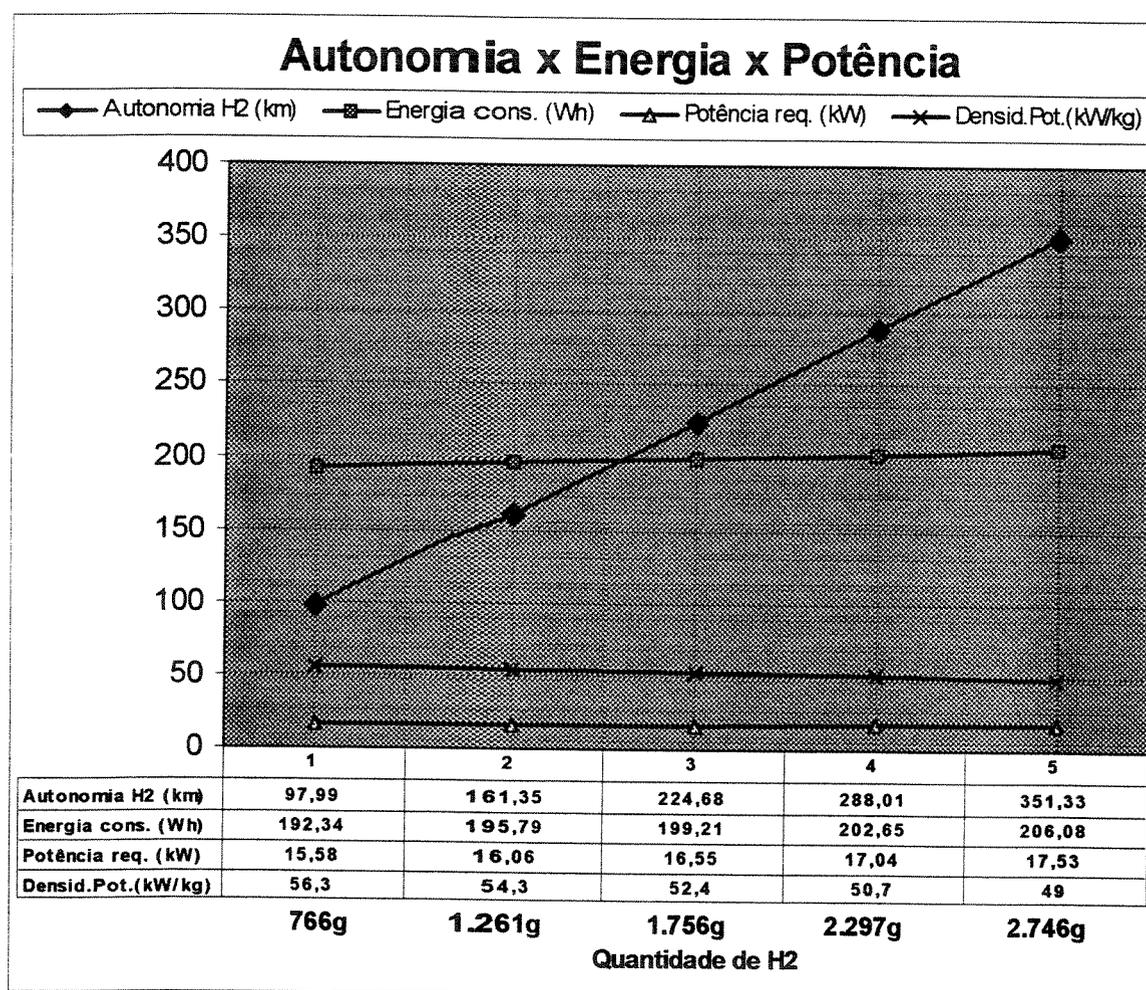


Figura 69 - Autonomia obtida com o aumento da quantidade de hidrogênio armazenado; energia consumida e a potência requerida dentro do ciclo SAE; densidade de potência com o aumento da massa do tanque.

Enfim, a melhor configuração dependerá da utilização que se pretende dar ao veículo e da faixa de preço em que ele se enquadraria. O importante é verificar que, mesmo com a atual tecnologia dos diversos equipamentos citados neste trabalho, a competitividade com um veículo normal com motor à combustão interna, exceto no fator preço, que depende de escala de produção, não se apresenta tão defasada a ponto de inviabilizar a introdução destes veículos no mercado.

9 - Conclusão

O agravamento dos problemas ambientais em muitas grandes cidade em todo o mundo tem levado vários países a investirem no desenvolvimento de veículos elétricos, tracionados por baterias eletroquímicas ou sistemas híbrido. Entre estes últimos o uso do hidrogênio em células de combustível tem recebido grande atenção, com recursos significativos sendo aplicados em pesquisa e desenvolvimento por empresas e/ou governos. Este trabalho insere-se neste esforço global, procurando contribuir para a conceituação e quantificação de arranjos e componentes deste tipo de veículo.

No aspecto conceitual desenvolveu-se uma metodologia para análise de veículos híbridos, a partir de um modelo criado para a análise de veículos à baterias. Este modelo foi atualizado, melhorado e aplicado com êxito no caso de veículos híbridos.

No caso específico dos veículos à célula de combustível/ baterias eletroquímicas, foi mostrado que:

1- Realmente a utilização de um sistema híbrido células de combustível/baterias eletroquímicas confere ao veículo vantagens significativas em relação ao veículo apenas a baterias. Estas vantagens tendem a ter um crescimento ainda mais expressivo se o dimensionamento do sistema for otimizado através da utilização de componentes específicos com tecnologia apropriada para esta aplicação. Isto apenas considerando os equipamentos já disponíveis. Com a perspectiva de avanços importantes, em especial em relação ao *stack* da célula, a competitividade dos veículos com este sistema deverá surpreender.

2- Foi demonstrado que uma célula de pequeno porte é suficiente para garantir as vantagens deste sistema de geração de eletricidade que possibilita um custo relativo menor. Por outro lado, diferentemente das baterias, pode-se aumentar a autonomia sem que seja preciso aumentar todo o sistema, ou seja, a autonomia é diretamente proporcional à capacidade do tanque de hidrogênio, bastando aplicá-lo para conferir maior autonomia. Estas são conclusões genéricas, porém através do método proposto nesta Tese é possível analisar-se cada caso isoladamente e prever com boa margem de segurança quais as características necessárias a cada componente para que se alcance um determinado objetivo, ou qual resultado pode ser alcançado com os equipamentos disponíveis. De fato, mostrou-se a possibilidade do uso de células de combustível com

potência de apenas 10% da faixa de potência de pico de um veículo elétrico, com características similares aos mais avançados e potentes veículos projetados atualmente. Dessa forma contribuiu-se para apontar um caminho que possibilitará, através da utilização de equipamentos menores e mais baratos, a sua introdução no mercado. Com isto atingir-se-á volumes de produção que possibilitarão a economia de escala necessária para que se obtenha o barateamento do custo do equipamento.

3- Através do dimensionamento termodinâmico dos componentes de potência foi demonstrado que apenas 25% do calor extraído da célula, após o veículo ter entrado em regime de operação, já atende as necessidade de suprimento de calor do tanque de hidretos; portanto não há o dispêndio de energia do sistema de suprimento energético do veículo para este fim.

Além destes resultados constatou-se que:

a- Fixando-se a massa do veículo e variando-se a quantidade de baterias com a disponibilidade de hidrogênio no tanque de hidreto, ou seja, variando-se a massa do tanque de acordo com o número de baterias substituídas, há aproximadamente um aumento de 20 km na autonomia total do veículo para cada 4 kW de redução na potência de pico. Quanto menor o número de baterias maior o aumento em porcentagem na autonomia, para uma variação significativamente menor, também em porcentagem, da potência de pico. Evidentemente que não se pode pensar na eliminação das baterias, pois neste caso não haveria reserva de energia para complementação da potência fornecida pela célula.

b- Mantendo-se constante o número de baterias e aumentando-se a massa do tanque de hidrogênio: para cada 50 kg de acréscimo há um aumento na autonomia de aproximadamente 60 km. Partindo-se da configuração original do veículo, os primeiros 50 kg de acréscimo correspondem a 60% de aumento na autonomia do veículo, para um decréscimo da densidade de potência de pico de apenas 4% e um aumento do consumo de energia de apenas 2%. Nas demais substituições, em valores relativos, a autonomia passa a ser gradativamente menor enquanto os demais valores mantêm o mesmo nível de variação.

Enfim, através desta Tese fica provado que a utilização de um sistema híbrido Célula de Combustível / Baterias Eletroquímicas além de viável, assegura grandes vantagens em relação ao sistema energético tradicional utilizado em veículos elétricos. Além disto, dependendo do arranjo adotado, pode imprimir ao veículo características mais próximas à dos veículos com motor à combustão, em relação à maior autonomia e

maior agilidade no reabastecimento. Por outro lado este trabalho apresentou uma série de pequenas contribuições para o tema, entre as quais, a metodologia proposta merece um destaque especial, não só por ter sido o instrumento que permitiu a realização das análises efetuadas, mas principalmente por ser este um mecanismo de extrema importância para aqueles que tem por objetivo desenvolver um novo veículo elétrico, ou ainda redimensionar o sistema energético de um veículo já existente, uma vez que, este método possibilita uma análise prévia com boa margem de acerto.

A continuidade natural deste trabalho seria a aplicação prática dos conhecimentos gerados e a comprovação dos resultados. A partir disto seria desejável o aprofundamento de cada área separadamente através do trabalho conjunto com pesquisadores de cada especialidade, para a aquisição do domínio completo de todas as tecnologias que envolvem o tema. Através da continuidade do Projeto VEGA será possível cumprir a primeira etapa subsequente desta Tese e viabilizar as etapas posteriores.

10 - Bibliografia

- 1- Correa P.B. e Berni M.D. "Transporte e Emissão de CO₂: Uma análise com enfoque multiobjetivo" II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – Unicamp, Dezembro de 1994.
- 2- Appleby A. J., "Fuel Cell Technology: Status and Future Prospects", Energy Vol.21, n° 7/8, pp. 521-653, 1996.
- 3- BEN - Balanço Energético Nacional, 1992.
- 4- Environmental Protection Agency - Office of Air Quality Planning and Standards. National Air Pollutant Emissions Estimates. EPA-450/-4-91-004, Research Triangle Park, NC, March, 1991.
- 5- Gabel H.K., and Roller L.H. "Trade Liberalization, Transportation, and the Environment", The Energy Journal, Vol.12, n° 1, 1992.
- 6- De Luchi M.A., "Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity", ANL/ESD/TM-22, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, November, 1991.
- 7- International Solar Energy Society Vol. 18, n° 4, December, 1994.
- 8- Woestman J.T. and Loghorthetis E.M. "Controlling Automotive Emissions - The Industrial Physicist", 1995.
- 9- Auto Smart – Delco Electronics Corporation, One Corporate Center, Mail Station, CT 50^a, Kokomo, IN 46904 –9005 EUA - 3^o semestre 1996.
- 10- Bates B., "Getting a Ford HEV on the Road" IEEE Spectrum July, 1995
- 11- Nadal M. and Barbir F., "Development of a Hibrid Fuel Cell/Battery Powered Electric Vehicle" Energy Partners, Inc., 1501 Northpoint Parkway, Suite 102, West Palm Beach, FL 33407, USA. September, 1995.
- 12- Billings R.E., Sanchez M., Cherry P. and Eyre D.B. "LaserCell Prototype Vehicle" Int. J. Hydrogen Energy, Vol.16, n° 12, pp. 829-837, 1991.
- 13- Reid R.H., "Dawn of the Hydrogen Age" Wired Magazine, Issue 5.10, october 1997. [HTTP://www.wired.com/wired/5.10/hydrogen.html](http://www.wired.com/wired/5.10/hydrogen.html)
- 14- Bottura C.P. e Barreto G., "Veículos Elétricos", Editora da Unicamp, 1989.
- 15- Batteries – Edited by Karl V. Kordesch – Union Carbide Corp. Battery Products Division Technology Laboratory Parma, Ohio USA.
- 16- Fukino M., Irie N. and Ito H. "Development of an Electric Concept Vehicle with a Super Quick Charging System", in SAE/SP-915, pp. 25-32, 1992.

- 17- Chan C.C. "An Overview of Electric Vehicle Technology" – Proceedings of the IEEE. Vol. 81, nº 9, September 1993.
- 18- Nissan Fev – Nissan Motor Co., Ltd. 17-1, Ginza 6-chome, chuo-ku, Tokyo 104-23, Japan.
- 19- Moore, T. "The Push for Advanced Batteries", EPRI J., pp. 17-19, 1991.
- 20- Ovshinsky S.R., Vehkatesan S., Feteenko M. and Dhar S., "Ovonic Ni-metal Hydride Batteries for Electric Vehicles", in Proc. ISATA, pp. 29-46, 1991.
- 21- Amaral E.G., "Aplicação do Sistema 'Solar-Hidrogênio' como Fonte de Energia para Veículos Elétricos: O protótipo 'VEGA'" - Tese de Mestrado - UNICAMP, dezembro de 1994.
- 22- Deluca W.H., Tummillo A. F., Kulaga J.E., Webster C.E., Gillie K.R., and Hogrefe R.L., "Performance Evaluation of Advanced Battery Technologies for Electric Vehicle Applications", in Proc. Intersoc. Energy Conver. Eng. Conf., pp. 314-319, 1990.
- 23- Honda Motor Company - Electric Vehicles, USA, 1995.
- 24- IMPACT Specification GM-Electric Vehicles, USA, 1994.
- 25- Automotive Engineering pp. 85-89, February, 1995.
- 26- Batteries International – Special feature, Published by Delco Remy USA. pp. 10-13, April, 1993.
- 27- Wouk V., "Hybrids: Then and Now" IEEE Spectrum, pp. 17-21, July, 1995.
- 28- da Silva E.P., Gallo W.L.R., Szajner J., Amaral E.G. e Bezerra C.R. "Aplicação do Sistema Solar-Hidrogênio em Veículos Automotivos". Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia e I Seminário Latino Americano de Energia, Rio de Janeiro - RJ, outubro/1993, Vol. 3, pags. 1077/1081. Publicação UFRJ/Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, 1993.
- 29- da Silva E.P., Gallo W.L.R., Szajner J., Amaral E.G. e Bezerra C.R. "State of the Art in the Use of Hydrogen as a Automotive Fuel" SAE Technical Paper Series nº 931706E, in II Mobility Technology Conference & Exhibit, outubro/1993, São Paulo, Brasil.
- 30- Gallo R., Silva E.P. and Bezerra C.R., IX Simpósio de Engenharia Automotiva, pp. 26-28, Agosto 1997.
- 31- da Silva E.P., Gallo W.L.R., Szajner J., Amaral E.G. e Bezerra C.R. "A Solar/Hydrogen/Electricity Hybrid Vehicle". Proceedings of 10th. World Hydrogen Energy Conference and Exhibition (HYDROGEN'94), junho/1994, Cocoa Beach,

- U.S.A., Vol. 3, pags. 1441/1445. Publicação International Association for Hydrogen Energy, Cocoa Beach, 1994.
- 32- Fuel Cells Modern Processes for the Electro Chemical Production of Energy – Wolf Vielstich Institut Fur Physikalische Chemie Der Universitat Bonn – Vol. 1, cap. 1, 1970.
- 33- ENERGY - The International Journal - v. 21, July/August, 1996.
- 34- Catálogo da empresa De Nora S.p.A, - Via Bistolfi, 35 - 20134 Milano tel. (02) 21291 - Italy, 1997.
- 35- ENERGY - The International Journal - "Commercialization of Fuel Cell", Vol. 20, nº 5, May, 1995.
- 36- Appleby A.J., Selman J.R., - Electrochemical Hydrogen Technologies, cap. 7, Amsterdam, 1990.
- 37- ENERGY - The International Journal - "Assessment of Research Needs for Advanced Fuel Cells" v. 11, nº 1/2, January/February, 1986.
- 38- da Silva E.P., "Introdução à Tecnologia do Hidrogênio" Editora da Unicamp, Campinas, 1991.
- 39- Appleby A.J., Electrolysis, in: Conway B.E., Bockris J.O'M, Khan S.U.M. and White R.E., (Ed.), Comprehensive Treatise on Electrochemistry, Vol. 7, pp. 173, Plenum, N.Y., 1983.
- 40- Appleby A.J. and Foulkes F.R., Fuel Cell Handbook, Van Nostrand - Reinhold, New York, pp.295, 1989.
- 41- Benjamin T.G., Handbook of Fuel Cell Performance, Institute of Gas Technology, Chicago, IL, pp.104, 1980.
- 42- Beecher D.T., Energy Conversion Alternatives Study (ECAS), Westinghouse, Phase 1. Vol. 1: Introduction and Summary and General Assumptions, NASA-CR-134941; Brown D.H. and Corman J.C., Energy Conversion Study (ECAS), General Electric, Phase 1. Vol.2: Advanced Energy Conversion Systems. Part I: Open Cycle Gas Turbines, NASA-CR-134948, Vol. 2, Pt 1, NTIS, Springfield, VA, 1976.
- 43- Prater K. "The Renaissance of the Solid Polymer Fuel Cell" Journal of Power Sources, 29, pp. 239-250, 1990.
- 44- Appleby A. J. "Grove Anniversary Fuel Cell Symposium - Closing Remarks" - Journal of Power Sources, 29, pp. 267-276, 1990.
- 45- Projeto em andamento "Environmental Strategy for Energy: Hydrogen Fuel Cell Buses for Brazil (ESSE/HB)" Ministério das Minas e Energia/PNND, Brasil, 1998.

- 46- Gottesfeld, S. "Recent Advances in PEM Fuel Cell Research at LANL" Abstracts Fuel Cell Seminar, 1988.
- 47- Glasser S.N. and Escombe F.M. "Fuel Cells: Applications and Opportunities", Escoval e Consultancy Services, Vol. 3, 1996.
- 48- Ewan M., Energy Partners, West Palm Beach, FL, personal communication, October 9, 1991.
- 49- Deluchi, M.A. and Ogden, J.M. "Solar Hydrogen Fuel Cell Vehicles" Transpn. Res.-A, Vol 27 A, n° 3, pp. 255-275, 1993.
- 50- Romano S. The DOE/DOT Fuel Cell bus Program and its Application to Transit missions. Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol.3, Reno, NV, August. Ed. By P.A. Nelson, W.W. Schertz and R.H. Till, American Institute of Chemical Engineers, NY, pp. 293-296, 1990.
- 51- U.S. Department of Energy Office of Transportation Technologies. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Program. DE91015020, Washington, DC, October, 1991.
- 52- Maggiore A. and Tettamanti M. - "Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Industrial Applications" - DeNora S.p.A, Milan, Italy. December, 1996.
- 53- Faita G., Mantegazza C., US Patent N. 5.482.792, 1994.
- 54- Le Point Magazine, France, n° 1281, April, 5 1997.
- 55- Willand J., Noreikat E. "State of the Art and Development Trends for Fuel Cell Vehicles", Daimler Benz AG, Stuttgart, Germany. In: European Fuel Cell News, Vol. 3, n° 2, pp. 8-14, July, 1996.
- 56- Schock R.N., Berry G.D., Rambach G.D., Smith J.R. "The Transition to Hydrogen as a Transportation Fuel: cost and infrastructure requirements" Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Germany, pp.115-122, June, 1996.
- 57- Moore R.B., Raman V. "Hydrogen Infrastructure for Fuel Cell Transportation". Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Germany, pp. 133-141, June, 1996.
- 58- Edwards N., Ellis S.R., Frost J.C., Golunski S.E., Petch M.I. and Reinkingh J.G. "Hot-Spot Technology for on board Hydrogen", Johnson Matthey Technology Centre. Published in: European Fuel Cells News, Special Issue, Vol. 3, n° 2, pp. 17-18, July, 1996.
- 59- Bentley J., Stobart R. "Fuel Power Systems", Arthur D.Little/Cambridge Consultants, report, 1996.

- 60- Catálogo da empresa SAB NIFE, Av. Pires do Rio, 400l. Itaquera, São Paulo-SP.
- 61- Patil P.G. and Huff J. "Fuel Cell/Battery Hybrid Power Source for Vehicles".
Proceedings of the 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference,
Philadelphia, PA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, NY, August,
pp. 993-998, 1987.
- 62- Adcock P.L., Bargon R.T., Dudfield C.D., Mitchell P.J., Naylor P., and Newbold A.
"Prospects for the Application of Fuel Cells in Electric Vehicles" Journal of Power
Sources, 37, pp. 201-207, 1992.
- 63- Burke A. F. Laboratory Testing of High Energy Density Capacitors for Electric
Vehicles. EGG-EP-9885, prepared for the U.S.Department of Energy, EG&G Idaho
Falls, October, 1991.
- 64- Catálogo da VCST Hydrogen Systems - "The Hydrogen Fueled City Bus" -
RELLESTRAAT 2 - 3800 SINT - TRUDEN - BELGIUM - Tel. 011/67.02.11 - Fax
011/69.27.22.
- 65- Popular Science pp. 69 October, 1993.
- 66- da Silva E.P., "The Unicamp Experiments with Hidrogen Vehicles" SAE Technical
Paper 911704. September, 1991.
- 67- da Silva, E.P., "Protótipos Ind. de Compressores Termoq. de Hidrogênio Baseados
na Tecn. dos Hidretos Metálicos" Tese de Doutorado, FEM-UNICAMP, Campinas,
1989.
- 68- Ekdunge P. and Raberg M., "The Fuel Cell Vehicle Analysis of Energy Use,
Emissions and Cost" Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23. n° 5, pp. 381-385, 1998.