

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEMIC - Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

O Sistema "Solar-Hidrogênio" como fonte de energia
para veículos:
O protótipo "VEGA"

Eduardo Gurgel do Amaral

Orientador: Prof. Dr. Bernard Waldman

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Eduardo Gurgel do Amaral
e aprovada pela Comissão
Juizadora em 22 / 12 / 94
Bernard Waldman
Orientador

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

Campinas - SP
Dezembro de 1994

VIDADE 194
CHAMADA: T/UNICAMP
Am13s
E1.
OMBO BC/31327
ROC. 28.1.97
C ☐ D ☒
PREÇO R\$ 11,00
DATA 13/08/97
N° CPD

CM-00099615-5

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

Am13s Amaral, Eduardo Gurgel do
 O sistema “solar-hidrogênio” como fonte de energia
 para veículos: o protótipo “VEGA” /
 Eduardo Gurgel do Amaral.--Campinas, SP: [s.n.], 1994.

 Orientador: Bernard Waldman.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica.

 1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia solar. 3.
 Hidrogênio - Tecnologia. 4. Veículos elétricos. I.
 Waldman, Bernard. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica. III. Título.

ÍNDICE

Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	i
Capítulo 2 - O SISTEMA ENERGÉTICO SOLAR HIDROGÊNIO	10
2.1 - As Células Fotovoltaicas	10
2.1.1 - Histórico	11
2.1.2 - A Célula Solar de Silício	12
2.1.3 - O Atual Estado da Arte das Células Solares. Novas Técnicas e Potencial	15
2.1.4 - Avanços Tecnológicos das Células Solares no Japão	16
2.1.4.1 - Esforços em Pesquisa e Desenvolvimento para Melhorar o Desempenho das Células Fotovoltaicas	19
2.1.5 - O Uso da Energia Solar Fotovoltaica: Perspectivas	26
2.1.5.1 - A Energia Fotovoltaica como Opção Energética	28
2.1.5.2 - Estocagem de Energia Fotovoltaica	29
2.2 - A Tecnologia do Hidrogênio	30
2.2.1 - A Geração do Hidrogênio	30

2.2.2 - A Eletrólise da Água	32
2.2.3 - O Armazenamento do Hidrogênio	34
2.2.4 - Considerações Gerais sobre a Tecnologia do Hidrogênio	37
2.3 - O Sistema Solar-Hidrogênio	39
 Capítulo 3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	 41
3.1 - Histórico	41
3.2 - Classificação	43
3.3 - Sistema Propulsor	45
3.3.1 - Motores	45
3.3.2 - Controle	49
3.3.2.1 - Aspectos Gerais	49
3.3.2.2 - Inversor para Controle de Motor de Corrente Alternada	52
3.4 - Baterias Eletroquímicas	58
3.4.1 - Tipos de Baterias Tradicionais	59
 Capítulo 4 - “VEGA”, O PROTÓTIPO DO VEÍCULO HÍBRIDO SOLAR	
HIDROGÊNIO-ELETRICIDADE	
4.1 - Histórico	68
4.2 - Características do Projeto	68
4.3 - Características do Veículo	73

Capítulo 5 - CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
Anexo 01	87
Anexo 02	89

DEDICATÓRIA

i

Dedico este trabalho à professora doutora Anne Corina Gottberg, pela luta constante na busca de soluções para a viabilização da aplicação da energia solar como forma de melhorar a vida no nosso planeta, se permitindo sonhar sem se importar com o julgamento que seus colegas membros da comunidade científica pudessem fazer de suas idéias. A coragem e determinação somadas a imaginação livre, sem restrições, muitas vezes é a chave para desvendar segredos ou fazer descobertas que podem vir a ser revolucionárias mudando quem sabe até o rumo da história.

Agradeço à prof. Dra. Anne Corina Gottberg pelo convite para desenvolver este trabalho acadêmico, que propiciou o início e a oportunidade de todo o projeto Vega.

Agradeço aos meus pais e a minha companheira pelo apoio, compreensão e incentivo que sempre dispensaram, fatores essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, coordenador do Laboratório de Hidrogênio, pela amizade, colaboração, incentivo, ajuda e orientação que dispensou durante todo o desenvolvimento desta dissertação assim como de todo o projeto.

Agradeço ao Laboratório de Hidrogênio por todo o apoio prestado e em especial ao Eder pelo suporte na digitação e montagem do texto.

Agradeço ao Prof. Dr. Bernard Waldman por ter me acolhido como orientado em substituição a Prof. Dra. Anne Corina Gottberg, pela compreensão, apoio e orientação afim de que eu pudesse concluir este trabalho.

Agradeço a todas as empresas participantes pelo apoio, sem o qual não seria possível desenvolver a parte prática deste projeto. Em especial, agradeço aos trabalhadores que tiveram uma dedicação especial, se sacrificando muitas vezes pelo simples desejo de colaborar.

Agradeço acima de tudo a Deus por proporcionar esta oportunidade e por se mostrar presente, das mais diversas formas em todos os momentos críticos, fazendo com que as dificuldades fossem superadas de forma tão surpreendente.

Este trabalho aponta a necessidade de se desenvolver e adotar alternativas aos atuais automóveis de combustão interna, principalmente aos de uso urbano, destacando também a importância da fonte energética destes.

Inicialmente, são apresentados motivos que justificam a conveniência de mudança do atual sistema energético-propulsor dos automóveis e as transformações necessárias que possibilitem ir ao encontro das soluções. O uso de veículos com tração elétrica como a opção que melhor atende aos enfoques ambientais, assim como uma fonte de energia capaz de garantir a geração de eletricidade sem poluição, são discutidas.

O Sistema Energético Solar-Hidrogênio é apresentado como uma alternativa de geração e armazenamento de energia de forma limpa, renovável e inesgotável. A tecnologia e o estado da arte, tanto das células solares como do hidrogênio, são descritos, bem como o esquema de funcionamento e as vantagens do Sistema Solar-Hidrogênio.

As principais características que diferenciam um veículo elétrico de um veículo à combustão interna são discutidas em seguida. Procura-se ressaltar as opções de maior importância atualmente para esta aplicação.

Finalmente, é apresentado o veículo "VEGA", protótipo de um veículo híbrido Solar-Hidrogênio-Eletricidade. O "VEGA" incorpora os elementos básicos de um pré-estudo de um veículo, alternativa possível para os atuais automóveis e primeiro elo de uma cadeia de projetos nacionais com a finalidade de produzir veículos não poluentes.

1 - INTRODUÇÃO

A busca de alternativas para os derivados de petróleo foi intensificada a partir dos “Choques do Petróleo” de 1973 e 1978. A alta nos preços do petróleo propiciou um grande empenho na pesquisa de alternativas. Com a queda dos preços no início dos anos 80 as pesquisas diminuíram, sendo retomadas atualmente devido à conscientização para os problemas ambientais causados por aqueles combustíveis.

Além do problema de preço, os choques revelaram a vulnerabilidade econômica dos países dependentes da importação do produto, uma vez que as principais reservas se concentram principalmente em regiões do planeta cujos países produtores são fortemente influenciados pelas potências mundiais, sendo desejável uma maior independência das flutuações econômicas e políticas que esta situação acarreta.

Na época atual (década de 90) os preços se mantêm em patamares relativamente baixos devido a um equilíbrio entre oferta e demanda. Houve um menor crescimento no consumo de derivados, o que pode ser creditado à busca de novas tecnologias, ao aprimoramento das atuais, à descoberta de novos poços de petróleo nos países consumidores e à substituição de parte das necessidades por outras fontes de energia. No entanto, a dependência ainda é muito grande e se está longe de encontrar substitutos para todos os produtos (hoje essenciais para nós) que têm os derivados de petróleo como insumo básico. Essa é uma das razões pela qual dever-se-ia reservar a utilização do petróleo para fins nobres e, na medida do possível, evitar a sua queima como combustível. A figura 1 mostra a porcentagem de uso de cada fonte energética na matriz de países industrializados e em desenvolvimento [1].

Recentemente, outra razão se apresenta de maneira incisiva: a poluição do meio ambiente. A consciência ambiental tem crescido ano a ano. Os efeitos da poluição ambiental têm sido constatados, às vezes de forma clara, outras de forma indireta, exigindo a tomada de uma atitude a respeito, sob pena de atingir-se situações extremamente perigosas à saúde

pública, como já existem em alguns grandes centros populacionais, como Los Angeles e Cidade do México. A figura 2 mostra a comparação da emissão per capita e o total de emissão em 1965 e 1989 [1].

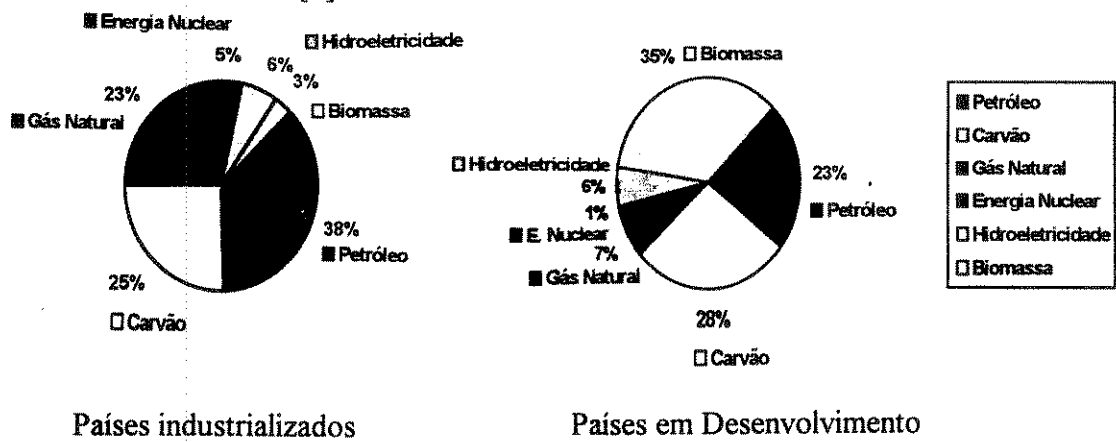


Figura 1 - Fontes de energia, 1987.

A emissão de poluentes, principalmente, por parte da indústria e meios de transporte, impõe altos custos para a saúde e produtividade [1, p.5]. Do petróleo consumido nos países em desenvolvimento, 55% o são pelos meios de transporte, tornando-se uma fonte significativa de poluição atmosférica nas cidades. Mais de 90% da emissão de chumbo e monóxido de carbono normalmente é proveniente de veículos [1, p.24]

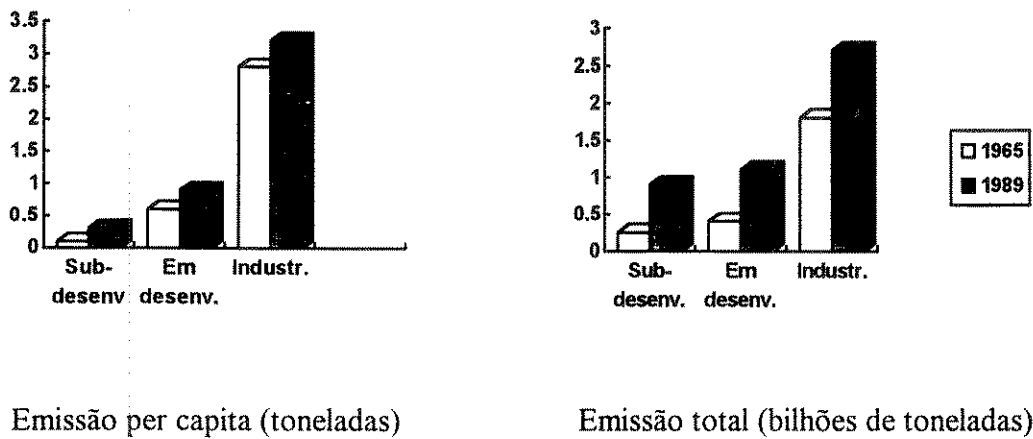


Figura 2 - Emissão global de dióxido de carbono de combustíveis fósseis e indústria cimenteira, 1965 e 1989.

Entre os problemas gerados pela poluição ambiental, estão os produtos particulados suspensos, uma ameaça para as pessoas que vivem nas áreas urbanas. Este tipo de poluição pode provocar o câncer e problemas respiratórios. Na segunda metade da década de oitenta, mais de 1,3 bilhão de pessoas viviam em áreas sujeitas a esse tipo de poluição, não havendo nenhum controle que objetivasse, no mínimo, atingir os níveis padrões determinados pela Organização Mundial de Saúde. Se houvesse tal controle, entre 300.000 e 700.000 mortes teriam sido evitadas, fora outros milhares de pessoas cujos sofrimentos causados por doenças respiratórias crônicas teriam sido poupados. A figura 3 mostra os percentuais da população urbana mundial exposta à poluição ambiental. [1, p.5]

Estimativas feitas em Bangkok sugerem que crianças venham a sofrer um decréscimo na sua capacidade intelectual devido à alta exposição ao chumbo, com sérias conseqüências ao desenvolvimento e produtividade na fase adulta. Nos adultos os problemas vão de aumento da pressão arterial a ataques cardíacos, que podem causar a morte. Em algumas cidade, foi constatado um aumento de 20% na hipertensão. [1, p.5]

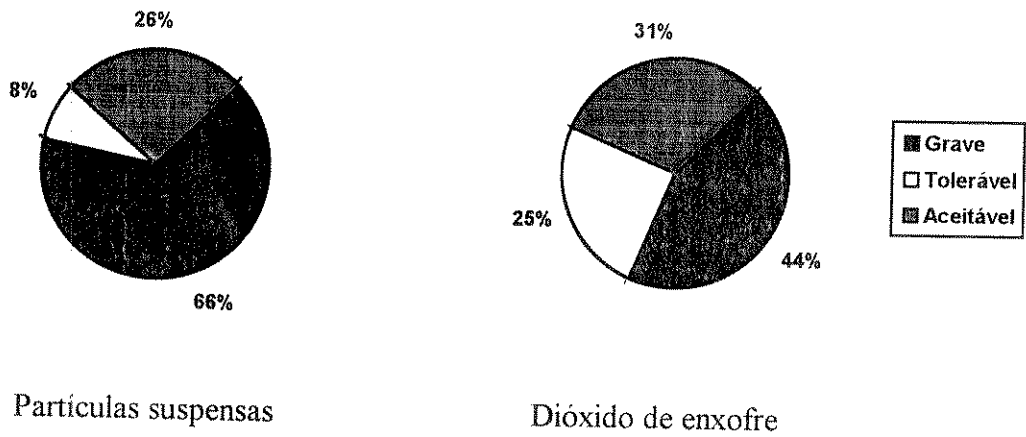


Figura 3 - Porcentagem de população urbana exposta à poluição do ar.

Há três fatores que tornam o problema mais sério em países subdesenvolvidos: a baixa qualidade dos combustíveis utilizados, as péssimas condições de boa parte dos veículos e a concentração destes, em poucas cidades. Como exemplo, no México e na Tailândia cerca de metade da frota nacional se concentra na capital e, no Brasil, um quarto da frota opera em São Paulo. Boa parte da população, principalmente a classe mais pobre, vive em contato direto com essa poluição, que atinge também os alimentos, pois a exposição ao ar contaminado é freqüente [1, p. 124].

A degradação do meio ambiente impõe custos à sociedade que normalmente não são incorporados nos produtos geradores da poluição. É imprescindível passar a comparar a vantagem proporcionada pelo uso do meio poluidor em relação ao custo e conseqüências dos danos causados ao meio ambiente.

Em alguns casos é possível reparar os danos através de medidas saneadoras. Entretanto, há casos em que os danos são irreversíveis, fato agravado por só se tornarem perceptíveis depois que o problema ocorre.

Nem sempre é fácil medir estes efeitos prejudiciais e muitas vezes o que se têm são estimativas que não refletem com precisão a realidade. A adoção de medidas preventivas com base nestas, apresenta-se como uma atitude inteligente, frente à imobilidade diante do risco da manifestação de atingir-se situações que exijam elevados sacrifícios e investimentos.

Uma das principais conseqüências da poluição gerada pelos veículos de combustão interna é a emissão de dióxido de carbono. Dos gases gerados pelas atividades humanas este é o maior responsável pelo agravamento do efeito estufa. [1, p. 61]. Outros gases nocivos são: o metano, o óxido de nitrogênio, o argônio, além de alguns gases artificiais, como por exemplo o clorofluorcarbono, que destrói a camada de ozônio, filtro natural dos raios ultravioleta. A figura 4 mostra o consumo mundial de energia e a emissão de CO₂ na atmosfera [2].

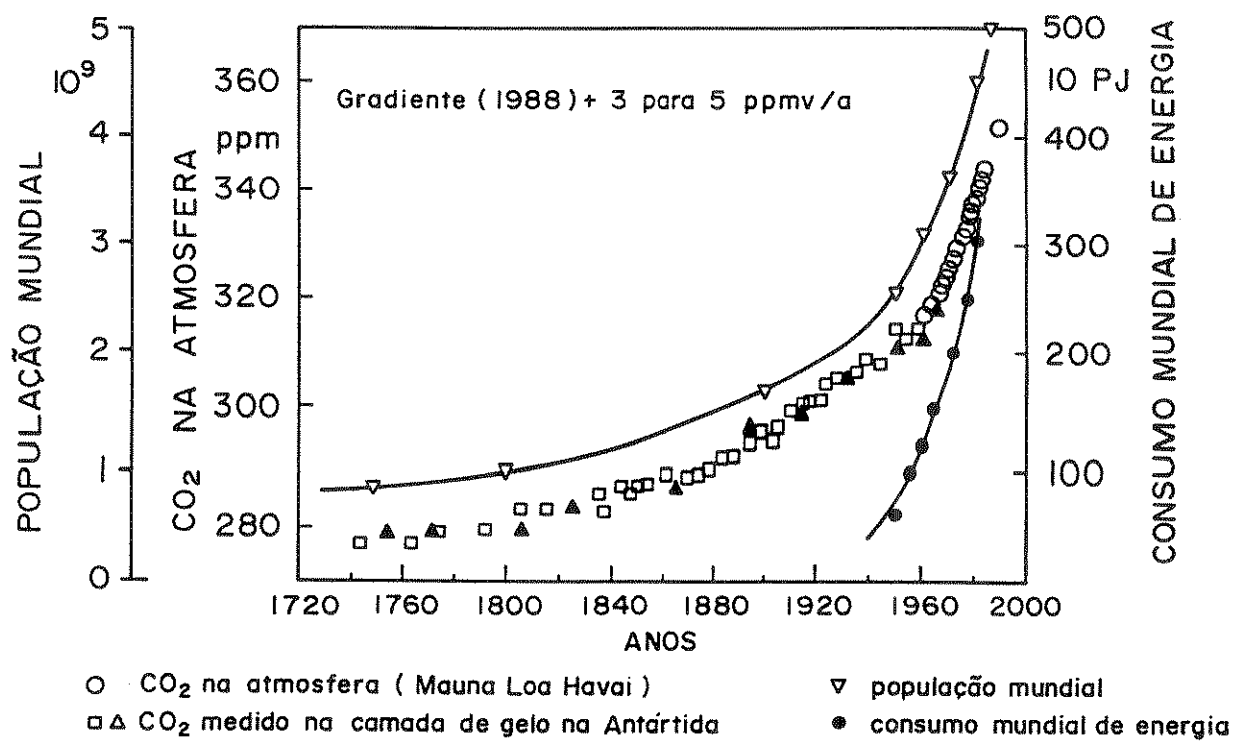


Figura 4 - Consumo mundial de energia e emissões de CO2 na atmosfera. [2]

O clima da Terra é comandado pela radiação solar. De toda a energia solar que atinge a Terra, uma parte (por volta de 30%) é refletida pela atmosfera, uma parte menor é por ela absorvida e o restante atinge o solo. O aquecimento da superfície do planeta faz com que esta emita parte da energia absorvida de volta ao espaço, sob forma de radiação infravermelha, mantendo a temperatura da superfície em regime estacionário. Os gases acima citados, presentes na atmosfera, absorvem esta radiação infravermelha, impedindo sua saída para o espaço, reemitindo parte dela de volta à superfície, elevando sua temperatura.

Os níveis de poluição do ar têm sido monitorados há pouco mais de uma década. Em muitos locais é comum vários poluentes excederem os níveis mínimos tolerados.

As três principais fontes de poluição do ar - a emissão de veículos, diversas formas de geração de energia e a produção industrial - tendem a ficar mais importantes com o desenvolvimento econômico mundial, se não forem adotadas medidas rígidas de controle e saneamento e se não forem procuradas alternativas para as atuais fontes de energia.

Várias propostas têm sido estudadas no mundo inteiro, como por exemplo o álcool e o gás natural. São fontes alternativas interessantes por diminuírem bastante a emissão de CO, SOx e aditivos à base de chumbo, ainda utilizados em muitos países que não adicionam álcool à gasolina. Entretanto, estas fontes não resolvem o problema da emissão de CO₂ e NOx (que só acabaria com o fim dos motores a explosão). Dessa maneira, o problema do efeito estufa continua a existir.

Segundo a previsão do crescimento do fornecimento de energia para atender a demanda do setor de transportes dentro da tecnologia usada atualmente, teremos até o ano 2030 o quádruplo dos níveis de poluição atual, como mostra a figura 5 [1, p.125].

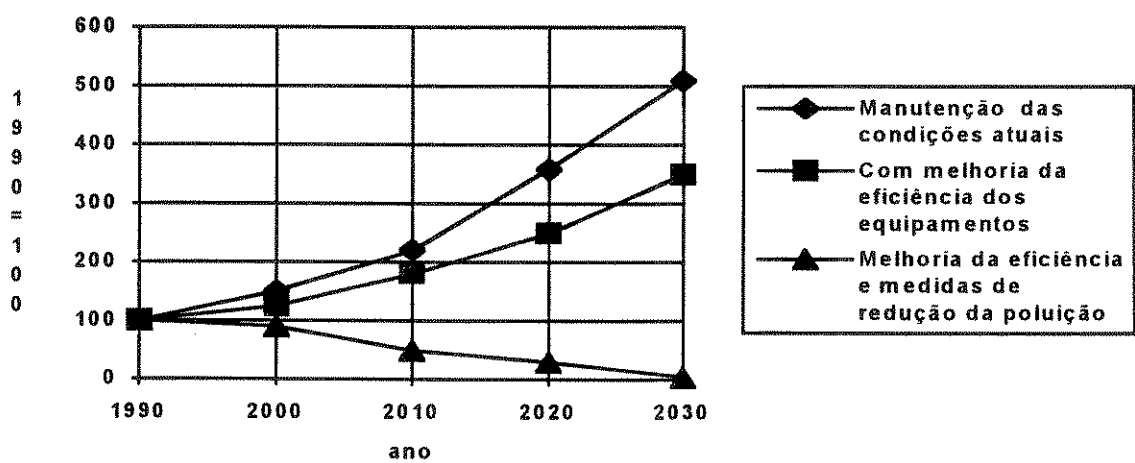


Figura 5 - Emissão de veículos em áreas urbanas de países em desenvolvimento. Três cenários 1990 - 2030.

A figura 5, apresenta três possibilidades. Primeira: a situação atual é mantida, sem nenhuma providência para alterá-la. Segunda: são adotadas medidas que visem mudanças na

aglomeração de veículos e imponham uma alta taxaço sobre os combustíveis. Por fim, terceira possibilidade: seriam adotadas medidas extremas como o controle rígido da emissão de poluentes e a gradual introdução de veículos de energia “limpa” durante um período de cerca de vinte anos.

Nos grandes centros urbanos, onde a quantidade de veículos é elevada, o problema da poluição se torna ainda mais grave. pelo elevado número de veículos circulando na mesma região e, ainda, devido à facilidade com que ocorrem congestionamentos. Daí também decorrem problemas econômicos pois, veículos parados com motor funcionando geram gastos adicionais de combustível e desgaste do motor, sem o correspondente benefício do veículo circulando. Nesses casos, mudanças radicais são ainda mais importantes.

Tendo em vista as necessidades ambientais, seria desejável que os veículos não emitissem qualquer poluente. -condição de **Emissão zero**. Para se atender a esta condição, os atuais motores de combustão interna não poderiam ser utilizados. O alcool ou gás natural são paliativos pois apenas reduzem a emissão de poluentes em relação à gasolina. O combustível que mais se aproxima do ideal, para motores de combustão interna, é o hidrogênio. Porém, não satisfaz a condição “Emissão zero”, pois além de vapor d’agua, como resultado da explosão no cilindro do motor, compostos do tipo “NOx” se formam, comprometendo assim a emissão de gases. Um veículo com outro tipo de propulsão precisaria ser adotado. Na atualidade, o veículo com tração elétrica, é o único que atende à condição de “Emissão zero”.

As principais indústrias de automóveis do mundo e alguns centros de pesquisa independentes têm se dedicado desde alguns anos a pesquisar veículos com tração elétrica.

Muitos protótipos foram criados, alguns com alto desempenho. Como exemplo, podemos citar: "Impact" da General Motors, "Ax Electric" da Citroen, "Zoom" da Renault-Matra, "106 Electric" da Peugeot, "Panda Electra" da Fiat, "Duo" da Audi, "Jetta City-Stomer" da Volkswagen, o "Jusin" da Opel, o "Fev" da Nisan, e outros. Muitos projetos com

motorização híbrida têm sido estudados também, como é o caso do "Chico" da Volkswagen, do "Vision A93" da Mercedes Benz, o "E1" da BMW e outros.

O interesse dos fabricantes de automóveis se explica por uma exigência de mercado. Impulsionados pelo movimento ambientalista, o estado da Califórnia, nos Estados Unidos, aprovou uma lei exigindo que 2% de todos os carros comercializados em 1998 sejam totalmente "verdes" (não poluidores, emissão zero). Em 2003, esse número deverá crescer para 10% do conjunto de carros produzidos [3]. Mais nove estados americanos já aderiram a estas medidas e possivelmente outros seguirão o mesmo caminho.

Várias outras medidas já vinham sendo estudadas para conter o agravamento dos problemas ambientais causado por veículos como, por exemplo, a adoção de taxas sobre combustíveis de acordo com o nível de poluição gerado por eles, o que gradativamente tornaria mais cara a utilização dos veículos atuais, favorecendo e viabilizando os veículos menos poluentes.

O veículo elétrico é considerado ideal para os grandes centros urbanos. Além de não poluir e ser silencioso, não desperdiça energia quando parado em congestionamentos. O grande problema deste tipo de veículo, entretanto, é o armazenamento de energia por meio de baterias eletroquímicas. No estágio atual da tecnologia, as baterias comercialmente viáveis apresentam uma densidade energética bastante desfavorável, fazendo-se necessário sobrecarregar o veículo com grande peso adicional. Além disso, a autonomia que elas proporcionam, a instabilidade e o tempo de recarga não são satisfatórios para que se torne possível, economicamente, o emprego de veículos elétricos em larga escala.

Por outro lado, para haver uma solução completa dos problemas ambientais, é preciso que a eletricidade a ser utilizada nestes veículos seja proveniente de uma fonte não agressiva ao meio ambiente.

A eletricidade é gerada de várias formas, nem todas "limpas"- não poluentes. No Brasil, a principal forma de geração é a hidroeletricidade, abundante, e considerada limpa (apesar de causar, na sua implantação, grandes impactos ambientais além de gerar gás de

efeito estufa (CH_4) durante muitos anos). Porém, não é assim em toda parte. No Japão, por exemplo, grande parte da energia elétrica é produzida por termoeletricas e, principalmente, por usinas nucleares. Na Europa, muitos países dependem da termoeletricidade, sendo as termoeletricas a carvão muito utilizadas.

Assim, caso a fonte de energia elétrica não seja limpa, estar-se-ia apenas melhorando as condições atmosféricas num determinado ponto, com agravamento em outro, permanecendo a agressão contra o ecossistema como um todo.

Uma fonte que se mostra como alternativa atraente e promissora para o futuro, é o SISTEMA ENERGÉTICO SOLAR-HIDROGÊNIO, apresentado a seguir. Este conta com a conversão da energia solar em elétrica como fonte primária e a produção de hidrogênio, através da eletrólise da água, como meio energético. Enfim, utiliza-se principalmente energia solar e água, extremamente abundantes e disponíveis, vitais para a própria existência da vida orgânica no planeta.

Este Sistema possui certa versatilidade como fonte energética automotiva, pois ele gera eletricidade e hidrogênio, podendo ser empregado: em veículos apenas elétricos que utilizem baterias eletroquímicas como meio armazenador; veículos híbridos que utilizem o hidrogênio para gerar eletricidade através de um motor de combustão ligado a um gerador, como forma suplementar de alimentar as baterias; veículos elétricos que utilizem células de combustível como principal forma de fornecer eletricidade e finalmente, veículos com motor à combustão que utilizem o hidrogênio como combustível. Todas as configurações são vantajosas do ponto de vista ambiental, mas as únicas alternativas que podem se enquadrar como emissão zero são as versões puramente elétricas, tanto à bateria como à célula de combustível.

2 - O SISTEMA ENERGÉTICO SOLAR-HIDROGÊNIO

Sistema Energético Solar-Hidrogênio é o nome normalmente atribuído ao sistema de geração de energia que utiliza energia solar fotovoltaica como fonte primária e hidrogênio eletrolítico como insumo energético, dando como resultado uma fonte de energia limpa, renovável e abundante.

Este sistema depende de duas tecnologias: a das células solares fotovoltaicas e da geração e armazenagem do hidrogênio, que serão apresentadas a seguir. Na sequência é demonstrado esquematicamente a configuração do Sistema Energético com as suas características e possibilidades.

2.1 - As células fotovoltaicas

Há várias formas de utilização da energia solar. A energia hidráulica, a energia das ondas, a energia eólica, assim como a biomassa e a fotossíntese, são formas indiretas do uso da energia solar.

A radiação solar pode ser convertida em energia elétrica por meio de duas formas distintas: conversão indireta e conversão direta. A conversão indireta transforma a radiação solar em calor e, através de um processo termodinâmico, é gerada energia elétrica. A conversão direta se processa através da transferência da energia da radiação solar para os elétrons de um sólido.

O processo de conversão direta tem como vantagem operar à temperatura ambiente, podendo ser utilizado também em climas frios, pois depende apenas da luz solar. Já os processos que dependem da geração de calor são mais apropriados aos locais de climas ensolarados e quentes. Além disso, necessitam também de uma fonte fria, normalmente

refrigeração a água ou ar. O meio mais avançado e de melhor desempenho de conversão direta é o que utiliza células fotovoltaicas.

2.1.1 - Histórico

O efeito fotovoltaico (FV) foi descoberto num eletrólito, em 1839, por Becquerel. Em 1876, Adams e Day descobrem o efeito FV num semicondutor (selênio). Já em 1930, Scottky apresenta a teoria do efeito FV relacionada a uma camada de barreira (Cu_2O). A descoberta do efeito FV em cristais de silício foi feita por Ohl, em 1941. As primeiras medidas de eficiência foram feitas neste material por Billig e Plessner, em 1949. Pearson Fuller e Chapin desenvolveram em 1954 a primeira célula solar prática, utilizando o silício. Em 1956, Jenny, Loferski, e Rappaport trabalharam na determinação do rendimento das células em função dos materiais. Em 1959 obteve-se um rendimento de 5% para células policristalinas. Em 1960, foi feita a primeira utilização de contatos de grade; também neste ano foram desenvolvidas as células dendríticas. Lindmayer foi o responsável pela célula violeta (1972). Em 1974 foram desenvolvidas as células em fita de silício e, no mesmo ano, Haynos apresentou a célula não refletora. A célula semicristalina veio no ano seguinte graças a J.Lindmayer e H.Fischer. Goetzberger, Rapp, Boling obtiveram, em 1976, rendimento óptico de 10% com concentrador de placa luminescente. No mesmo ano, Carlson e Wronski desenvolvem células de silício amorfo hidrogenado com rendimento de 5%. Em 1978, James, Moon e outros obtêm um dispositivo Si/GaAs com rendimento de 28,5%. Ainda em 1976, Lindmayer consegue um rendimento de 16% com as células de Si semicristalinas e 8,5% com as células de Si metalúrgico.

As aplicações terrestres tiveram início em 1956, sendo dirigidas para alimentação de lanternas, luzes de navegação e estações de comunicação. Em 1958, as células solares tiveram sua primeira aplicação espacial no Satélite Vanguard I.[4]

2.1.2 - A Célula Solar de Silício

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre. É extraído do dióxido de silício contido na areia, onde é o maior constituinte. É o material básico para toda a indústria eletrônica e o mais importante material semiconductor para conversão fotovoltaica. [4,5]

A maior parte das células em uso são fabricadas de material monocristalino, a partir de laminas cortadas de tarugos monocristalinos cilíndricos (forma de puxamento do cristal). A espessura da lâmina, depois de cortada, normalmente, é de 300 μm .

A Figura 6 mostra a estrutura de uma célula solar típica de silício.

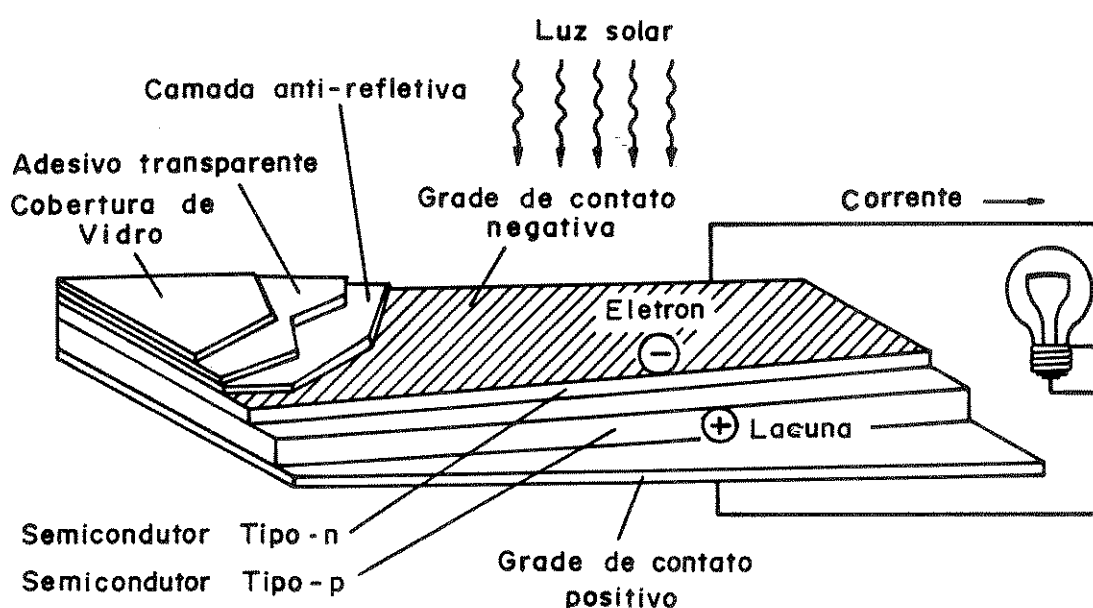


Figura 6 - Estrutura de uma célula solar fotovoltaica.

Fonte: Harnessing Solar Power - The Photovoltaics Challenge. Plenum Press - New York (1990) K.Zweibel.

A eficiência de uma célula solar é dada pela razão entre a potência elétrica que pode ser extraída no ponto de potência máxima da curva I-V e a potência de luz incidente.

O rendimento teórico máximo de uma célula solar de silício é de cerca de 45-50% para luz visível monocromática.[4, p 247] Como o espectro da luz solar estende-se do ultravioleta pela faixa visível até a faixa inferior do infravermelho, os rendimentos de células solares de silício possíveis para a luz do sol são inferiores ao máximo. As células solares de silício são insensíveis à luz de significante parte do espectro solar.[6]

A Figura 7. mostra a faixa de sensibilidade das células solares de silício, comparada ao espectro solar fora da atmosfera e ao nível do solo.

A Figura 8. mostra as características da célula solar convencional de ser insensível à luz em parte do ultravioleta e do infravermelho superior do espectro.

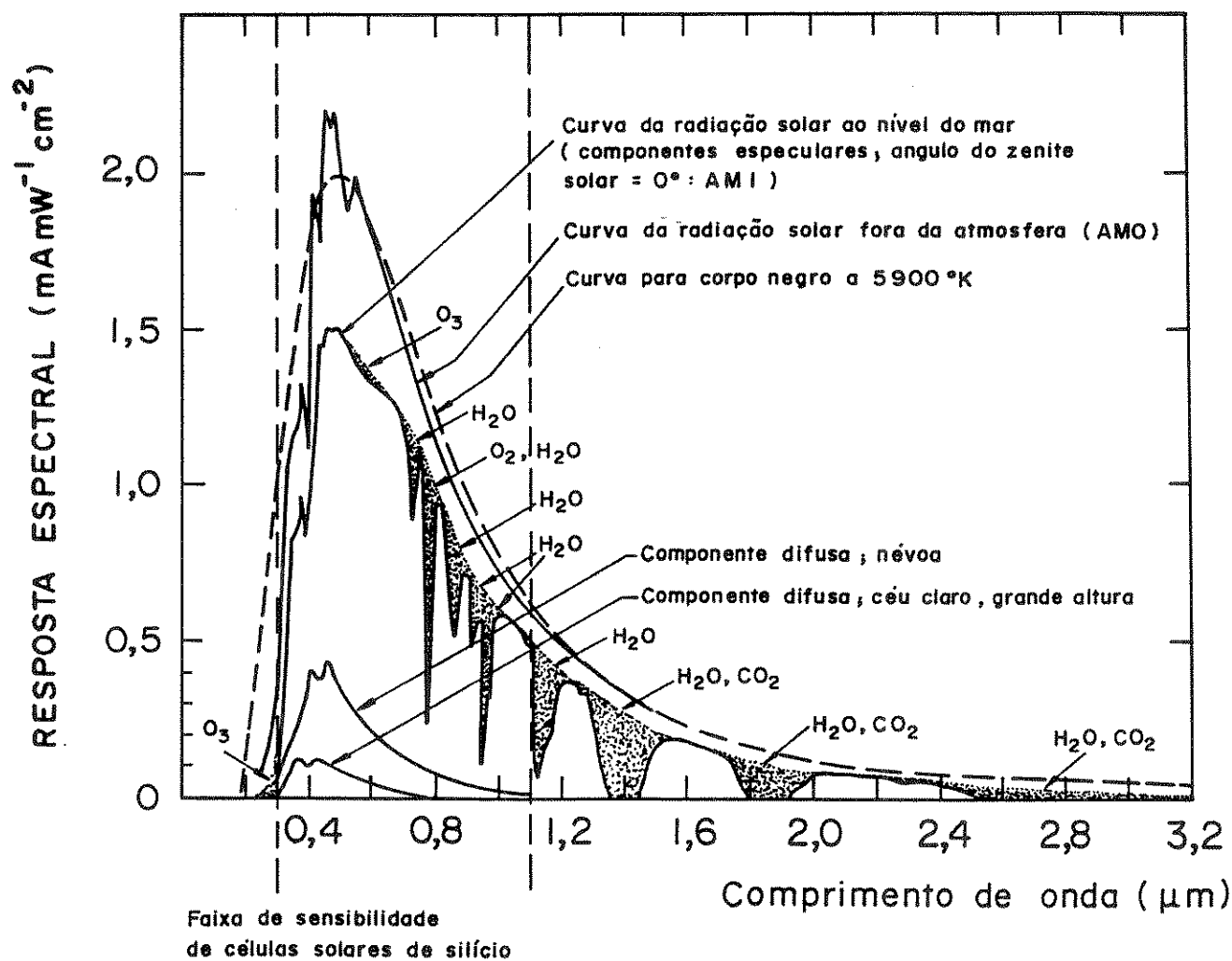


Figura 7 - Faixa de sensibilidade de células solares de silício em relação ao espectro solar AMO e AMI. Fonte: Energia Solar e Fontes Alternativas (1981). Wolfgang Paz.

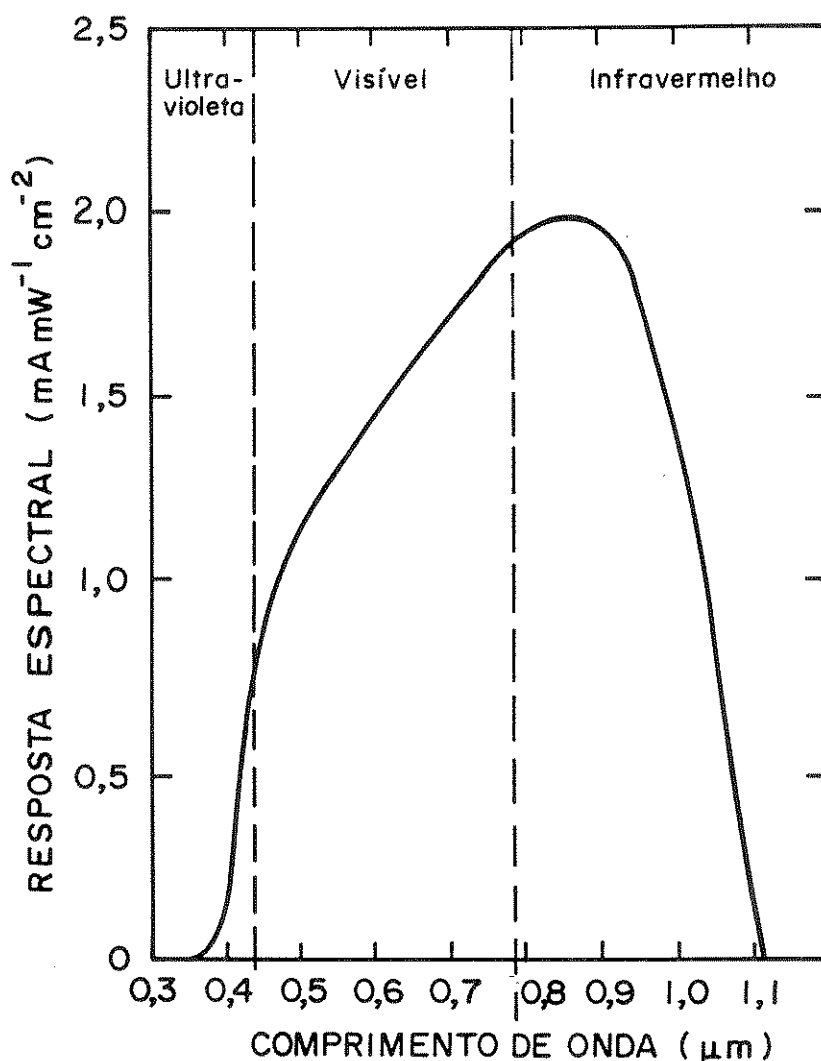


Figura 8 - Resposta espectral de uma célula solar convencional de silício.

Fonte: Energia Solar e Fontes Alternativas. (1981). Wolfgang Paz.

O rendimento teórico máximo da conversão para células solares de silício é aproximadamente 19% à temperatura ambiente para massa de ar zero (AM0), ou seja, submetida à radiação luminosa de 1,38 kW m² de intensidade, para luz solar fora da atmosfera. Vale destacar que este espectro é importante apenas para aplicações astronáuticas. Ao nível do mar, o espectro é diferente. O infravermelho é mais pobre no espaço. Esta diferença na composição espectral faz com que as células solares de silício sejam geralmente mais eficientes na Terra do que no espaço apesar da menor intensidade luminosa em Terra (AM1), devido à maior concentração de energia incidente na faixa do espectro em que as células solares são mais sensíveis. Verifica-se que o rendimento teórico máximo de uma célula solar de silício na Terra está por volta de 23% [4].

A célula é tanto melhor quanto maior for a sua capacidade de converter luz em eletricidade. O parâmetro essencial para a célula de alta absorção é sua faixa proibida (“*band gap*”). O “*band gap*” (1,1 eV para o Si à temperatura ambiente) determina a porção de luz que pode ser absorvida e a voltagem da célula. Fótons com energia menor do que o “*band gap*” não são absorvidos.

2.1.3 - O Atual Estado da Arte das Células Solares: Novas Técnicas e Potencial.

Os semicondutores mais discutidos, para aplicação em células solares, hoje são: Silício Cristalino, (c-Si) Cádmio-Telúrio (CdTe), Cobre-Índio Diseleneto (CIS) e Silício Amorfo (a-Si).

Novas técnicas apontam para a redução de custos e aumento de eficiência, algumas das quais destacam-se a seguir:

a - Filmes finos

As células compostas de uma camada muito fina de um substrato coberta com material semicondutor, usualmente óxido de alumínio. Este método foi testado com a-Si, CIS e CdTe, com resultados promissores nos casos de CIS e CdTe. A maior eficiência obtida em filmes finos estava próxima de 15% para CIS.

O investimento em tecnologia de filmes finos de CIS representa apenas 1% do investimento em tecnologia do silício amorfo. O melhor filme fino de silício amorfo não têm rendimento superior a 6%. Eficiências acima de 12% já foram alcançadas, mas as células não são estáveis. Este fato se deve em parte, ao chamado efeito Staber-Wronski, devido ao qual o decréscimo do rendimento é causa da fadiga do material decorrente da degradação provocada pela luz. O objetivo da indústria do silício amorfo é alcançar, a partir de 1995, 10% de eficiência nos módulos de filmes finos comerciais. O maior fabricante mundial de

produtos fotovoltaicos, Siemens AG, espera produzir, em breve, filmes finos de CIS, em larga escala. [7].

b - Multijunção

Esta técnica desponta como uma das mais promissoras e deverá ser a tecnologia predominante para a fabricação de células solares a partir do ano 2000. É uma técnica superior, incorporando a tecnologia de filmes finos com alta eficiência e baixo custo.

A técnica de multijunção consiste, basicamente, em associar materiais semicondutores com diferentes "*band gap*". empilhando-os de forma a possibilitar a absorção de parcela maior do espectro, como se mostra na figura 9.

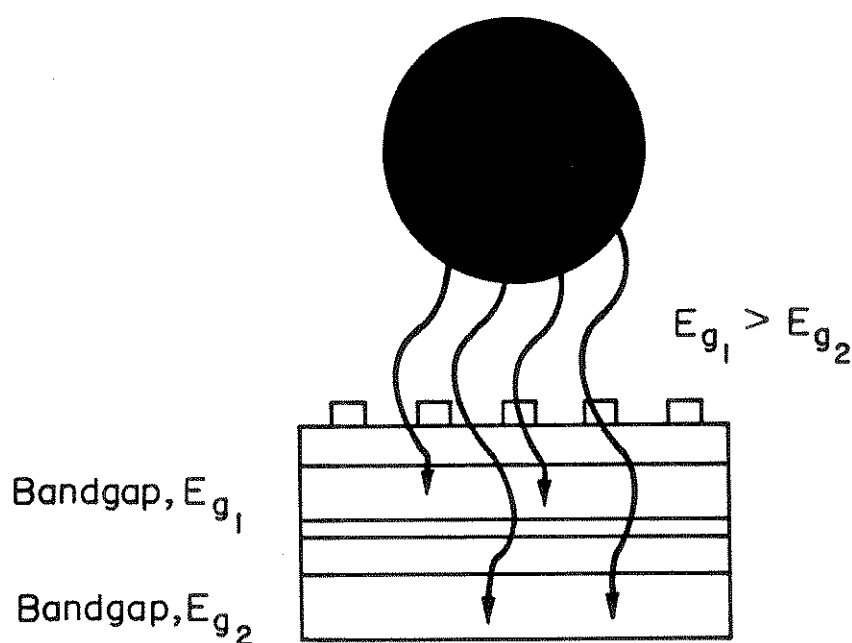


Figura 9 - Esquema de uma célula com duas junções.

As melhores multijunções podem ter rendimento 50% maior do que qualquer um dos componentes funcionando como célula comum. [7].

c - Célula Solar Esférica

Esta nova tecnologia tem sido desenvolvida pela Texas Instruments e pela Southern California Edison Company. A fabricação se dá por meio de técnicas, equipamentos e manufaturas de baixo custo e utiliza silício em grau metalúrgico, impuro e barato. O custo desse silício varia de US\$ 1 a US\$ 2/kg. O silício puro, utilizado hoje para a produção de células solares, custa aproximadamente US\$ 75/kg.

O que caracteriza esta técnica é a fixação de pequenas esferas de 1,5 mm de diâmetro em um filme de alumínio, com o qual posteriormente se fundem, formando uma unidade, como se mostra na Figura 10. [7]

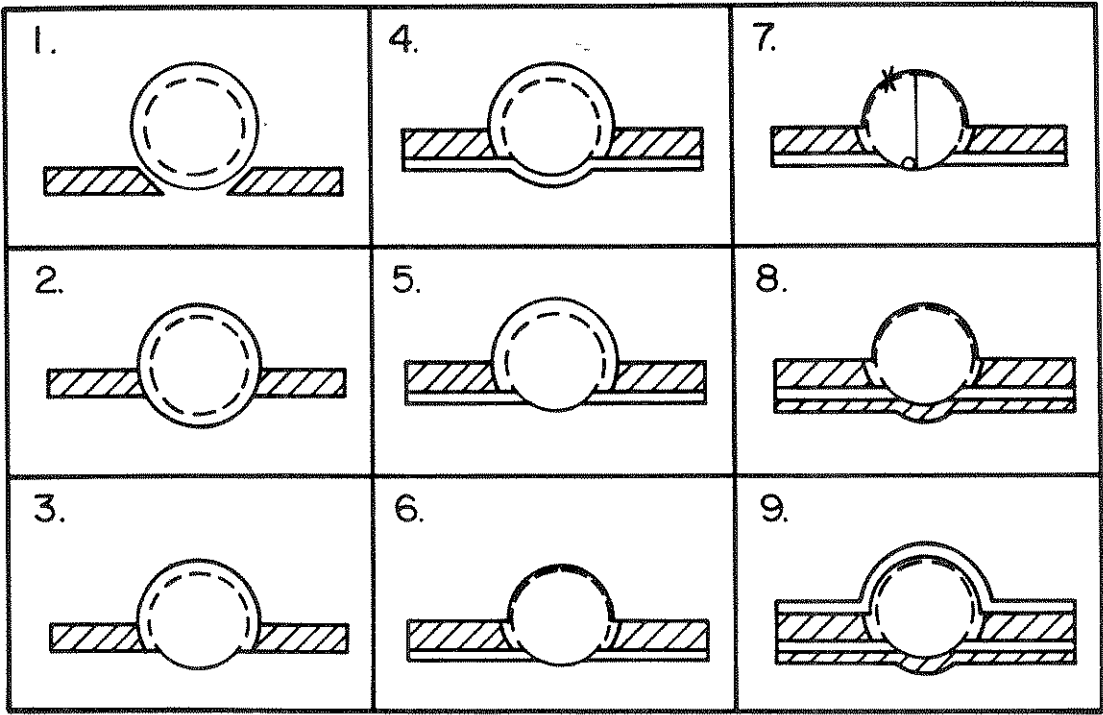


Figura 10 - Processo de fabricação da célula solar esférica da Texas Instruments.

O processo mostrado na Figura 10 apresenta os seguintes passos: (1) colocação da célula esférica na fresta da chapa de alumínio; (2) ligação frontal termomecânica da célula à chapa; (3) remoção da parte posterior da esfera para expor o núcleo; (4) aplicação de poliamida na face posterior; (5) abrasão seletiva a fim de criar uma abertura no polímero; (6) processamento da face anterior para aumentar a penetração de luz na célula; (7) processo de eletrodissolução seletiva para isolar alguma esfera desviada; (8) inclusão de uma segunda chapa de alumínio na parte posterior; (9) aplicação da camada antirefletiva, usualmente TiO_2 .

Esta técnica apresenta a vantagem de reduzir o número de etapas de fabricação em comparação com o processo de fabricação de uma célula convencional. O grande problema é livrar-se dos contaminantes no silício. Durante a fusão os contaminantes surgem na superfície e só então podem ser retirados. A produção comercial destas células não é esperada para antes da segunda metade da década de 90. [7]

d - Dispositivo de alta concentração para fotovoltaicos (HCPV)

Uma nova tecnologia de célula de silício com concentração de radiação tem sido desenvolvida e envolve os seguintes atributos:

- Máximo de eficiência 28,5%, para células não passivadas (instáveis sob luz solar);
- Para células passivadas a eficiência chega a 26%;
- Custo efetivo baixo e processo de fabricação simples.

O interesse por esta tecnologia começou em meados dos anos 80, quando se buscava um menor custo para células de alta concentração. A perspectiva de produção em larga escala aponta de os anos 2010-2030. [7]

Os produtos de alta eficiência são necessários para gerar mais eletricidade por unidade de área e, portanto, reduzir o custo global do sistema.

2.1.4 - Avanços Tecnológicos das Células Solares no Japão

Apresenta-se aqui, mais detalhadamente, o estado da arte no Japão, por ser este um dos países que mais investem em pesquisa de ponta, contando com tecnologia das mais avançadas.

A Figura 11 mostra a produção anual de células solares no Japão desde 1976. Podemos notar que a evolução se fez em dois campos. De 1976 a 1986, o crescimento médio anual foi superior a 160% enquanto que o custo do módulo (painel com células) foi reduzido de US\$ 60/Watt-pico para US\$ 6/Watt-pico no mesmo período.

A Tabela 1 mostra os recordes em eficiência das células e módulos até maio de 1990 no Japão para três tipos de células solares a silício. Entre parênteses estão indicadas as células em fase de laboratório. O critério no qual se baseia esta tabela, o US DOE, estabelece o objetivo para o nível de custo ser da ordem de US\$ 1/Watt-pico. [8]

O comitê técnico japonês de células solares de silício amorfo, integrante do "Sunshine Project", também tem estimado que, a longo prazo, o custo do módulo de célula solar deve atingir 100 ¥ (~US\$ 1) a 200¥ (~US\$ 2)/Wp, que coincide, a grosso modo, com o preço almejado pela US DOE, tendo em conta a diferença no preço da energia elétrica. [8]

Numa previsão razoável, a futura redução de custo é esperada nos próximos dez anos, com o desenvolvimento de duas inovações tecnológicas. A primeira delas é a evolução baseada na aplicação da tecnologia de policristalinos de baixo custo no desenvolvimento dos processos de fabricação de células de silício monocristalino. A outra é a tecnologia de fabricação de células do tipo filme fino de silício amorfo. Com essa mudança do custo, de fabricação somada à utilização em larga escala, completa-se a estratégia para se atingir os objetivos desejados para o ano 2000.

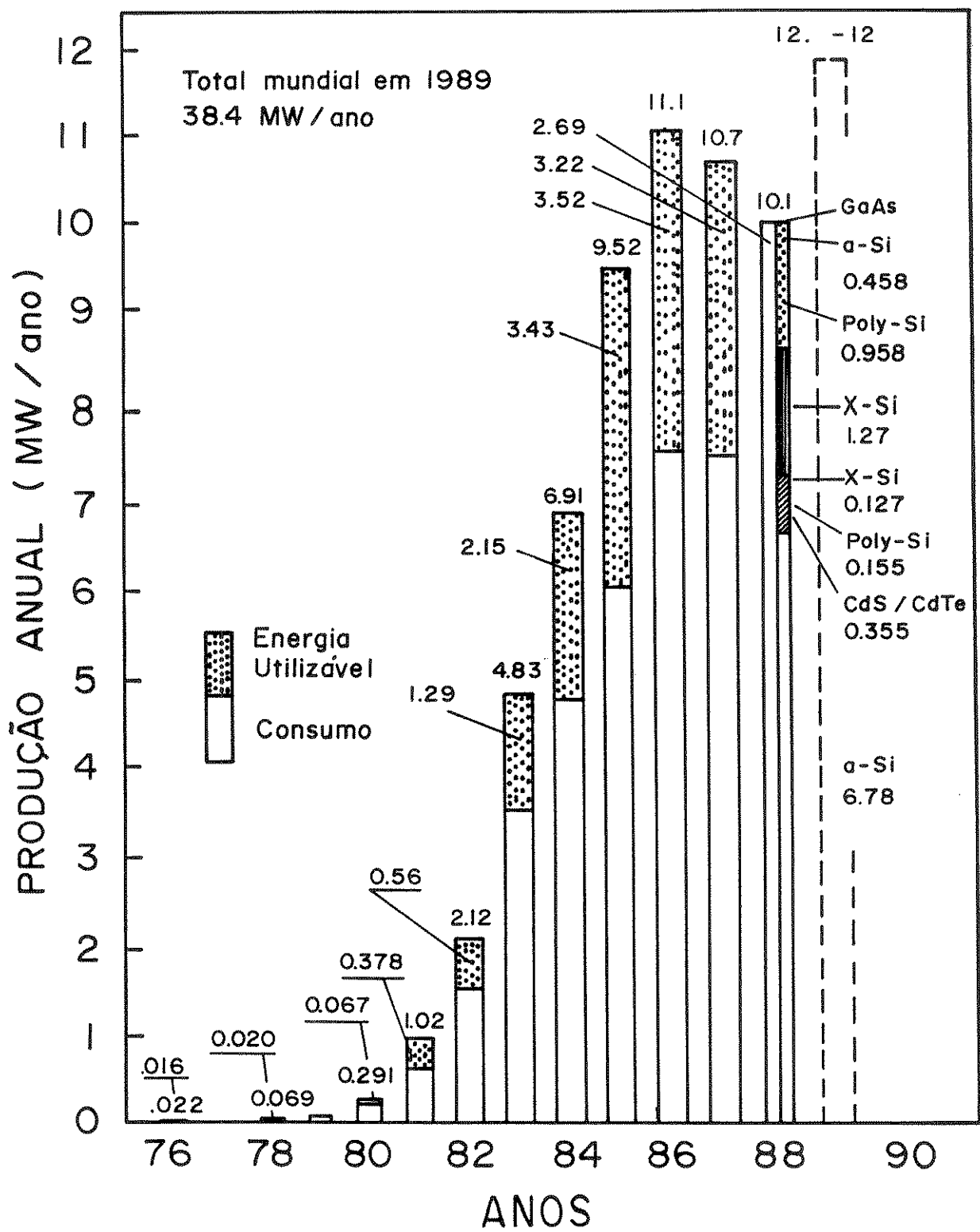


Figura II - Produção anual de células solares no Japão, de 1976 a 1988.

Fonte: Solar Energy Materials 23 (1991) p.141. North Holand. Y.Hamakawa.

Tabela I - Eficiência de conversão e objetivos técnicos para células e módulos FV.[8]

		1989	1994	2000
Célula solar/módulo de eficiência	c-Si	18/55	20/18	22/20
Rendimento (%)		(23.7)		
100 cm² nível de área	“Poly-Si”	15.7/13.5	18/15.5	20/17.5
	“cast/sheet”	[15.7/12.3]	[18/14]	
Melhor eficiência para areas pequenas.	a-Si	10/8.7	12/10	14/12
		(12.0)		
	“Stacked”	10.6/9.2		
	(a-Si)	(13.4/)		
		12*	40	500
Escala de produção (Mwp/ano)		700*	500*	100-200*
Custo do módulo (¥/Wp)		(6 \$ W _p)	(3.3 \$/W _p)	(1 \$/W _p)
		500	350	250
		(3.3 \$/W _p)	(2.3 \$/W _p)	(1.7 \$/W _p)
Tempo de vida do sistema (anos)		20	22	25
“Levelized eletricity (Y/kWh)		*41	27	11
		0.32 \$/kWh	0.18 \$/kWh	0.07 \$/kWh

* Eficiência do módulo: 10%. Período de radiação anual: 1200 h/ano.

2.1.4.1 - Esforços em Pesquisa e Desenvolvimento para Melhorar o Desempenho das Células Fotovoltaicas

Para baixar o custo dos módulos de células solares de US\$ 5/Wp, para US\$ 1-2/Wp esperados para o começo do próximo século, grandes esforços têm sido realizados em pesquisa e desenvolvimento a fim de obter tanto matéria prima como avanços na tecnologia de fabricação de células fotovoltaicas com melhor desempenho.

Os últimos avanços obtidos na pesquisa e no desenvolvimentos das células fotovoltaicas são indicados a seguir.

a - Tecnologia de baixo custo de silício grau solar

Para produzir a baixo custo o silício grau solar (SOG-Si) de triclorosilana, foi desenvolvido um novo tipo de reator de leito fluidizado de SiC-Si que passa da planta piloto com capacidade de 10 t/ano para 100 t/ano e a redução de custo passa dos atuais 27¥ (US\$ 0,27)/g para 6,8 ¥ (US\$ 0,07)/g. Eficiências de 18% ou mais são conseguidas para substratos de 10x10 cm², enquanto que na fase de laboratório, com células de 2x2 cm², chega-se a 20,5% . [8]

b - Tecnologia de fabricação de material do substrato de silício policristalino

O processo de fusão e extração tem sido melhorado para proporcionar produção de alta qualidade e grande escala para lingotes quadrados. A tecnologia de corte também não está sendo deixada de lado. Técnicas para obter células de 30x30 cm² têm sido estudadas. Um método que não requer cortes e proporciona uma alta velocidade no processo de manufatura para produzir folhas do tipo “wafer” de 10x10 cm² também está sendo estudado. As eficiências das células produzidas por este processo atingem 12,3%. Os cubos fundidos de células solares de silício policristalino da Kyocera apresentam 15,7% de eficiência. [8]

c - Tecnologia de células solares de silício cristalino de alta eficiência

Eficiência de mais de 18% tem sido alcançada nos últimos anos. Eficiências de 21,9% em pequenas áreas, em fase de pesquisa, são atingidas pela Stanford, 21,8% para células da UNSW do tipo "emitter passivated", e 19,8% para células “wafer” simples CZ da Hitachi. [8]

A Figura 12 mostra a evolução da eficiência de uma célula básica de silício cristalino.
(Células produzidas comercialmente pela Sharp Corporation)

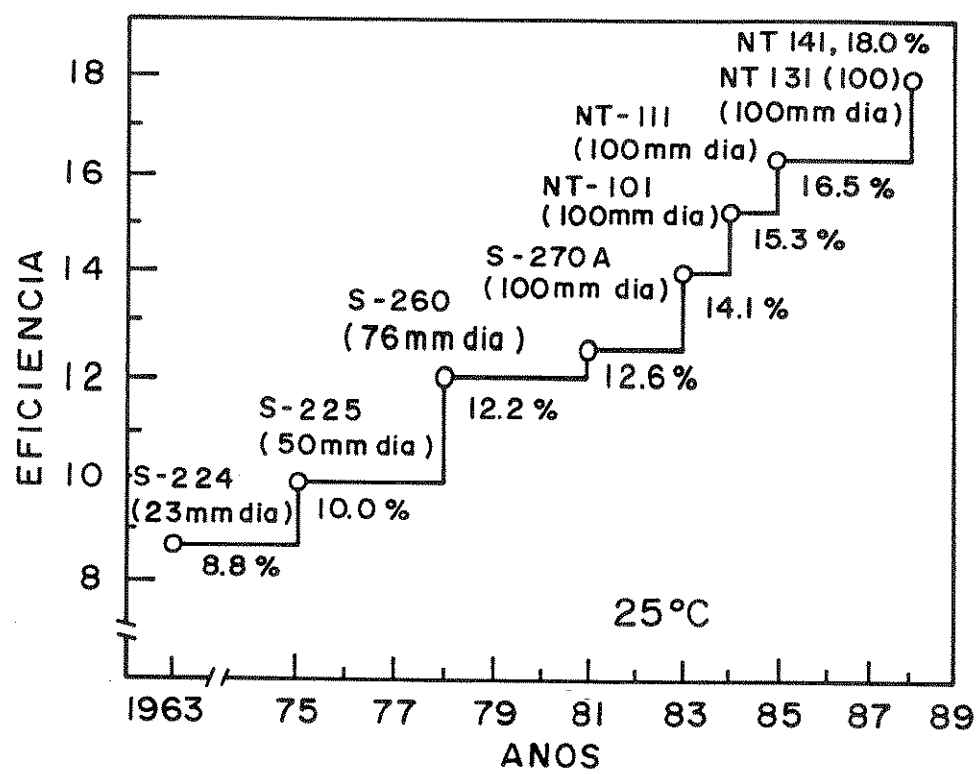


Figura 12 - Evolução da eficiência de uma célula solar básica de silício cristalino.
Fonte: Solar Energy Materials 23 (1991) p.145 North Holand. Y.Hamakawa.

Consegue-se reduzir o custo das células de silício cristalino através de duas formas, uma buscando meios para aumentar sua eficiência e outra, aumentando o volume de produção.

No desenvolvimento tecnológico de células solares de alta eficiência, resultados superiores a 15% de eficiência têm sido encontrados tanto para silício cristalino como para policristalino. Para células deste nível de eficiência, se se atingisse um patamar de custo na faixa de 500 ¥ (US\$ 5,00)/Wp, num futuro próximo, ter-se-ia uma grande expansão no mercado de células solares a partir da segunda metade da década de 90 [8]

A Tabela 2 mostra algumas das recentes eficiências alcançadas no Japão (outubro 1990).

Tabela 2 - Eficiências máximas das células solares alcançadas no Japão. [8]

Estrutura	Eficiência (%)	Área (cm²)	Fabricante
<i>Célula solar básica Si cristalino</i>			
c-Si p-n	19,8	4,0	Hitachi
c-Si p-n	19,3	78,5	Hoxan
c-Si p-n (CZ)	18,5	100,0	Kyocera
c-Si p-n (CZ)	18,1	100,0	Sharp
“CAST”-Si p-n	15,7 - 15,5	100,0	Sharp, Kyocera Hitachi
“CAST”-Si p-n	15,1	225,0	Kyocera
“SPIN-CAST”-Si p-n	15,1	100,0	Hoxan
<i>Célula solar a composto III-V</i>			
MOCVD GaAs	22,5 (AM0)	4,0	Mitsubishi
LPE GaAs	24,7 (AM1)	4,0	Mitsubishi
LPE GaAs	22,6 (x100)	4,0	Mitsubishi
InP	22,5 (AM1.5)	4,0	NTT
	18,0 (AM0)	4,0	NTT
MOCVD GaAs sobre Si	20,0 (AM1.5)	1,0	NTT
	18,3 (AM0)	1,0	NTT
<i>Outras células</i>			
“Screen-Printed” Cds/CdTe	11,3	1,07	Matsushita Bat.
	7,8	1200,0	Matsushita Bat.
CdS/CuInSe ₂	10,1	0,08	Fuji
	8,2		Tokyo Inst. Tech.
In ₂ O ₃ /CdTe (“single”)	14,4	0,018	Shinshu Univ.

Com a criação do carbeto de silício amorfo (a-SiC) e a heterojunção da célula solar de silício amorfo como uma junção de janela, importante avanço ocorreu em relação às

células solares de silício amorfo. A liga de (a-SiC) e células de heterojunção do tipo a-SiC/a-Si tem controle de valência através da dopagem de impurezas e também controle do *gap* de energia através da variação da quantidade de carbono no sistema. A heterojunção de células do tipo a-SiC/a-Si seguem o mesmo caminho. Uma nova fase em ligas se inicia através dessas inovações, criando uma série de novos materiais, como silício amorfo-Germânio (a-SiGe), silício microcristalino (μ c-Si), silício amorfo-Nitreto (a-SiN), etc. Células solares de silício amorfo têm tido um aumento de eficiência com a utilização desses novos materiais. A eficiência alcança 9% para várias centenas de módulos produzidos e, para células de 100 cm², alguns institutos apontam rendimentos na faixa de 10%. Em fase de laboratório as eficiências atingem 12% ou mais com a heterojunção de a-SiC/a-Si, junção empilhada de a-Si/a-SiGe, 13,7% e para a-Si/poly-Si pode alcançar 16,8%. [8]

A tabela 3 apresenta os maiores fabricantes de células solares nos Estados Unidos, Europa, Japão e Brasil.

ESTADOS UNIDOS	ARCO SOLAR (SIEMENS) SOLAREX SOLAR CHRONAX
EUROPA	PHOTOWATT BP SOLAR AEG SIEMENS
JAPÃO	SANYO FUJI KYOCERA HOXAN
BRASIL	HELIODINÂMICA

Tabela 3 - Principais fabricantes de células solares dos: EUA, EUROPA, JAPÃO e BRASIL. (1991)

2.1.5 - O Uso da Energia Solar Fotovoltaica: Perspectivas

O uso das células solares foi limitado, no início, a aplicações nos programas espaciais. Nos anos sessenta eram usadas em algumas aplicações para fins militares. Nos Estados Unidos, a decisão em nível governamental de estudar o potencial para aplicação da tecnologia das células solares para fins terrestres veio com o “Choque do Petróleo”, em 1973. Alguns nichos de mercado para aplicações em sistemas isolados de baixa potência foram encontrados no período entre o primeiro e o segundo choque do petróleo (1978). A partir deste segundo choque, alguns governos resolveram estudar a tecnologia fotovoltaica para aplicações em larga escala, tanto para sistemas isolados como para sistemas que trabalham conectados à rede de energia normal, sendo este caso o mais considerado e estudado, por aparentar ser a solução mais técnica e economicamente viável.

Na década de 80 houve uma grande evolução no mercado de fotovoltaicos, que permanece em desenvolvimento acentuado até os dias de hoje. O preço continua com uma tendência decrescente, sendo que de 76 a 80 sofreu uma queda vertiginosa, e durante a década de 80 a queda se deu de forma mais branda. Ainda assim, atingiu em 1990 a metade do preço do início da década. A Figura 13 representa a evolução do mercado e a redução do preço no período de 1976 a 1992.

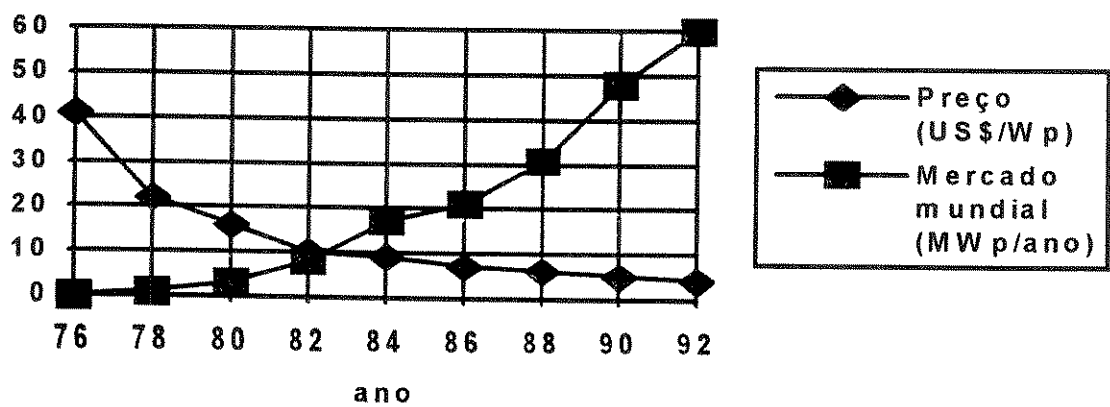


Figura 13 - Evolução do mercado versus redução do preço de FV.
Fonte: Strategies Unlimited; PV Insider's. rep. Aug. 91.

Comparando-se a energia fotovoltaica com os outros processos já estabelecidos e considerando-se o tempo de pesquisa, desenvolvimento, divulgação e implantação de uma tecnologia na área de energia, (que historicamente é da ordem de século) constataremos que a energia fotovoltaica é de utilização muito recente e, não obstante a facilidade e rapidez da troca de informações e divulgação que temos hoje, necessitaremos de pelo menos mais 20 anos, de acordo com os "experts", para o processo de desenvolvimento mais completo da tecnologia de fotovoltaicos. Sendo assim, devemos fazer algumas importantes considerações.

- a. A energia solar disponível, para captação, em muitos países, é bastante superior à energia de que eles necessitam. Mesmo considerando uma eficiência de 10% dos painéis fotovoltaicos, é possível suprir a necessidade total de energia elétrica destes países.
- b. A implementação de painéis fotovoltaicos pode ser feita em terras áridas e marginais que não servem para plantio, sendo de baixo custo e representam áreas muito superiores às necessárias para a geração de energia de demanda. [9].
- c. A tecnologia fotovoltaica tem provado sua aptidão e confiabilidade para aplicações energéticas e ainda está sujeita a um significativo desenvolvimento futuro.
- d. Hoje, o sistema energético fotovoltaico, em algumas aplicações, se paga em aproximadamente quatro anos [9] tendo duração (para os módulos) de vinte e cinco anos.
- e. Os processos de produção estão em rápida e constante evolução, traduzindo-se em alta eficiência e baixo custo.

- f. Para algumas aplicações específicas, o sistema fotovoltaico tem se mostrado bastante competitivo.
- g. As aplicações em que os sistemas fotovoltaicos são conectados à rede, têm se mostrado válidas e de importante utilidade.

Novas tecnologias levam a acreditar que, com a redução de custos, cada vez mais a tecnologia de fotovoltaicas penetrará no mercado através de novos nichos. Porém, por outro lado, por ser recente o processo de desenvolvimento, não é possível ter certeza de que a energia fotovoltaica será competitiva considerando-se todas as alternativas possíveis.

2.1.5.1 - A Energia Fotovoltaica como Opção Energética

A adoção de sistemas fotovoltaicos conectados diretamente à rede de distribuição se mostra deficiente devido às características de sazonalidade da captação da energia solar.

É cada vez mais reconhecida a necessidade de uma fonte de energia “limpa”, renovável e competitiva, principalmente, devido ao aumento dos problemas com a poluição ambiental e o efeito estufa decorrentes da queima de derivados de petróleo. Estes fatores tornam a adoção da energia fotovoltaica em larga escala uma alternativa a ser considerada seriamente.

O fator técnico que mais limita e dificulta a possível adoção desta forma de energia de maneira mais efetiva é a necessidade de equilibrar a produção de energia de acordo com o perfil de consumo. No caso da energia fotovoltaica, a única forma é estocar a energia através de um sistema de armazenagem. A Figura 14 mostra a curva de consumo de energia comparada com a radiação solar durante o ano para países do Hemisfério Norte.

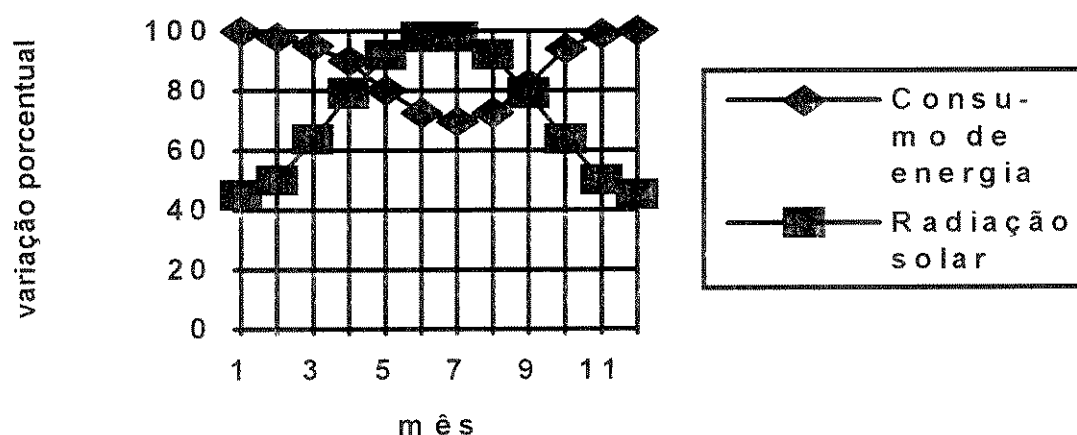


Figura 14 - Curva típica da intensidade de radiação solar incidente na maior parte dos países industrializados e a demanda necessária neste mesmo período.

Fonte: Solar Energy Materials and Solar Cells 27 (1991) p. 80. North-Holand.

2.1.5.2 - Estocagem de Energia Fotovoltaica.

Por meio de um sistema de armazenamento de energia, é possível compensar a descontinuidade da incidência da radiação solar. Esse sistema de armazenagem conectado diretamente ao sistema fotovoltaico funcionaria quando a demanda fosse inferior à energia gerada. Para armazenar esta energia pode-se utilizar baterias eletroquímicas quando se tratar de pequenas quantidades de energia elétrica. Para quantidades maiores o hidrogênio produzido por eletrólise da água é a opção mais atraente.

Dotando o sistema fotovoltaico com um sistema próprio de estocagem, ele se torna um novo tipo de estação central auto-suficiente. Seguindo essa linha de geração-estocagem independente, o sistema fotovoltaico passa a ser uma real opção energética. É desejável que o sistema utilizado como estocagem tenha características compatíveis com as do sistema fotovoltaico, ou seja, ser ecologicamente correto e proporcionar possibilidades de competir num futuro próximo com a energia proveniente dos derivados de petróleo, privilegiando assim toda a sociedade.

2.2 - A Tecnologia do Hidrogênio

O hidrogênio foi identificado pela primeira vez no século XVI. Com o desenvolvimento do processo de síntese da amônia, que ocorreu em 1913, houve um aumento da quantidade de hidrogênio produzido devido ao maior interesse comercial, principalmente a partir da primeira guerra mundial. Sua utilização em larga escala ocorreu após a segunda guerra mundial, graças ao desenvolvimento tecnológico que possibilitou a redução do seu custo de fabricação e também devido aos baixos preços do gás natural. A partir da década de 60, com os programas espaciais, desenvolveram-se tecnologias mais avançadas, de geração e utilização do hidrogênio.

O hidrogênio é considerado um dos mais representativos e importantes energéticos entre os possíveis substitutos dos derivados do petróleo. Acredita-se que ele deva participar, de forma privilegiada, da matriz energética de muitos países, podendo inclusive, num futuro próximo, contribuir para a antecipação do fim da era dos combustíveis fósseis. Isto porque o aprimoramento da sua tecnologia passou a ocorrer de forma intensa recentemente, abrindo caminho para novas descobertas e acelerando seu desenvolvimento, possibilitando talvez um melhor dimensionamento das necessidades do mercado.

2.2.1 - A Geração do Hidrogênio

O hidrogênio não é uma fonte primária de energia. É encontrado na natureza na sua maior parte ligado quimicamente a um ou mais átomos de outro(s) elemento(s), formando compostos que precisam sofrer reações para a disassociação e sua libertação. Como consequência ele necessita de uma outra fonte de energia para ser produzido. É grande o número de elementos e compostos que podem se associar ao hidrogênio, assim como ele pode ser gerado de diversas fontes primárias, através de vários processos artificiais. Entre

estas fontes pode-se destacar: petróleo, carvão, nuclear, energia solar, energia eólica, etc.. Por outro lado, ele pode ser reconvertido em outra forma de energia, ou em alguns casos até mesmo na mesma forma que o gerou, com índices de eficiência que variam de aceitáveis para muito bons.[10] Os principais processos de geração do hidrogênio, são descritos a seguir:[11]

a - Reação de reforma-vapor de hidrocarbonetos leves

Este processo produz hidrogênio e monóxido de carbono a partir da combinação de vapor e gás natural (metano). A reação é a seguinte: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$. A eficiência fica em torno de 70 a 86%. O metano quando aquecido na presença de um catalizador apropriado pode ser desmembrado diretamente em C e 2H_2 .

b - Reação de oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados

Este processo produz CO, CO_2 , H_2 e CH_4 utilizando-se O_2 e H_2O .

c - Gaseificação do carvão em alta temperatura

Neste processo o vapor gerado na gaseificação do carvão reage com o carbono e o carvão, produzindo H_2 e CO; o CO é então posteriormente reage com H_2O e produz CO_2 e mais H_2 . A eficiência do processo é de 60%.

d - Processo térmico

Neste processo a água é decomposta a temperaturas superiores a 2.500K. Este método apresenta sérios problemas para separar o hidrogênio de outros gases a altas temperaturas, além de que, por vezes, gasta-se mais energia do que a obtida. Não se apresenta como um processo interessante, atualmente.

e - Processo termoquímico

Este processo utiliza temperaturas mais baixas, mas ainda de valores elevados, decompondo a molécula da água através de uma série de reações químicas cíclicas com a produção de H_2 e O_2 ; os compostos químicos intermediários são regenerados. Os processos mais interessantes utilizam bromo, rádio, enxofre. Este tipo de processo tem a grande desvantagem de envolver produtos tóxicos e/ou corrosivos, além de ser um processo caro.

f - Processo fotoeletrolítico

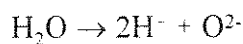
Este processo consiste na decomposição da molécula da água na presença da luz e um elemento fotoquímico de origem biológica, similar à clorofila, que funciona como reagente de transferência de elétrons. Este método é considerado a mais elegante das soluções, porém seu rendimento normal é de 1%. Há experiências em andamento com alguns tipos específicos de bactérias que, dentro de determinadas condições, permitem alcançar rendimentos maiores. Com luz monocromática obtiveram rendimentos de até 20%, mas nenhum resultado considerado econômico foi ainda alcançado.

g - Eletrólise da água

Dada a importância deste processo no aproveitamento da energia solar fotovoltaica, este item está analisado mais detalhadamente a seguir.

2.2.2 - A Eletrólise da Água

O processo eletrolítico consiste em passar uma corrente elétrica na água na presença de eletrodos inertes em meio condutor ácido ou básico. As reações produzidas têm como resultado a decomposição da água. A reação é a seguinte:



Com a utilização da eletrólise avançada, (resultado das pesquisas de alguns países voltados para a área espacial) houve um desenvolvimento rápido do processo, a partir da década de 60.

Os eletrolisadores (equipamentos para a produção de eletrólise) podem ser classificados em três categorias: clássicos, modernos e avançados, diferindo em relação aos materiais utilizados, temperaturas de trabalho e densidades.

Os clássicos, ou convencionais, utilizam como meio condutor iônico uma solução eletrolítica. São feitos de estruturas de aço carbono, diafragma de asbesto e superfície dos anodos protegidas por niquelação (clássica). Apresentam grandes dimensões e utilizam menor densidade de corrente por unidade de área dos eletrodos. A temperatura de operação esta em média entre 70°C e 80°C e seu rendimento de produção do hidrogênio é de 70 a 80%. [10]

A diferença entre os eletrolisadores modernos e os convencionais está: na cobertura especial dos eletrodos que recebem a deposição de catalisadores e superfícies rugosas; na eliminação do espaço entre os eletrodos e os diafragmas ("zero gap"). Existem modelos que trabalham com membranas separadoras à base de teflon ou outros materiais, o que permite trabalhar a temperaturas que variam de 80°C a 120°C, sob pressão. O rendimento do processo esta entre 75 e 85% [10].

Os eletrolisadores avançados, ainda em fase de início da produção industrial, são muito compactos, trabalham com altas densidades de corrente e utilizam catalisadores e eletrodos de metais nobres. Existem modelos cujos eletrólitos são sólidos, funcionando também como membranas separadoras. Seu rendimento varia de 80 a 90% e trabalham a temperaturas superiores a 120°C [10].

Atualmente, uma das principais dificuldades encontradas no uso do hidrogênio, notadamente no caso do uso automotivo, é o seu armazenamento com segurança.

2.2.3 - O Armazenamento do Hidrogênio

O armazenamento do hidrogênio apresenta dificuldades que os outros combustíveis, principalmente os combustíveis líquidos, não apresentam. Na forma de gás comprimido sua densidade energética é muito baixa. Para torná-lo líquido e mantê-lo neste estado há necessidade de grande quantidade de energia para resfriar e mantê-lo a temperatura a -255 C. É interessante e muito seguro de estocá-lo sob forma de hidretos metálicos, mas neste caso o armazenamento é caro e mais pesado.

Para uso automotivo, a estocagem do hidrogênio é um grande problema.

a - Gás comprimido

O mais simples de estocar hidrogênio é sob forma gasosa em cilindros de alta pressão. É a forma utilizada para armazenar gás natural, normalmente envasado à pressão de 200 atm, em cilindros reforçados de alta segurança, feitos de alumínio e encapsulados em fibra de vidro. O hidrogênio comparado ao gás natural é oito vezes mais leve por mol; conseqüentemente, necessitaria de uma pressão muito maior para proporcionar o mesmo rendimento energético para um dado volume [10]

Cilindros especiais de alumínio encapsulados em fibra de carbono, de peso reduzido e que suportam altíssimas pressões (por volta de 690 atm) com segurança, estão sendo pesquisados. Contudo, seu preço, proibitivo para aplicação automotiva, só convém às aplicações espaciais [11].

Cilindros encapsulados em fibra de vidro são mais baratos, mas podem ser de 1,45 a 1,7 vezes mais pesados que os de alumínio e fibra de carbono. Como base de comparação, para um motor a combustão interna com um tanque de gasolina de 25 litros e 27kg de peso, considerando-se 0,72kg de gasolina por litro e 9kg o peso do tanque vazio e que num veículo tivesse o rendimento de 17km/l. percorreria 350km. Para se fazer a mesma quilometragem num veículo a hidrogênio, considerando-se uma eficiência 22% maior, seria

necessário um tanque com 65kg de peso e 409 litros de volume a 207 atm de pressão. Se a pressão for para 690 bar, o peso do tanque passa para 85kg de peso e o volume se reduzirá para 228 litros. Portanto, teríamos 3,5 vezes mais peso e nove vezes mais volume que o tanque a gasolina [11].

b - Hidrogênio líquido

O hidrogênio, o mais leve dos elementos, possui uma densidade de 1/14 da densidade da água. O hidrogênio se liquefaz à temperatura de -255°C e 2 bar de pressão.

O tanque de armazenagem de hidrogênio líquido é feito com paredes duplas para proporcionar bom isolamento térmico de modo a haver uma mínima transferência de calor, e evitar ao máximo a evaporação do hidrogênio líquido. Veículos que utilizam hidrogênio líquido têm sido desenvolvidos e testados, com sucesso, no Japão, EUA e Alemanha.[10]

As desvantagens desta forma de armazenagem são: o custo elevado do hidrogênio líquido e da tecnologia criogênica, as perdas por evaporação e o volume do sistema de estocagem. A vantagem do uso do hidrogênio líquido é ser bem mais leve e por vezes mais compacto que os sistemas de hidreto metálicos para a mesma capacidade energética. Se compararmos o sistema de estocagem do hidrogênio líquido com um tanque de gasolina para o mesmo desempenho, o sistema do hidrogênio líquido não é muito mais pesado, porém é bem mais volumoso.

O hidrogênio líquido tem uma densidade energética de 9.511 BTU/l enquanto que a gasolina 33.000 BTU/l. Considerando-se ainda a necessidade de um tanque com paredes duplas, com vácuo entre elas, bem como todos os equipamentos necessários ao sistema de estocagem, entre eles o de maior dimensão é a bomba de compressão, tem-se que para a mesma quantidade de energia o sistema de hidrogênio líquido é 6 a 8 vezes mais volumoso que o da gasolina. Considerando-se o melhor rendimento térmico do hidrogênio o volume do sistema de hidrogênio líquido será pouco menor (5 ou 6 vezes). [11]

c - Compostos intermediários

É possível armazenar o hidrogênio fazendo-o parte de outro composto, sólido ou líquido, que possa ser reconvertido quando for conveniente, propiciando fácil estocagem e transporte. Entre os compostos na forma líquida destacam-se a amônia, o metanol e o ciclohexano. Já na forma sólida, os compostos são chamados de hidretos metálicos, havendo uma grande variedade de compostos que podem formar hidretos.

Os compostos de hidrogênio podem ser indicados por RH_x em que R é um elemento ou composto, H, hidrogênio e x o número de átomos. Sempre que o elemento for um metal, tem-se um hidreto metálico. A reação do hidrogênio com o metal, reação gás-sólido, gera calor, que é liberado. Para se obter novamente o hidrogênio em forma de gás é preciso fornecer calor ao hidreto. A pressão do hidrogênio é relativa à temperatura e à sua concentração no material, uma vez que esta concentração é obtida através de uma dada temperatura e pressão em equilíbrio para cada material.[10]

Os metais mais usados em hidretos são: ferro, manganês, níquel, magnésio e titânio. As principais características desejáveis para um hidreto metálico são:

- baixo custo
- alta densidade de energia
- baixa temperatura de liberação do hidrogênio
- fraca expansão volumétrica
- baixa susceptibilidade de contaminação do gás por impurezas

Nenhum hidreto, atualmente, atende simultaneamente a todos estes requisitos, o que leva a escolher o tipo de acordo com as prioridades que a aplicação impõe.

O maior problema dos hidretos é a baixa densidade energética. Os hidretos destinados a aplicações automotivas possuem capacidade de armazenar apenas de 0,5 a 2,0% do seu peso em hidrogênio.[11]

Um sistema completo de estocagem é composto do invólucro do hidreto e do sistema de troca de calor. Este último ocupa um volume de 100 a 300 litros e pesa de 120 a

485 kg [11]. Comparado a um tanque de gasolina ou de hidrogênio líquido, o sistema com hidreto tem a desvantagem de proporcionar uma autonomia limitada, função do seu grande volume e peso, porém tem a grande vantagem de ser seguro, pois no caso de rompimento do tanque o hidrogênio permanece associado, não oferecendo risco de explosão.

2.2.4 - Considerações Gerais sobre a Tecnologia do Hidrogênio

O hidrogênio processado a partir de combustíveis fósseis não pode ser considerado uma fonte limpa e renovável. Estes processos, principalmente, o hidrogênio gerado por meio do tratamento do carvão, abundante e de baixo custo, poderão ser importantes no sentido de sustentar a produção de H_2 durante um período de transição, para servir como substituto dos combustíveis fósseis na utilização na área de transportes.

A adoção do hidrogênio como vetor energético necessita ainda de estudos complexos, abrangendo inclusive a forma de cálculos dos rendimentos dos combustíveis utilizados atualmente.

Do ponto de vista dos impactos ambientais e da comparação entre o custo do hidrogênio e de outros combustíveis limpos e os derivados de petróleo, algumas considerações são necessárias.

Hoje, mede-se o rendimento de um combustível aplicando-se o princípio da primeira lei da termodinâmica. A conversão é considerada levando em conta o quociente entre o trabalho gerado e a energia empregada. Desta forma, considera-se todas as perdas dentro da conversão, porém não são consideradas as perdas antes e depois da mesma. Não se considera a energia dispendida para explorar, escavar, extrair, refinar, enriquecer, transportar, etc., assim, como após a conversão, nos casos em que os resíduos têm de ser tratados, transportados e estocados. Não são considerados ainda a vida útil dos equipamentos e, principalmente, o que é mais difícil de prever com exatidão e calcular, o

custo e as consequências dos diversos danos causados ao meio ambiente em forma de poluição ambiental (causadas pela emissão de CO_2), acidificação, etc, que atingem homens, animais e plantações, assim como a ameaça da radioatividade da energia nuclear e muitas outras variáveis, que agredem o meio ambiente. Todos estes fatores precisariam ser considerados para que fosse possível ter uma visão mais realista do conjunto e um ganho em qualidade de vida.

Atualmente, os energéticos ecologicamente corretos, com rendimentos termodinâmicos baixos, não são considerados econômicos, dificultando bastante a sua implementação.

O hidrogênio não deverá ser adotado em larga escala, ainda por um longo período de tempo, talvez décadas, necessitando antes mostrar-se competitivo, pelo grande desafio que é dificultado pela própria economia de escala.

De uma forma ou de outra, a humanidade tem que se preparar para a era pós energéticos fósseis e, para isto, é necessário haver uma política de apoio que incentive o desenvolvimento e o uso de combustíveis renováveis através de um controle mais sério, incluindo taxações sobre emissões de poluentes, que oriente o emprego dos atuais combustíveis, privilegiando substitutos futuros, com incentivos para que eles possam ir ocupando alguns segmentos do mercado, servindo assim de experiência para seu desenvolvimento técnico e econômico, e contribuindo para a melhora do meio ambiente. Toda energia consumida que utilizar átomos de hidrogênio, em vez de átomos de carbono, proporcionará redução dos problemas ambientais.

2.3 - O Sistema Solar-Hidrogênio

O uso integrado dos painéis fotovoltaicos com o sistema de produção de hidrogênio através da eletrólise da água forma o SISTEMA SOLAR-HIDROGÊNIO, cujo esquema é

mostrado na figura 15.

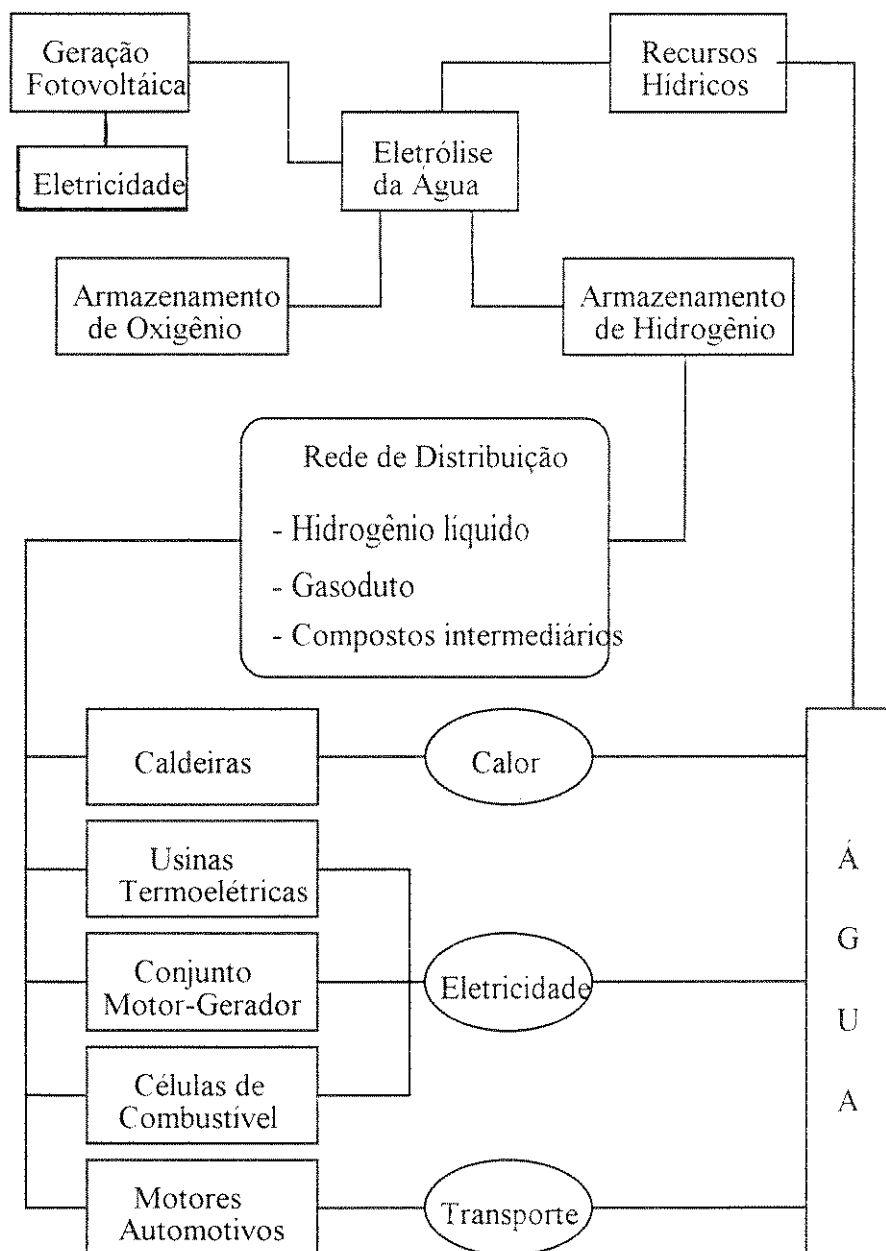


Figura 15 - O sistema Solar-Hidrogênio.

O sistema fotovoltaico transforma a energia solar em energia elétrica que, por sua vez, alimenta o eletrolisador. Da eletrólise da água obtemos oxigênio e hidrogênio. O hidrogênio é armazenado de forma química ou física, de acordo com a conveniência de sua

distribuição e utilização posterior. A reconversão do hidrogênio pode gerar energia térmica, elétrica ou mecânica e o resultado da conversão, além da energia, é água que, eventualmente, pode ser armazenada e realimentar o sistema, fechando o ciclo renovável.

Por meio deste sistema seria possível um melhor equilíbrio energético mundial, pois os países ensolarados poderiam adaptar-se a esta fonte de energia, surgindo assim uma cooperação econômica entre as nações, assim como uma cooperação norte-sul, mudando o quadro sócio-político-econômico, uma vez que evitaria a dependência mundial de países e regiões como o Oriente Médio, que atualmente detêm as maiores reservas do insumo energético do petróleo. Os combustíveis para motores de combustão interna poderiam ser substituídos pelo hidrogênio com dupla vantagem: por um lado é o menos poluente dos combustíveis que podem ser utilizados em motores, e por outro é extremamente abundante e inesgotável.

A utilização de energia fotovoltaica está ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, necessitando chegar a níveis de preços mais competitivos e alcance de maior domínio e confiabilidade da sua tecnologia. A tecnologia do hidrogênio eletrolítico já está bem desenvolvida e estabilizada necessitando, talvez, de alguns ajustes para ser usado no sistema fotovoltaico, não sendo necessária a espera de uma nova tecnologia para sua implementação.

3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

Quando se fala sobre veículos elétricos, muitas vezes fica a impressão de estar-se referindo sobre algo inovador, ou seja, uma nova forma de concepção de um veículo, cuja propulsão parece ter sido experimentada somente nos tempos atuais. Na verdade, a história revela que este tipo de veículo antecedeu aos veículos de motores a combustão interna. Já em 1837, Robert Davison Aberdeen construiu uma carruagem elétrica que era impulsionada por um motor elétrico muito simples. Esta carruagem já contava com os principais elementos básicos dos atuais veículos elétricos. A fonte de eletricidade provinha de uma bateria primitiva de ferro-zinco. [12,13]

3.1 - Histórico

Em 1881, a partir do surgimento das baterias chumbo-ácido, foi possível o lançamento do primeiro veículo elétrico, pela Paris Onibus Company. Em 1888, Londres já contava com seu primeiro ônibus elétrico. Em 1897, W.A.Bersey construía para a London Electric Cab. Co.Ltd. os primeiros táxis elétricos, que operaram por dois anos.

No fim do século XIX, o primeiro recorde de velocidade era obtido na França, por um veículo elétrico a bateria. Em 1898, a velocidade média alcançada durante o quilômetro medido era de 63 km/h, sendo superada no ano seguinte pelo belga Camille Jenatzy com a marca de 106 km/h com o seu carro em forma de torpedo, o "Le Jamais Content". Já em 1902, Charles Baker, um norte-americano, chegou à marca de 137 km/h graças aos aperfeiçoamentos técnicos de seu veículo. Infelizmente por uma falha mecânica, seu carro deixou de conquistar o recorde mundial. [12,13]

Os veículos elétricos tiveram seu apogeu entre a última década do século passado e a primeira deste. Devido às suas características como: o fato de serem silenciosos, não

trepidarem e estarem livres de fuligem, razão pela qual não assustavam os cavalos e não sujavam os que dele se utilizavam, eles tinham a preferência das elites. Outra vantagem dos veículos elétricos em relação aos a vapor e a gasolina, era o despojamento de comandos e alavancas. A sua própria concepção permitia que os fabricantes de veículos pudessem lhes dar um aspecto mais nobre, uma vez que era possível esconder motor e baterias, tornando possível um estilo privilegiado e mais elaborado.

Com o petróleo se firmando cada vez mais como vetor energético (todos os seus derivados passaram a ser consumidos em larga escala) e com o rápido desenvolvimento do motor a combustão interna, o carro elétrico foi deixando de ser competitivo e, em pouco tempo, sua produção passou a ser insignificante. Enquanto isto, os veículos a combustão interna já ultrapassavam a casa de um milhão de unidades por volta de 1917, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Produção de veículos de passageiros nos EUA , de 1889 a 1933.[12,13,14]

ANO	ELETRICO	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

Os veículos elétricos ficaram restritos a algumas aplicações como por exemplo: troleibus, metrô, veículos comerciais de entrega (utilizados na Inglaterra até hoje), empilhadeiras de uso industrial, etc.. A baixa autonomia, a dificuldade de recarregar as baterias, o peso adicional das mesmas e as características de aceleração foram responsáveis pela falta de competitividade dos veículos elétricos como automóveis.

3.2 - Classificação

Por haver várias aplicações e categorias de veículos elétricos, foi preciso recorrer a padronizações a fim de facilitar a comparação dos mesmos. Foi criado em 1972 nos EUA o ciclo SAE-J277, que é baseado no ciclo CVC (“Constant Volume Sampling of Emissions”- “Federal Urban Driving Cycle”).

Tabela 4 - Ciclo para veículos elétricos SAE - J277 (1972).

MODO	Aceleração (km/h/s)	Tempo (s)	Tempo total (s)
Parado	0	20	20
Aceleração (0-48 km/h)	3,45	14	34
Velocidade Constante (48 km/h)	0	15	49
Desaceleração (48-24 km/h)	-2,20	11	60
Aceleração (24-72 km/h)	1,93	15	75
Velocidade constante (72 km/h)	0	25	100
Desaceleração (72-32 km/h)	-1,91	21	121
Desaceleração (32-0 km/h)	-4,03	21	142

Posteriormente, esta tabela foi modificada e ampliada, a fim de acomodar os veículos feitos após a primeira versão da tabela e que nela não se enquadram de forma específica. Foram criados então os ciclos SAE-J277a -A-B-C-D, que se baseiam na velocidade máxima de operação do veículo estudado.

Tabela 5 - Ciclos de veiculos elétricos SAE - J277a.

Parâmetros	Unidade	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 veiculo fica sem esforço
motriz, desacelerando devido às perdas.

Grupo A - veiculos para manuseio de cargas em depósitos de estradas de ferro,
pontos terminais de ônibus, fábricas, armazens, aeroportos, portos e hospitais.

Grupo B - Veículos de entrega de pão e leite, transporte de alimentos e transporte de
inválidos.

Grupo C - Veículos utilitários para transporte de carga, manutenção de linhas aéreas,
iluminação pública e subestações.

Grupo D - Veículos de passeio, táxis e outros.

3.3 - Sistema Propulsor

O sistema propulsor é composto do motor elétrico e o meio de controle deste. É de grande importância, para o bom funcionamento e desempenho do sistema, a escolha adequada do conjunto para cada caso.

A função do sistema de controle é a conversão de tensão e corrente elétricas em outras (tensão, corrente) apropriadas para obtenção da velocidade ou torque desejados.

Basicamente, podemos ter quatro configurações distintas de sistemas de processamento de potência elétrica, como mostra a tabela 6.

Tabela 6 - Configurações de sistemas de processamento de potência elétrica.

TIPO	ENTRADA	SAÍDA
Recortadores	CC	CC
Inversores	CC	CA
Retificadores	CA	CC
Cicloconversores	CA	CA

3.3.1 - Motores

Os motores para veículos elétricos podem ser de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Para cada tipo, Há uma série de possibilidades esquematizadas nos diagramas das figuras 16 e 17 .

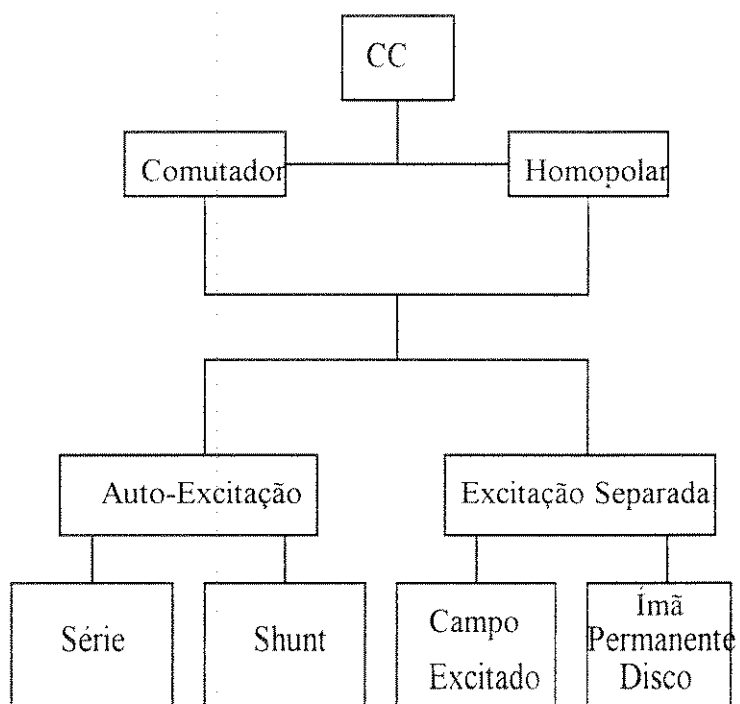


Figura 16 - Motores de Corrente Contínua

Fonte: Veículos Elétricos - Editora da Unicamp 1989. Bottura, C.P. e Barreto

G.

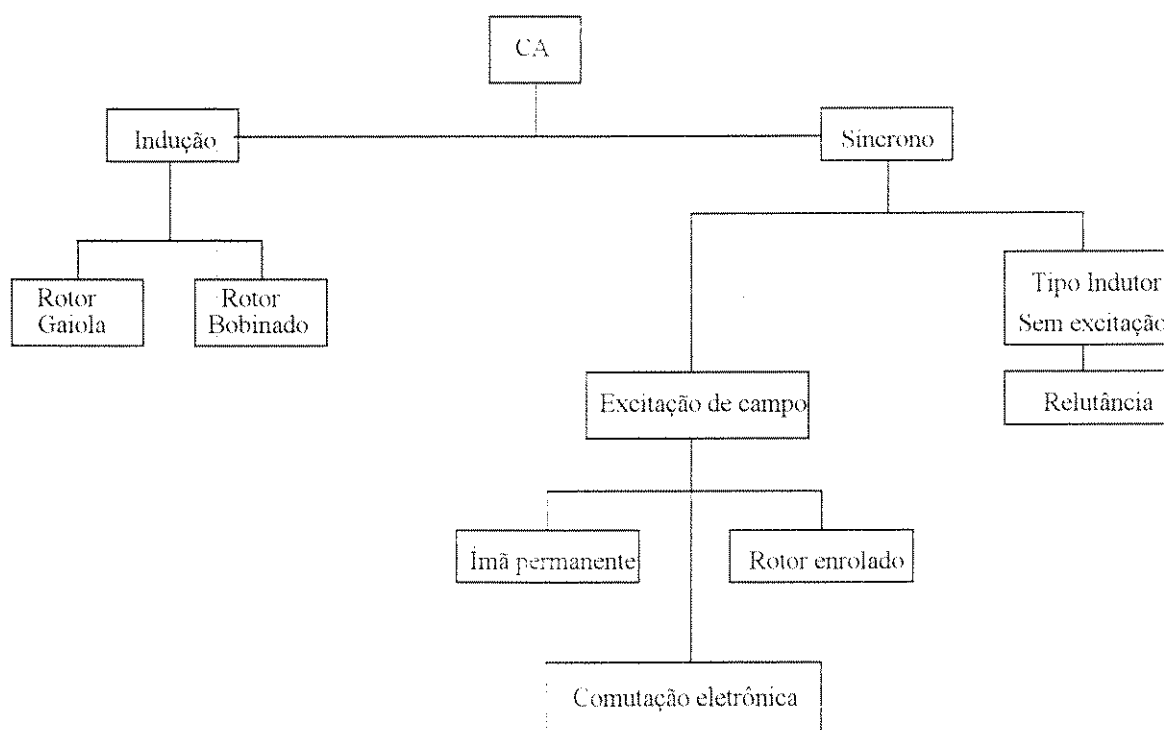


Figura 17 - Motores de corrente alternada. Fonte: Idem a anterior.

Para se determinar a potência do veículo elétrico é preciso levar em conta sua finalidade e conseqüente aceleração, velocidade e inclinação máximas, coeficiente de arrasto aerodinâmico e os ciclos de paradas e partidas. É importante também levar em conta as suas características diversas, como massa, sistema de controle, equipamentos auxiliares e de manutenção, além das características do sistema de energia como: razão de descarga, densidade energética, nível de potência e nível de tensão.

Deve-se considerar ainda os seguintes requisitos: o controle de aceleração e de frenagem deve ser suave e apresentar resposta rápida para toda a gama de velocidades; é desejável que seja capaz de proporcionar frenagem regenerativa; o torque deverá ser suficientemente elevado na faixa de zero a um quarto da velocidade máxima; deverá ter condições de proporcionar uma potência constante na faixa de um quarto da velocidade máxima até o seu limite; a eficiência energética deverá ser elevada para sua finalidade; a razão de potência para a massa total do sistema deverá ser alta. Além disso, é preciso que seja resistente, durável, de baixa manutenção e baixo custo.

O motor de corrente alternada possui algumas vantagens sobre o motor de corrente contínua: maior densidade de potência (kW/kg); menor custo; não requer manutenção freqüente, uma vez que seu rotor é alimentado por indução magnética, dispensando comutadores e escovas que são usados nos motores C.C.

Dos diversos tipos de motores elétricos existentes, o motor de rotor do tipo gaiola de esquilo, por ser compacto, de construção simples, barato e bastante sólido, é dos mais difundidos e utilizados atualmente. O estator do motor recebe corrente diretamente de uma fonte de corrente alternada trifásica. [12]

Para a escolha do conjunto motor-controle ou acionador, três fatores devem ser considerados: eficiência, massa e custo. A Tabela 7 mostra, comparativamente, dez diferentes tipos de sistemas, com seus respectivos valores de eficiência, massa e custo relativo.

Tabela 7 - Comparação entre sistemas de tração/controle.[12]

Tipo do Motor	Eficiência	Massa (kg)		Custo relativo
		Motor	Acionador	
CC c/ recontador transistorizado	80%	100	20	1 C
Indução CA com transistor	89%	50	40	1 C
Indução CA c/ SCR McMurray	85%	45	60	1,7 C
Indução CA c/ SCR de corrente	86%	40	180	3 C
Síncrono rotor enrolado c/ transistor	87%	55	60	1,1 C
Síncrono rotor enrolado c/ SCR McMurray	83%	55	65	1,8 C
Síncrono rotor enrolado c/ SCR s/ comutação	86%	55	70	1,2 C
Síncrono L.V.HV. disco c/ transistor	84%	50	75	2 C
Síncrono L.V.HV. disco s/ comutação	85%	50	70	1,2 C
Síncrono L.V.HV. disco s/ comutação	88%	30	40	1 C

C = Custo do sistema mais barato.

3.3.2 - Controle

3.3.2.1 - Aspectos Gerais

Há várias formas de controle para um motor elétrico. Para um motor de corrente contínua o processo é bastante simples, pois tem-se apenas duas tensões a serem controladas. Já num motor de corrente alternada a complexidade é bem maior, pois se faz necessário controlar três tensões alternadas que têm variação de amplitude, frequência e fase. Resulta assim um sistema de controle multivariável, onde as variáveis de controle são a tensão e a frequência, enquanto torque, velocidade, posição, fluxo e corrente no estator podem ser as variáveis controladas isoladamente ou relacionadas entre si. [14]

A Figura 18 destaca o sistema de controle, num diagrama de blocos, que representa de forma genérica as principais funções de um veículo elétrico.

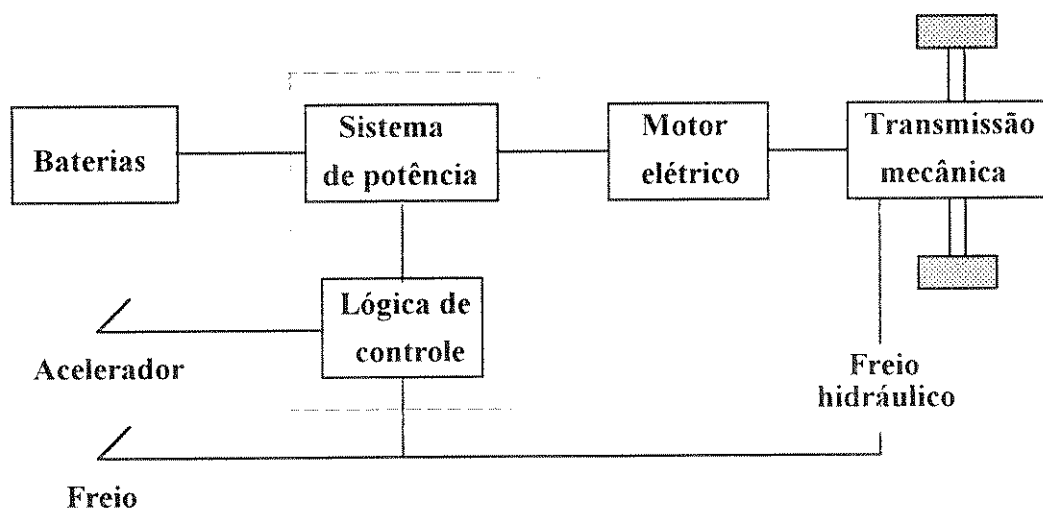


Figura 18 - Diagrama de blocos de um sistema de controle de um veículo elétrico.

Observando a Figura 18, nota-se que o controle é constituído por dois sub-blocos; um tem por função manipular a potência elétrica a ser fornecida ou retirada do motor; o outro controla o primeiro de acordo com o sinal que recebe do acelerador e, em alguns

casos, também do pedal do freio. Este leva em conta ainda os valores das variáveis elétricas e mecânicas, como, por exemplo, a corrente do motor e sua velocidade.

Para desacelerar o veículo é possível, no caso de tração elétrica, utilizar, além do sistema de freio hidráulico tradicional, dois outros tipos de frenagem: a frenagem dinâmica e a regenerativa. Isto se dá devido ao fato de ser possível fazer funcionar o motor elétrico como gerador, transformando a energia cinética do veículo em movimento, em energia elétrica. No caso desta energia gerada ser dissipada em resistores, denomina-se frenagem dinâmica. Quando ela é aproveitada para realimentar as baterias, é considerada frenagem regenerativa. A frenagem elétrica não dispensa a tradicional hidráulica, pois sua eficiência é diretamente proporcional à velocidade do veículo, sendo ineficaz a baixas velocidades.

A forma de controle depende do tipo de motor elétrico que se quer utilizar. Como já comentado anteriormente, o motor trifásico de indução do tipo gaiola de esquilo, pelas suas características, representa uma boa opção para ser usado em tração elétrica.

O motor de indução, quando alimentado com tensão e frequência fixas, tem sua característica estática representada pela curva da Figura 19

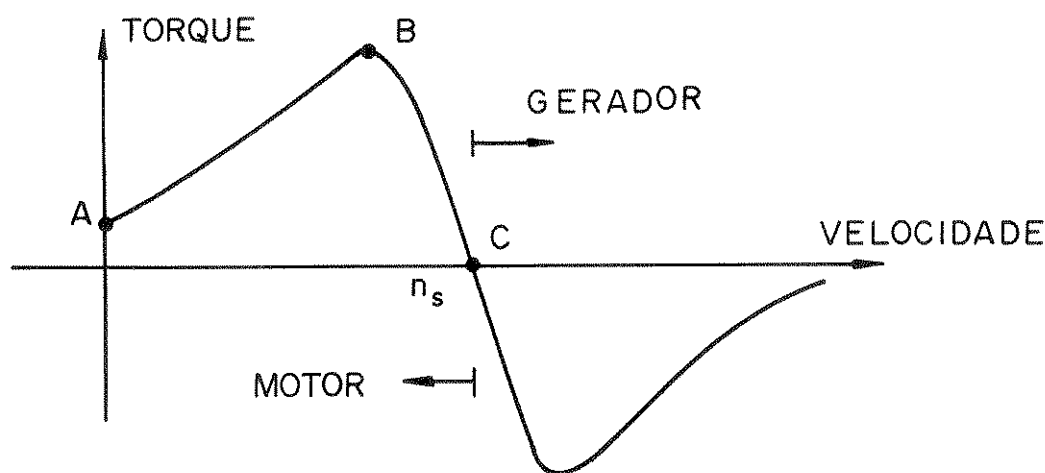


Figura 19 - Curva característica torque x velocidade para um motor de indução tipo gaiola de esquilo, alimentado com frequência f e tensão V .

Na figura 19, o ponto A corresponde ao torque de partida; o ponto B corresponde ao torque máximo; o ponto C corresponde à velocidade síncrona do motor. A velocidade síncrona do motor é proporcional à frequência de alimentação do mesmo. Na velocidade síncrona, como o torque é nulo, o motor de indução não pode acionar uma carga. O motor trabalha normalmente entre a região B e a região C. O escorregamento "s" é o afastamento percentual da velocidade real n em relação à velocidade n_s . $[s = (n_s - n)/n_s]$

Quando o motor é levado a girar por uma força mecânica acima da velocidade síncrona, ele funcionará como um gerador síncrono, transformando a energia mecânica em energia elétrica.

O motor de indução é basicamente um motor de velocidade constante, pois trabalha na tração em velocidades menores e próximas da velocidade síncrona. A forma de se ampliar a faixa de velocidade que é necessária para atender às necessidade de um veículo, é variando a frequência de alimentação do motor. Porém, para manter o torque nos mesmos níveis, é necessário variar também a tensão. Para que o coeficiente de tensão (V) com a frequência (f) seja mantida constante, é necessário que ambas devam ser variadas pelo sistema de controle mantendo k constante. Assim procedendo obteremos um conjunto de curvas, como mostra a Figura 20.

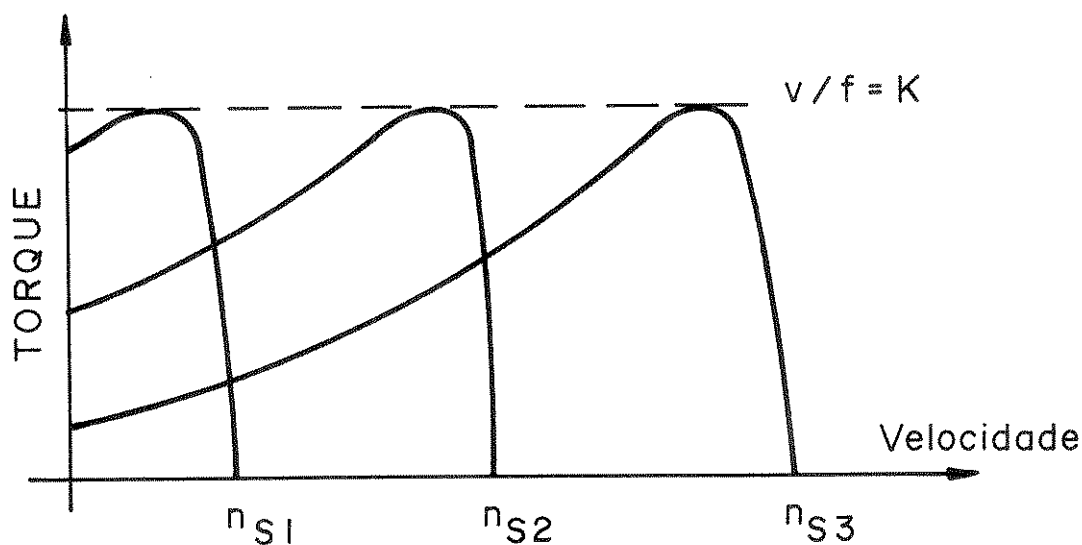


Figura 20 - Curva característica de velocidade x torque para várias frequências mantendo o fluxo do entreferro constante

Nota-se então que é possível manter o torque máximo na proporção que a velocidade aumenta. A potência cresce acompanhando a velocidade, até o seu valor máximo. Se a partir daí, se desejar prosseguir aumentando a velocidade, se faz necessário modificar a lei de variação da tensão aplicada, para que não se extrapole o valor máximo de potência. Sendo assim, para manter a potência igual à potência máxima faz-se $v = v_0 \sqrt{f/f_0}$, para $f > f_0$. O sistema de controle se encarrega de executar também esta possibilidade, que é mostrada na Figura 21.

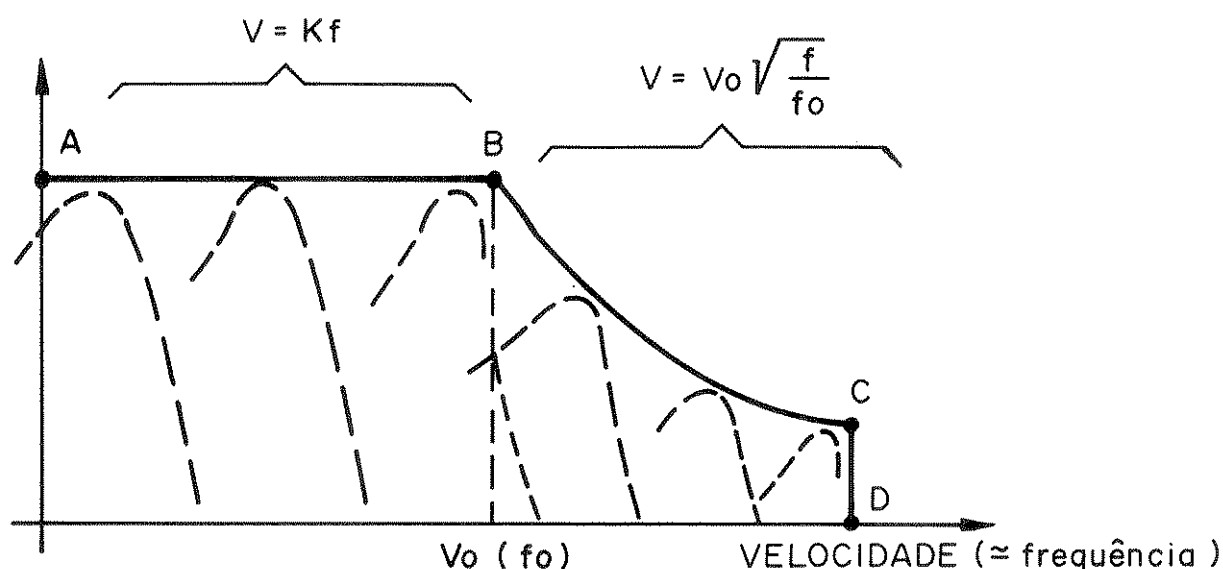


Figura 21 - Curva característica de torque x velocidade em tração.

Na região AB tem-se torque máximo e constante; na região BC a potência é máxima e constante.

3.3.2.2 Inversor para Controle de Motor de Corrente Alternada.

Dispondo-se de uma fonte de energia em corrente contínua (caso dos veículos elétricos a bateria), se faz necessário transformar a energia fornecida por esta fonte C.C., em outra forma de tensão alternada trifásica de valores de frequência adequadas para

funcionamento do motor de corrente alternada trifásica. Inversor é o circuito capaz de transformar uma tensão contínua em uma tensão alternada. Ele é um conversor estático CC/CA que tem por função controlar o fluxo de energia elétrica entre duas fontes, sendo uma fonte de tensão contínua (CC) e a outra de tensão alternada (CA) monofásica ou trifásica. As tensões trifásicas de saída do inversor têm uma tensão de onda próxima às senoidais, dependendo da técnica de controle aplicada ao inversor, obtendo-se assim diferentes conteúdos de harmônicas.[14]

a - Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de um inversor monofásico pode ser observado na Figura 22. A polaridade da tensão aplicada à carga muda de sinal de acordo com o chaveamento, ou seja, quando as chaves 1 e 3 estão fechadas e as outras duas abertas, a polaridade da tensão recebida pela carga é positiva; quando as chaves fechadas são a 2 e a 4 e as outras duas abertas, a polaridade da tensão aplicada à carga muda de sinal, ficando negativa.

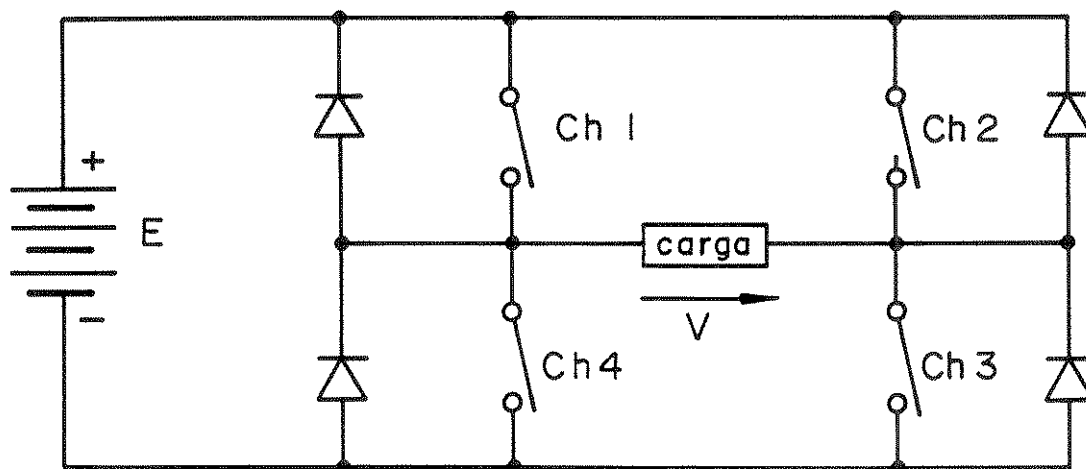


Figura 22 - Representação do princípio de funcionamento de um inversor monofásico.

Pelo esquema da Figura.23, pode-se ver a tensão retangular aplicada à carga. A taxa de repetição na operação de chaveamento estabelece a frequência.

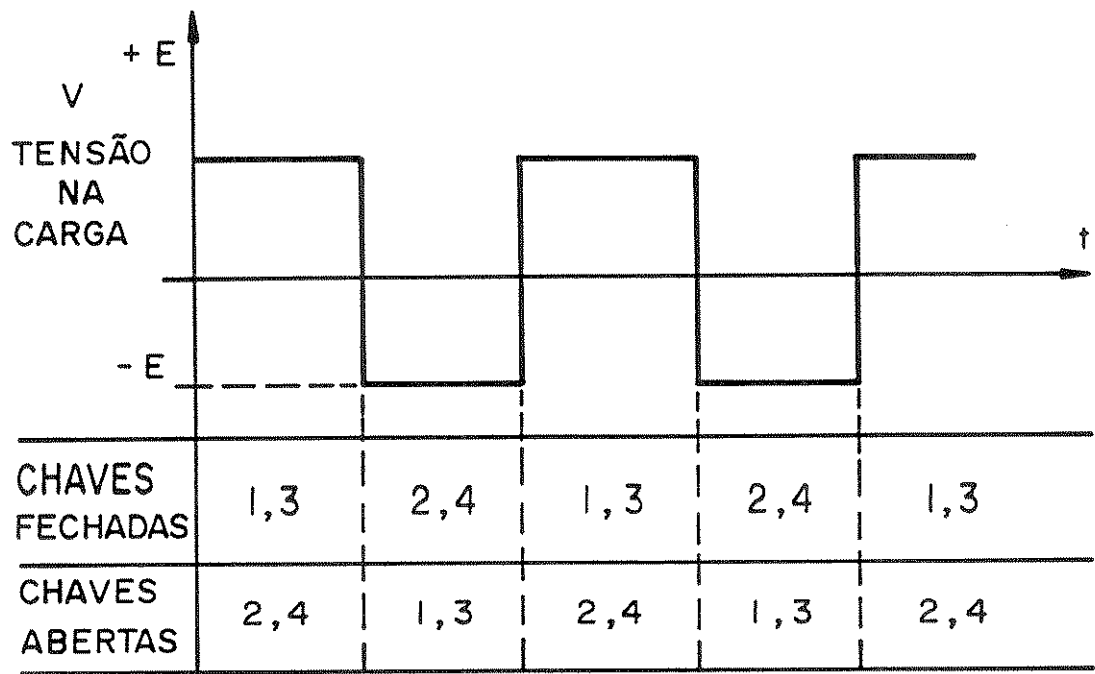


Figura 23 - Sequência de chaveamento e a forma da onda gerada.

A corrente não fica em fase com a tensão pelo fato da carga sempre ter uma componente negativa, principalmente tratando-se de um motor. Como mostrado na Figura 22, diodos são usados como alternativa para direcionar a corrente de carga indutiva que, após a mudança de sentido da tensão, também muda de sentido.

As chaves representadas na Figura 23 podem ser representadas por tiristores junto com seu circuito para bloqueio. Mais de uma chave pode ser atendida pelo mesmo circuito de bloqueio. A Figura 24 exemplifica este circuito, onde os tiristores T1, T2, T3 e T4 correspondem respectivamente às chaves de 1 a 4 da Figura .23 Tanto T1 como T4 podem ser bloqueadas por L1 e C1, assim como L2 e C2 podem bloquear T2 eT3. Os tiristores Ta, Tb, Tc e Td bloqueam respectivamente os tiristores T1, T2, T3 e T4, no momento adequado, por disparo.

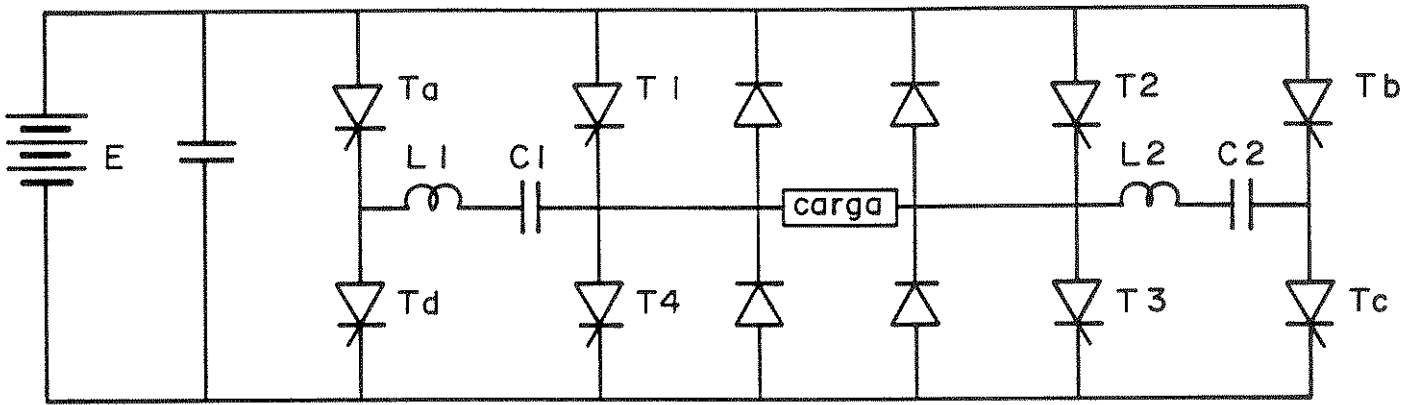


Figura 24 - Representação do circuito da Figura 23 com tiristores.

Pela Figura 24 nota-se que é possível realizarmos outras seqüências de chaveamento quando há uma nova forma de onda, conforme exemplificado na Figura 25

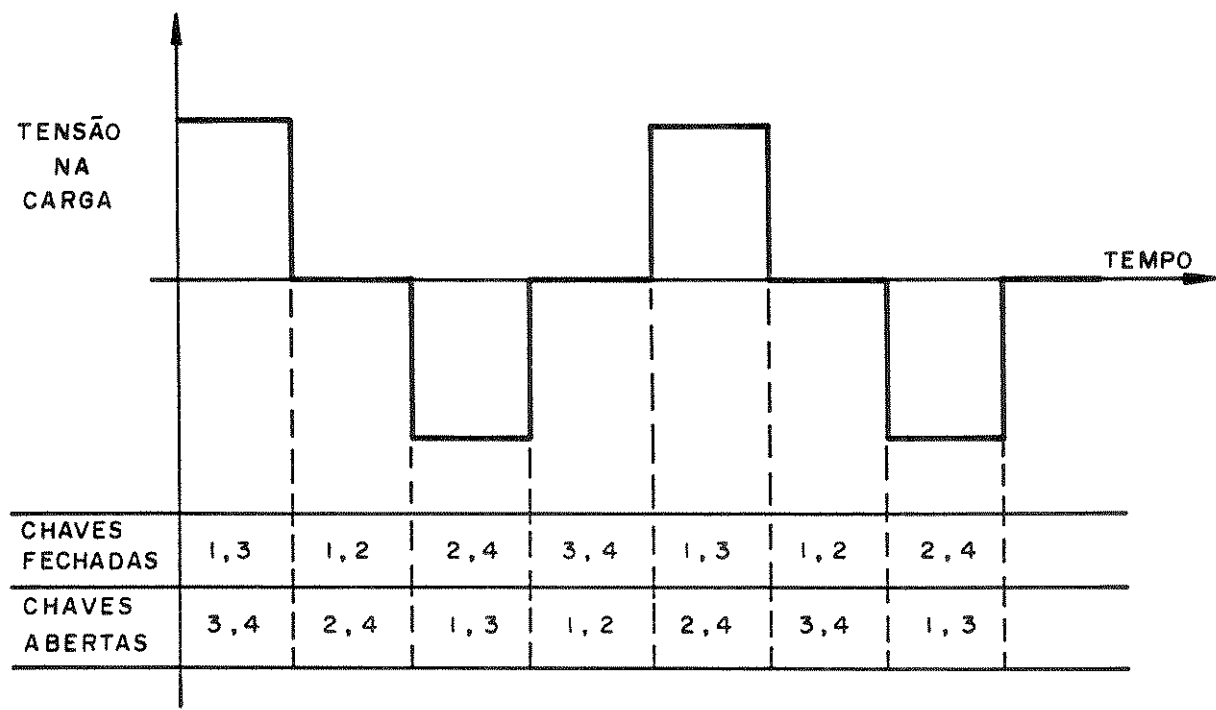


Figura 25 - Nova seqüência de chaveamento e forma de onda correspondente.

A Figura 25 apresenta uma menor amplitude de fundamental do que a Figura 24. Nota-se então, que controlando adequadamente os tempos de chaveamento, podemos alterar, além da frequência, a amplitude da tensão de saída.

Para um motor trifásico, o esquema é exemplificado na Figura 26.

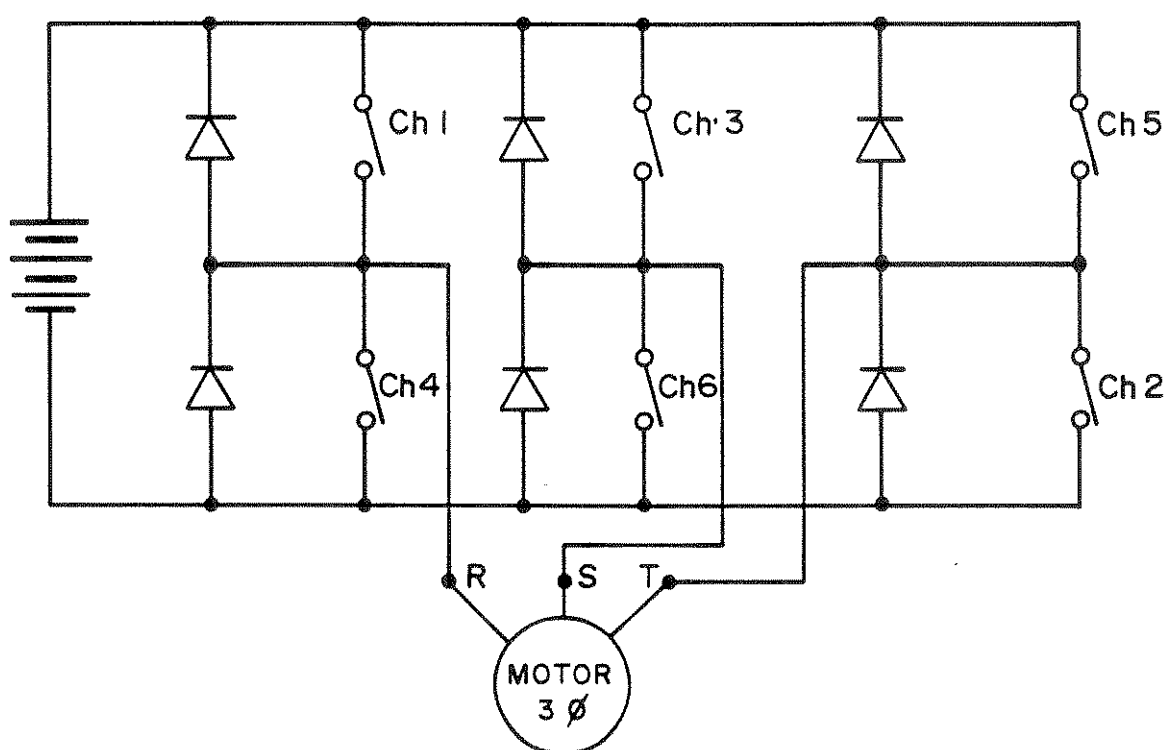


Figura 26 - Representação do princípio de funcionamento do inversor trifásico.

E finalmente, a Figura 27 mostra uma dada sequência de chaveamento e as respectivas ondas geradas nas três fases do motor.

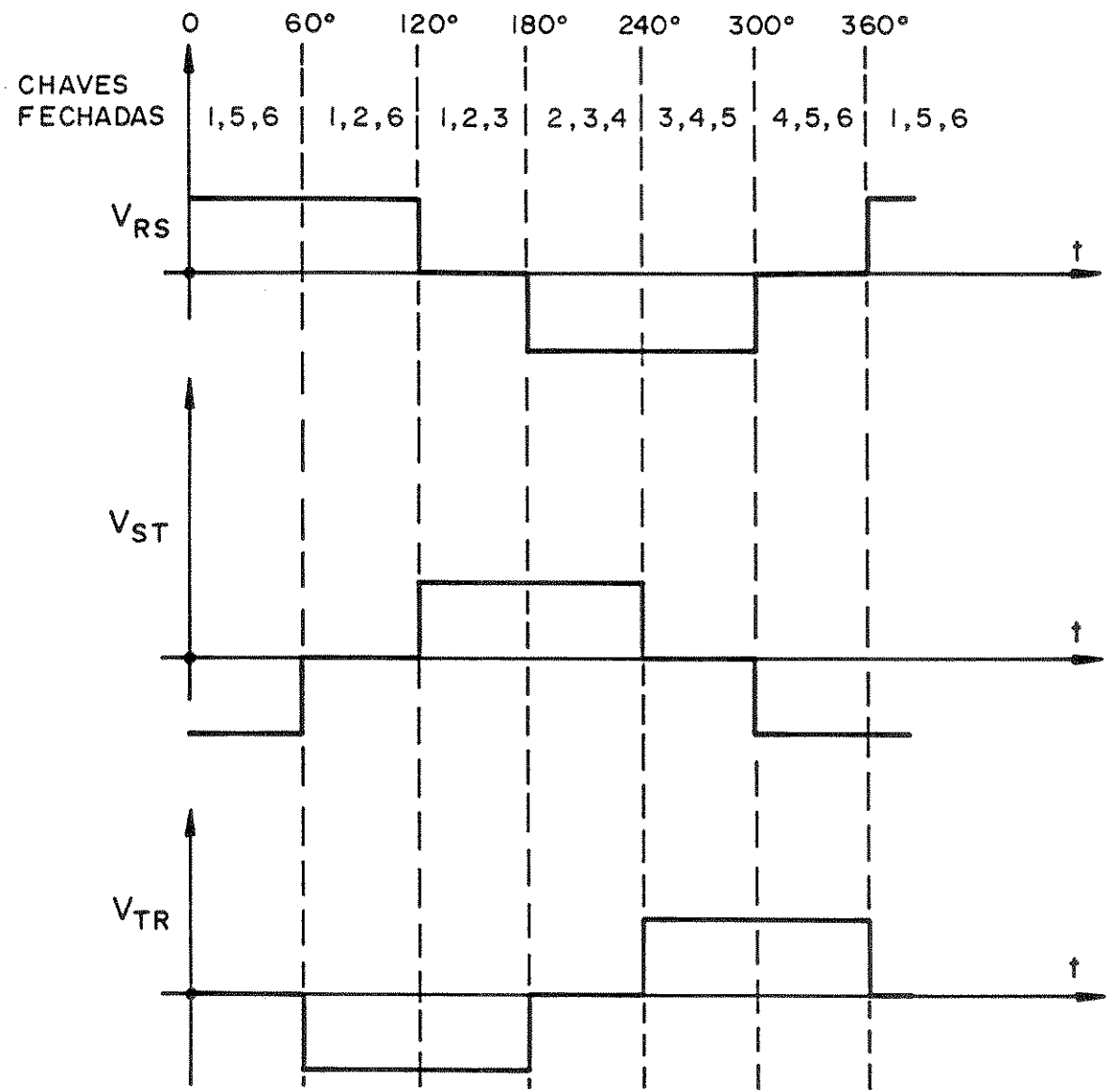


Figura 27 - Ondas geradas pelo inversor trifásico esquematizado na Figura 26.

3.4 - Baterias Eletroquímicas

Uma bateria é composta de um conjunto de células recarregáveis individuais ligadas em série para produzir determinada tensão. Uma célula recarregável tem a capacidade de converter energia elétrica em energia química e vice-versa. Cada célula contém eletrodos positivos e negativos imersos em eletrólito. A tensão gerada depende da composição química do material ativo contido nas placas e no eletrólito.

A Figura abaixo mostra um tipo de célula galvânica elementar, a Pilha de Daniel (1836).

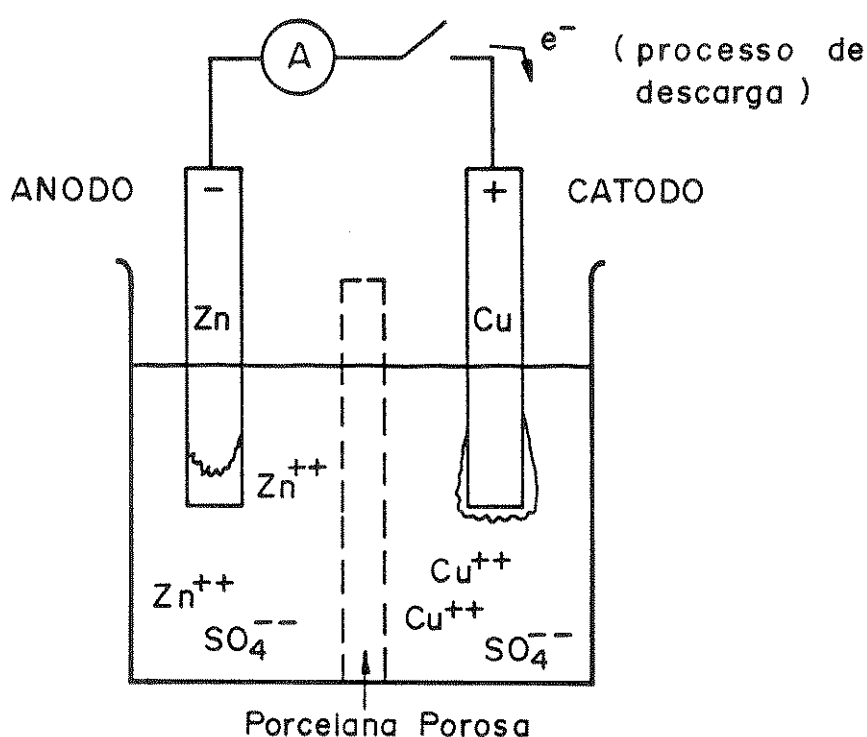


Figura 28 - Esquema da pilha elementar de Daniel de 1836.

Fonte: Veículos Elétricos - Editora da Unicamp (1989). Bottura, C.P. e Barreto, G.

A bateria num veículo elétrico é um dos pontos principais e talvez a grande limitadora de sua competitividade, em relação aos de combustão interna. Para ser usada em tração, ela tem que atender a uma série de pré requisitos básicos:

- a- Energia específica (wh/kg) e potência específica (kw/kg) elevadas, proporcionando máxima capacidade acumulada de energia dentro do compartimento.
- b- Alta eficiência de descarga (quando o motor for submetido a sobrecargas, a bateria deverá ser capaz de fornecer picos de corrente com mínima queda de tensão).
- c- Elevado número de ciclos de carga e descarga sem degeneração de sua capacidade de armazenamento de energia.
- d- Os componentes utilizados na sua fabricação devem ter alta resistência mecânica para suportar as vibrações durante o uso e possíveis choques no manuseio, e serem seguros no caso de acidentes. Também importante para a viabilidade comercial das baterias tracionárias é a abundância da matéria prima utilizada na fabricação e um custo de fabricação baixo.
- e- Baixa auto-descarga.
- f- Baixo tempo de carregamento.

3.4.1 - Tipos de Baterias Tracionárias

A Tabela 8 permite comparar algumas das características dos tipos mais usuais de baterias tracionárias. Em seguida são comentados de forma sucinta alguns casos constantes desta tabela, sendo abordados de maneira mais abrangente os dois tipos mais utilizados.

Tabela 8 - Baterias tracionárias, algumas características.

SISTEMA	Tensão por célula (volts)	Número de ciclos (vida útil)	Temperatura (°C)	Densidade Energética (wh/kg)	
				Teórica	Experimental
Pb-H ₂ SO ₄	2,10	200-300	10-40	170	30-40
Ni-Cd	1,29	1000-3000			53
Fe-ar	1,28		40-45	764	110
Na-S	2,00	1000	375	665	176-221
Ni-Zn	1,78	250-350	20-30	267	66-88
Ni-Fe	1,30	1500	20-30	267	44-65
Zn-ar	1,65	200	55	196	44
Zn/Cl ₂ . 6H ₂ O	2,12	500	50	831	177
Li/Al-FeS ₂	1,60	2500	600	870	221
Li-Cl ₂	3,50	2000	650	2314	110

a - Níquel/Ferro:

A densidade energética teórica é de 267 Wh/Kg, vida útil 1500 ciclos. A desvantagens dessas baterias são: baixa corrente de pico, baixa tensão por célula, auto descarga de 2% da capacidade por dia a 25°C e alto custo do níquel [12].

b - Níquel/Zinco:

A densidade experimental energética máxima dessas baterias é de 88 wh/kg. A vida útil de aproximadamente 300 ciclos dificulta sua adoção. Essa limitação deve-se à tendência

do eletrodo de zinco, quando em eletrólito alcalino, dar origem a formações dendríticas, as quais penetram nos separadores durante o ciclo de carga, curto circuitando os eletrodos. Uma possível solução para este problema seria a agitação do eletrodo de zinco durante a carga, o que poderia estender a vida útil para 1200 ciclos [12].

c - Zinco/Cloro Hidratado:

O sistema possui uma densidade energética elevada, o custo do material é baixo, apresenta uma alta tensão por célula (2,12 V) e vida útil de 500 ciclos. O hidrato de cloro ($\text{Cl}_2\text{-H}_2\text{O}$) é obtido pelo borbulhamento do gás cloro em um resfriador ($-\Delta H$ 80 cal/g). O hidrato de cloro é estável e pode ser armazenado por um longo tempo num reservatório com boa isolamento. Existe atualmente a necessidade de melhorar o sistema de resfriamento, uma vez que na troca de calor do resfriador perde-se Cl_2 gasoso, (o qual é recuperado aumentando-se a pressão de armazenamento do sistema) que, se liberado, causa envenenamento, exigindo portanto, um equipamento complexo e de alto custo [12].

d - Sódio/Enxofre

As baterias de Sódio/Enxofre, apesar de operarem em altas temperaturas (350°C), possuem alta densidade energética, pois seus reagentes possuem grandes diferenças de eletronegatividade (E 2,08 V) e baixa densidade, vida útil de 1000 ciclos. Tanto o sódio como o enxofre fundem-se a 115°C, propiciando a partir desta temperatura uma diferença de potencial entre ambos [12,15].

f - Níquel/Cádmio

Bastante utilizada por muitos dos protótipos de veículos elétricos hoje existentes, a bateria de níquel cádmio é resultado do estudo e desenvolvimento de baterias alcalinas que nasceu no princípio da década de 1890, quando Waldemar Jungner iniciou o desenvolvimento de uma bateria recarregável capaz de concorrer com a bateria chumbo-ácido. Levando em consideração as desvantagens da bateria chumbo-ácido, Jungner

demonstrou que os eletrólitos alcalinos não sofrem alteração na sua composição durante o processo de carga e descarga. Demonstrou também que, diferente neste das baterias ácidas, os materiais estruturais internos inativos da bateria alcalina não necessitam ter resistência ao eletrólito, propiciando o uso de componentes de aço no seu projeto.

As bolsas feitas de finas chapas metálicas perfuradas, que continham os materiais ativos para os eletrodos de baterias alcalinas, foram patenteadas em 1893 por Jungner, tornando-se o modelo original dos modernos eletrodos de bolsa. Em 1899 a apresentação formal do trabalho de Jungner sobre as baterias alcalinas originou outra patente e, ainda no mesmo ano, foram autorizadas a ele cartas patentes sobre eletrodos de prata e eletrodos porosos de cádmio. Células de níquel-zinco foram também por ele pesquisadas.

Thomas Edison, na mesma época, trabalhava numa bateria alcalina. Patenteou o projeto de uma bateria envolvendo o uso de óxido de níquel como eletrodo positivo e ferro como eletrodo negativo.

O ferro da massa ativa da célula Jungner foi substituído pelo cádmio em 1900, constituindo assim a primeira bateria níquel cádmio.

Um novo tipo de bateria de níquel cádmio empregando eletrodos sinterizados foi patenteado em 1928 por cientistas da IG Farbenindustrial na Alemanha. Estes se distinguem por terem entre os materiais ativos e o eletrólito, superfície de contato relativamente grande. O baixo peso e volume, aliados à necessidade de alta corrente de descarga, fez deste tipo de bateria a mais comum para uso na aviação.

A eletroquímica da bateria níquel-cádmio se processa da seguinte forma: os constituintes ativos em uma célula elementar níquel/cádmio são o níquel nas placas positivas e o cádmio nas placas negativas. O eletrólito é composto de uma solução de hidróxido de potássio em água deionizada e hidróxido de lítio como aditivo. A fim de diminuir as perdas é necessário um baixo teor de impurezas. Os eletrodos positivo e negativo são insolúveis no eletrólito.

A tensão nominal de descarga resultante da reação eletroquímica é de 1,2 volts por célula.

Ao se carregar, os materiais ativos inicialmente presentes como hidróxido são alterados. O hidróxido de cádmio é reduzido ao estado metálico enquanto o material do níquel atinge um grau mais elevado de oxidação. O processo é invertido na descarga, fazendo com que os materiais ativos retornem a seus estados originais.

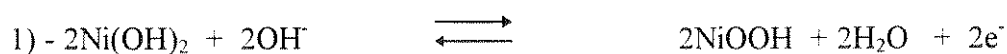
O eletrólito de hidróxido de potássio age somente como condutor de íons, não tomando parte nas reações.

O hidróxido de lítio contido no eletrólito proporciona um substancial aumento na vida do eletrodo positivo, ampliando este efeito com o aumento da temperatura.

A condição ideal para a condutividade e operação a baixas temperaturas dá-se com o eletrólito preparado com uma densidade de 1,120 a 1,200.

Este eletrólito tem a vantagem de nunca se congelar na forma sólida. Abaixo de - 25°C ele se torna uma massa viscosa, porém, totalmente inofensiva. Descongelado, ele permite que a bateria volte ao funcionamento normal.

A seguir apresentam-se as equações que descrevem as reações eletroquímicas da bateria níquel cádmio.



A equação 1 representa a reação reversível do material ativo positivo num eletrólito de hidróxido de potássio. O eletrodo positivo não tem potencial estável, o valor padrão é 0,49 V a 25°C.

A equação 2 representa a reação reversível do material negativo num eletrólito de hidróxido de potássio. O potencial reversível padrão do eletrodo negativo é -0,809 V a 25°C.

A equação 3 dá a reação global e simplificada para o elemento níquel cádmio com placas de bolsa.

O potencial padrão é igual a 1,299 V, que é resultado da diferença entre os potenciais padrões dos eletrodos apresentados acima.

As características químicas, elétricas e mecânicas ímpares das baterias níquel cádmio com placas de bolsa proporcionam confiabilidade e vida útil extremamente longa.

Suportam abusos exagerados; podem ser descarregadas profundamente e até invertidas de polaridade. Curto circuitos não a destruirão dentro de certos limites e elas podem permanecer parcial ou totalmente descarregadas sem profundos danos. Sobrecargas, mesmo prolongadas, podem ser toleradas.

Seu desempenho é excelente, mesmo em descargas com alta intensidade de corrente, e sua recuperação de tensão é quase instantânea.

Não está sujeita ao problema de "morte súbita" como a grande maioria dos outros tipos porque os materiais internos de suporte dos elementos não sofrem corrosão.

Pelo fato da construção interna ser inteiramente de aço e a caixa ser de plástico de alto impacto ou aço, sua resistência mecânica é muito grande.

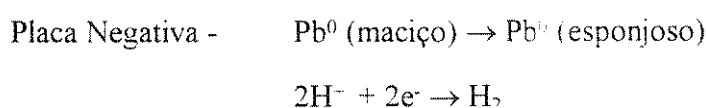
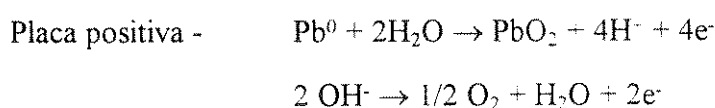
Como o processo de envelhecimento é bem lento e caracteriza-se por um desempenho em ligeiro declínio, permite ao usuário planejar a sua substituição com anos de antecedência.

Como desvantagens, têm-se que o suprimento de cádmio apresenta limitações que, aliado ao alto preço, prejudica a adoção em larga escala das baterias de níquel cádmio. No entanto, sua alta densidade de energia e potência faz com que ela seja uma opção interessante em muitos casos [A maior parte das informações contidas neste item foram baseadas em informações de catálogo - referência 17].

g - Chumbo-Ácido

Um breve histórico do desenvolvimento das baterias leva ao início das baterias chumbo-ácido. Em torno de 1800, Volta descobriu o princípio da célula galvânica (Zn-Ag). Em 1860, Siemens e Sinstedden o aplicaram no sistema $\text{Pb}/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{PbO}_2$. Na década seguinte, uma célula para o armazenamento de energia elétrica foi idealizada por Planté. Esta célula era composta por duas lâminas de chumbo separadas por tiras de borracha enroladas em espiral em uma solução de H_2SO_4 ($\approx 10\%$). Planté descobriu que, devido a um aumento no depósito de material ativo, aumentava a capacidade da célula com o fornecimento de carga elétrica, seguido de períodos de descarga [16].

A seguir, a Figura 29 descreve o processo de descarga numa bateria de chumbo-ácido. Abaixo são descritas as reações de carga e descarga.



As reações de descarga são:

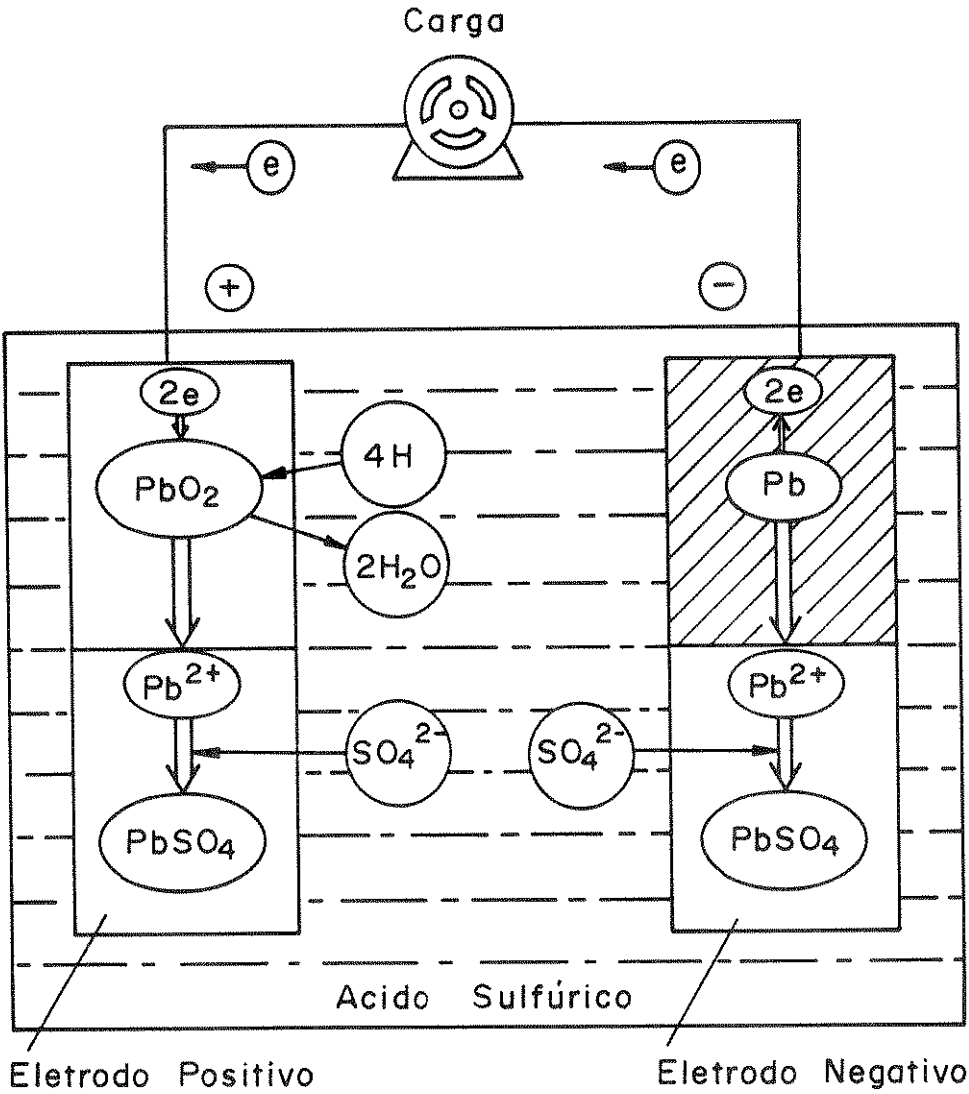
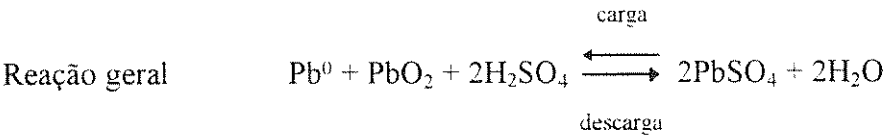
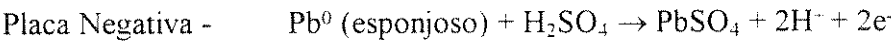
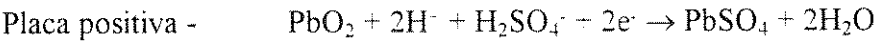


Figura 29 - Processo de descarga de uma bateria chumbo-ácido.

Fonte: Batteries vol. 2- Lead-Acid Batteries and Electric Vehicles. Union Carbide Corporation, Battery Products Division, Technology Lab., Parma Ohio, Usa.

Ao se carregar a célula, na placa positiva o chumbo metálico se transforma em peróxido de chumbo. Na placa negativa não há alteração química, porém, o chumbo passa de maciço para esponjoso, ficando mais macio e poroso que o chumbo metálico comum.

Ao se descarregar a célula, na placa positiva o peróxido de chumbo converte-se em sulfato de chumbo, ao passo que na placa negativa o chumbo esponjoso transforma-se em sulfato. Assim, há uma tendência das placas a se igualarem eletroquimicamente, não havendo, portanto, diferença de potencial entre elas.

Porém, se em função da corrente de carga a placa positiva transformar-se para peróxido e a negativa para chumbo esponjosos, passa a existir uma força eletromotriz (F.E.M.) entre as mesmas e, ao se fechar o circuito elétrico, haverá um fornecimento de corrente elétrica de célula, até que o potencial elétrico entre as duas placas se iguale.

Este processo foi observado por Planté, motivando-o a introduzir o sistema chumbo-ácido como acumulador reversível de energia eletroquímica.

Um grande número de outros sistemas foi proposto, sem o mesmo sucesso, devido às desvantagens apresentadas, que impediam sua adoção comercial.

A bateria de chumbo-ácido ainda é atualmente o sistema eletroquímico recarregável de maior importância comercial. É um sistema de uso universal, que tem as seguintes vantagens: não está sujeito aos efeitos de deterioração química; a energia química se converte em energia elétrica, e vice-versa, de forma quase que reversível; baixo custo dos componentes; baixa resistência interna; após várias centenas de ciclos de carga e descarga possui grande capacidade de recuperação; é favorável à estocagem de energia em estado de carga seca; seu desempenho corresponde mesmo dentro de uma diversidade de variações de descarga e temperatura. [12]

As principais desvantagens que este sistema apresenta são: baixa capacidade por unidade de massa e pequena resistência mecânica das placas.

4 - “VEGA”, O PROTÓTIPO DO VEÍCULO DE TRAÇÃO HÍBRIDA SOLAR-HIDROGÊNIO-ELETRICIDADE.

4.1 - Histórico

Este projeto nasceu da interação do autor deste trabalho com o Laboratório de Hidrogênio (LH2) da Unicamp. Após um período inicial de contato verificou-se haver afinidade de idéias, e coincidência com um dos objetivos do Laboratório. O autor buscava desenvolver um trabalho voltado para utilização da energia fotovoltaica para uso de propulsão automotiva, enquanto o LH2 pretendia retomar a linha de pesquisa de adaptação de veículos a hidrogênio. Experiências já haviam sido feitas em dois veículos anteriormente, na época em que a grande preocupação era o preço dos combustíveis (1976 a 1982).

Após um período de estudos, traçou-se uma linha geral dentro das perspectivas atuais. A partir dela, buscou-se o apoio de especialistas em cada uma das diversas áreas de pesquisa que envolvia todo o projeto. Definiu-se uma divisão de responsabilidades que no decorrer do desenvolvimento do projeto, foram sendo ajustadas de acordo com a disponibilidade e envolvimento de cada um. Posteriormente, houve a adesão de outros participantes como colaboradores.

Coube ao autor, inicialmente, a criação e desenvolvimento da estrutura e “*design*” do veículo. O projeto envolveu os Laboratórios de Hidrogênio (Física), de Motores (Engenharia Mecânica) e de Controle (Engenharia Elétrica), todos da Unicamp. Posteriormente contou com o apoio de diversas empresas, que através da doação de equipamentos e/ou serviços, contribuíram de forma decisiva para a realização do projeto.

4.2 - Características do Projeto

O objetivo deste projeto é a construção de um protótipo que procure atender as 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.

Um veículo para uso urbano tem as seguintes características:

a- Pequena autonomia:

Não há necessidade de grande autonomia para o uso do veículo em meio urbano. Considerando-se que a maior cidade do Brasil, São Paulo, possui uma área de aproximadamente 1500 km^2 , o que equivale a um círculo de 44km de diâmetro, uma autonomia entre 80 e 100 km é suficiente para se percorrer, diariamente, duas vezes o diâmetro da cidade de São Paulo (ida e volta).

b- Baixa velocidade:

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 a velocidade máxima necessária aos veículos urbanos é de 80 km/h.

c- Pouca aceleração:

No perímetro urbano das cidades não há 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. A norma SAE 227 Ja - D estipula o tempo de 28 seg. para acelerar um veículo elétrico de 0 a 72 km/h.

d- Baixa potência:

Considerando-se que no caso de veículos urbanos as velocidades e acelerações são reduzidas, então a potência desenvolvida não assume valores elevados. A excessão fica por conta das ladeiras onde, dependendo da inclinação e da velocidade de subida, a potência requerida pode ser mais significativa. Por exemplo, no caso de uma ladeira bastante íngreme, de inclinação de 30° , percorrida a uma velocidade de 20 km/h por um veículo de 0,8 tonelada, a potência efetiva mínima necessária é de 22kW (29 HP).

Entretanto, de uma forma geral, para 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, tem-se uma potência 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.

Para o protótipo, definiu-se uma potência de 15 kW, para a sua primeira fase.

e- Peso reduzido:

A quase totalidade dos veículos urbanos se refere ao transporte de passageiros, em geral de duas pessoas. Portanto nestes casos não há necessidade de grande quantidade de recursos e acessórios, sendo desejável, por outro lado, uma massa reduzida do veículo, possibilitando uma maior eficiência do conjunto, menores custos de compra, uso e manutenção.

Neste primeiro protótipo esta característica foi sacrificada em relação às outras, uma vez que os recursos do projeto são bastante limitados, e a maioria dos componentes do veículo não foram projetados e fabricados especificamente para esta finalidade.

f- Baixo consumo:

Evidentemente que se um veículo apresentar as características já enumeradas anteriormente, e possuir um sistema de propulsão moderno, compatível com estas características, seu desempenho será bastante eficiente, com baixo consumo de combustível. Esta propriedade é muito desejável no caso de veículos urbanos, não só pela economia que proporciona, como também pela redução dos níveis de emissão de poluentes, fator este cada vez mais importante, principalmente nas grandes cidades, onde há a presença simultânea de um grande número de veículos em trânsito.

Esta é sem dúvida a maior vantagem deste protótipo, considerando que trata-se de um veículo elétrico, com um conjunto motor-gerador consumindo hidrogênio, onde o único composto nocivo liberado é um pouco de Nox.

4.3 - Características do Veículo

Os principais componentes do protótipo são mostrados esquematicamente na figura 30.

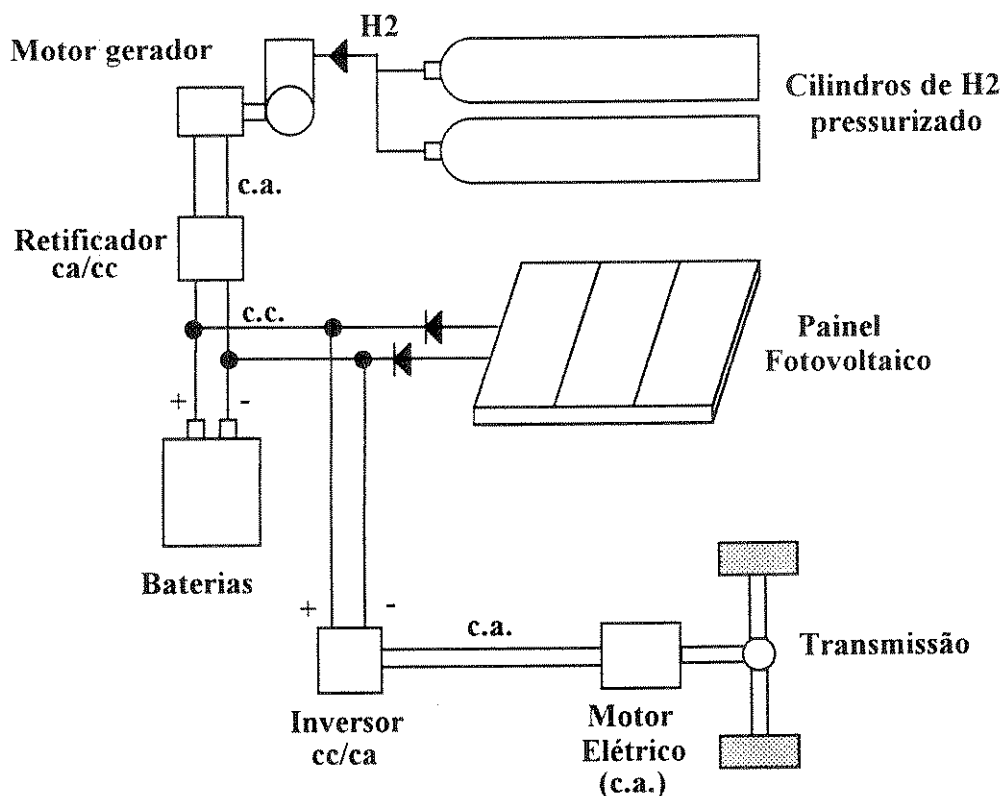


Figura 30 - Principais componetes do protótipo do veículo de tração híbrida solar-hidrogênio-eletricidade desenvolvido no LH2 da Unicamp.

As principais caraterísticas de cada componente são:

a - Chassi / Carrosseria

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.

Carrosseria do tipo "pick-up" para 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.

b - Motor Elétrico

Tipo corrente alternada trifásico, potência de 15.000 w (20 HP), 75 V, 60 Hz.

Fornecedor: WEG Motores S.A.

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, peso 102 kg.

Fornecedor: WEG Automação Ltda.

d - Baterias

Tipo chumbo-ácido, com grades de liga chumbo-cálcio, laminados-expandidos e placas de grande espessura e alta densidade. Modelo DELCO 2000. Tensão nominal de 12 V, capacidade nominal 115 Ah em 100 h a 25° C até 10,5 V (1,75 V/elemento). Número de baterias: 10, peso de cada uma: 27,3 kg, dimensão em mm: 320,2 x 172,0 x 217,8.

Fornecedor: Delco Remy

e - Pannel de Células Fotovoltaicas

Módulos de células de silício monocristalino, totalizando uma área de aproximadamente 2,0 m², 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 S.A.

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 Nm³ de hidrogênio a 150 kgf/m², o peso é de 60 kg, para cada cilindro.

Fornecedor: Laboratório de Hidrogênio

4.3 - Comentários gerais sobre os principais itens

Motor Elétrico:

O motor utilizado foi reenrolado pelo próprio fabricante para trabalhar com uma tensão de 75 V. Essa necessidade surgiu pelas características de operação do conversor de frequência e está relacionada à tensão de entrada deste, que é de 120 V. A potência do motor foi idealizada através dos parâmetros já descritos anteriormente a fim de atender ao mínimo necessário dentro das características pretendidas para o veículo. Assim como os outros equipamentos, o motor não foge a regra, é um equipamento de linha do fabricante voltado para aplicações industriais. Teve como única alteração o seu reenrolamento. É um componente de fundamental importância, que pode ser bastante otimizado para as próximas etapas dos futuros protótipos, como, por exemplo, utilizar dois ou quatro motores de alta rotação (na faixa de 10.000 rpm), que são bem mais compactos. Podem ser ligados diretamente ao semi-eixo, ou ainda serem dispostos na própria roda (caso do carro elétrico japonês IZU).

Baterias:

As baterias utilizadas não são do tipo tracionárias, ou seja, não foram dimensionadas especialmente para esta finalidade, mas por serem do tipo descarga profunda, são bastante superiores às baterias chumbo-ácido convencionais, usualmente utilizadas para alimentação da parte elétrica de veículos convencionais. Foi a melhor opção disponível, dentre as baterias comercializadas no país pela empresa fornecedora do equipamento. A quantidade de baterias foi determinada pela relação voltagem e peso, ou seja, máxima voltagem necessária para um peso de baterias não muito excessivo.

Células fotovoltaicas:

Como o custo dos painéis fotovoltaicos é muito elevado, não foi possível obter a área necessária para gerar energia suficiente a fim de proporcionar ao veículo uma autonomia de 80 km por dia, a ser instalada fora do veículo. Optou-se, então, por incorporar uma pequena área no próprio veículo, que teria por função polarizar as baterias e servir de base para a simulação da área de painéis necessária para atender aos objetivos do projeto. Desta forma proporcionaria ainda um aspecto mais concreto ao protótipo, valorizando o apelo visual do veículo.

Motor gerador:

A opção por um motor de quatro tempos foi imposta pelas características técnicas. Um motor dois tempos possui um sistema de lubrificação não compatível com o uso do hidrogênio. O processo de lubrificação destes motores se faz através da mistura de óleo à gasolina. A lubrificação é feita pelo óleo já livre da gasolina, que vai se evaporando. Para um combustível gasoso, esse tipo de lubrificação não é compatível. Outros tipos tais como: motor diesel, motor Wankel, turbinas a gás, foram descartados ou por regime de operação desfavorável, considerações práticas associadas aos seus custos, disponibilidades, etc.

A potência do motor foi condicionada à disponibilidade de modelos no mercado. Hoje a maioria dos motores de maior potência comercializados são do tipo diesel. A adoção de um mono-cilindro está relacionada à facilidade de adaptação do motor ao hidrogênio devido a número menor de variáveis, se comparado a um motor de dois ou mais cilindros, propiciando um maior controle das reações do motor. Cada combustível requer um mapa de ponto de ignição próprio, que satisfaça às diferentes cargas do motor, a fim de adequar suas características visando otimizar seu desempenho em toda faixa de operação. O hidrogênio

possui uma velocidade de queima superior ao da gasolina, que torna o ajuste do ponto de ignição essencial para o desempenho do motor.

Quanto à alimentação do motor, pode-se utilizar o processo típico de motores a combustíveis gasosos que consiste em efetuar a mistura ar-combustível em um misturador situado antes da válvula de admissão. Outra opção seria através da injeção direta no cilindro após o processo de admissão. Uma terceira opção, que tem sido pesquisada em outros países, é a injeção de hidrogênio líquido diretamente na câmara de combustão. A primeira opção apesar de ser a mais simples tem a desvantagem de comprometer o rendimento volumétrico do motor ocasionando uma perda de potência em relação ao uso da gasolina. Isto se explica pelo fato do hidrogênio deslocar parte do ar que seria admitido. Outra desvantagem deste processo é a facilidade de ocorrer o retorno de chama no coletor de admissão. A segunda opção permite a manutenção ou até um ganho de potência apesar de envolver dificuldades mecânicas consideráveis. Foi a opção adotada, porque o hidrogênio disponível é armazenado em cilindros de alta pressão, facilitando a alimentação diretamente dos mesmos, através de uma válvula de injeção comandada. A última opção foi desconsiderada a fim de se evitar a produção de hidrogênio em estado criogênico, assim como, os problemas decorrentes à resistência dos materiais em contato com temperaturas tão baixas. No atual estágio de desenvolvimento a primeira opção tem sido adotada, não se verificando os efeitos negativos mencionados, que são típicos na adaptação de motores veiculares (que não é o caso).

O motor gerador foi adaptado ao uso de hidrogênio pelo Laboratório de Hidrogênio com o apoio técnico do Laboratório de Motores, ambos da Unicamp. O trabalho foi iniciado com uma revisão completa do motor, cuidado necessário pelas características do hidrogênio que é muito permeável e qualquer desajuste poderia facilitar uma fuga do gás, que seria indesejável não só quanto ao desempenho, como também pelos riscos que poderia acarretar.

Após a revisão, foi feito o ensaio do motor, utilizando o método de Dinamômetro Elétrico, por ser o mais prático de se construir devido à facilidade de aquisição dos

equipamentos de leitura. Os Dinamômetros Elétricos são máquinas elétricas moto-geradoras que funcionam como freio quando se aplica uma carga ao gerador. A potência no eixo do motor (potência efetiva) é obtida através da leitura da potência fornecida pelo gerador a um banho eletrolítico, conhecendo-se a curva de eficiência do mesmo. Para o ensaio do motor, os dados relevantes são: medição de potência, medição de rotação, medição de torque e temperatura do gás de escape. O objetivo deste ensaio é obter a curva do motor -potência x rotação- com o uso de gasolina, para posterior comparação com os resultados do motor trabalhando com hidrogênio.

Chassi / Carosseria

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 cogitadas na época, era a mais imediata e única completamente disponível, razão pela qual foi escolhida, mesmo com reservas por parte do projetista que, devido ao atraso tecnológico e dimensionamento deste chassi, sentia que teria grandes dificuldades para executar um projeto moderno e racional, envolvendo estudos de ergonomia, “*design*”, desempenho das partes estruturais e mecânicas dentro de um padrão aceitável. Como os principais equipamentos a serem utilizados no protótipo não seriam os ideais e sim paliativos, e que, formando uma primeira versão para estudos que não teria grandes compromissos com perfeição e desempenho, decidiu-se que um projeto mais elaborado ficaria para uma próxima etapa. Sendo assim, resolveu-se criar uma estrutura despojada, composta apenas de 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 31 e 32.

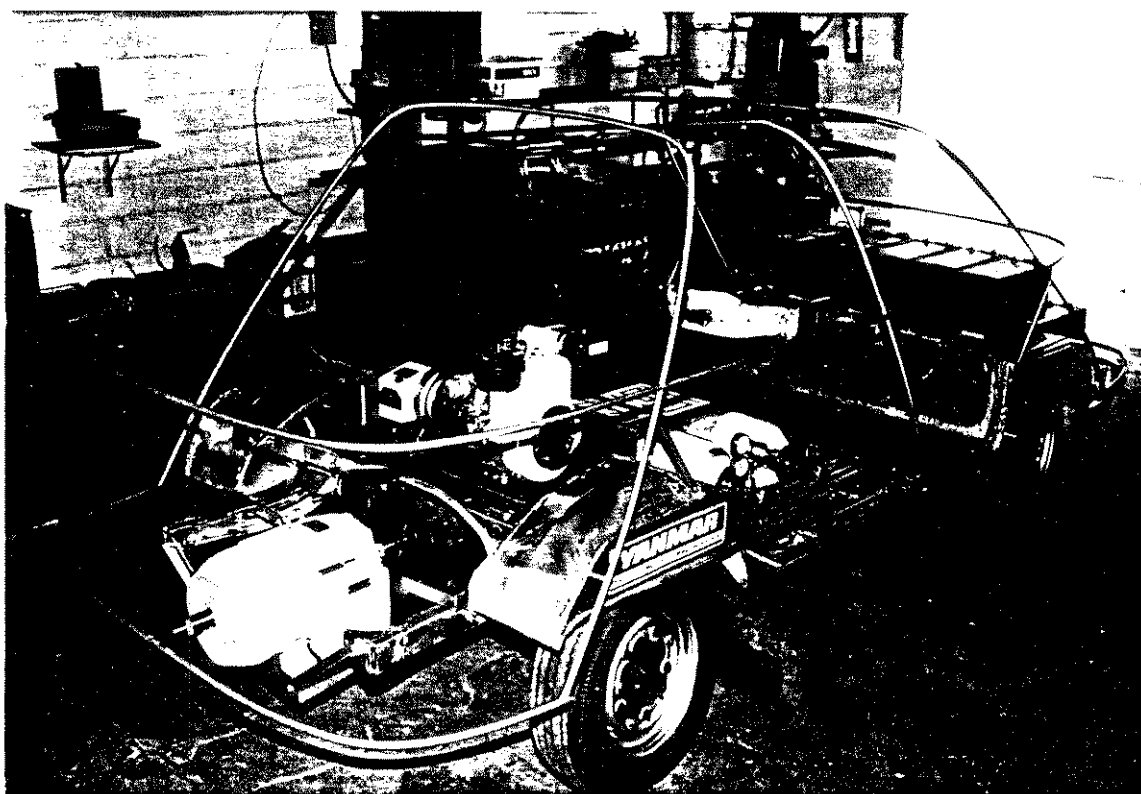


Figura 31 - Fase inicial de construção do protótipo (vista lateral posterior).

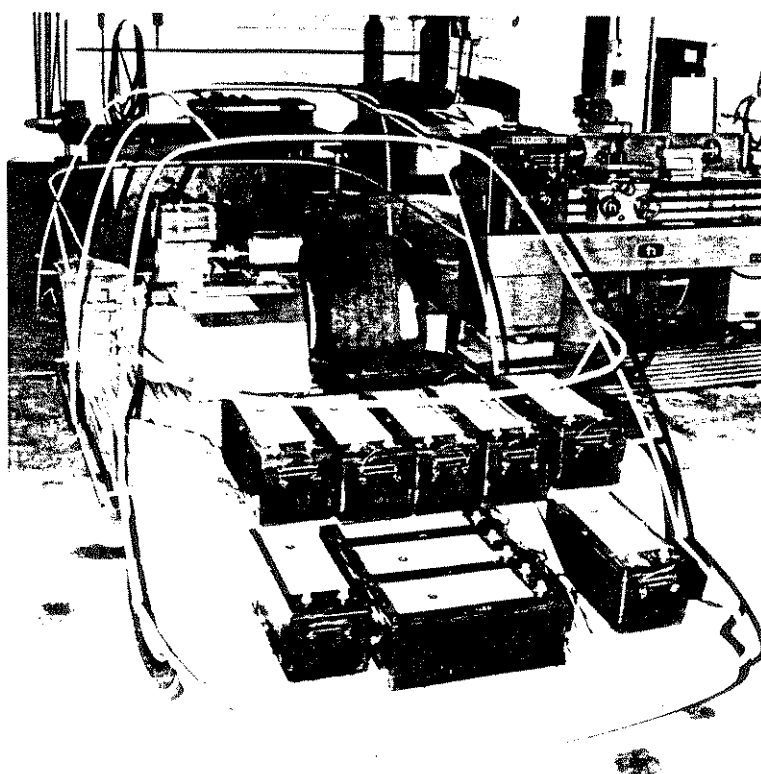


Figura 32 - Fase inicial da construção do protótipo (vista frontal).

As empresas que até então participavam do projeto mostraram um interesse acima do esperado, sendo que uma delas (Delco-Remy) fez uma visita ao Laboratório em março de 1993, em busca de informações sobre o andamento do projeto e sua fase de desenvolvimento. Ao receber as informações desejadas e ao conhecer o protótipo, mostrou grande interesse em ampliar seu apoio.

Neste ponto sentiu-se que com a divulgação do projeto poder-se-ia antecipar a viabilização das outras etapas que necessitariam de mais empenho, mais recursos, um número maior de pessoas envolvidas e um tipo de apoio mais abrangente, profundo e imediato que o recebido até então. Fazia parte da ideologia do projeto gastar o mínimo, da forma mais racional, buscando sempre o melhor resultado possível. Por outro lado, estaríamos colocando o protótipo para apreciação fora dos meios acadêmicos, de onde poderia vir o apoio necessário. Dessa forma, o enfoque não poderia ser exclusivamente acadêmico mas contemplar também outros aspectos, tornando o protótipo mais atraente. Abrangendo um público maior, proporcionaria maior retorno às empresas vinculadas ao projeto em forma de publicidade. Conseqüentemente, a sobrevivência do projeto estaria garantida, viabilizando a pesquisa numa área carente de verbas.

Paralelamente ao desenvolvimento tecnológico do projeto, que incluía a adaptação do motor gerador ao uso do hidrogênio, o levantamento das características dos modelos de inversores disponíveis no mercado e seus fabricantes e o estudo e planejamento das adaptações necessárias, iniciava-se o estudo da construção da carroceria do protótipo.

Os parâmetros que balizavam o projeto nessa fase eram os seguintes:

- Partia-se de um chassi adaptado de um veículo usado, já bastante deteriorado, incompatível com uma concepção moderna de *design*. Dentre os problemas relativos ao chassi pode-se destacar a altura do assoalho elevada, a posição original do assento do motorista (sobre o eixo dianteiro), a bitola dos eixos era estreita e o sistema de suspensão muito ultrapassado, além do excesso de peso da estrutura.

- A mão de obra disponível para a construção da carroceria era, na maior parte do tempo, composta de apenas duas pessoas: um técnico do LH2 e o próprio projetista, além da colaboração do coordenador do LH2 que, quando sobrava um tempo dentro de suas atribuições, também participava.

- O espaço físico, as ferramentas e os materiais básicos para a execução do trabalho eram fornecidos pelo LH2.

- O apoio oferecido pela Delco era essencial e foi o responsável pelo início da mudança de concepção do protótipo mas, por si só, não garantia a construção de todo o protótipo. Além disso, como a liberação de peças ou a execução de qualquer serviço externo dependiam da disponibilidade de verbas publicitárias que pudessem ser alocadas para o projeto naquele momento, não se podia estabelecer um ritmo constante de trabalho.

A fim de minimizar o problema, a Delco convidou seu distribuidor regional (Cedros Veículos e Peças) para participar do projeto garantindo, com esta parceria, maior agilidade. A partir daí, depois de um período de entrosamento com este novo participante, ficou mais fácil a definição de peças que comporia a carroceria. A maior parte das peças utilizadas para formar o veículo eram peças danificadas de veículos sinistrados, que foram escolhidas buscando compatibilizar funcionalidade dentro do *design* pré-estabelecido.

Esta opção visava montar a carroceria com o menor custo possível, sem por em risco os recursos fornecidos pelas empresas, caso algo impedisse a conclusão do protótipo. Os componentes novos requisitados eram preservados e só foram definitivamente incorporados ao protótipo já na fase de acabamento. A fim de não sobrecarregar as empresas que faziam parte do projeto até então, outras foram convidadas a participar, de acordo com o surgimento das necessidades nas etapas seguintes do desenvolvimento da carroceria.(ver relação no Apêndice 1)

Desta forma, toda a parte de fibra de vidro foi feita com a colaboração da Aerodina. Uma particularidade sobre esta fase deve ser destacada: normalmente, as peças de fibra de vidro, principalmente uma carroceria de veículo, requerem a confecção de um molde que,

devido a seu alto custo em comparação com a peça em si, só se justifica para a construção de uma determinada quantidade mínima de peças. Neste caso, todas as partes de fibra de vidro da carroceria foram executadas sem o uso de um molde. A modelagem foi feita no próprio veículo, através de um processo desenvolvido pela equipe responsável pelo protótipo no LH2.

A funilaria da parte de chapa metálica foi iniciada pela Cedros, que recuperou as partes referentes às portas, teto e vidro traseiro, uma vez que estas peças sofreram uma mudança no seu dimensionamento para poderem ser adaptadas ao protótipo. Posteriormente, a GPC (outra empresa participante), complementou a funilaria, fazendo também o acabamento e algumas importantes melhorias nas partes de fibra de vidro. Esta empresa foi também responsável por toda a preparação, acabamento e pintura das partes internas e externas do veículo. A Figura 33 mostra o veículo na GPC, no início do trabalho desta fase.

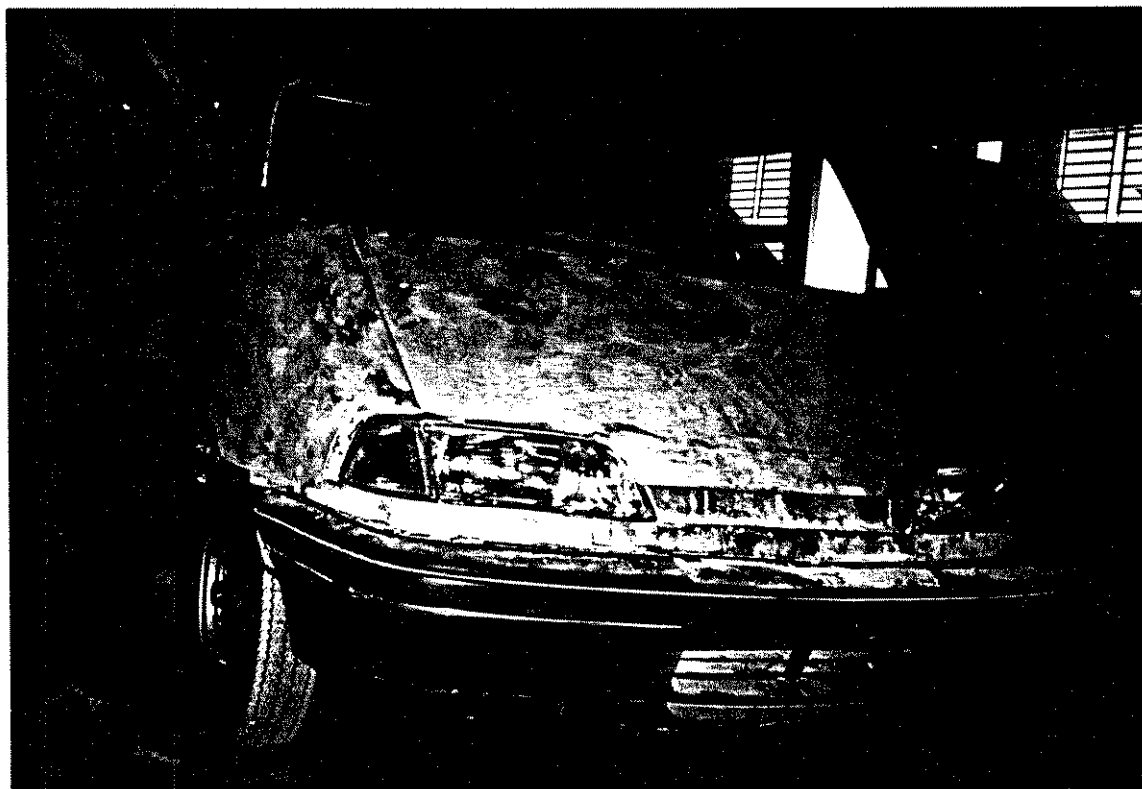


Figura 33 - Fase de aprimoramento e acabamento da carroceria na GPC.

Os vidros foram fabricados especialmente para o protótipo pela Fanavid e posteriormente colocados pela Vidrocar. Aqui também se faz necessário um parêntese. Todos os vidros do veículo possuem dimensões não encontradas no mercado. A confecção de um vidro curvo temperado é um processo que exige um molde específico para cada tamanho e tipo de vidro. Estes moldes são caros e bastante trabalhosos e são feitos por mão de obra especializada da própria fábrica. Além disso, o processo de moldagem por calor é conjugado com o de têmpera, sendo que o equipamento é reajustado para cada novo modelo, razão pela qual são processados grandes lotes de um mesmo tipo de vidro por vez. Normalmente, só as grandes montadoras têm o privilégio de obter vidros especiais para um determinado protótipo, por óbvias razões. Os pequenos fabricantes de veículos especiais, bem como os que trabalham com transformação de veículos de fábrica (caso de fabricantes de pick-ups especiais do tipo cabine dupla), não só precisam arcar com todos os custos de desenvolvimento dos moldes, como também só são atendidas se a quantidade mínima for economicamente viável. Desta forma, só os grandes e bem estruturados clientes têm acesso a vidros especiais.

A forração da cabine com revestimentos e carpete, a colocação de película de proteção solar nos vidros e a adaptação de máquinas elétricas nos vidros das portas ficou a cargo da empresa Falantão.

A rodas modelo R-780 16"x7,5". especial, tipo exportação, com pneus de perfil baixo, foram fornecidas pelo Rodão.

O grafismo foi desenvolvido em conjunto com os *designers* da 3M, empresa que colaborou na confecção dos mesmos. A Figura 34 mostra o veículo já acabado no pátio do Laboratório de Hidrogênio.



Figura 34 - O Protótipo com a sua parte externa já concluída.

5 - CONCLUSÃO

Como foi visto anteriormente, a busca de alternativas aos combustíveis fósseis se faz necessária hoje, muito mais pelos problemas ambientais do que pela própria futura escassez dos derivados de petróleo.

Atualmente os preços destes combustíveis estão estabilizados em patamares relativamente baixos. A conscientização da gravidade dos problemas ambientais ainda está restrita a alguns países industrializados e grupos ecológicos. O desenvolvimento de alternativas de novas fontes de energia e suas aplicações em veículos automotivos, de forma mais séria e objetiva, tem se restringido a esses países. Sabe-se que uma nova tecnologia

energética costuma levar um período de 5 a 30 anos para ser adotada [4]. Se faz necessário então, o estudo e desenvolvimento de possíveis opções com maior empenho e rapidez, antecipando-se aos fatos, a fim de se alcançar uma possível solução antes que o tema deixe de ser especulação dentro de uma perspectiva futura, e torne-se necessidade imperiosa presente.

Muitas das principais indústrias automobilísticas e laboratórios de pesquisa de países industrializados têm se mobilizado na busca de opções, fazendo maciços investimentos para tanto. O Brasil não possui uma indústria automobilística essencialmente nacional. Todas as principais montadoras aqui instaladas estão subordinadas às suas matrizes no exterior. Sendo assim, o País não tem como contar com a principal fonte de recursos de grande monta, dos participantes do seleto grupo de países que pesquisam alternativas para o cobiçado e forte setor automobilístico. A dependência de recursos governamentais de nossas universidades e centros de pesquisa desestimula o empenho neste sentido, principalmente no atual quadro de dificuldades econômicas que o País tem atravessado.

Por outro lado, o Brasil possui bons centros de pesquisa, além de um corpo de pesquisadores de comprovada competência e habilidade em enfrentar dificuldades, o que já faz parte das características dos brasileiros. Partindo-se daí, buscou-se criar condições de desenvolver, no campo prático, um veículo com as características da proposta energética apresentada.

A finalidade era desenvolver um veículo totalmente não poluente (*emissão zero*), que tivesse como fonte energética o sistema solar-hidrogênio. Este sistema funcionaria fora do veículo, gerando eletricidade através da conversão fotovoltaica. Esta seria acumulada produzindo-se hidrogênio eletrolítico armazenado em tanques de hidretos que, por sua vez, abasteceria o veículo elétrico que utilizaria células combustíveis em substituição à maior parte das baterias convencionais, normalmente utilizadas neste tipo de veículo.

Porém um veículo com a concepção ideal exigiria grandes recursos para o desenvolvimento de equipamentos específicos e, principalmente, para o melhor aprimoramento das

células combustível, pois trata-se de tecnologia recente que carece proporcionar maior durabilidade e menor custo de seus componentes para que possa ser utilizada em larga escala.

Foi preciso dividir a execução deste projeto em etapas, para que fosse possível estudar e aprimorar cada componente, até se chegar a versão final. Partiu-se então para a execução de um veículo básico, que se utilizaria de equipamentos de linha das indústrias, alguns com pequenas modificações, pois estes que não foram dimensionados para esta finalidade. Procurou-se atender as necessidades mínimas de um veículo para uso urbano.

As especificações gerais do veículo como: potência do motor, quantidade energética e tipo de arranjo das baterias, assim como a escolha do tipo de sistema motor/controle estão em conformidade com os veículos elétricos atualmente em circulação no Japão. (ver anexo 2)

Até a presente data, a estrutura do veículo está pronta, faltando apenas algumas poucas complementações, que para a fase inicial de testes não são imprescindíveis (ligações elétricas do próprio veículo como faróis, lanternas, buzina etc.). O funcionamento do conjunto motor-inversor já foi testado em bancada e ajustado no próprio veículo. Os testes em pista começam ainda nesta fase e a partir daí os primeiros dados técnicos serão obtidos. Só então poder-se-á iniciar o trabalho de aprimoramento dos diversos componentes, a fim de otimizar todo o conjunto e ser possível estabelecer melhores parâmetros para os veículos que serão desenvolvidos nas próximas etapas

REFERÊNCIAS

1. World Development Report 1992, Development and The Environment. Publicação do Banco Mundial, Oxford University Press, 1992.
2. Hidrogen Energy Progress VIII, vol.1, 1990.
3. Veja, 04/09/1991, pg. 88. Editora Abril, 1991.
4. Paz, W. "Energia Solar e Fontes Alternativas". Hemus Livraria e Editora Ltda., 1991.
5. Gotteberg, A.C. "Célula Solar Simplificada". Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1987.
6. Green, M.A. "Operating Principles, Technology and System Applications". The University of New South Wales, 1986.
7. Friberg, R. "Aphotovoltaic Solar-Hydrogen Power Plan for Rural Electrification in India. Part 1: General Survey of Technologies Applicable Whithin The Solar-Hydrogen Concept". Int. J. Hydrogen Energy, vol. 18, nº 10, pp. 853-882. Pergamon Press, 1993.
8. Hamakawa, Y. "Recent Advances in Solar Photovoltaic Technologies in Japan". Solar Energy Materials, 23, pp. 139-151. North-Holand, 1991.
9. Coiante, D. e Barra, L. "Can Photovoltaic Become an Effective Energy Option?" Solar Energy Materials and Solar Cells, 27, pp. 77-89. North-Holand, 1992.
10. Da Silva, E.P., "Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio". Editora da UNICAMP, 1992.

11. DeLuchi, M.A. "Hydrogen Vehicles: An Evaluation of Fuel Storage, Performance Safety, Environmental Impacts and Cost". Int. J. Hydrogen Energy, vol. 14, ° 2, pp. 81-130. Pergamon Press, 1988.
12. Bottura, C.P. e Barreto, G. "Veículos Elétricos". Editora da UNICAMP, 1989.
13. Como Funciona - Fascículo 10. Enciclopédia de Ciência e Tecnologia. Editora Abril, 1975.
14. Bravo, V. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1992.
15. "Bateria Beta: O Momento Oportuno". Revista São Paulo Energia, ano VI, nº 50, pp. 13-16. Departamento de Comunicação da CESP, 1989.
16. Kordes, K.V. "Batteries Vol.2 - Lead-Acid Batteries and Electric Vehicles". Union Carbide Corporation, Battery Products Division, Technology Laboratory, Parma, Ohio, USA.
17. Aaslund G. e Cooper D. SAB Nife. Catálogo da Empresa Nife Brasil Sistemas Elétricos Ltda. Eurobat - Association of European Accumulator Manufacturers. Alkaline Accumulator Section.

PROJETO VEGA

VEÍCULO URBANO COM TRAÇÃO SOLAR/HIDROGÊNIO/ELETRICIDADE

RELAÇÃO DE EMPRESAS COLABORADORAS

*** YANMAR DO BRASIL S.A.**

a) Av. Dr. Gastão Vidigal, 2001

V. Leopoldina - CEP 05314-000 São Paulo - SP

b) Av. Presidente Vargas, 1400

CEP 13330-000 - Indaiatuba - SP

Equipamento: conjunto motor-gerador GM G 2500 110V de 3 HP, com partida elétrica.

*** DELCO**

Al. Santos, 647 - 13º andar

CEP 01419-901 - São Paulo - SP

Equipamentos: baterias de descarga profunda DELCO 2000, 100 Ah;
componentes da carroceria e acessórios.

*** WEG MOTORES S.A.**

R. Venâncio da Silva Porto, 399

CEP 89250-600 - Jaraguá do Sul - SC

Equipamento: motor trifásico TEX31 20CV de 20 HP, com enrolamento para 75 V.

*** WEG AUTOMAÇÃO LTDA.**

R. Joinville, 300

Cx. P. 420 - CEP 89256-900 - Jaraguá do Sul - SC

Equipamento: conversor de frequência série CFW-03 de 88kVA e 135 A

*** CEDROS VEÍCULOS E SERVIÇOS LTDA.**

Av. Barão de Itapura, 2221/2233

CEP 13076-000 - Campinas - SP

Equipamentos: componentes da carroceria e acessórios marca GM.

Serviço: acabamento das partes metálicas da carroceria

*** HELIODINÂMICA S.A.**

Rod. Raposo Tavares, km 41

CEP 06730-970 - Vargem Grande Paulista - SP

Equipamento: painéis fotovoltaicos de silício monocristalino, para 200 W, colocados sobre a carroceria do veículo.

*** AERODINA - EQUIPAMENTOS AUTOMOTIVOS LTDA.**

Av. Senador Antonio Lacerda Franco, 455

CEP 13050-380 - Campinas - SP

Serviço: conformação e acabamento das partes de fibra de vidro da carroceria.

- * **FALANTÃO - NETO SONORIZAÇÃO E ACESSÓRIOS PARA AUTOS LTDA.**
R. Coronel Quirino, 701
CEP 13025-001 - Campinas - SP
Serviço: acabamento interno e nos vidros do veículo.

- * **G.P.C. REPARAÇÕES AUTOMOBILÍSTICAS LTDA.**
R. São Luís do Paraitinga, 904/912
CEP 13031-070 - Campinas - SP
Serviço: funilaria, acabamento da carroceria, pintura e acabamento externo.

- * **RODÃO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.**
Divisão Industrial
Av. Alfredo Achcar, 970
CEP 13280-000 - Vinhedo - SP
Componente: rodas cromadas.

- * **FANAVID - FÁBRICA NACIONAL DE VIDROS DE SEGURANÇA LTDA.**
R. 12 de Setembro, 392/426
CEP 02052-000 - São Paulo - SP
Componentes: pára-brisa especial e vidros laterais

- * **K.S. RECUPERADORA**
Av. Dr. Carlos de Campos, 414
CEP 13032-690 - Campinas - SP
Serviço: adaptação dos pára-choques.

- * **3M DO BRASIL**
Via Anhanguera, km 110
CEP 13170-970 - Sumaré - SP
Componentes: faixas decorativas laterais e logotipos das empresas colaboradoras.

- * **AUTO VIDROS SANTO ANTÔNIO**
R. Dr. Betim, 295
CEP 13042-020 - Campinas - SP
Serviço: instalação e vedação dos vidros do veículo.

電気自動車主要諸元表 SPECIFICATIONS FOR ELECTRIC VEHICLE

ANEX 02

89

車名・型式		ニッサンFEV NISSAN FEV	ニッサンセドリック EV NISSAN CEDRIC ELECTRIC VEHICLE	寒冷地向け電気自動車「マイルド」 ELECTRIC VEHICLE FOR COLD CLIMATIC CONDITION「MILD」	電気自動車(ドリームミニ) ELECTRIC VEHICLE (DREAM MINI)	IZA IZA
会社名		日産自動車株式会社 NISSAN MOTOR CO., LTD.	日産自動車株式会社 NISSAN MOTOR CO., LTD.	東北電力株式会社 TOHOKU ELECTRIC POWER CO., INC.	中部電力株式会社 CHUBU ELECTRIC POWER CO., INC.	東京電力株式会社 TOKYO ELECTRIC POWER CO., INC. 株式会社東京アールアンドデ TOKYO R&D CO., LTD.
主要寸法	全長 m	3,995	4,690	3,410	2,465	4,870
	全幅 m	1,698	1,695	1,618	1,395	1,770
	全高 m	1,290	1,425	1,444	1,430	1,260
質量	空車質量 kg	900	1,600	1,598	680	1,573
	最大積載量 kg	—	—	60	—	—
	乗車人員 人	4 (大人2 + 幼児2)	4	2	2	4
性能	自動車総質量 kg	1,010 (大人2名乗車時)	1,820	1,768	790	1,793
	最高速度 km/h	130	100	90	80	176
	登坂能力 tan θ	0.35	0.24	0.18 (25km/h)	0.26	0.33
	最小旋回半径 m	5.2	5.5	4.81	3.5	6.5
	一充電走行距離 km (km/h 定速走行時)	250 (40)	120 (40)	200 (40)	120 (40)	548 (40)
電動機	種類	交流誘導電動機 A.C. induction motor	交流誘導電動機 A.C. induction motor	直流分巻電動機 D.C. shunt motor	ブラシレス直流電動機 D.C. brushless motor	ブラシレス直流電動機 D.C. brushless motor
	定格出力・電圧・時間 kW・V・h	20 (10×2)・200・1	20 (10×2)・200・1	12・120・1	3.5×2・120・連続 3.5×2・120・Continuous	6.8×4・288・連続 6.8×4・288・Continuous
制御方式		IGBTインバータ制御方式 IGBT inverter	IGBTインバータ制御方式 IGBT inverter	サイリスタチョップ制御方式 Thyristor chopper	トランジスタチョップ制御方式 Transistor chopper	IGBTチョップ制御方式 IGBT chopper
タイヤ	前輪	165/65 R14	205/65 R15	195/60 R14	155/60R13 69H	205/50R 17
	後輪	165/65 R14	205/65 R15	195/60 R14	155/60R13 69H	205/50R 17
電池	種類・形式	密閉形・ニッケル・カドミウム電池 Sealed Nickel-Cadmium	密閉形・鉛電池 Sealed Lead-acid	鉄・ニッケル電池 Iron-Nickel	密閉形ニッケル・カドミウム電池・VON70A-10 Sealed Nickel-Cadmium	ニッケル・カドミウム電池 VON100 Nickel-Cadmium
	容量・電圧 Ah/HR・V	35/5・12	25/5・12	165/3・6	70/5・12	100/5・12
	積載個数 個	23	46 (23×2並列)	20	10	24
	総電圧 V	276	276	120	120	288
	補助電池 形式・電圧 V	LCR・12	50D20R・12	28B17L・12	—	鉛電池12・Lead-acid・12
充電装置	設置形式	車載形 On-board	別置形 Stationary	別置形 Stationary type	車載形 On-board type	別置形 Stationary type
	充電制御方式	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	超急速充電 Super quick charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge
	交流入力電源 相数・電圧・電流 φ・V・A	1・100・15	3・400・160 Or 3・200・320	3・200・15	1・200・10	3・200・50
	標準充電時間 h	8	6分間 (40%補充電) 6 minutes (40%)	8	8 ~ 10 (DOD80%より充電)	8

車名・型式		エレクトリック ジェッタ ELECTRIC JETTA	スズキエブリクスーパーマルチプル電気自動車 SUZUKI EVERY SUPER-MULTI PURPOSE ELECTRIC VEHICLE FOR MULTI PURPOSE	ダイハツハイゼットバン電気自動車 DAIHATSU HIJET VAN ELECTRIC VEHICLE	ダイハツラガー電気自動車 DAIHATSU RUGGER ELECTRIC VEHICLE	三菱ランサー電気自動車 MITSUBISHI ELECTRIC LANCER
会社名		東京電力株式会社 TOKYO ELECTRIC POWER CO., INC.	スズキ株式会社 SUZUKI MOTOR CORPORATION	ダイハツ工業株式会社 DAIHATSU MOTOR CO., LTD	関西電力株式会社 THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.	三菱自動車工業株式会社 MITSUBISHI MOTORS CORPORATION
主要寸法	全長 m	4,315	3,295	3,295	3,980	4,185
	全幅 m	1,665	1,395	1,395	1,580	1,635
	全高 m	1,415	1,870	1,840	1,890	1,485
質量	空車質量 kg	1,200	1,345	1,300	2,400	1,680
	最大積載量 kg	—	200 (100)	200 (100)	—	—
	乗車人員 人	4	2 (4)	2 (4)	2	4
性能	自動車総質量 kg	1,530	1,655 (1,665)	1,610 (1,620)	2,510	1,900
	最高速度 km/h	120	75	80	90	110
	登坂能力 tan θ	0.34	0.45 (24°25')	0.3	0.4	0.3
	最小旋回半径 m	右4.95 左4.85	3.8	3.6	6.1	4.9
	一充電走行距離 km (km/h 定速走行時)	190 (50)	230 (40)	140 (40)	200 (40)	200以上 200 or more (40)
電動機	種類	直流他励電動機 D.C. sparate motor	直流分巻電動機 D.C. shunt motor	直流分巻電動機 D.C. shunt motor	直流分巻電動機 D.C. shunt motor	直流分巻電動機 D.C. shunt motor
	定格出力・電圧・時間 kW・V・h	13.5・90・連続 13.5・90・continuous	14・125・1	14・112・1	20・120・1	20・120・1
制御方式		サイリスタチョップ・トランジスタチョップ併用制御方式 Thyristor and transistor chopper	MOS・FETチョップ制御方式 MOS・FET chopper	トランジスタチョップ制御方式 Transistor chopper	トランジスタチョップ制御方式 Transistor chopper	MOS FETチョップ制御方式 MOS FET chopper
タイヤ	前輪	175/65R14	145R12LT-6PR	145R12-6PR	215R15	165R14/6PRLT
	後輪	175/65R14	145R12LT-6PR	145R12-6PR	215R15	165R14/6PRLT
電池	種類・形式	ナトリウム・硫黄電池 Sodium-Sulfur	ニッケル・亜鉛電池 Nickel-Zinc	密閉形・鉛電池 Sealed Lead-acid	鉛電池・EY-150 Lead-acid	密閉形・ニッケルカドミウム Sealed Nickel-Cadmium
	容量・電圧 Ah/HR・V	140/2・180	240/3・13.2	170/5・12	150/5・12	100/5・12
	積載個数 個	1	10	10	20 (10×2)	20
	総電圧 V	180	132	120	120	120
	補助電池 形式・電圧 V	鉛電池12・Lead-acid・12	NT60-S4・12	28B17L・12	95E41R・12	34B19R
充電装置	設置形式	車載形 On-board type	別置形 Stationary type	車載形 On-board type	別置形 Stationary type	車載形 (別置形充電器も使用) On-board type
	充電制御方式	定電流充電 Constant current charge	準定電圧自動充電 Modified constant voltage charge	準定電圧充電 Modified constant voltage charge	準定電圧充電 Modified constant voltage charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current
	交流入力電源 相数・電圧・電流 φ・V・A	1・200 ~ 220・16	3・200・20	1・200・20	3・200・34	1・200・39
	標準充電時間 h	8 ~ 9	10	8	8	8

トヨタタウンエースバン電気自動車 TOYOTA TOWNACE VAN ELECTRIC VEHICLE	ニッサン プレジデント EV NISSAN PRESIDENT ELECTRIC VEHICLE	マツダボンゴ電気自動車(放送中継車) MAZDA ELECTRIC BONGO(BROADCASTING VEHICLE)	CO.OP EV 2000 いすゞエルフ電気配送トラック ISUZU ELF ELECTRIC TRANSPORTER	中部電気バス CHUDEN ELECTRIC VAN	name-type		
トヨタ自動車株式会社 TOYOTA MOTOR CORPORATIN	日産自動車株式会社 NISSAN MOTOR CO., LTD.	マツダ株式会社 MAZDA MOTOR CORPORATION	コープ電動車両開発株式会社 CO-OP ELECTRIC VEHICLE DEVELOPMENT CORPORATION いすゞ自動車株式会社 ISUZU MOTORS LIMITED	中部電力株式会社 CHUBU ELECTRIC POWER CO., INC	company		
4,360	5,225	4,610	4,945	4,360	overall length	m	dimensions
1,670	1,830	1,690	1,795	1,685	overall width	m	
1,930	1,425	3,650	2,800	1,905	overall height	m	
1,970	1,990	1,980	4,860	1,880	unladen vehicle weight	kg	weight
250(150)	—	—	1,250	250(100)	maximum pay load	kg	
2(4)	5	7	2	2(4)	seating capacity		
2,330(2,340)	2,265	2,365	6,220	2,240(2,200)	gross vehicle weight	kg	performance
85	40	75	110	85	maximum speed	km/h	
0.3	0.19	0.3	0.32	0.3	hill climbing ability tan θ		
4.5	6.0	4.6	5.2	4.5	minimum turning radius	m	
160 (40)	100 (20)	80 (20)	100 (40)	160 (40)	range	km (at const. speed-km/h)	motor
流かこ型誘導電動機 C. induction motor	直流分巻電動機 D.C. shunt motor	直流分巻電動機 D. C. shunt motor	直流分巻電動機 D. C. shunt motor	交流かこ型誘導電動機 A. C. induction motor	kind		
20・120・1	12・100・1	12・90・1	33・108・1	20・120・1	rated output・voltage・hour kW ・ V ・ h		
トランジスタインバーター制御方式 ransistor inverter	サイリスタチョップ・トランジスタチョップ併用制御方式 Thyristor and transistor chopper	サイリスタチョップ・トランジスタチョップ併用制御方式 Thyristor and transistor chopper	トランジスタチョップ制御方式 Transistor chopper	トランジスタインバーター制御方式 Transistor inverter	control system		
175R14-6PRLT	215/65R15	185R14-6PRLT	7,00R15-12PRLT	165R13-6PRLT	front		tire
175R14-6PRLT	215/65R15	185R14-8PRLT	7,00R15-12PRLT	165R13-8PRLT	rear		
電池 ED150A 1-acid	鉛電池・ED150A Lead-acid	鉛電池・ED150 Lead-acid	鉛電池・ED150P(+太陽電池) Lead-acid	密閉形ニッケルカドミウム電池・VON150-10 Sealed Nickel-Cadmium	kind・type		main battery
150/5・12	150/5・12	150/5・12	150/5・12	150/5・12	rated capacity・voltage Ah/HR・V		
16	10	10	27	16	number		
192	120	120	108	192	total voltage	V	
80D26R・12	28B17R・12	34B19L・12	726	55D23L・12	type・voltage	V	
別置形 Stationary type	別置形 Stationary type	別置形 Stationary type	車載形 On-board type	車載形 On-board type	type of setting		charger
準定電圧充電及び急速充電 Modified constant voltage charge or quick charge	準定電圧充電 Modified constant potential charge	準定電圧充電 Modified constant voltage charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	charging control system		
3・200・60	3・200・15	3・200・15	3・200・40	1・200・30	A.C.input phase・voltage・current φ ・ V ・ A		
8又は1(40%補充電)	8	8	6	8～10	rated charging hour		

ホンダ CUV-ES HONDA CUV-ES	電気スクーター R&D ES600 ELECTRIC SCOOTER R&D ES600	電気スクーター R&D E24B ELECTRIC SCOOTER R&D E24B	name-type								
本田技研工業株式会社 HONDA MOTOR CO., LTD.	株式会社東京アールアンドデー TOKYO R&D CO., LTD.	株式会社東京アールアンドデー TOKYO R&D CO., LTD.	company								
1,750	1,725	1,600	overall length	m	dimensions						
0.615	0.650	0.647	overall width	m							
1,020	0.990	0.995	overall height	m							
90	110	88	unladen vehicle weight	kg	weight						
16	—	—	maximum pay load	kg							
1	1	1	seating capacity								
145	165	143	gross vehicle weight	kg	performance						
60	53	42	maximum speed	km/h							
0.21	0.28	0.13	hill climbing ability tan θ								
1.9	1.50	1.8	minimum turning radius	m							
80 (30)	60 (30)	50 (30)	range	km (at const. speed-km/h)	motor						
ブラシレス直流電動機 C. brushless motor	直流ブラシレス電動機 D. C. brushless motor	ブラシレス直流電動機 D. C. brushless motor	kind								
0.58・48・1	0.6・48・1	0.6・48・1	rated output・voltage・hour kW ・ V ・ h	control system							
/M制御方式 /M(pulse wide modulator)control	トランジスタチョップ制御方式 Transistor chopper	トランジスタチョップ制御方式 Transitor chopper									
3.00-10-42J	3.00-10-4PR	3.00-10-4	front	tire							
3.00-10-42J	3.00-10-4PR	3.00-10-4	rear								
ニッケル亜鉛電池 Vickel-Zinc Alkaline	密閉形・鉛電池 Sealed Lead-acid	密閉形・鉛電池 Sealed Lead-acid	kind・type	main battery	battery						
34/1・24	30/5・12	24/20・12	rated capacity・voltage Ah/HR・V								
2	4	4	number								
48	48	48	total voltage				V				
—	—	—	type・voltage				V				
車載形 On-board type	車載形 On-board type	車載形 On-board type	type of setting				charger				
定電流(電圧、時間自動制御) Constant current charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	定電流定電圧充電 Constant voltage-constant current charge	charging control system								
1・100・6.8	1・100・5	1・100・4	A.C.input phase・voltage・current ϕ ・ V ・ A								
5	8	8	rated charging hour								

財団法人 日本電動車両協会

理事長 久米 豊 (※日本自動車工業会会長)

昭和51年8月に、我が国の電気自動車の研究開発、実験、普及の中心として、通商産業省のもと、自動車、電力、電機、電池、産業車両、自動車部品、タイヤ、鉛亜鉛等の関連業界により設立されたもので、電気自動車に関する科学技術調査、標準化、試用デモンストラーション、広報活動等を行っています。

JAPAN ELECTRIC VEHICLE ASSOCIATION

President Yutaka Kume

Japan Electric Vehicle Association, established in August 1976 under the guidance of the Ministry of International Trade and Industry, consists of automobile, electricity, battery, electric machine, industrial vehicle, auto parts, tires, lead and zinc, and other related industries interested in research, development, testing, and diffusion of electric vehicles in Japan. Scientific and technological research, standardization, trial demonstration, and public relations as regards the electric car are part of its activity.