Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Gilmar Barreto aprovada pela Comissão julgadora em 21/11/86 (em 2 volumes)

Celso Pascoli Bottura

VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA : CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE SEU DESEMPENHO E SEU PROJETO

(VOLUME I)

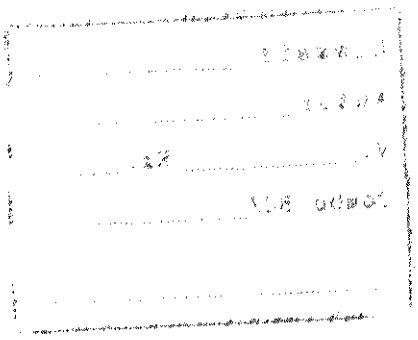
Autor : GILMAR BARRETO

ORIENTADOR : PROF. Dr. CELSO PASCOLI BOTTURA

TESE APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP - COMO PARTE DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

- NOVEMBRO DE 1986 -

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL



Aos

Meus Pais, Antonio e Iolanda

Meus Irmãos, Gilson e Giovana

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuiram para a realização deste trabalho.

Em especial,quero destacar meu orientador e amigo Prof. Dr. Celso Pascoli Bottura ,pelo apoio, incentivo e orientação que transcendem este trabalho.

Aos Professores Yaro Burian Jr. e Edson Bim pelo auxílio e orientação no tema máquinas elétricas.

Aos Professores Alvaro Geraldo Badan Palhares, Sigmar Maurer Deckmamn, Julio Cesar Moreira, Carlos Alberto de Castro Jr. e José Antenor Pomilio pelo apoio.

Aos amigos Marcelo Ganzarolli de Oliveira, Basílio Augusto S. Martins, Manoel Afonso de André Neto, José Tarcisio V. Aguillar, Helio Cesar Alves Seabra Salles, Jorge Salomão pelo auxílio na execução da parte experimental deste trabalho.

VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA :

CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE SEU DESEMPENHO E SEU PROJETO

(VOLUME I)

Resumo

Nota

Prefácio

CAPÍTULO I : CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

I.1 - Introdução, I.1

I.2 - Veículos com Diversidade Energética, I.3

I.3 - Histórico do Veículo Elétrico, I.6

I.4 - Vantagens e Desvantagens de Um Veículo Elétrico, I.11

I.5 - Sumário, I.19

I.6 - Bibliografia, I.19

CAPÍTULO II : VEÍCULOS ELÉTRICOS : CONFIGURAÇÕES E PARÂMETROS

II.1 - Introdução, II.1

II.2 - Configurações de Veículos Elétricos, II.4

II.3 - Parâmetros de Um Veículo Elétrico, II.17

II.4 - Sumário, II.39

II.5 - Bibliografia, II.40

CAPÍTULO III : FONTES DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

III.1 - Introdução, III.1

III.2 - Bateria Níquel-Ferro, III.4

III.3 - Bateria Níquel-Zinco, III.4

III.4 - Bateria Zinco-Cloro Hidratado, III.7

III.5 - Bateria Sódio Enxofre, III.8

III.6 - Baterias Diversas, III.9

III.7 - Bateria Chumbo-Ácido, III.10

III.8 - A Eletroquímica da Bateria de Chumbo-Ácido, III.12

III.9 - Modelamento de Uma Bateria Chumbo-Ácido, III.34

III.10 - Parte Experimental, III.50

III.11 - Sumário, III.53

III.12 - Bibliografia, III.54

(VOLUME II)

CAPÍTULO IV : SISTEMAS DE ACIONAMENTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

IV.1 - Introdução, IV.1

IV.2 - Motores Para Veículos Elétricos

1 - Introdução, IV.4

2 - Motor de Corrente Contínua, IV.11

3 - Motor de Corrente Alternada, IV.22

4 - Comparações, IV.40

IV.3 - Controle de Velocidade e Torque Para Veículos Elétricos

1 - Introdução, IV.44

2 - Controle Para Máquina de Corrente Contínua, IV.45

3 - Controle Para Máquina de Corrente Alternada, IV.66

IV.4 - Sumário, IV.103

IV.5 - Bibliografia, IV.104

V - MODELAMENTO DE VEÍCULO ELÉTRICO

V.1 - Introdução, V.1

V.2 - Elementos Essenciais de Um Modelo de Veículo Elétrico, V.3

V.3 - Projeto e Simulação de Componentes do Veículo, V.7

1 - Especificação da Fonte de Energia, V.7

2 - Especificação da Máquina Elétrica, V.39

V.4 - Análise Econômica : Considerações, V.52

V.5 - Análise Dinâmica : Considerações, V.55

V.6 - Predição de Desempenho Através da Simulação, V.56

V.7 - Otimização : Considerações, V.73

V.8 - Sumário, V.74

V.9 - Bibliografia, V.75

VI - ANTEPROJETO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

VI.1 - Introdução, VI.1

VI.2 - Como Projetar, VI.1

VI.3 - Exemplo Para Um Veículo Utilitário, VI.2

VI.4 - Sumário, VI.7

VI.5 - Bibliografia, VI.7

VII - CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

VII.1 - Introdução, VII.1

VII.2 - Descrição do Veículo, VII.2

VII.3 - Desempenho Apresentado, VII.10

VII.4 - Comparações e Conclusões Com o Modelo Proposto, VII.14

VII.5 - Sumário, VII.15

VII.6 - Bibliografia, VII.16

VIII - CONCLUSÕES e COMENTÁRIOS

- Conclusões, Comentários e Sugestões para trabalhos futuros, VIII.1

- APÊNDICE I

Características Gerais de Um Veículo Elétrico Utilitário

RESUMO

Neste trabalho objetiva-se dar uma introdução ao tópico veículo elétrico a bateria, abordando a finalidade deste meio de transporte, os parâmetros que determinam seu desempenho, a fonte de energia, o sistema de acionamento e o seu controle e finalmente baseados nos itens anteriores apresentamos como avaliar o desempenho de veículos elétricos e seu sistema de energia através de programas computacionais.

Como parte experimental para comprovação do modelo apresentado relatamos o projeto e construção de um veículo elétrico desenvolvido durante a elaboração deste trabalho e experimentos efetuados com baterias chumbo-ácido em diversas condições de operação.

Conclusões, comentários e sugestões para trabalhos futuros na área de veículos elétricos são elaboradas.

NOTA

1 - Os programas computacionais apresentados neste trabalho foram executados em um Computador de Bolso PC-1500 da Sharp.

A linguagem de programação utilizada foi BASIC (Beginer's All-purpose Symbolic Instruction Code).

Devemos ressaltar a grande versatilidade deste computador com sistema de "plotagem" em eixos X e Y, principalmente pelo fato de ser portátil e facilmente transportável dentro de um veículo.

2 - Este trabalho foi implementado através do Redator de Texto do Sistema I-7000 da Itautec.

Para facilitar o trabalho de digitação dos Capítulo V, VI, VII utilizamos como símbolo para exponenciação : Λ .

3 - A bibliografia foi citada em ordem de utilização.

PREFÁCIO

Sempre que discutimos sobre veículos elétricos nos fazem a seguinte afirmação : " Tem autonomia reduzida e custa mais caro que um veículo convencional".

Está idéia nos persegue até hoje e ainda irá durar por um longo tempo até que a sociedade se conscientize de que estamos todos navegando numa nave espacial chamada TERRA.

Dentro desta nave existe um almoxarifado, sem reposição imediata, chamado NATUREZA e neste temos uma substância denominada petróleo. Esta substância demorou milhões de anos para ser produzida e a usamos inadvertidamente sem pensar numa provável escassez. Neste momento a indústria petroquímica (por exemplo, fertilizantes e plásticos) deveria ter prioridade sobre esta reserva.

O petróleo, a nível internacional, baixou de preço, vamos gastar ("queimar") petróleo, desativar o Proálcool, desativar os programas de energia alternativa e novamente esqueceremos que o preço foi criado por nós e as requisições para buscar este material também, mas o estoque que nos reserva este almoxarifado não.

Os programas energéticos alternativos são fundamentais e devem ter prosseguimento independentemente de oscilações nos preços dos combustíveis convencionais.

O transporte eletrificado é mais recomendável que o transporte à combustão pois sua energia em grande parte, aqui no Brasil, provém de

um reservatório hídrico inesgotável e seu consumo não deriva produtos poluentes; além disso os veículos com motores a combustão interna são menos eficientes energeticamente que os veículos elétricos.

Estes foram alguns dos fatores que nos levaram a realizar este trabalho que está dividido em 8 Capítulos,conforme mostramos na FIG.1, nos quais abordamos o tema veículos elétricos a bateria.

No Capítulo I apresentamos a definição de um veículo elétrico e suas possíveis e variadas formas de utilização, ressaltando a versatilidade da obtenção de energia elétrica, por exemplo hídrica, solar ou eólica, para recarregar as baterias; sem dúvida este é um ponto a favor da utilização dos veículos elétricos.

No Capítulo II, diversas configurações de veículos elétricos são apresentadas. Parâmetros necessários para o cálculo das resistências aerodinâmica, rolamento e inercial envolvidas num veículo, aceleração, velocidade, potência, energia, número de paradas, desaceleração, distâncias percorridas e diagramas de energia são vistos. Ciclos padrões de percurso para aplicações em veículos elétricos são apresentados. Este capítulo é fundamental para a elaboração do Capítulo V.

No Capítulo III vemos as características necessárias que uma bateria deve possuir para atender as necessidades de um veículo elétrico. Dentro dos vários tipos de células disponíveis o acumulador de chumbo-ácido possui as condições para uma utilização atual até que os novos sistemas existentes se tornem viáveis (tecnologia dominada e custo baixo). Um histórico e as partes constituintes de uma bateria chumbo-ácido são revistas e comentadas.

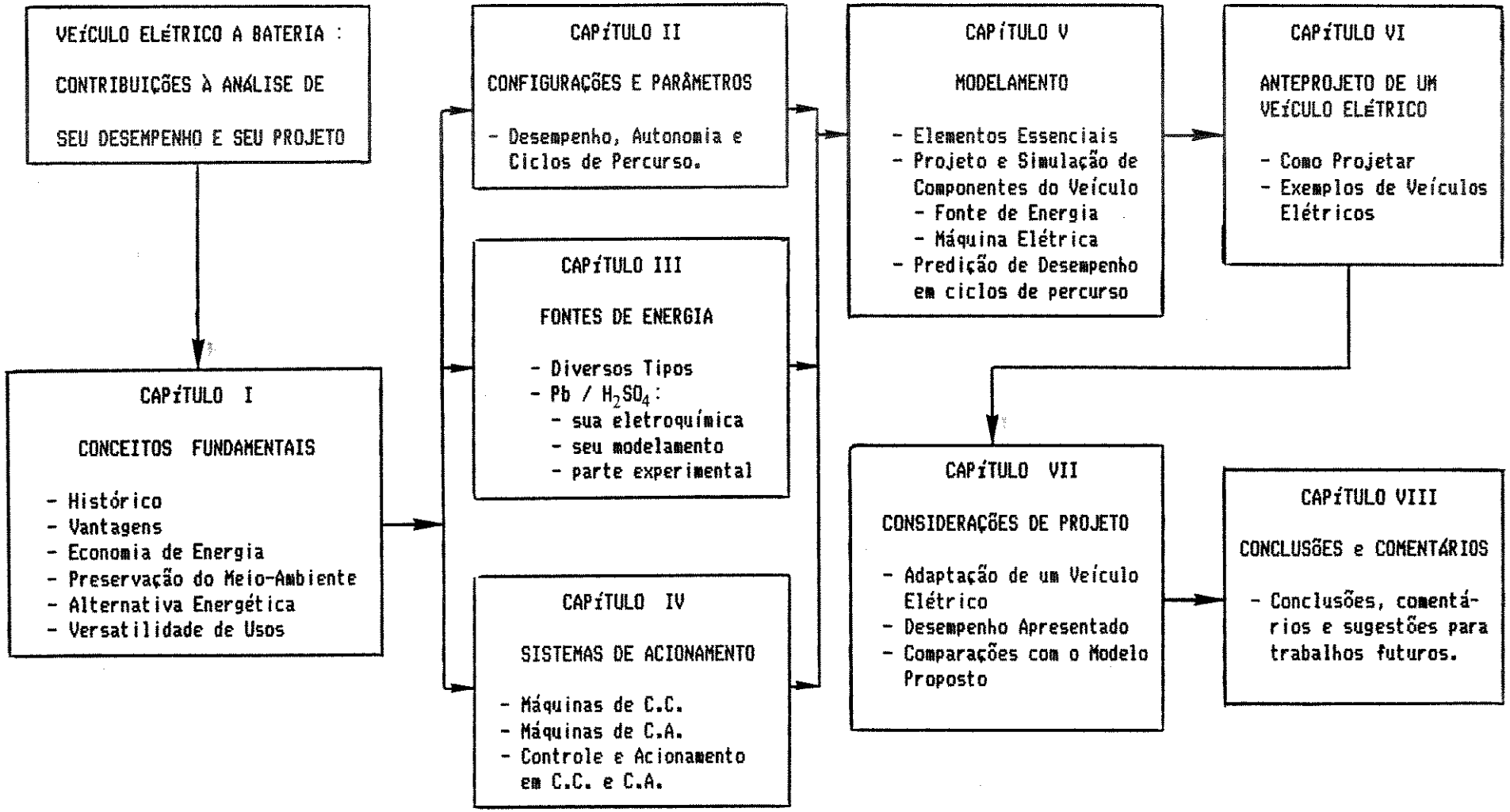


FIG.1 Fluxograma da Tese de Mestrado : "Veículo Elétrico a Bateria : Contribuições à Análise de Seu Desempenho e Seu Projeto"
Autor : Gilmar Barreto
Orientador : Celso Pascoli Bottura

O modelamento matemático das características elétricas da bateria utilizando relações para :

a - corrente versus tempo : Peukert

b - tensão nominal versus tempo e corrente : Shepherd

c - estado de carga

d - auto descarga

é apresentado. Utilizando uma bateria S.L.I.(Starting - Light - Ignition) de fabricação nacional testamos o modelo apresentado.

No Capítulo IV os diversos tipos de acionamento (máquinas elétricas e controle de torque e velocidade) para aplicações em tração são abordados. As condições para a utilização de uma máquina elétrica em um veículo são apresentadas. A seguir as relações matemáticas básicas de um motor de C.C. são vistas e os vários tipos de máquinas de C.C. são abordados e suas características físicas e de desempenho são avaliadas.

A máquina de corrente alternada é tratada de maneira similar a de corrente contínua. Comparações entre os dois tipos de máquina são feitas.

Para a máquina de corrente contínua mostramos algumas maneiras de se efetuar o controle de velocidade e torque ressaltando as diversas topologias de recortadores existentes.

Similarmente estudamos diversos tipos de controle de máquinas de indução e diversas topologias de inversores através das quais podemos efetuar o controle desejado.

Abordamos também o princípio de frenagem regenerativa.

No Capítulo V apresentamos uma classificação de modelos computacionais para serem utilizados em um projeto de veículos elétricos. A seguir elaboramos programas para :

- Cálculo das constantes de Peukert e Sherpherd para estimativa do desempenho de baterias chumbo-ácido.
- Cálculo da potência e da energia disponível em baterias chumbo-ácido.
- Avaliação da potência necessária e da eficiência de máquina elétrica em uma dada condição de torque e velocidade.
- Cálculo da energia consumida, potência necessária e distância percorrida de veículos elétricos em um dado percurso.

Ressaltamos que todos os programas computacionais apresentados são conversacionais.

Fizemos também considerações sobre aspectos econômicos, dinâmicos e de otimização de veículos elétricos.

No Capítulo VI apresentamos um procedimento para iniciar o projeto de um veículo elétrico. Através de comparações com veículos existentes pudemos prever a boa aplicabilidade do modelo proposto, apesar das dificuldades na obtenção de dados reais para os coeficientes aerodinâmico e de rolamento e dos valores estimados das eficiências.

No Capítulo VII mostramos como nosso veículo foi adaptado e utilizado. Com o programa computacional desenvolvido avaliamos a autono-

mia prevista deste veículo, a seguir comparamos este resultado com o obtido experimentalmente. Dados de um outro veículo elétrico foram analisados e comparados.

No Capítulo VIII apresentamos conclusões, comentários e sugestões para continuidade deste trabalho.

Pesquisas e desenvolvimentos na área de veículos à bateria só começaram a se intensificar na última década apesar dos veículos elétricos serem utilizados antes dos veículos convencionais com motores à combustão interna. Como toda tecnologia não convencional é preciso o apoio político social para esta atividade para obtermos resultados satisfatórios que dificilmente são obtidos a curto prazo.

Esperamos que este trabalho contribua de alguma maneira para atingirmos o objetivo de termos um veículo elétrico viável a nível social (baixo custo e autonomia elevada).

CAPÍTULO I

CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

I.1 INTRODUÇÃO

Quando projetamos um sistema composto por uma ou mais máquinas elétricas, um sistema de acionamento e controle de velocidade ou torque desta máquina destinada a transportar ou conduzir pessoas, objetos ou uma carga específica, estamos criando um Veículo Elétrico (VE). Um VE pode ser uma especificação de sistemas extremamente diversos (FIG. I.1).

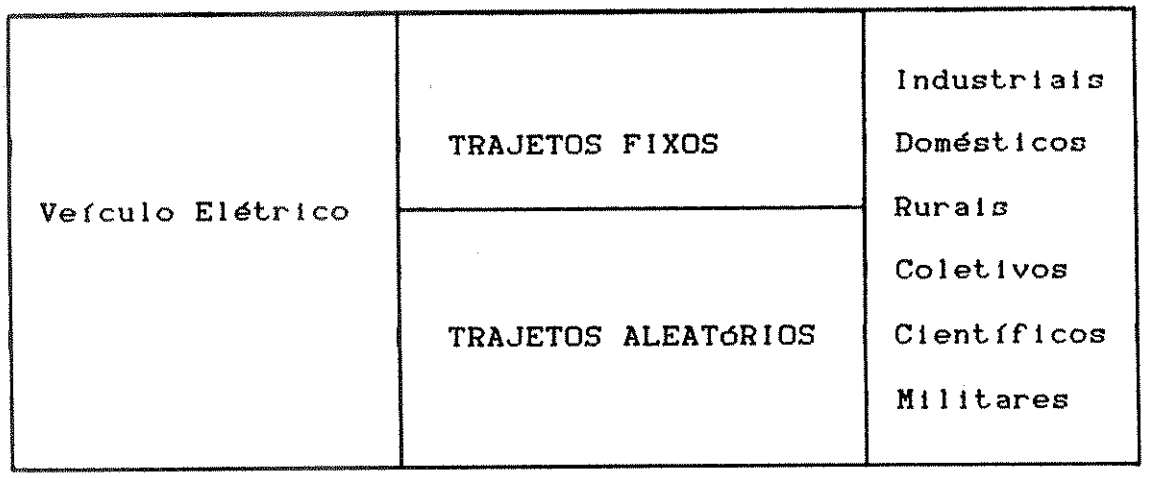


FIG.I.1 - Campo de Utilização dos VEs.

Na FIG.I.1, dividimos os VEs em dois grandes grupos: os de trajetos aleatórios e os de trajetos fixos.O que determina o grupo em que se encaixa um determinado tipo de veículo é o seu sistema de energia, ou seja, por exemplo um metrô ou trolebus obrigatoriamente deverá seguir uma rota pré-determinada pelos trilhos ou linhas de transmissão. Alguns exemplos de utilização de VEs podem ser vistos na tabela I.1.

Veículos Elétricos	TRAJETOS FIXOS	TRAJETOS ALEATÓRIOS
INDUSTRIAIS	esteiras pontes rolantes elevadores guinchos robôs	empilhadeiras carros utilitários robôs
DOMÉSTICOS	elevadores	robôs carros motocicletas cadeiras de rodas
COLETIVOS	trólebus metrô trens esteiras escadas rolantes bondes	ônibus veículos utilitários
RURAIS	tratores esteiras	tratores transporte de cargas
CIENTÍFICOS	robôs	submarinos, rôbos
MILITARES		submarinos, rôbos carros, caminhões motocicletas

Tabela 1.1 - Alguns exemplos de aplicações de VEs.

A diversidade dos sistemas existentes de VEs nos obriga a limitar a extensão deste trabalho para apenas um determinado tipo de aplicação de VE. Portanto, quando citarmos as expressão VE, estaremos nos referindo a carros e veículos utilitários.

1.2 - Veículos com Diversidade Energética

Uma dúvida que existiu no início deste trabalho foi por que desenvolver um estudo sobre VEs quando, tecnicamente,o Proálcool é um sucesso. Na safra 1984-1985 foram produzidos nove milhões de litros, ou cerca de cento e vinte mil barris equivalentes de petróleo por dia. Novas tecnologias permitiram reduzir em seis vezes ou mais o volume de vinhoto (subproduto poluente) produzido (para um litro de álcool - com tecnologia tradicional - são produzidos de treze a dezesseis litros de vinhoto). Os automóveis a álcool resolveram seus problemas técnicos, e o álcool está efetivamente substituindo a gasolina. O diesel, combustível responsável pela maior parte do transporte de cargas no país, poderá ser substituído por óleos de soja, dendê e babaçu. Para uma produção diária de quatro milhões e meio de barris (715000 m^3/dia) destes óleos as plantações destas oleaginosas precisariam ser ampliadas até 2 % do território nacional (170000 Km^2),a plantação total atual cultivada (lavouras) do Brasil é de 6 % (491000 Km^2).

Os programas alternativos agrícolas ,PROÁLCOOL e "PROóLEO", são viáveis e estratégicos para o Brasil, mas as áreas cultiváveis, que precisam ser adubadas e irrigadas não seriam melhor aproveitadas para a produção de cereais ?

Os números que sem dúvida dariam uma avaliação da melhor fonte energética, mas dificílmente teremos acesso a eles seriam :

1 - energia de 1 litro de gasolina / energia média gasta para a extração, transporte, refino e distribuição deste litro de gasolina.

2 - energia de 1 litro de álcool / energia média gasta para o cultivo, produção e distribuição deste litro de álcool.

3 - energia de 1 litro de óleo vegetal (soja, dendê, babaçu) / energia média gasta para o cultivo, produção e distribuição deste litro de óleo.

Mas no caso do transporte elétrico teríamos :

4 - energia total gerada por uma hidroelétrica / energia gasta para construção e manutenção desta hidroelétrica.

É evidente que a cada segundo que passa a relação acima correspondente a energia elétrica se torna maior, o veículo elétrico não seria uma boa solução ?

Até aqui, uma razão já nos é mostrada, mas temos outras. A própria definição da introdução deste trabalho já é uma,ou seja, a diversidade da utilização de um VE.Além destes argumentos há problemas atuais de poluição atmosférica nas grandes cidades. Reconhece-se, hoje, ser necessário adotarem-se medidas de controle da poluição atmosférica, simultaneamente com providências destinadas ao uso mais eficiente das fontes de energia disponível. Os automóveis são os maiores causadores de poluição atmosférica nos grandes centros urbanos,ao mesmo tempo em que sua utilização no tráfego representa um grande desperdício de energia, visto que, na maioria das vezes, circula com um ou dois passageiros. Além disso, a utilização do petróleo na indústria

petroquímica é mais nobre do que a sua simples combustão, vide Tabela I.2.

Gasolina	46%
G.L.P.	3%
Diesel e outros combustíveis	38%
Indústria petroquímica	3%
Subprodutos + perdas	12%

Tabela I.2 - Produção de derivados de petróleo em uma refinaria.

Portanto, a utilização de automóveis elétricos no tráfego urbano e suburbano das grandes cidades iria reduzir os problemas de poluição ambiental e sonora.

Sem dúvida, a grande vantagem de um VE com baterias é a forma sob a qual poderíamos obter a energia necessária para reabastecer este veículo. Entre as formas mais convencionais de energia, estariam a cedida pelas concessionárias, de origem hidroelétrica, a térmica, e, em menor escala, a energia nuclear. A diversidade de obtenção de energia elétrica para recarregar um conjunto de baterias é ampla : ela poderia ser de origem eólica, solar, ou ainda de biodigestores, o que sem dúvida, abre um horizonte para a utilização de VEs. Em propriedades rurais, onde o VE poderia ser um trator, suas baterias poderiam ser recarregadas com uma infinidade de alternativas energéticas disponíveis no campo (por exemplo uma microhidroelétrica).

I.3-Histórico do Veículo Elétrico

Em termos de passado, a história do carro elétrico antecede à do automóvel, da gasolina, e prossegue no tempo com maior ou menor intensidade, até os nossos dias,e com um futuro altamente promissor.

Para melhor compreender o VE, voltemos no tempo: em 1837, Robert Davison Aberdeen construía uma carruagem elétrica. O veículo era movido por uma bateria rústica de ferro-zinco, e impulsionado por um motor elétrico, já contendo todos os elementos básicos empregados nos modernos VEs.

Na Inglaterra, destacaram-se os veículos de tração elétrica feitos por Thomas Davenport, Moses Farmer, Ratcliffe Ward, e Water A. Bersey, que, em 1897, construiu os primeiros táxis elétricos para a London Eletric Cab Co.Ltd., que se mantiveram em operação por dois anos. Na França, experiências eram realizadas por Charles Jeantaud e Raffard, ao mesmo tempo em que Werner Siemens, na Alemanha, aperfeiçoava o motor elétrico. Assim, se por um lado,o carro a vapor começava a se impor, principalmente na área de transporte coletivo, o VE mantinha-se firmemente no páreo, mostrando-se ideal no trânsito urbano, onde o seu silêncio não assustava transeuntes nem os cavalos, e o seu sistema de tração não poluía o ambiente.

Sua época de ouro atingiu o máximo de 1890 até o final da primeira década deste século, com o surgimento de numerosas marcas de carros de passeio, táxis, comerciais e ônibus. Algumas dessas marcas chegaram mesmo a se tornar famosas, como a Baker, de Walter Baker e Fred White, a Columbia, a Detroit, a National, a Woods (veículos comerciais), a Eletric Carriage (táxis), a Studebaker e a Pope, todas

dos Estados Unidos; a Electromobile, a Suburban e a Electromotion (estas últimas, subsidiárias da Columbia), da Inglaterra; a Kriéger, de Louis Kriéger, e a Jeantaud, na França; Dora e Ausonia na Itália; Lloyd e Kuhlstein, na Alemanha, onde também eram fabricados os motores elétricos Porsche, para exportação, muito utilizados pelos veículos ingleses.

Por não envolverem qualquer tipo de combustão,os automóveis elétricos estavam livres de fuligem e de graxa, sendo assim muito limpos. Dispondo basicamente de um veículo com graduações para três, quatro, e até nove velocidades, não eram obrigados a carregar aquela parafernália de comandos, que era uma das características negativas dos carros a gasolina e a vapor.

Como consequência, contavam com a preferência dos profissionais liberais (médicos em especial), dos "lords" e "ladies", que podiam ir a seus consultórios, clubes e passeios pelos parques, sem serem afetados por fumaça, barulho e trepidações mecânicas. Como os motores e baterias ficavam escondidos sob a carroceria, os estilistas da época caprichavam na estética de seus modelos,dando-lhes uma nobre elegância, não compartilhada pelos barulhentos carros a gasolina, ou os fumacentos e quentes veículos a vapor.

Por volta do fim do século passado,um carro movido a bateria estabeleceu o primeiro recorde de velocidade em terra, na França. Em 1898, o quilômetro medido foi percorrido a uma velocidade média de 63 Km/h, e, em 1899, esse índice subia para 106 Km/h, conquistado por um belga, Camille Jenatzy, em seu carro elétrico em forma de torpedo, o "La Jamais Contente".

Aperfeiçoamentos técnicos permitiram ao norte-americano Charles Baker alcançar 137 Km/h por volta dé 1902. O mais recente recorde de velocidade para VEs foi obtido pelo "Silver Eagle", projetado pelas Eagle Picher Industries,nos Estados Unidos. Em agosto de 1971,em Bonneville, o carro completava o quilômetro medido a uma velocidade média de 245 Km/h. Entretanto, como veremos a seguir, o importante em um veículo elétrico não é sua velocidade máxima, mas sim sua autonomia.

O fato é que, com a virada do seculo, começou o declínio do automóvel de tração elétrica, como podemos observar pela tabela I.3, onde temos dados referentes aos Estados Unidos.

ANO	ELÉTRICO	GASOLINA	VAPOR
1899	1575	936	1681
1904	1425	18.699	1568
1909	3826	120.393	2374
1914	4669	564.385	-
1919	2498	1.649.127	-
1924	391	3.185.490	-
1929	757	4.454.421	-
1933	-	1.560.599	-

Tabela I.3 - Número de veículos construídos nos EUA no início do século.

Pela TAB.I.3 pode-se notar que com a descoberta de petróleo no Texas no ínicio deste século bem como com o desenvolvimento de técnicas de destilação em regime contínuo e o consequente barateamento dos

derivados de petróleo, todo o desenvolvimento tecnológico da indústria automobilística foi dirigido para veículos com motores a combustão interna.

Dessa forma, os veículos a gasolina e posteriormente, a diesel, rapidamente atingiram níveis de desempenho muito melhores que os veículos elétricos (maior velocidade, maior aceleração, menor peso).

Essa supremacia dos veículos a gasolina e a diesel foi reforçada pela supremacia do petróleo como vetor energético. A indústria do petróleo se desenvolveu a um ponto em que praticamente todos os seus derivados passaram a ser consumidos em larga escala.

Em 1936 na Inglaterra foi comercializado o Brougham, de Partridge Wilson, movido por uma bateria de 60 volts e 34 Ah, que possibilitava uma velocidade de 51,5 Km/h e um raio de ação de 97 Km por carga de bateria, mas as vendas foram mínimas.

Com a descoberta de vastos campos petrolíferos no Oriente Médio na década de 40 o preço internacional do petróleo caiu ainda mais e a indústria automobilística passou a ter uma produção cada vez mais massificada.

Enquanto isso as únicas variantes de veículos elétricos em uso eram o trólebus, empilhadeiras elétricas para uso industrial e veículos de golfe.

Estes foram alguns fatores responsáveis pelo declínio desse tipo de veículo, mas os princípais foram sua pequena autonomia (entre 50 a 100 Km), velocidade reduzida (em média, 50 a 100 Km/h), demora na re-

carga de baterias (em torno de 8 horas), e falta de infra-estrutura de atendimento ao usuário.

Quanto a infra-estrutura é bom salientar que atrás do motor a explosão temos quase noventa anos de investimentos em serviços de apoio. Vamos imaginar a situação contrária se só existissem VEs e quisessemos implantar o carro à explosão. Temos que pensar nos postos de serviço: hoje temos um posto de serviço a cada esquina, sem dúvida uma infra-estrutura com um custo extremamente elevada ou simplesmente inviável de ser totalmente remodelada ou adaptada.

No início da década de 70 o veículo elétrico começou a sair do estágio de hibernação em que se encontrava devido ao agravamento da poluição ambiental nos grandes centros urbanos. Na Inglaterra, por exemplo, veículos de entrega que operam durante a noite devem satisfazer condições de poluição acústica só atingíveis por veículos elétricos.

Com a eclosão e agravamento da crise do petróleo em meados e fins da década de 70 o veículo elétrico passou a ser considerado também como alternativa energética, principalmente em países com muita geração hidroelétrica ou termoelétrica a base de carvão

Era necessário, no entanto, aprimorar o veículo elétrico para que ele voltasse a ser competitivo com veículos a gasolina e a diesel.

Portanto o interesse atual por VEs tem aumentado substancialmente inclusive através de pesquisas que buscam aumentar a capacidade energética das baterias, bem como aumentar o desempenho dos motores e desenvolver técnicas e dispositivos de controle eletrônicos, em substi-

tuição aos reostatos, além de projetar veículos específicos para tração elétrica em oposição a mera adaptação dos veículos convencionais.

I.4 - Vantagens e Desvantagens de Um Veículo Elétrico.

A seguir listaremos uma série de vantagens e desvantagens de um VE em comparação com um veículo convencional (com motor a explosão).

I.4.1. Vantagens de Um Veículo Elétrico.

1 - Maior eficiência energética que um veículo convencional.

2 - Não produzem produtos poluentes.

3 - Alto torque com baixa rotação.

4 - Manutenção menos frequente e simplificada

5 - Diminuição do cansaço do motorista pela possibilidade de inexistência de mudanças de marchas.

6 - Uso imediato em quaisquer condições atmosféricas (apesar do sistema de baterias ter uma faixa de temperatura onde o seu rendimento é otimizado).

7 - Só consomem energia quando em movimento.

8 - São silenciosos quando em uso reduzindo deste modo a tensão do usuário.

9 - Alta durabilidade (podem ser modernizados com a substituição das carrocerias velhas, mantendo-se o chassis, motores, baterias).

10 - Alta durabilidade dos pneus e transmissões no caso de não haver embreagem e caixas de marcha.

11 - Podem ser utilizados em ambientes fechados (fábricas, depósitos, hospitais, túneis e minas) onde haja restrições à emis-

são de gases dos motores de combustão interna.

I.4.2 Desvantagens de Um Veículo Elétrico.

1 - Carga útil reduzida pelo peso considerável das baterias.

2 - Baixa autonomia por carga de baterias, o que limita suas aplicações

3 - Preço elevado das baterias e dos veículos porque estes não se beneficiam ainda dos métodos de fabricação empregados na produção de veículos convencionais.

4 - Energia e potência específicas reduzidas se comparadas com as disponíveis nos veículos convencionais.

5 - Reabastecimento de energia demorado por inexistência de serviço adequado.

6 - Possibilidade de queima do motor e do sistema de acionamento em caso de falha dos fusíveis de proteção.

I.4.3 Desvantagens de Um Veículo Convencional.

1 - Aquecimento e desgaste excessivo do motor, caixa de marcha, embreagem e freios, provocados pelas paradas e partidas frequentes e consequente aumento do consumo de gasolina ou de óleo diesel e da poluição atmosférica.

2 - Pequeno torque em baixa rotação, o que exige o uso de caixas de marcha. Isto reduz a eficiência total do sistema.

3 - Manutenção complicada.

4 - Consumo permanente de energia no trânsito quer estejam parados ou em movimento.

5 - Baixa eficiência total do veículo.

6 - São barulhentos.

7 - Vida útil do motor do VCI menor que a máquina elétrica.

8 - A existência de embreagens e caixas de marcha aumenta o desgaste dos pneus e diminuim a duração da transmissão.

9 - A necessidade de constante uso de embreagem e da caixa de marcha aumenta o cansaço dos motoristas por período de trabalho.

10 - Não podem ser utilizados em ambientes confinados tais como minas, escavações de túneis e transporte subterrâneo a não ser que se disponha de complicado e dispendioso sistema de ventilação.

I.4.4 Vantagens da Utilização de Um Veículo Convencional.

1 - Grande autonomia com velocidades constantes ou não.

2 - Capacidade de manterem-se em alta velocidade nas rampas íngremes.

3 - Facilidade e rapidez de reabastecerem-se nas cidades e nas estradas devido a ampla existência de postos de serviços criados ao longo de quase um século.

4 - Presença de energia e potência específicas elevadas.

I.4.5 Tabelas Comparativas

A seguir apresentaremos tabelas com dados comparativos de VE e veículos convencionais :

MOTORES AUTOMOTIVOS DE COMBUSTÃO (com bateria e controle de poluição)			
Motores 1975	Massa (Kg)	Eficiência (%)	Densidade (KW/Kg)
150 HP (112 KW) V-8	291	27	0,39
80 HP (60 KW) Diesel	255	32	0,23
150 HP (112KW) Tecnologia Avançada			
Gasolina	186	29	0,60
Diesel	289	35	0,39

TAB.I.4 Dados de Motores automotivos de combustão.

Densidade de Potência do Sistema (KW/Kg)	VCI	0.32
	VE	0.06
Densidade de Energia do Sistema (KWh/Kg)	VCI	2.00
	VE	0.02

* VE :1976, baterias de chumbo-ácido, com motor C.C. controlado por recortador (85% de eficiência).

**VCI :1975, Motor V-8, gasolina (20% de eficiência).

TAB.I.5 Comparações de densidades energética e de potência

MOTORES ELÉTRICOS TRACIONÁRIOS (30 KW na saída com controle)				
Tipo de Propulsão	Massa (Kg)		Eficiência (%)	Densidade de Potência (KW/Kg)
	Motor	Controle		
C.C. recortador	114	41	85	0.19
C.A. inversor	27	82	85	0.27

TAB.I.6 Dados de Sistemas de Acionamento Elétrico

Fonte de Potência	Densidade de Potência (W/Kg)
Gasolina	325
Baterias: Pb-ácido (1980)	100
tecnologia avançada	150
: Ni-Zn (1980)	150
tecnologia avançada	240
: Ni-Fe(1980)	100
: Na-S	200

TAB.I.7 Comparações entre densidades de potência de alguns sistemas de energia de veículos

Fonte de Energia	Densidade de Energia (Wh/Kg)
Gasolina	12300
Gás Natural (G.L.P.)	9350
Metanol	6200
Hidrogênio	28000
Bateria Chumbo-Ácido	30 - 40
Bateria Sódio - Enxofre	176 - 221
Volante (aço)	12 - 30
Álcool Etílico	7600

TAB.I.8 Comparações entre densidades energéticas de várias fontes com aplicações em veículos

	Veículo de 7500 Kg		Veículo de 1500 Kg	
	VCI (diesel)	VE	VCI (gasolina)	VE
Consumo	0.9 l/Km	2.25 KWh/Km	0.12 l/Km	0.30 KWh/Km
Equivalente g de combust.	840 g/l	265 g/KWh	800 g/l	265 g/KWh
Consumo	756 g/Km	596 g/Km	96 g/Km	80 g/Km
Economia do V.E(%)	21		17	

TAB.I.9 Balanços Energéticos Comparativos : VE e VCI.[8]

Das tabelas apresentadas devemos ressaltar que apesar das diferenças entre os valores das densidades de potência, 3 vezes maior para os VCI (TAB.I.7), e dos valores de densidade energética, 400 vezes maior para os VCI (TAB.I.8) os VEs possuem vantagens que não podem ser desconsideradas :

- alta eficiência energética (TAB.I.4 e TAB.I.6)

- maior economia energética (TAB.I.9).

Além destes fatos os VEs se destinam atualmente a utilização urbana e a energia armazenada em um conjunto de baterias é suficiente para atender as necessidades diárias de um usuário de VCI que irá utilizar este veículo, em média 32 Km por dia, o que sem dúvida pode ser atendido por um VE. Este VE poderia ter suas baterias recarregadas automaticamente em uma garagem previamente adaptada por exemplo.

Portanto alto valor da densidade energética de um VCI só é requisitado em um número reduzido de ocasiões, logo o VE atenderia satisfatoriamente um grande segmento de usuários de transporte individual da nossa sociedade.

Quanto ao maior valor da densidade de potência a favor dos VCI devemos frisar que dificilmente trafegamos utilizando a máxima potência disponível de um VCI; normalmente um valor de 0.5 da potência total do veículo é necessário para atender nossas necessidades.

Quanto ao problema de poluição ambiental provocada por VCIs devemos ressaltar que em regiões como o centro da cidade de São Paulo ou a

zona sul do Rio de Janeiro, os VCI são responsáveis por nada menos que 80 % da poluição do ar.

O Brasil desde o início de maio de 1986 possue o Programa de Controle de Poluição do Ar Produzida por Veículos Automotores (PROCONVE). Este programa apesar de estar atrasado em relação a países europeus e ao E.U.A. deve-se principalmente a um documento do Ministério da Saúde onde destaca-se :

"pela crescente utilização da álcool etílico puro ou misturado na gasolina, o etanal produzido por sua combustão, apresenta efeitos nocivos ao homem, que vão desde a irritação cutânea e das mucosas até a neoplasias (tumores benignos ou malignos) passando pelo edema pulmonar"..."tais efeitos podem ocorrer em determinadas áreas urbanas, de elevado tráfego de veículos, sobre receptores (principalmente seres humanos), submetidos por anos de convivência (moradia, locais de trabalho, etc) a níveis elevados deste poluente atmosférico".

O objetivo do PROCONVE será normalizar e fiscalizar a instalação de dispositivos antipoluentes (filtros) nos veículos automotores.

As vantagens técnicas e de bem estar da população com uma ampla utilização de VEs, deverão ser o alicerce para a implementação definitiva deste meio de transporte principalmente nas grandes cidades devido aos altos índices de poluição ambiental citados anteriormente.

I.5 Sumário

Neste capítulo vimos a definição de um V.E. bem como suas possíveis e variadas formas de utilização.

A versatilidade da obtenção de energia elétrica para recarregar as baterias vem a ser sem dúvida um ponto a favor da utilização dos V.Es. em algumas atividades,por exemplo rurais.

Um histórico sobre V.E. foi apresentado abordando desde sua criação até os dias de hoje com uma abordagem paralela do problema energético.

Vantagens e desvantagens de um V.E. em comparação com V.C.I. são apresentadas de maneira clara e objetiva.

Concluíndo temos uma bibliografia onde poderemos nos aprofundar no estado de arte dos veículos elétricos.

I.6 Bibliografia

1 - Perrin - Pelletier,F. "Eletric Vehicle in Europe" - Septieme Symposium Internacional du Véhicule électrique Routier - - Versailles - France, 12-19, julho, 1984.

2 - Unnewehr,L.E.; Nasar,S.A. "Electric Vehicle Technology" - John Willey & Sons - 1982.

3 - Hamilton,W.F. "Electric Automobiles" - McGraw-Hill - 1980.

4 - Zarur,E.; Pereira,A.C.R. "Veículos Elétricos" Relatório Eletrobrás - julho de 1974.

5 - I Seminário Sobre Veículos Elétricos Utilitários a Baterias" FINEP - USP- agosto 1984.

6 - Agarwal,P.D. "Energy Utilization of Eletric and Hybrid Vehicles and Their Impact on US National Energy Consumption" Int.J. of Vehicle Design, vol.3, nº 4, 436-449,1982.

7 - Hamilton,W.F.; Morecraft,L.M.and Carriere,W.M. "Social and Environmental Impacts of Eletric and Hybrid Vehicles", Int.J. of Vehicle Design, vol.2, nº4, 480-496, 1981.

8 - Pornin,M. "Traction Électrique Automobile Routiere" 1 - 20, D 840 - Techniques de L'Ingenieur -1981.

CAPÍTULO II

VEÍCULOS ELÉTRICOS : CONFIGURAÇÕES E PARÂMETROS

VEÍCULOS ELÉTRICOS : CONFIGURAÇÕES E PARAMETROS

II.1 Introdução

Os veículos elétricos (VEs) estão em fase de implantação na sociedade e como eles terão que competir com os veículos de combustão interna (VCIs) muitos fatores irão influenciar a popularização do VE como meio de transporte ideal. Dentre estes fatores podemos destacar :

a - disponibilidade energética.

b - política ambiental.

c - custo.

d - disponibilidade de metais.

c - conscientização da população.

d - outros fatores de ordem social, econômica, política, tecnológica e científica.

Os fatores acima mostram quase todos os aspectos para uma mudança definitiva no sistema de transporte atual.

Os VEs atuais possuem além de inúmeras formas, tamanho e finalidades algumas singularidades que podemos destacar:

1 - A fonte de energia do VE ainda se encontra em desenvolvimento e não está definido qual será o sistema de suprimento de energia a ser adotado, por exemplo :

a - sistema eletroquímico : baterias ou células combustíveis. No

capítulo III apresentamos vários tipos de baterias com suas características, além da tradicional bateria chumbo-ácido que é a solução atual como fonte de energia para veículos elétricos.

b - rede elétrica (por exemplo : trolebus, metrô)

c - sistemas híbridos, associando fontes diversas de energia tais como baterias, combustíveis líquidos usuais (diesel, gasoli-álcool) e ou volantes de alta rotação [Ref.4].

2 - O sistema de acionamento e controle não está completamente desenvolvido principalmente quando pensamos na alternativa corrente contínua, corrente alternada (CC / CA).

O estado da arte em eletrônica de potência e controle pode ser visualizado da seguinte maneira :

1950 - 1970 : Eletrônica de **POTÊNCIA** e Controle : neste período a ênfase no acionamento foi dada para o projeto dos diversos tipos de topologias dos conversores de potência (inversores, recortadores, retificadores), tendo em vista os diversos tipos de máquinas elétricas existentes.

1970 - 1980 : **ELETRÔNICA** de Potência e Controle : Foi o período onde a Eletrônica de acionamento desenvolveu-se com a implantação de técnicas de modulação em largura de pulsos, MLP, utilizando microprocessadores para o acionamento dos tiristores.

1980 - 1986 : Eletrônica de Potência e **CONTROLE** : os equipamentos de potência que estão sendo desenvolvidos utilizam técnicas de controle adaptativo, controle ótimo , controle multivariáveis, controle por realimentação de estado e compensadores não lineares que para suas implementações práticas necessitam da utilização de micoprocessadores.

3 - Os VEs de trajetos não aleatórios (por exemplo, trolebus, metrô e trens) possuem muitos periféricos e elementos de controle formados por subsistemas instalados previamente para possibilitar sua utilização inicial, portanto elevando o custo da implementação destes sistemas. Podemos destacar nestas interfaces :

a - sistemas de trilhos ou linhas aéreas.
b - sistemas especiais para abastecimento da energia elétrica ao veículo, formados por transformadores e ou retificadores.

4 - Meios e mecanismos para reabastecimento de energia do VE a bateria não estão totalmente definidos como no caso dos postos de serviços dos VCIs.

O reabastecimento do VE a bateria poderá ocorrer de 2 maneiras distintas :

a - troca do conjunto de baterias descarregadas por outro carregado; este método irá depender do desenvolvimento de postos de serviços com vários conjuntos de baterias bem como da padronização das baterias, além de depender do desenvolvimento de um método adequado para substituição rápida de todas as

baterias.

b - desenvolvimento de um método rápido para o carregamento das baterias, o que obrigaria instalação especiais por parte das concessionárias de energia, pois para recarregar um conjunto de baterias com 100 V de 50000 Wh em 1 hora precisaríamos de uma corrente de 500 A.

O atual desenvolvimento dos VEs esta fortemente influenciado pelos projetos da indústria de VCIs. Os projetos específicos (por exemplo, baterias, motores e acionamento) para VEs se tornam cada vez mais necessários para a elaboração de veículos confiáveis e com desempenho satisfatório.

As definições e parâmetros que serão apresentados a seguir são frequentemente utilizados na indústria de VCIs.

II.2 Configurações de Veículos Elétricos

O termo configuração será utilizado aqui para relacionar as conexões existentes entre a fonte de energia e os componentes de tração do VE.

Das configurações existentes de VEs podemos citar .

a - CC / CA

b - CC / CA

c - CA / CC

d - CA / CA

e - Híbridos

II.2.a Veículos Elétricos CC / CC

Os VEs possuem fonte de alimentação de CC e motor de tração de CC, o controle do motor e consequentemente da velocidade do veículo pode ser feito de maneira eletrônica ou eletromecânica como veremos no capítulo IV. A fonte de energia poderá ser a bateria convencional ou a célula combustível.

Um diagramaa de blocos de um veículo CC / CC pode ser visto na FIG.II.1. O bloco de controle (de armadura, e ou campo e sistemas de proteção) pode ser construído com uma variedade muito grande e componentes semicondutores ou eletromecânicos. O sistema de potência é representado pelo bloco de controle de potência. Frequentemente se utiliza um sistema de ventilação independente para refrigeração do sistema de potência do VE.

II.2.b Veículos Elétricos CC / CA

Neste tipo de VE o motor CA utilizado tem uma série de vantagens sobre o motor de CC dentre as quais podemos destacar :

a - Custo : para uma mesma potência o motor CC é muito mais caro do que um motor CA de indução.

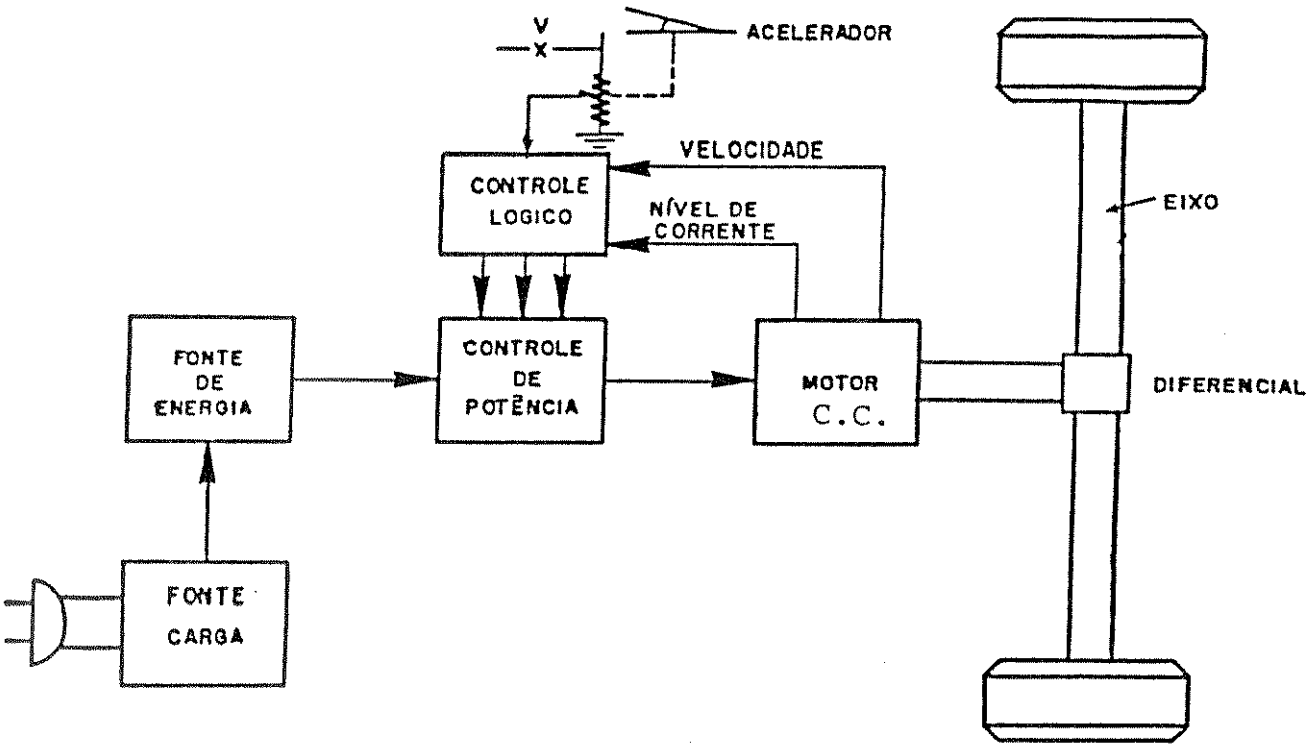


FIG.II.1 Diagrama de Blocos de um VE CC / CC.

b - Manutenção : o motor de CC possue escovas e comutadores que periodicamente exigem manutenção e oneram o seu custo operacional, o que não ocorre com o motor de CA.

c - Relação Peso - Potência : este é um fator muito importante quando a intenção é tornar o veículo o menos pesado possível. Neste aspecto os motores de CA possuem vantagens em relação aos de CC para a mesma potência.

O controle do motor CA pode ser feito eletronicamente através de um inversor como veremos no Capítulo IV.

A seguir apresentamos na FIG.II.2 um diagrama de blocos simplificado de um veículo CC / CA. Devemos observar que a corrente e tensão alternadas liberadas pelo inversor são monitoradas através de sensores onde através de um sistema de decodificação, comparação e processamento realimenta-se o inversor.

No Capítulo IV voltaremos a abordar o sistema de acionamento de um veículo CC / CA.

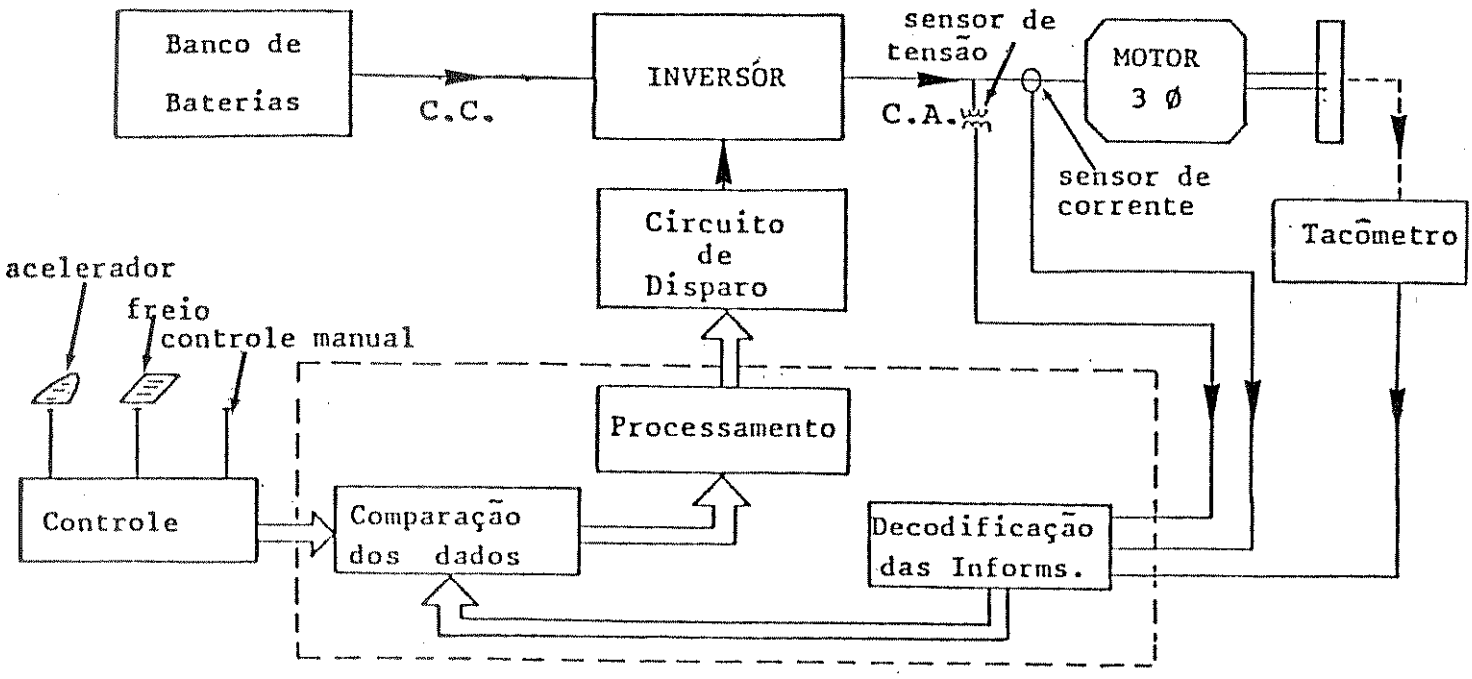


FIG.II.2 Diagrama de Blocos de um Veículo CC / CA.

II.2.c Veículos Elétricos CA / CC

São veículos com alimentação em CA e motor de CC. O controle do motor de CC pode ser efetuado de três maneiras distintas :

a - com auxílio de um retificador não controlado transformamos a e energia CA em CC e controlamos a velocidade do motor através de um recortador. A vantagem desta alternativa é que mantemos fixo o fator de potência, o que é conveniente para as concessionárias de energia.

b - utilizando um retificador monofásico controlado o que ocassiona um fator de potência não constante, além de um alto "ripple".

c - usando um sistema de retificação trifásica variável, apesar da dificuldade para a implementação das linhas trifásicas áreas o que dificulta sua utilização.

II.2.d Veículos Elétricos CA / CA [Ref.11]

Existem 2 maneiras distintas de controle de máquina CA com alimentação em CA, são elas :

- o cicloconversor : o qual possilita controlar a tensão e frequência na entrada do motor CA. A frequência será variável numa faixa de 1/3 a 2/3 da frequência de entrada. Este tipo de controle

é utilizado para potências acima de 100 HP onde o seu custo se torna viável.

- Controlador CA / CA : apenas temos controle sobre a tensão aplicada no estator da máquina sendo a frequência mantida fixa; com este recurso atuamos no escorregamento da máquina CA. É utilizado para baixas e médias potências, normalmente menores que 2 HP.

II.2.e Veículos Híbridos

O sistema que possui mais de uma forma de armazenamento ou utilização de energia é comumente chamado de híbrido. Todo veículo híbrido com bateria e motor a combustão interna pode ser agrupado em duas classes : série e paralelo.

No sistema série, como é mostrado na FIG.II.3 toda a potência do motor a explosão é convertida em potência elétrica por um alternador - retificador ou um gerador CC. A potência elétrica é reconvertida em potência mecânica por um motor elétrico conectado nos eixos do veículo através de uma caixa de transmissão.

A velocidade do veículo é controlada como em um VE. Portanto neste tipo de veículo o motor a explosão está constantemente carregando as baterias. Este veículo é excelente quando opera com velocidade constante do motor CI onde proporciona uma ótima economia de combustível. O motor e controle podem também possibilitar frenagem regenerativa.

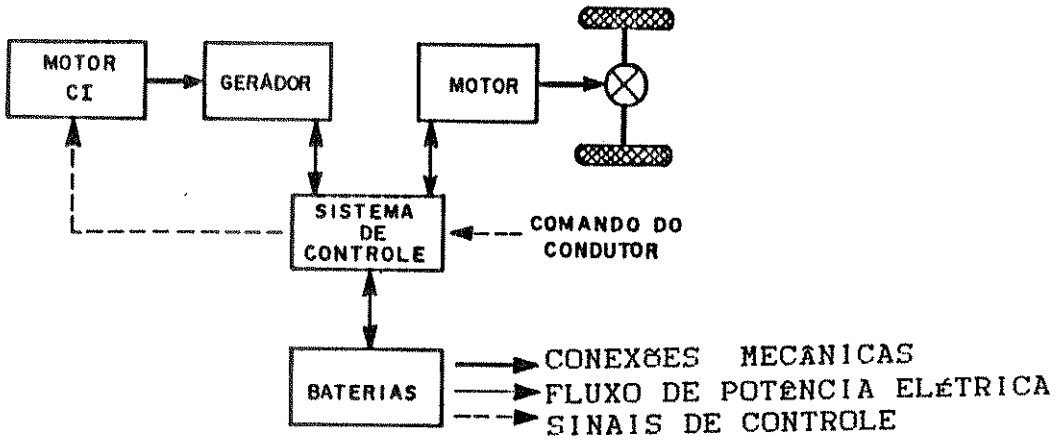
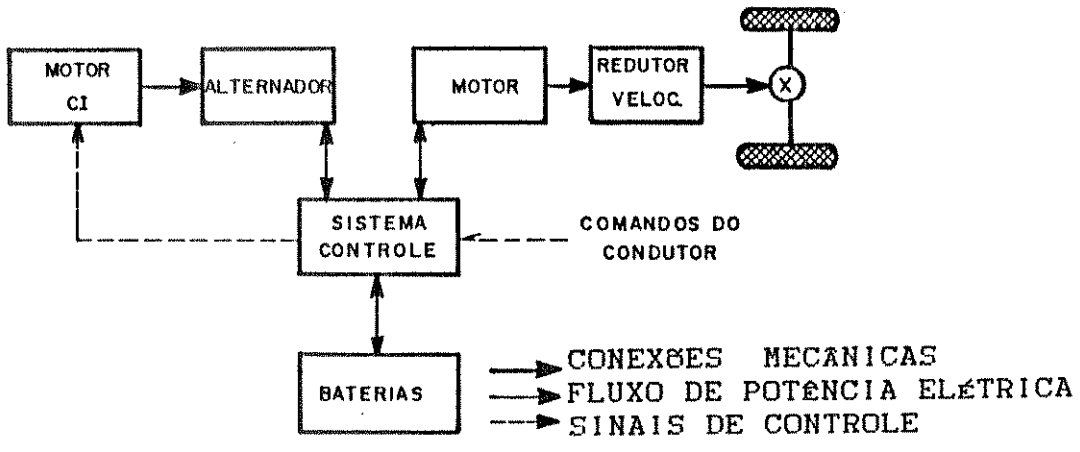


FIG.II.3 Diagrama de um Veículo Híbrido Tipo Série

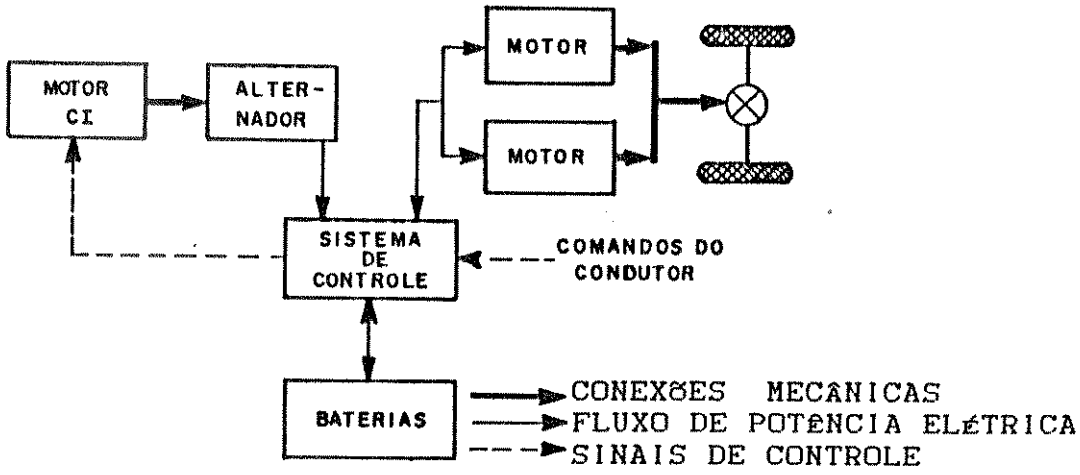
A seguir apresentamos alguns diagramas de VEs híbridos tipo série [REF.3] :



Potência do Motor CI : 6 KW

Potência do Motor CC : 15 KW (tipo série)

FIG.II.4 Stir-Lec II da General Motors

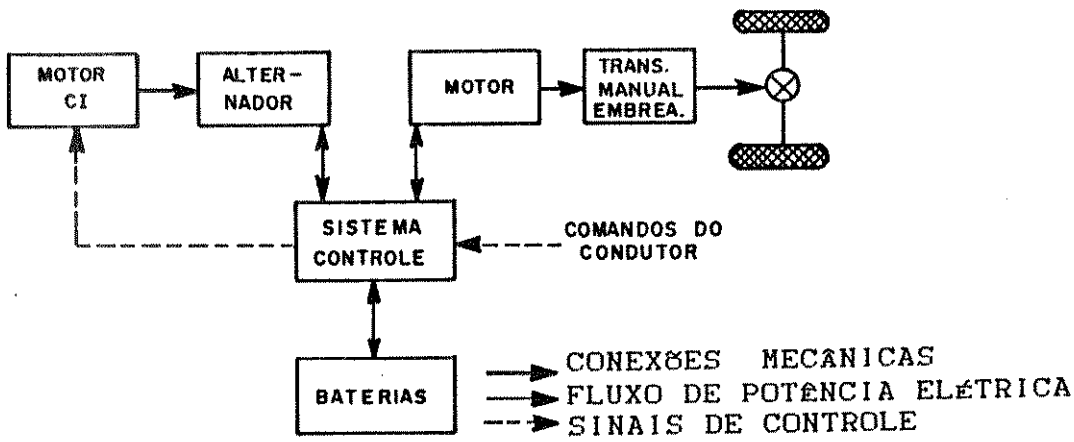


Observe dois motores ligados em paralelo

Potência do motor CI : 10 KW

Potência do motor CC : 19 KW (cada um) (tipo shunt)

FIG.II.5 Veículo Híbrido da Universidade da Florida

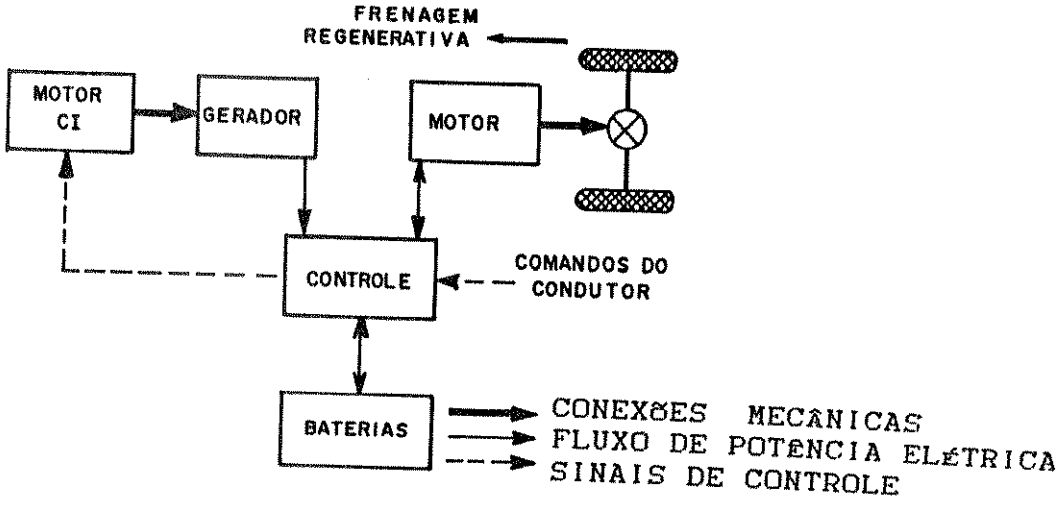


Desenvolvido por Karl V. Kordesch

Potência do Motor CI : 12 KW

Potência do Motor CC : 15 KW (tipo série)

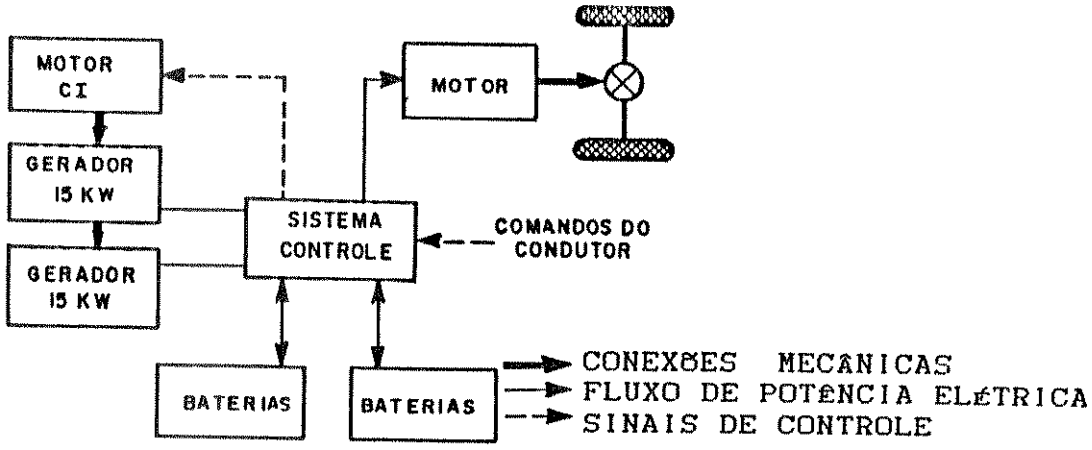
FIG.II.6 Veículo Híbrido da Union Carbide Corporation



Potência do Motor CI : 75 KW

Potência do Motor CC : 90 KW (tipo shunt)

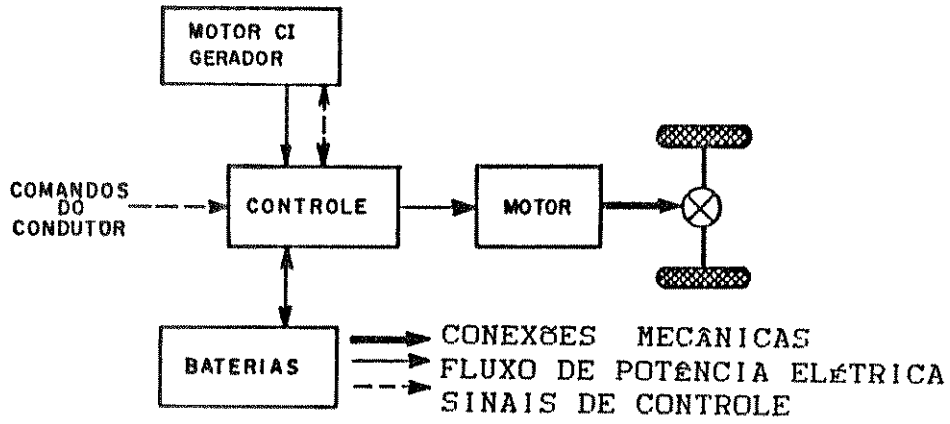
FIG.II.7 Veículo Híbrido da Mercedes-Benz (OE -305)



Potência do Motor CI : 45 KW

Potência do Motor CC : 37 KW (tipo série)

FIG.II.8 Ônibus Híbrido desenvolvido pela Universidade da Florida



Potência do Motor CI : ISUZU 330 Diesel MG

Potência do Motor CC : 67 KW (tipo série)

FIG.II.9 Ônibus Híbrido desenvolvido pela KAWASAKI

O sistema paralelo como pode ser visto no diagrama da FIG.II.10, somente a potência requerida para carga das baterias é convertida em potência elétrica. Nesta configuração o motor a combustão interna é montado na mesma caixa de embreagens do motor elétrico.

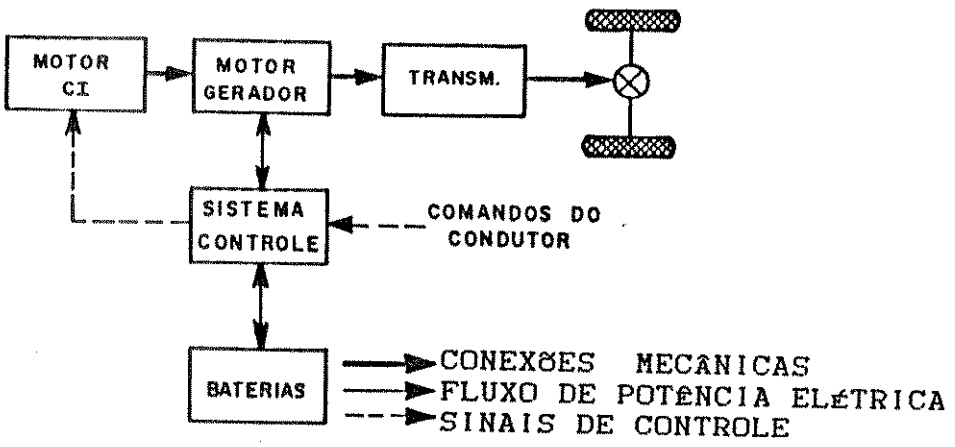
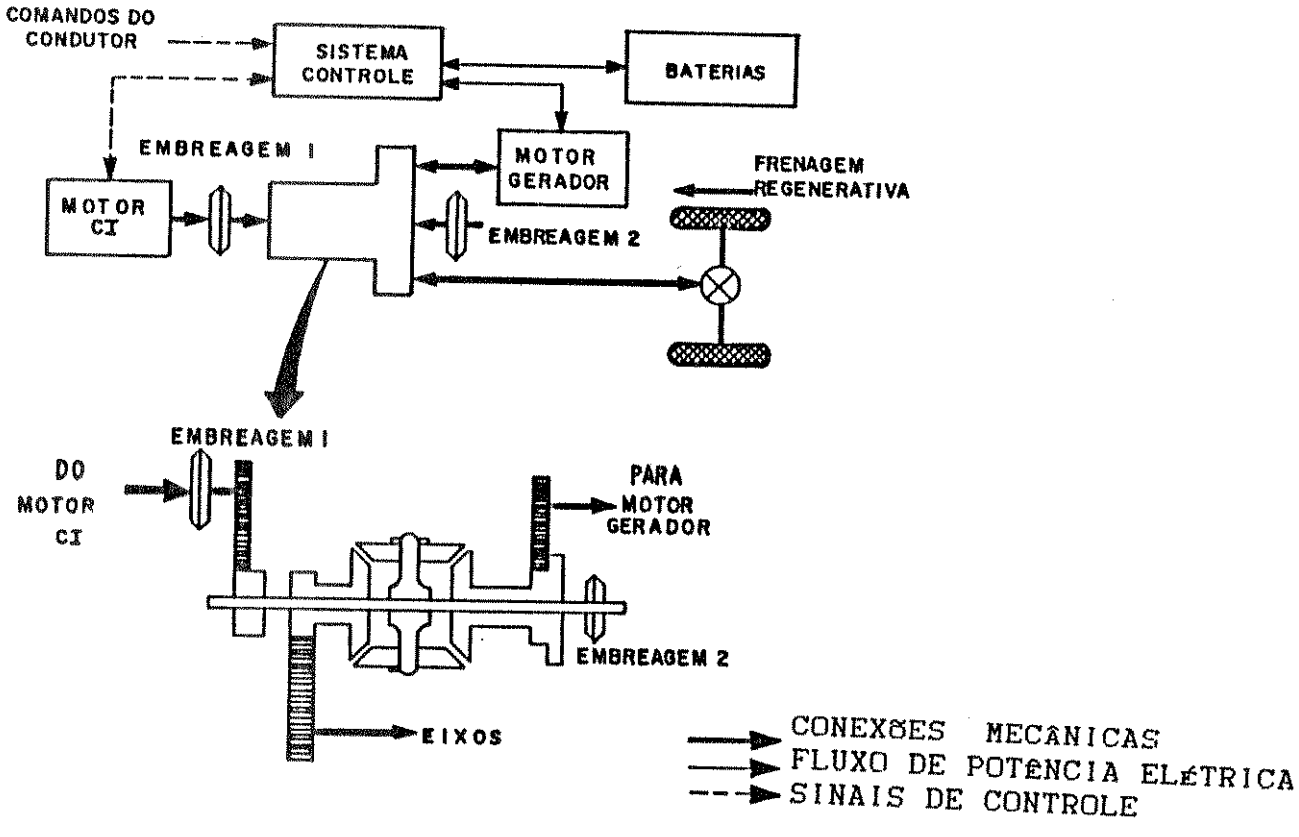


FIG.II.10 Diagrama de um Veículo Híbrido : Tipo Paralelo

Um exemplo de Veículo Híbrido (Tipo Paralelo) foi construído pela Universidade de Wisconsin como pode ser visto na FIG.II.11.



Potência do Motor CI : 37 KW

Potência do Motor CC : 13,5 KW (tipo série)

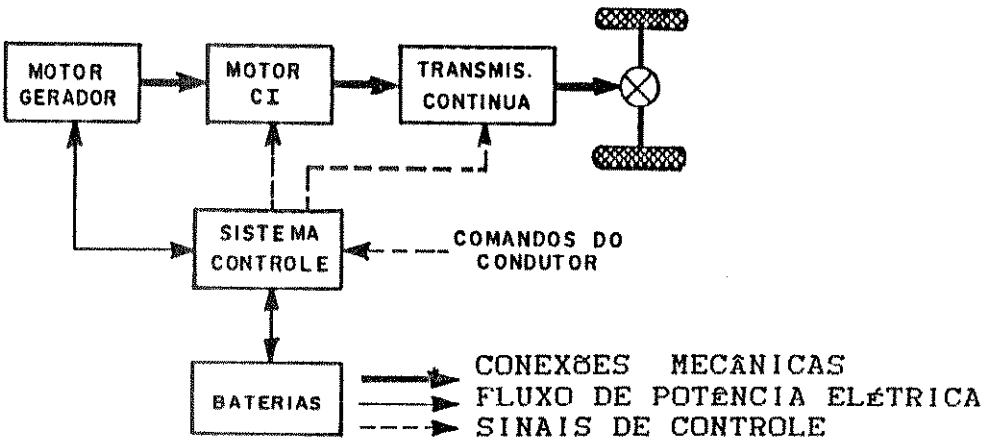
FIG.II.11 Diagrama de Blocos do Veículo Híbrido desenvolvido pela Universidade de Wisconsin.

Engatando 2 e desengatando 1 temos somente o sistema elétrico operando totalmente isolado do sistema CI. Isto permite com que o motor funcione como gerador quando ocorrer frenagem do veículo.

Engatando 1 e desengatando 2 temos o motor CI operando; e num outro modo 1 e 2 são engatados e ambos os motores irão ser responsáveis pelo movimento do veículo.

Nos Veículos Híbridos tipo paralelo usualmente o motor elétrico é menor que no tipo série, pois quando o motor a CI não for suficiente para suprir as necessidades de potência do veículo o motor elétrico é acionado atuando simultaneamente com o motor a CI. No sistema paralelo também é possível frenagem regenerativa.

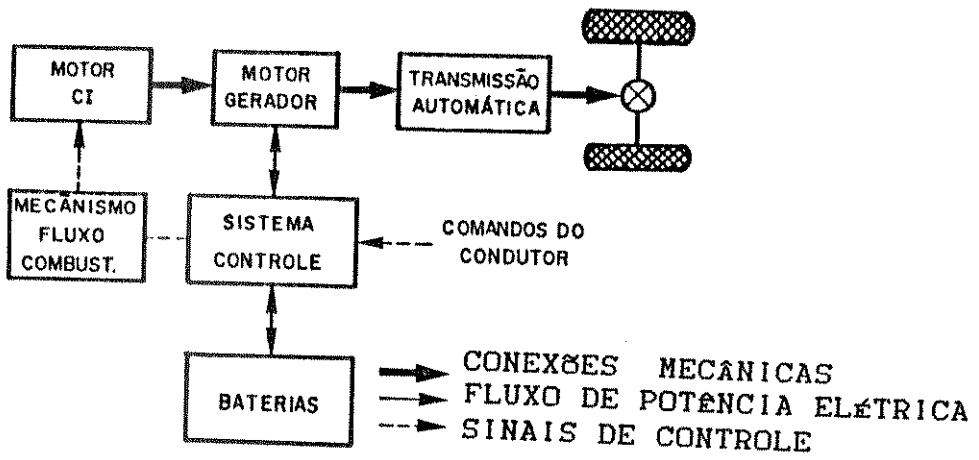
Outras possibilidades são a montagem dos motores elétricos e a combustão interna em um único eixo, FIG.II.12 e FIG.II.13.



Potência do Motor CI : 19 KW

Potência do Motor CC : (Não disponível)

FIG.II.12 Veículo Híbrido da Gould Postal



Potência do Motor CI : 30 KW

Potência do Motor CC : 7,3 KW (tipo shunt)

FIG.II.13 Veículo Híbrido Minicars (Goleta - Califórnia)

Uma outra alternativa para veículo híbrido é a com armazenamento de energia em volantes. A utilização de um volante para armazenamento de energia, incorporado ao veículo permite recuperar uma parcela de energia que seria dissipada durante a frenagem. Esta recuperação é conseguida pelo aumento da rotação do volante durante a desaceleração do veículo. A energia assim recuperada é reutilizada durante a operação subsequente [REF.4].

Na FIG.II.14 apresentamos um diagrama de um Veículo Híbrido com volante.

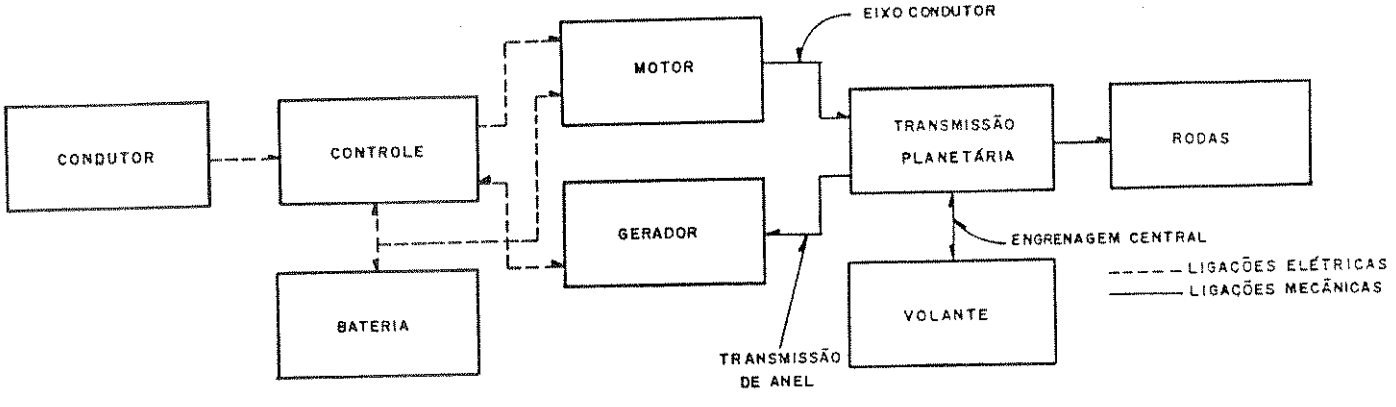


FIG.II.14 Veículo Híbrido com volante [REF.1]

Para finalizar esta seção apresentamos na FIG.II.15 um diagrama de um veículo elétrico tendo como fontes de energia baterias e células combustíveis.

O número de configurações onde pode ser aplicado um sistema elétrico de tração é altamente variável possibilitando inúmeras alternativas, apesar do grande número comum de componentes e estrutura veicu-

lar, por exemplo suspensão e sistema portante.

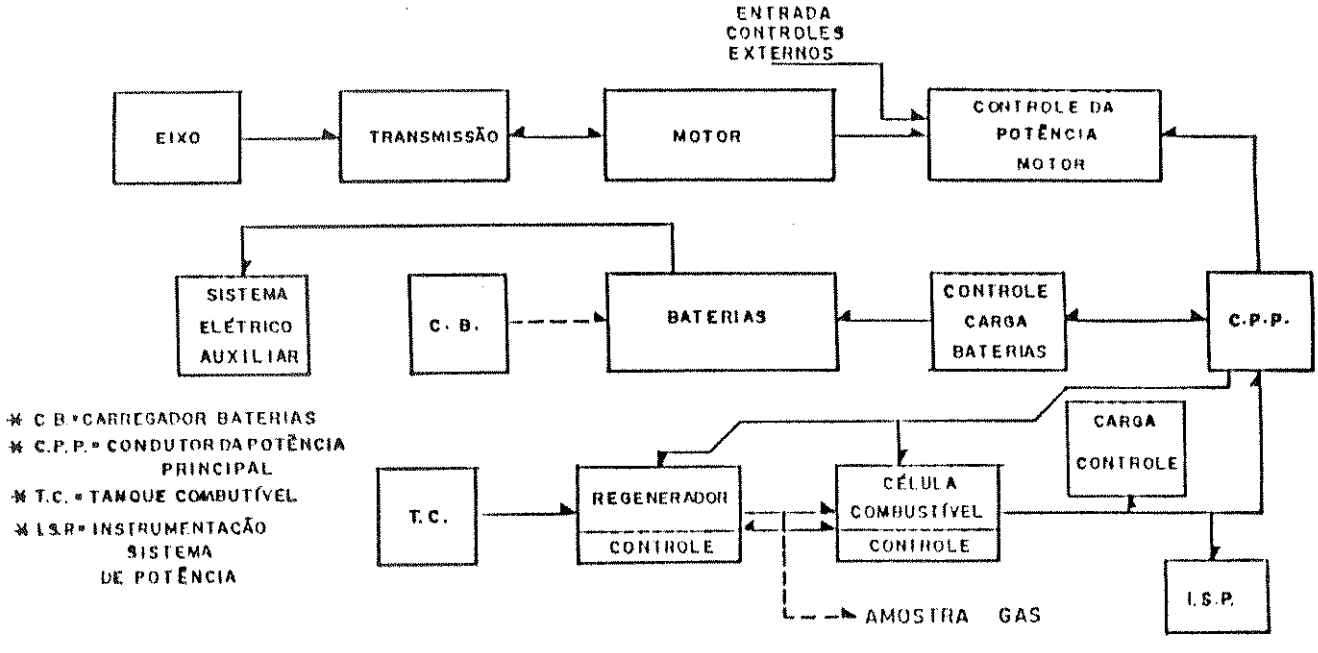


FIG.II.15 Veículo Híbrido com baterias e células combustíveis [1]

II.3 Parâmetros de Um Veículo Elétrico

Nesta seção introduziremos os parâmetros usados para descrever os VEs de maneira quantitativa, a partir dos quais poderemos prever o desempenho de um veículo elétrico. Em geral estes parâmetros são os mesmos utilizados em VCIs. Estes parâmetros também formam uma base adequada para comparações quantitativas de veículos de vários tipos.

Os VEs são veículos limitados energeticamente em muitas aplicações e a avaliação da eficiência energética é essencial. A massa do veículo é o parâmetro chave para avaliação do consumo energético. A seguir apresentamos algumas definições usuais :

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

1 - Massa Bruta : massa do veículo mais carga.

2 - Massa do Veículo : massa do veículo sem carga.

3 - Massa dos Componentes : massa do sistema de acionamento, da fonte de energia e do motor.

4 - Massa útil : massa dos passageiros e da carga.

Geralmente os VEs utilitários tem parte da sua capacidade de transporte diminuida em comparação com os VCIs devido a massa das baterias, o que resulta em projetos especiais para a suspensão e para a estrutura do veículo.

Outro parâmetro de grande importância é a área frontal do veículo, pois ela será responsável pela resistência aerodinâmica. Este parâmetro é de fundamental importância para o cálculo da potência de arraste.

II.3.1 Forças de Resistência : Aerodinâmica, Rolamento e Inercial

Um veículo para entrar em movimento até atingir uma dada velocidade de cruzeiro deverá vencer as forças de resistências aerodinâmica, de rolamento e inercial.

A - Força de Resistência Aerodinâmica

É a força de resistência devido ao atrito do veículo com o ar. Ela é função de vários fatores dentre os quais podemos destacar :

- área frontal do veículo

- tipo do veículo

- temperatura do ar

- velocidade do veículo.

A força de resistência aerodinâmica será dada pela expressão [II.1]. :

$$F_a = \frac{C_D \ \rho_a \ A_F \ V^2}{2} \qquad [N] \qquad [II.1]$$

onde : F_a : força de resistência aerodinâmica (Newton)

ρ_a : massa específica do ar (Kg/m^3)

C_D : coeficiente aerodinâmico

A_F : área frontal do veículo (m^2)

V : velocidade do veículo (m/s)

B - Força de Resistência ao Rolamento

É a força de resistência ao movimento do veículo devido às deformações dos pneus conforme o tipo de pista , ao atrito dos mancais e do eixo, ao atrito dos pneus à pista e às irregularidades da pista. A pressão interna do pneu é um fator fundamental para o cálculo da resistência devido ao rolamento, pois altera a rigidez do pneu. Outros fatores que afetam a resistência devido ao rolamento são : temperatura , tipo de pneu, velocidade do veículo.

Para maior confiabilidade no valor da resistência devido ao rolamento é conveniente obter valores experimentais e propor uma expressão matemática que se adapte ao veículo em estudo. Os procedimentos expe-

rimentais para tais determinações são encontrados nas normas SAE - J-1269, J-1270, J-1379 e J-1380 [REF.9].

Uma expressão bastante conservadora, [REF.5] ,pode ser dada por :

$$F_R = (K_1 + K_2 V) W \qquad [N] \qquad [II.2]$$

onde : F_R : força de resistência devido ao rolamento (Newton)

V : velocidade do veículo (m/s)

W : massa do veículo (Kg)

Os valores de K_1 e K_2 determinados utilizando os procedimentos convenientes e pneus tipo radiais são dados abaixo [REF.10] :

Tecnologia	K_1 [m / s^2]	K_2 [1 /s]
Atual	0.127	0.000116
Aperfeiçoada	0.118	0.000108
Avançada	0.108	0.000099

Os dados de K_1 e K_2 referentes a tecnologia atual foram obtidos utilizando pneus radiais. Os dados referentes a tecnologia aperfeiçoada e avançada foram obtidos estimando melhorias nos pneus radiais.

C - Força de Resistência Inercial

É a força de resistência devido a aceleração ou desaceleração do veículo, sendo positiva na aceleração por convenção. O valor negativo

da força de inércia deverá ser considerado quando tivermos frenagem regenerativa.

A potência, P, em Watts para vencer a inércia de um veículo com massa W é dado por :

$$P = W\ V\ \frac{dv}{dt} \qquad [Watts]$$

onde : V : velocidade do veículo [m/s]

W : massa do veículo [Kg]

t :tempo [s]

Se a aceleração for constante para o veículo desde o repouso até a velocidade V, então a velocidade será :

$$V = a\ t \qquad [II.4]$$

logo substituindo [II.4] em [II.3] temos :

$$P = W\ a^2\ t \qquad [II.5]$$

portanto o valor máximo da potência será dado por :

$$P = W\ a\ V_c$$

onde V_c é a velocidade de cruzeiro do veículo.

Em um veículo elétrico a curva de aceleração se caracteriza pelo uso de transmissão infinitamente variável e embreagem eletromecânica ou mecânica que pode eliminar as descontinuidades na aceleração ; portanta curva da velocidade de um veículo elétrico poderá ter a forma mostrada na FIG.II.16.

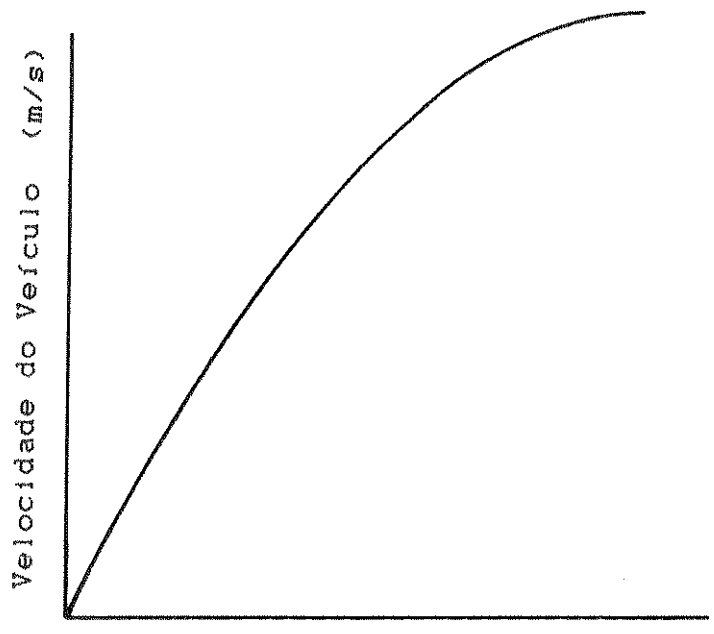


FIG.II.16 Velocidade Versus tempo de um Veículo Elétrico durante a aceleração. [REF.9 : SAE - J 272.a]

A FIG.II.16 foi representada por Murphy [REF.8] :

$$v = a_1 \tau \left(1 - \exp(-t/\tau) \right) \qquad 0 \leqslant t \leqslant_a T \qquad [II.7]$$

onde : t : tempo [s]

T_a : tempo total da aceleração s]

a_1 : aceleração inicial (m / s^2)

τ : constante de tempo [s]

Derivando em relação ao tempo ambos lados da equação [II.7] :

$$a = a_1 \exp(-t / \tau) \qquad 0 \leqslant t \leqslant T_a \qquad [II.8]$$

onde a é a aceleração do veículo dada em [m/s^2].

O valor da constante de tempo será dado por :

$$\tau = \frac{V_L}{a_i} \qquad [II.9]$$

onde V_L é a velocidade limite obtida em [II.7].

Portanto a equação [II.8] pode ser reescrita :

$$a = a_i \exp G \qquad 0 \leqslant t \leqslant T_a \qquad [II.10]$$

onde $G = - \frac{a_i}{V_L} t$

e a equação [II.7]

$$v = V_L \ (1 - \exp G) \qquad 0 \leqslant t \leqslant T_a \qquad [II.11]$$

quando $V = V_c$, o tempo gasto para se atingir V_c será obtido a partir de [II.11] :

$$V_c = V_L \ (1 - \exp G)$$

$$\frac{V_c - V_L}{V_L} = - \exp G$$

$$\left(\frac{V_L - V_c}{V_L} \right) = \exp G$$

aplicando ln em ambos os lados :

$$\ln \left(\frac{V_L - V_c}{V_L} \right) = G = - \frac{a_i}{V_L} T_a$$

$$T_a = \frac{V_L}{a_i} \ln \left(\frac{V_L}{V_L - V_c} \right) \quad \text{onde} \quad V_c < V_L \qquad [II.12]$$

A aceleração inicial e a velocidade limite são dependentes da potência cedida pelo motor e esta é determinada pela posição do acelerador.

Se a aceleração for descrita por [II.10] então a potência necessária para superar a inércia do veículo será dada por :

$$P_I = W\ a_i\ V_L \exp G\ (\ 1 - \exp G\ ) \qquad 0 \leqslant t \leqslant T_a \qquad [II.13]$$

onde P_I é a potência gasta para vencer a resistência inercial, a unidade de P_I é Watts.

II.3.2 Potência

A potência total para colocarmos o veículo em movimento será dada pela adição da potência aerodinâmica, de rolamento e inercial e é obtida pela soma de [II.1], [II.2] multiplicada pela velocidade mais [II.13] como mostrado a seguir :

$$P_{A,R} = \frac{1}{2} \rho_a C_D A_F V^3 + (K_1 + K_2 V) V W \quad [\text{Watts}]$$

como K_2 é um valor muito pequeno podemos simplificar a expressão acima para :

$$C_1 = K_1 W$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \rho_a C_D A_F$$

logo C_1 e C_2 serão constantes dependentes do tipo de veículo em estudo.

Portanto a potência total requerida durante a aceleração será dada por [II.16] onde a velocidade foi substituida por [II.11] :

$$P_t = (C_1 + W a_i \exp G) (1 - \exp G) V_L + C_2 V_L^3 (1 - \exp G)^3$$

$$0 \leqslant t \leqslant T_a \qquad [\text{II.16}]$$

onde $G = - \frac{a_i}{V_L} t$

Logo o tempo no qual o pico de potência será máximo será dado por:

$$P_t = C_1 V_L - C_1 V_L \exp G + V_L W a_i \exp G - W a_i V_L (\exp G)^2 +$$

$$+ C_2 V_L^3 (1 - \exp G)^3$$

derivando em relação ao tempo :

$$\frac{d P_t}{dt} = 0 + C_1 V_L \frac{a_i}{V_L} \exp G - V_L W \frac{a_i^2}{V_L} \exp G + 2 V_L W \frac{a_i^2}{V_L} \exp(2 G) +$$

$$+ 3 C_2 V_L^3 \frac{a_i}{V_L} (1 - \exp G)^2 \exp G.$$

A potência será máxima quando : $\frac{dP_t}{dt} = 0$

$$0 = (C_1 a_i - W a_i^2 + 2 W a_i^2 \exp G) \exp G + 3 C_2 V_L^2 a_i \exp G *$$

$$(1 - \exp G)^2$$

dividindo a equação acima por: $a_i \exp G$, obtemos :

$$0 = C_1 - W a_i + 2 W a_i \exp G + 3 C_2 V_L^2 (1 - \exp G)^2$$

rearranjando,

$$\exp G \left(3 C_2 V_L^2 \exp G - 6 C_2 V_L^2 + 2 W a_1 \right) + 3 C_2 V_L^2 - W a_1 = - C_1$$

multiplicando ambos os lados por $12 C_2 V_L^2$

$$\exp G \left(36 C_2^2 V_L^4 \exp G - 72 C_2^2 V_L^4 + 24 W a_1 C_2 V_L^2 \right) + 36 C_2^2 V_L^4 -$$

$$- 12 W a_1 C_2 V_L^2 = - 12 C_1 C_2 V_L^2$$

$$\left[-6 C_2 V_L^2 (1 - \exp G) + 2 W a_1 \right]^2 = 4 W^2 a_1^2 - 12 W a_1 C_2 V_L^2 - 12 C_1 C_2 V_L^2$$

$$- 6 C_2 V_L^2 (1 - \exp G) + 2 W a_1 = \sqrt{4 W^2 a_1^2 - 12 W a_1 C_2 V_L^2 - 12 C_1 C_2 V_L^2}$$

$$\exp G = \frac{6 C_2 V_L^2 - 2 W a_1 + \sqrt{4 W^2 a_1^2 - 12 W a_1 C_2 V_L^2 - 12 C_1 C_2 V_L^2}}{6 C_2 V_L^2}$$

$$T_M = \frac{V_L}{a_1} \ln \frac{6 C_2 V_L^2}{6 C_2 V_L^2 - 2 W a_1 + \sqrt{4 W^2 a_1^2 - 12 W a_1 C_2 V_L^2 - 12 C_1 C_2 V_L^2}}$$

[II.17]

Portanto o tempo, em segundos, no qual ocorre o pico de potência

durante a aceleração desde a partida terá a forma :

$$T_p = \begin{cases} T_M \ , & T_M < T_a \\ T_a \ , & T_M \geqslant T_a \end{cases} \qquad [II.18]$$

II.3.3 Energia

A energia necessária para acelerar o veículo desde a partida até a velocidade de cruzeiro será obtida integrando ambos os lados de [II.16] desde t = 0 até t = T_a. Esta energia de aceleração será dada por :

$$P = C_1 V_L - C_1 V_L \exp G + W a_i V_L \exp G - V_L W a_i \exp 2G +$$

$$C_2 V_L^3 (1 - 3 \exp G + 3 \exp 2G - \exp 3G)$$

integrando ambos lados de P de 0 a T_a temos :

$$E_a = C_1 V_L t \Big|_0^{T_a} + C_1 \frac{V_L^2}{a_i} \exp G \Big|_0^{T_a} - W V_L^2 \exp G \Big|_0^{T_a} +$$

$$+ W \frac{V_L^2}{2} \exp 2G \Big|_0^{T_a} + C_2 V_L^3 \left\{ t \Big|_0^{T_a} + \frac{3 V_L}{a_i} \exp G \Big|_0^{T_a} - \right.$$

$$- \frac{3\ V_L}{2\ a_1}\ \exp\ 2\ G\Big|_0^{T_a} + \frac{V_L}{3\ a_1}\ \exp\ 3\ G\Big|_0^{T_a}\Bigg] =$$

$$E_a = C_1 V_L T_a + \frac{C_1\ V_L^2}{a_1}\ \exp\left(-\frac{a_1}{V_L} T_a\right) - \frac{C_1\ V_L^2}{a_1} - W\ V_L^2 \exp\left(-\frac{a_1}{V_L} T_a\right) +$$

$$+ \frac{W\ V_L^2}{2}\ \exp\left(-\frac{2\ a_1}{V_L} T_a\right) - \frac{W\ V_L^2}{2} + C_2\ V_L^3 \left[T_a + \frac{3\ V_L}{a_1} * \right.$$

$$* \left(\frac{V_L - V_C}{V_L}\right) - \frac{3\ V_L}{a_1} - \frac{3\ V_L}{2\ a_1}\left(\frac{V_L - V_C}{V_L}\right)^2 + \frac{3\ V_L}{3\ a_1}\left(\frac{V_L - V_C}{V_L}\right)^3 -$$

$$\left. - \frac{V_L}{3\ a_1} \right] + W\ V_L^2$$

de [II.12] temos que $T_a = \frac{V_L}{a_1}\ \ln\left(\frac{V_L}{V_L - V_C}\right)$

portanto $\exp\left(-\frac{a_1}{V_L} T_a\right) = \exp\left[-\frac{a_1}{V_L}\ \frac{V_L}{a_1}\ \ln\left(\frac{V_L}{V_L - V_C}\right)\right] = \frac{V_L - V_C}{V_L}$

$$E_a = (C_1\ C_2 + C_2\ V_L^3)\ T_a + \frac{C_1\ V_L}{a_1}\ (V_L - V_C) - \frac{C_1\ V_L^2}{a_1} + W\ V_L^2 *$$

$$\left[1 - \exp\left(-\frac{a_1}{V_L} T_a\right)\right] + \frac{W\ V_L^2}{2}\left[1 - \exp\left(-\frac{2\ a_1}{V_L} T_a\right)\right] +$$

Ver página II.31 o desenvolvimento deste termo.

$$+ \frac{3\ C_2\ V_L^3}{a_1}\ (V_L - V_C) - \frac{3\ C_2\ V_L^4}{a_1} - \frac{3\ C_2\ V_L^2}{2\ a_1}\ (V_L - V_C)^2 +$$

$$+ \frac{3\,C_2\,V_L^4}{a_1} - \frac{3\,C_2\,V_L^2}{2\,a_1}\,(V_L - V_C)^2 + \frac{3\,C_2\,V_L^4}{2\,a_1} +$$

$$+ \frac{C_2\,V_L}{3\,a_1}\,(V_L - V_C)^3 - \frac{C_2\,V_L^4}{3\,a_1} = (C_1\,V_L + C_2\,V_L^3)\,T_a + \frac{1}{2}\,W\,V_C^2 -$$

$$- \frac{V_C\,V_L}{a_1}\,(C_1 + 3\,C_2\,V_L^2) - \frac{3\,C_2\,V_L^2}{2\,a_1}\,(V_L^2 - 2\,V_L\,V_C + V_C^2) + \frac{3\,C_2 V_L^4}{2\,a_1} +$$

$$+ \frac{C_2\,V_L}{3\,a_1}\,(V_L^3 - V_C\,V_L^2 + 3\,V_C^2\,V_L - V_C^3) - \frac{C_2\,V_L^4}{3\,a_1} = (C_1 V_L + C_2\,V_L^3)\,T_a +$$

$$+ \frac{W\,V_C^2}{2} - \frac{V_C\,V_L}{a_1}\,(C_1 + 3\,C_2\,V_L^2) - \frac{3\,C_2\,V_L^2}{2\,a_1}\,(-2\,V_L\,V_C + V_C^2) +$$

$$+ \frac{C_2\,V_L}{3\,a_1}\,(-3\,V_C\,V_L^2 + 3\,V_C^2\,V_L - V_C^3) = (C_1\,V_L + C_2\,V_L^3)\,T_a + \frac{W\,V_C^2}{2} -$$

$$- \frac{V_C\,V_L}{a_1}\,(C_1 + 3\,C_2\,V_L^2) + \frac{3\,C_2\,V_L^3\,V_C}{2\,a_1}\,(2 - \frac{V_C}{V_L}) - \frac{C_2\,V_L}{3\,a_1} *$$

$$(3\,V_C\,V_L^2 - 3\,V_C\,V_L^2 + V_C^3) = (C_1\,V_L + C_2\,V_L^3)\,T_a + \frac{W\,V_C^2}{2} -$$

$$- \frac{V_C\,V_L}{a_1}\,(C_1 + 3\,C_2\,V_L^2) + \frac{3\,C_2\,V_L\,V_C}{2\,a_1}\,(2 - \frac{V_C}{V_L}) - \frac{C_2\,V_L}{3\,a_1} *$$

$$(1 - 3\,\frac{V_L}{V_C} + 3\,\frac{V_L^2}{V_C^2})$$

rearranjando é substituindo T_a por [II.12] :

$$E_a = \frac{W\ V_C^2}{2} + V_L \left[\left(C_1 + C_2\ V_L^2 \right) \frac{V_L}{a_1} \ln \left(\frac{V_L}{V_L - V_C} \right) - (C_1 + 3\ C_2 V_L^2) * \right.$$

$$\left. \frac{V_C}{a_1} + \frac{3\ C_2\ V_L^2\ V_C}{2\ a_1} \left(2 - \frac{V_C}{V_L} \right) - \frac{C_2\ V_C^3}{3\ a_1} \left(1 - \frac{3\ V_L}{V_C} \left(1 - \frac{V_L}{V_C} \right) \right) \right]$$

[J / partida] [II.19]

(*) desenvolvimento dos dois termos assinalados é mostrado a seguir:

$$W\ V_L^2 \left[1 - \exp\left(- \frac{a_1}{V_L} T_a\right) \right] + W\ V_L^2 \left[-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp\left(- \frac{2\ a_1}{V_L} T_a\right) \right] =$$

$$= W\ V_L^2 \left[1 - \exp\left(- \frac{a_1}{V_L} T_a \right) - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp\left(- \frac{2a_1}{V_L} T_a \right) \right] =$$

$$= W\ V_L^2 \left\{ \frac{1}{2} + \exp\left(- \frac{a_1}{V_L} T_a \right) \left[\frac{1}{2} \exp\left(- \frac{a_1}{V_L} T_a \right) - 1 \right] \right\} =$$

$$= W\ V_L^2 \left\{ \frac{1}{2} + \left(\frac{V_L - V_C}{V_L} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_L - V_C}{V_L} \right) - 1 \right] \right\} =$$

$$= W\ V_L^2 \left\{ \frac{1}{2} + \left(1 - \frac{V_C}{V_L} \right) \left[-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{V_C}{V_L} \right] \right\} =$$

$$= W \left(V_L^2 \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{V_C}{V_L} + \frac{1}{2} \frac{V_C}{V_L} + \frac{1}{2} \frac{V_C^2}{V_L^2} \right) = \frac{1}{2} W\ V_C^2$$

A energia consumida por metro na velocidade de cruzeiro é obtida a partir de [II.15] :

$$P = \frac{dE}{dt} = C_1 V + C_2 V^3 \qquad \text{(Watts)}$$

$$E_c = C_1 + C_2 V_C^2 \qquad \text{(Joule / m)} \qquad [II.20]$$

onde: E_c : energia consumida por metro na velocidade de cruzeiro (J/m)

V_C : velocidade de cruzeiro (m/s)

C_1 e C_2 : constantes (definidas na página II.24)

II.3.4 Paradas

Se o número de paradas por kilometro for M, a energia total requerida por Km é :

$$E_{Km} = E_a M + E_c \left(1 - (D_a + D_d) \right) \qquad [II.21]$$

onde E_{Km} : energia total consumida (J / Km)

E_a : energia de aceleração (J)

E_c : energia consumida na velocidade de cruzeiro por Km (J/Km)

D_a : distância percorrida durante a aceleração (Km)

D_d : distância percorrida durante a desaceleração (Km)

II.3.5 Desaceleração

O tempo necessário para desacelerar o veículo desde a velocidade de cruzeiro até parar será dado por :

$$T_d = \frac{V_C}{D} \quad \text{(s)} \qquad [II.22]$$

onde D é a desaceleração do veículo dado em (m/s^2), por hipótese constante.

II.3.6 Distâncias Percorridas

A - Aceleração

A distância percorrida na aceleração (D_a) pode ser calculada a partir de [II.11] :

$$V = V_L \left(1 - \exp \left(- \frac{a_i}{V_L} t \right) \right) = \frac{dr}{dt} \quad , \quad 0 \leqslant t \leqslant T_a$$

$$\int_0^{D_a} dr = \int_0^{T_a} V_L \left((1 - \exp (- \frac{a_i}{V_L} t) \right) dt$$

$$D_a = V_L \, t \Big|_0^{T_a} + V_L \, \frac{V_L}{a_i} \exp \left(- \frac{a_i}{V_L} \right) \Big|_0^{T_a}$$

$$\text{mas} \quad T_a = \frac{V_L}{a_i} \ln \left(\frac{V_L}{V_L - V_C} \right)$$

$$D_a = V_L \, T_a + \frac{V_L^2}{a_i} \left(\frac{V_L - V_C}{V_L} \right) - \frac{V_L^2}{a_i} = V_L \, T_a + \frac{V_L^2}{a_i} - \frac{V_L \, V_C}{a_i} - \frac{V_L^2}{a_i}$$

$$D_a = V_L \left(T_a - \frac{V_C}{a_i} \right) \qquad [II.23]$$

B - Desaceleração

$$D_d = \frac{V_C^2}{D}$$

onde D_d : distância percorrida em metros na desaceleração.

D : desaceleração do veículo (m/s^2)

II.3.7 Diagramas de Energia

Os diagramas de energia descrevem o fluxo de energia em um veículo. Estes diagramas são similares na forma aos diagramas de fluxo utilizados em teoria de controle.

A seguir apresentamos os diagramas de energia dos 4 tipos de veículos apresentados anteriormente.

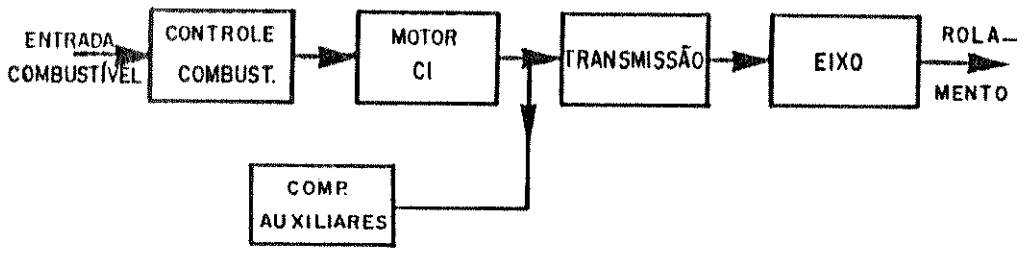
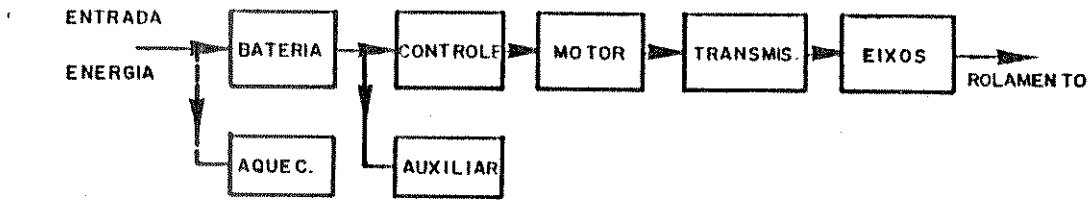


FIG.II.17 Diagrama do Fluxo de Energia de Um Veículo com Motor a Combustão Interna



Observe a representação referente ao aquecimento interno do veículo e das baterias, recurso utilizado em países com temperatura baixa ($< 10^{0}C$).

FIG.II.18 Diagrama do Fluxo de Energia de Um Veículo Elétrico.

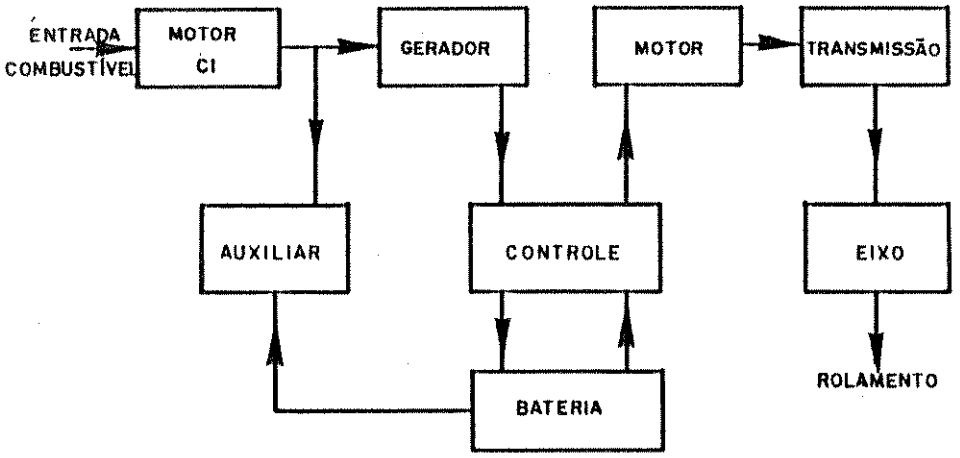


FIG.II.19 Diagrama do Fluxo de Energia de Um Veículo Híbrido Tipo Série

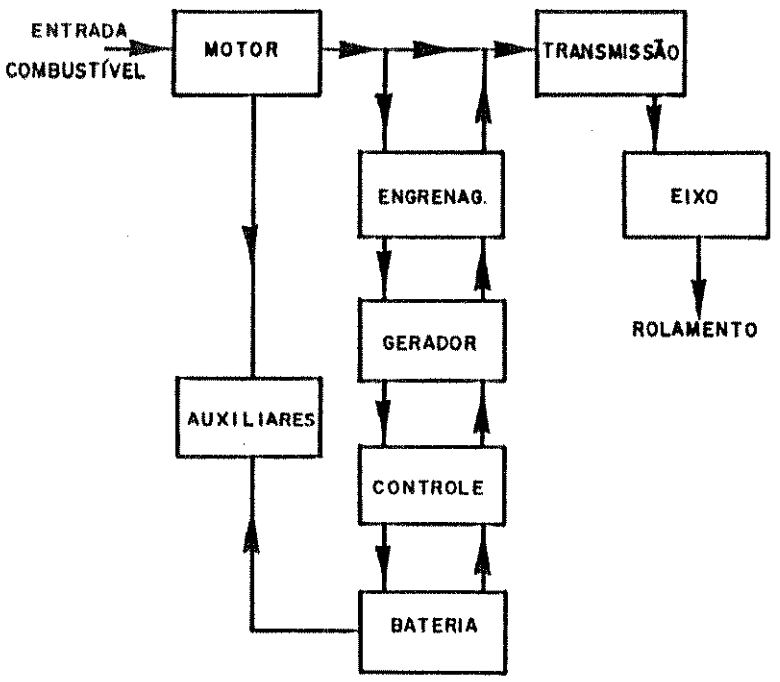


FIG.20 Diagrama do Fluxo de Energia de Um Veículo Híbrido Tipo Paralelo

Nos 4 diagramas apresentados anteriormente todos os blocos possuem eficiências energéticas inferiores a 100 %.

Normalmente um valor de eficiência somente é válido para uma determinada condição de operação. Por exemplo o motor elétrico apresenta um dado valor de eficiência para cada valor de torque e velocidade. Portanto se um veículo for avaliado em diferentes condições de velocidade e torque, um grande número de eficiências da máquina elétrica será obtido; logo para facilitar os cálculos para avaliação do desempenho de um veículo foram criados os ciclos padrões de percurso.

II.3.8 Perfil de Percurso

Visando uma padronização e facilidade para comparações entre Veículos elétricos foi criado em 1972 nos E.U.A. o ciclo SAE - J 277, Tabela II.1 . Este ciclo é baseado no ciclo CVS (Constant Volume Sampling of Emissions) (Federal Urban Driving Cycle).

O ciclo acima é específico para intervalos de aceleração e desaceleração constantes e deve ser programado usando a sequência sugerida.

Após ser criado o ciclo SAE - 277, muitos veículos elétricos foram desenvolvidos com sucesso nos E.U.A., mas este ciclo não se adaptava aos novos veículos devido a grande variedade de aplicações que os mesmos se destinavam . Foram criados então os ciclos SAE - J277a - A - B - C - D. Nestes ciclos a escolha é feita baseado na velocidade máxima de operação do veículo em estudo, foi criado deste modo uma diferenciação para os vários tipos de veículos desenvolvidos.

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

TAB.II.1 Ciclo para Veículos Elétricos SAE - J 277 (1972)

Os ciclos da TAB.II.2 foram criados com vistas à velocidade máxima que o veículo deve operar. Assim no grupo A estão os veículos para manuseio de cargas em depósitos de estradas de ferro, pontos terminais de ônibus, fábricas, armazéns, aeroportos, portos e hospitais. No grupo B estão veículos utilizados para entrega de pão, leite, transporte de alimentos nos hospitais e transporte de inválidos. No grupo C estão

os veículos utilitários utilizados para transporte de carga, manutenção de linhas aéreas, iluminação pública e subestações. No grupo D estão os veículos de passeio, táxis e outros. O perfil de velocidade por tempo do ciclo SAE - J277a é visualizado na FIG.II.20.

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

(*) Tempo de Costeamento : tempo em que o veículo fica sem esforço motriz, desacelerando devido as perdas.

FIG.II.2 Ciclos para Veículos Elétricos SAE - J 277a

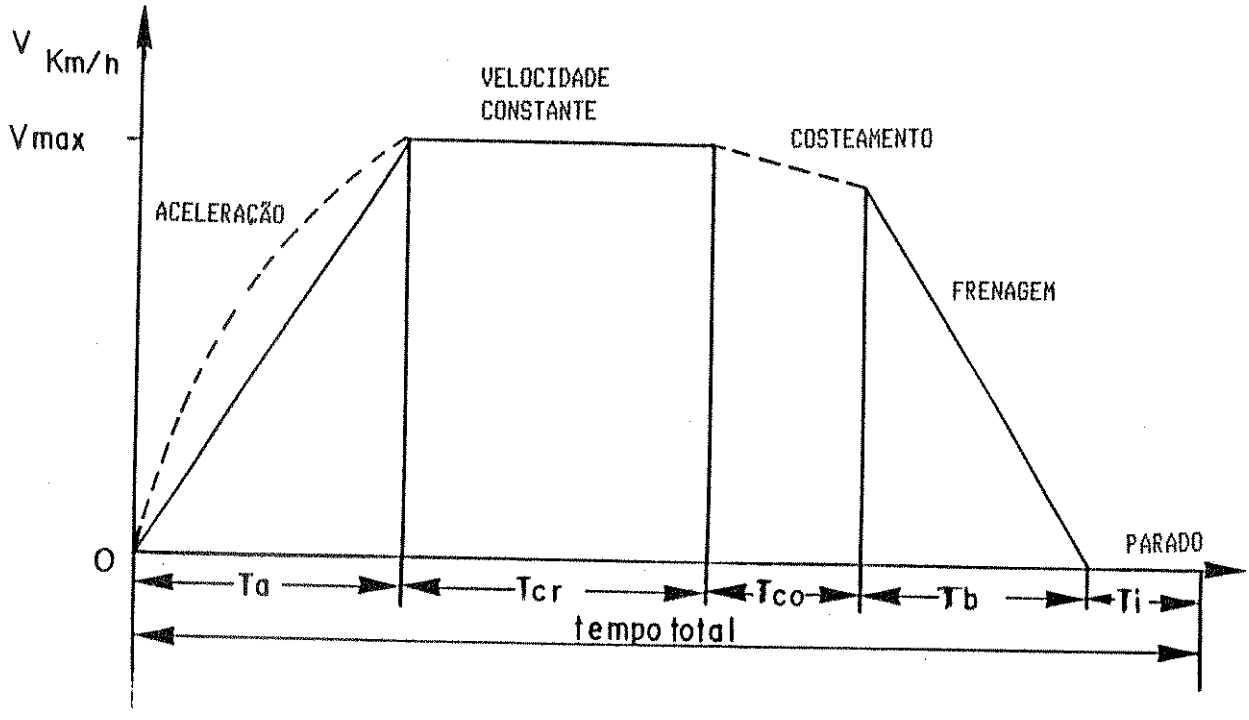


FIG.II.21 Ciclo SAE - J 227a para Veículos Elétricos.

II.4 Sumário

Neste capítulo procuramos mostrar várias das formas possíveis que um veículo elétrico pode assumir ressaltando a grande variedade de veículos híbridos existentes.

Na secção II.3 foram apresentados os parâmetros e equações necessários para o cálculo das resistências aerodinâmicas, de rolamento e inercial envolvidas num veículo, da aceleração, da velocidade, da potência, da energia, do número de paradas, da desaceleração, das distâncias percorridas; bem como diagramas de energia para Veículos Elétricos e Veículos Híbridos. A escolha de um ciclo padrão (SAE J-277a) se deve ao fato da sua ampla utilização para padronização da análise e avaliação do desempenho de Veículos Elétricos.

Este capítulo é de fundamental importância para realização e compreensão do capítulo V, quando trataremos do modelamento de um VE.

II.5 Bibliografia

1 - Unnewehr, L.E., Nasar S.a., "Electric Vehicle Tecnology" John Wiley & Sons, 1982.

2 - Moreira, J.C., Barreto, G., I Seminário sobre Veículos Elétricos Utilitários à Bateria - Palestra - São Paulo - Agosto, 1984.

3 - "Electric and Hybrid Vehicles" edited by M.J. Collie, Noyes Data Corporation, Park Ridge, N.J., 1979.

4 - Stavropovlov, Konstantinos, "Simulação em Computador de um Veículo Híbrido com Armazenamento de Energia em Volante" - Tese de mestrado em Engenharia Mecânica - UNICAMP-FEC-DEM, 1981.

5 - Artamonov, M.D., Ilarionov, A.V., Morin, M.M., "Motor Vehicles Fundamentals and Design", Mir - 1976.

6 - Palmer N.I. Alcorn, W.R., Mulkerin, D.L., "Design Considerations for Zinc - Air Batteries" - SAE - 690453, 1969.

7 - Hayden, J.T. - "Veículos Elétricos a Bateria e Híbridos", curso do DEE-FEC-UNICAMP - fevereiro 1980.

8 - Murphy G.J. "Considerations in the Design of Drive Systems for On - The Road Electric Vehicles" - Proceedings of the IEEE - vol. 60, 1519 - 1533, nº 12 December, 1972.

9 - SAE - Handbook 28.09 - Volume 4 - 1983.

10 - Hamilton, W. "Electric Automobiles", McGraw-Hill Book Company - 1980.

11 - Moreira, J.C. "Projeto Via Programação Matemática e Implementação de Conversores CC-CA de Frequência Variável" - Tese de Mestrado - DEE-FEC-UNICAMP, agosto de 1983.

CAPÍTULO III

FONTES DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

FONTES DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

III.1 INTRODUÇÃO

Um acumulador é uma célula galvânica suficientemente reversível para que possa ser elétricamente recarregada.

Um tipo de célula galvânica elementar, a Pilha de Daniel (1836), é mostrada na FIG.III.1.

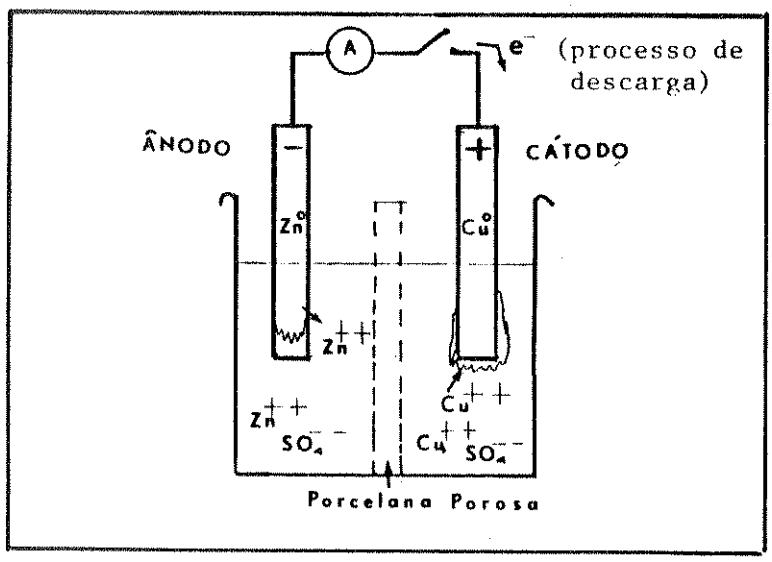


FIG.III.1 Pilha Elementar de Daniel (1836).

Uma bateria é um conjunto de acumuladores.

O que é uma bateria tracionária ?

Baterias ou Reatores Eletrolíticos são essencialmente o "coração"

de um veículo elétrico, portanto quanto mais avançada for a tecnologia e pesquisa no campo dos reatores eletrolíticos maior será o avanço na área dos veículos-elétricos.

A bateria para ser usada em tração exige uma série de pré-requisitos básicos tais como :

- Máxima capacidade acumulada de energia dentro do compartimento do veículo, ou seja energia específica (Wh/Kg) e potência específica (W/Kg) elevadas.

- Maior eficiência de descarga (a bateria deve ser capaz de fornecer picos de correntes com a mínima queda de tensão quando a máquina for submetida a sobrecargas).

- Número elevado de ciclos de carga e descarga sem degeneração de sua capacidade de armazenamento de energia.

- Grande resistência mecânica dos componentes capaz de suportar as vibrações durante o uso e eventuais choques nas trocas para a carga.

Além dêstes serão necessários para viabilizar comercialmente a bateria tracionária :

- Custo de fabricação baixo.

- Abundância da matéria-prima empregada na fabricação.

Portanto qualquer desenvolvimento de sistema eletroquímico que

não atenda tais requisitos tende a não se viabilizar para a utilização em grande escala.

Dentro dos sistemas eletroquímicos desenvolvidos com finalidades tracionárias podemos destacar os mais usuais através da TAB.III.1.

SISTEMA	Tensão por célula (volts)	Número de ciclos de vida útil	Temperatura (^{o}C)	Densidade Energética (Wh/Kg)	
				Teórica	Experimental
$Pb-H_2SO_4$	2.10	200 - 300	10 - 40	170	30 -40
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
$Zn/Cl_2.6H_2O$	2.12	500	50	831	177
Li/Al-FeS	1.60	2500	600	870	221
Li - Cl_2	3.50	2000	650	2314	110

TAB.III.1 Baterias Tracionárias - Algumas Características.

Antes de analizarmos individualmente alguns dos sistemas da TAB. III.1, devemos ressaltar que a quantidade energética disponível de uma dada bateria depende do tempo de descarga da mesma, ou seja a energia disponível é inversamente proporcional a corrente de descarga. Assim sendo a **densidade energética (Wh/Kg)** decresce quando a **densidade de potência (W/Kg)** aumenta.

III.2 BATERIA NÍQUEL-FERRO (1), (2)

A bateria de Níquel - Ferro foi desenvolvida por Thomas Edison em 1901 e até 1920 era uma bateria secundária bastante promissora de larga utilização industrial. Embora ainda amplamente utilizada na URSS. Ressaltamos que a URSS detêm atualmente 29 % da produção mundial de níquel. A bateria Ni/Fe está sendo substituída em outros países quase totalmente pela $Pb\text{-}H_2SO_4$.

Recentes pesquisas na URSS, EUA, Japão, Suiça e Bulgária podem mudar o atual estado da arte do sistema Ni/Fe e viabilizá-lo.

O eletrólito empregado é o hidróxido de potássio, KOH.

As reações eletroquímicas no sistema Ni/Fe durante a carga e descarga são mostradas a seguir :

$$2\ Ni(OH) + 2\ OH^- \rightleftharpoons 2\ NiOOH + 2\ H_2O + 2\ e^- \qquad E = +\ 0.450\ V$$

$$Fe(OH) + 2\ e^- \rightleftharpoons Fe + 2\ OH^- \qquad E = -\ 0.877\ V$$

$$2\ Ni(OH) + Fe(OH) \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftharpoons}} 2\ NiOOH + Fe + 2\ H_2O \qquad E = 1.33\ V$$

A densidade energética teórica é de 267 Wh/Kg. O número de ciclos de carga e descarga é da ordem de 1500 (3).

As desvantagens das baterias Ni/Fe são :

- corrente de pico baixa

- baixa tensão por célula

- auto-descarga (2% da capacidade por dia a 25 ^{o}C)

- alto custo de níquel

A vantagem desta bateria é a densidade energética prática da ordem de 44 - 65 Wh/Kg maior portanto que a do sistema Pb/H_2SO_4.

III.3 BATERIA NíQUEL - ZINCO (4)

O potencial do sistema Ni/Zn em circuito aberto é de 1.70 Volts.

A densidade energética teórica máxima obtida foi de 88 Wh/Kg. O número de ciclos de carga e descarga é da ordem de 300.

As reações na célula de Ni/Zn com KOH como eletrólito são :

$$2\ NiOOH + Zn + 2\ H_2O \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftharpoons}} 2\ Ni(OH)_2 + Zn\ (OH)_2$$

As baterias níquel-zinco estão em desenvolvimento pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) que tem obtido excelentes resultados principalmente devido ao uso de separadores especiais.

Tais baterias estão sendo testadas em veículos de entrega do U.S. Mail Service como parte do programa do Energy Research and Development Administration (ERDA).

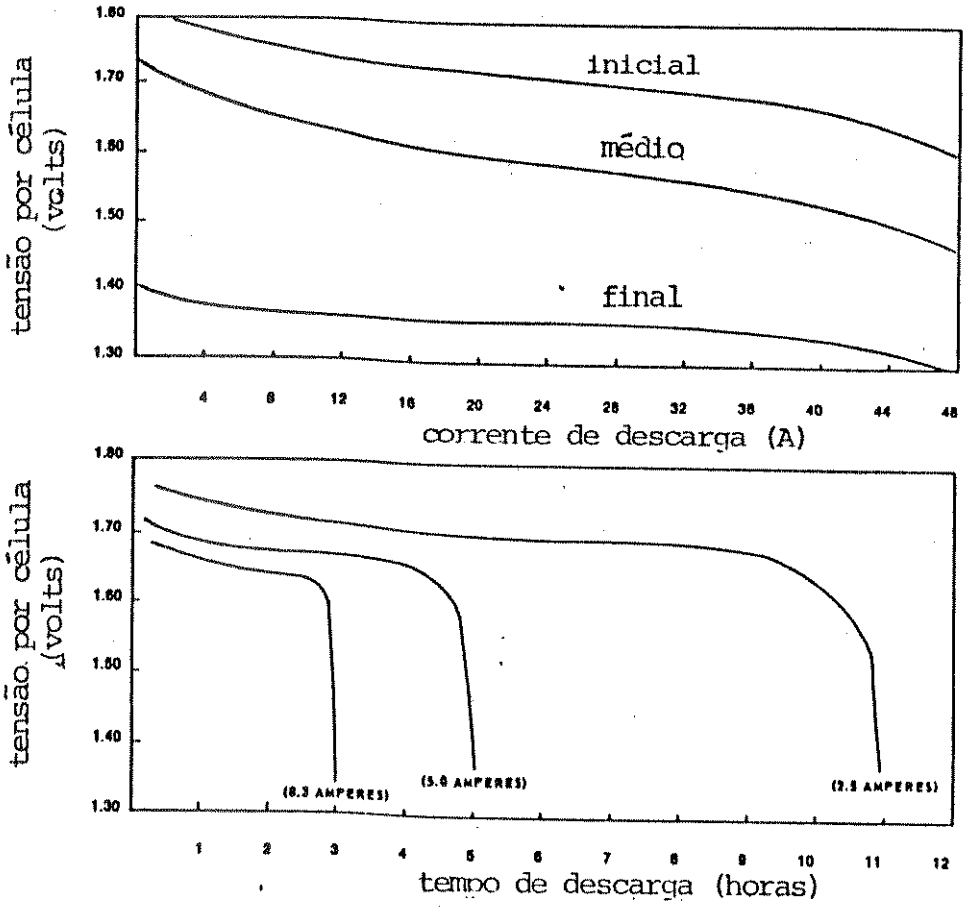


FIG.III.2 Desempenho da Bateria de Níquel-Zinco

A vida útil limitada em torno de 300 ciclos representa um problema para não viabilização destas baterias. O ciclo de vida da bateria é limitado pela tendência do eletrodo de zinco em eletrólito alcalino dar origem a formações dendríticas as quais penetram nos separadores durante o ciclo de carga, curto-circuitando os eletrodos. A possível solução para este problema é a agitação do eletrodo de zinco durante a carga, a bateria de Ni/Zn que utiliza este recurso é denominada "Vibrocel" a qual tem atingido uma vida útil de 1200 ciclos.

III.4 BATERIA DE ZINCO-CLORO HIDRATADO (4)

O sistema possue uma densidade energética elevada, 831 Wh/kg, custo material baixo e uma alta tensão por célula (2.12 V). O hidrato de cloro (Cl_2- H_2O) é obtido pelo borbulhamento de gás cloro em um resfriador (- ΔH = 80 cal/g). O hidrato de cloro é estável e poderá ser armazenado por um longo tempo num reservatório com boa isolação.

Durante o processo de carga, o zinco metálico é depositado na grade e o gás cloro é liberado no outro elétrodo através de uma contínua circulação do eletrólito aquoso de cloreto de zinco. Com a carga completa a bateria possue zinco, nas placas do anodo, e hidrato de cloro no reservatório. Durante o processo de descarga o cloro hidratado é liberado por aquecimento. As bombas de circulação do hidrato e do eletrólito são ligadas, colocando em contato com a célula de zinco, através do eletrólito, o cloro liberado.

$$Zn + Cl_2.6\,H_2O \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftharpoons}} ZnCl_2 + 6\,H_2O$$

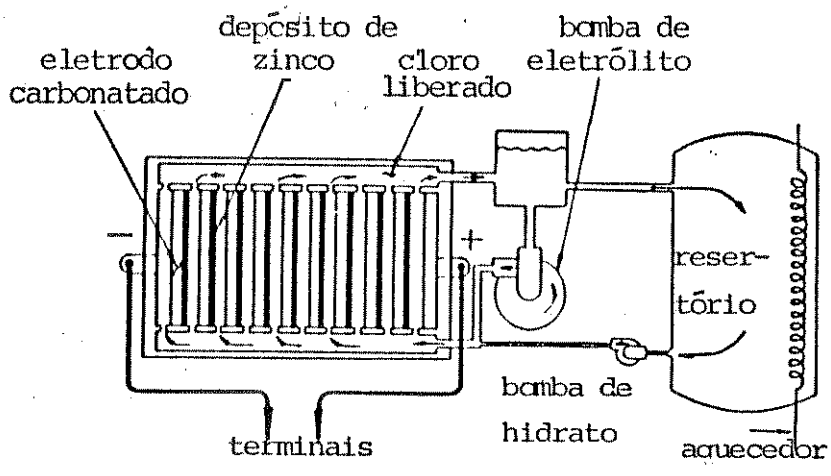


FIG.III.3 Bateria de Zinco-Cloro Hidratado

Existe atualmente a necessidade de melhorar o sistema de resfriamento. A troca de calor do resfriador significa perda do Cl_2 gasoso, o qual recupera-se aumentando a pressão de armazenamento no sistema ou causa envenenamento se liberado. O que sem dúvida irá exigir um equipamento complexo e de alto custo para termos um funcionamento e segurança adequados.

III.5 BATERIAS DE SÓDIO - ENXOFRE (5)

As baterias de sódio-enxofre apesar de operarem a altas temperaturas (350 ºC), possuem alta densidade energética pois os seus reagentes possuem grandes diferenças de eletronegatividade (V = 2.08 V) e baixo peso específico.

Tanto o sódio quanto o enxofre fundem-se a 115 ^{o}C . Logo a partir de 115 ^{o}C já podemos obter uma diferença de potencial entre o Na/S.

A reação que se processa na célula é :

$$x\ Na + y\ S \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftharpoons}} Na_xS_y$$

onde x = 2 e y = 3 a 5.

A bateria Na/S irá opera com eletrodos líquidos e um eletrólito sólido denominado β-alumina dopada com pequenas quantidades de óxido de sódio que conduz seletivamente o íon de sódio, além de ser resistente a corrosão, impermeável ao sódio e ao enxofre e de resistência mecânica satisfatória.

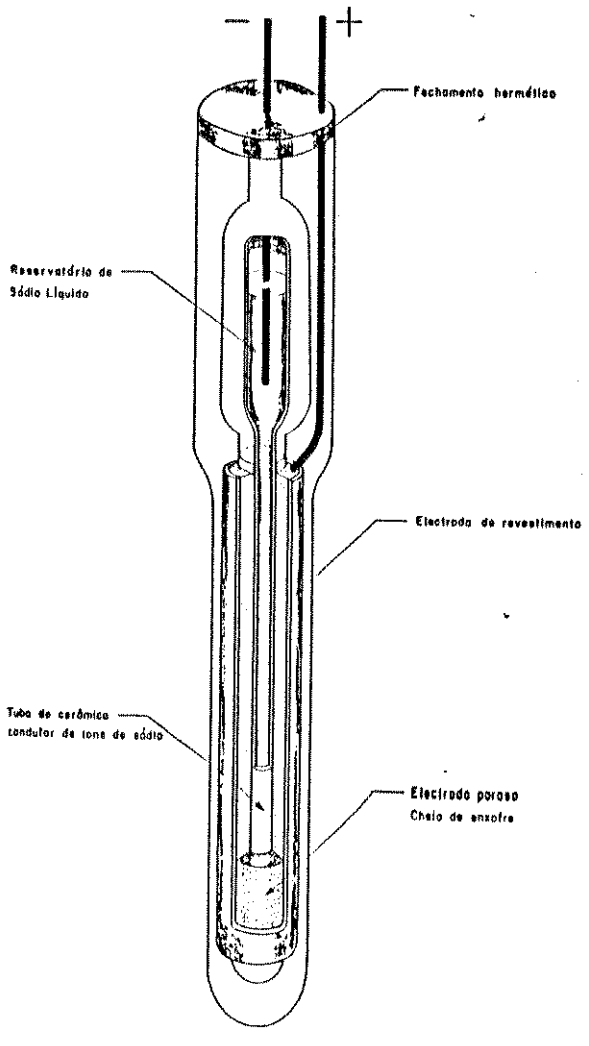


FIG.III.4 Bateria de Sódio - Enxofre.

III.6 BATERIAS DIVERSAS

Outros tipos de baterias Fe-ar, Zn-ar, Li/Al-FeS_2,Li-Cl_2 são objetos de estudos e vários protótipos tem sido construídos e utilizados de maneira ainda pouco satisfatória devido ao alto custo da tecnologia envolvida; portanto a bateria chumbo-ácido que será tratada a seguir, irá ainda predominar como a mais usada nos próximos anos.

III.7 BATERIA DE CHUMBO-ACIDO

A bateria chumbo-ácido é o sistema eletroquímico recarregável de maior importância comercial da atualidade. O seu uso como fonte de energia para ignição na partida e iluminação em veículos convencionais, e para tração, nos veículos elétricos, não só está solidamente estabelecido como vem sofrendo um constante aumento ano após ano.

Dentro da crescente ênfase sobre as várias formas de tração, considerações sobre aspectos econômicos e de regeneração do chumbo, tem mantido as baterias chumbo-ácido como a única fonte de energia elétrica de larga escala de utilização no campo dos reatores eletroquímicos.

Apesar da competição tecnológica que introduz novos reatores, como por exemplo, os acumuladores de alta energia e as células combustíveis, que podem se tornar atrativos no futuro em aplicações especializadas, a bateria chumbo-ácido tem grandes chances de se manter em ampla escala de utilização até um futuro ainda não definido.

É sabido que o uso de veículos elétricos industriais como carregadores e de veículos elétricos comerciais, em entregas, equipados com baterias chumbo-ácido, já está bem estabelecido em vários países do mundo.

Diante desta perspectiva, a necessidade de uma utilização mais eficiente e de melhorias na construção da bateria chumbo-ácido, torna-se óbvia.

Neste sentido, um ponto que precisa ser abordado de imediato é o da avaliação do desempenho das baterias comerciais existentes atual-

mente no mercado brasileiro. De posse de tal informação pode-se direcionar os esforços de pesquisa no sentido onde eles sejam mais necessários. Localizar as principais falhas na construção e na utilização das baterias é um ponto chave para se desenvolverem estudos de otimização das mesmas. Saber como avaliar e como interpretar o desempenho em termos dos princípios eletroquímicos de funcionamento da bateria, é pré-requisito para que se possa empreender mudanças que levem a um aumento da capacidade e a uma utilização mais racional da bateria chumbo-ácido.

Este tipo de preocupação faz parte dos objetivos principais deste capítulo que está voltado para um estudo sistemático desta bateria, calcado nos conhecimentos até então disponíveis.

É importante ressaltar que estudos sobre o desempenho de baterias chumbo-ácido podem ser encontrados na literatura, por exemplo referências (6) e (7). Porém tais estudos, efetuados com sistemas de placas isoladas e baterias que não pertencem à nossa realidade tecnológica, devem ser encarados como um suporte teórico para que se possa desenvolver, aqui, os estudos necessários. Convém mencionar também que alguns fabricantes de baterias levantam curvas de desempenho semelhantes às por nós obtidas. Entretanto, pode-se verificar que tais resultados, de forma geral, não são atualizados e que em alguns casos são mesmo obtidos de fontes de literatura e encarados como uma verdade geral.

Logicamente, uma idéia concreta sobre a qualidade e as características de desempenho das baterias chumbo-ácido do Brasil envolve uma avaliação de todos os principais modelos e marcas disponíveis. Neste trabalho pretende-se apenas introduzir as bases, segundo as quais, esta avaliação poderia ser feita e compreendida, para em seguida, um es-

tudo mais completo se determinar as possíveis melhorias a serem introduzidas nesta fonte de energia de uso tão amplo e importante.

III.8 A ELETROQUÍMICA DA BATERIA CHUMBO-ÁCIDO

III.8.1 INTRODUÇÃO

Talvez, na apresentação de um estudo sobre a bateria de chumbo-ácido, surja a pergunta : porque afinal este tipo de bateria ? Qual a sua origem ? Neste caso, é necessário recordar alguns dados históricos.

Decorrem aproximadamente 60 anos desde a descoberta do princípio da célula galvânica (Zn-Ag) por Volta, até a sua aplicação no sistema $Pb/H_2SO_4/PbO_2$ em 1860 por Siemens e Sinsteden (4).

Quase 10 anos depois Planté planejou uma célula para o armazenamento de energia elétrica que consistia de duas lâminas de chumbo separadas por tiras de borracha enroladas em espiral em uma solução diluída de H_2SO_4 ($\simeq$ 10 %). Ele descobriu que com o fornecimento de carga elétrica à célula seguido de períodos de descarga, aumentava a capacidade da mesma, devido a um aumento no depósito de material ativo.

Placa positiva

$$Pb^{o} + 2\,H_2O \longrightarrow PbO + 4\,H^{+} + 4\,e^{-}$$

$$2\,OH^{-} \longrightarrow 0.5\,O_2 + H_2O + 2\,e^{-}$$

Placa negativa

$$Pb^{\circ}\ (maciço) \longrightarrow Pb^{\circ}\ (esponjoso)$$

$$2\ H^{+} + 2\ e^{-} \longrightarrow H_2$$

e as reações de descarga das correspondentes placas são :

Placa positiva

$$PbO_2 + 3\ H^{+} + HSO_4^{-} + 2\ e^{-} \rightleftharpoons PbSO_4 + 2\ H_2O$$

Placa negativa

$$Pb^{\circ}\ (esponjoso) + HSO_4^{-} \rightleftharpoons PbSO_4 + H^{+} + 2\ e^{-}$$

Reação Geral

$$Pb^{\circ} + PbO_2 + 2\ H^{+} + 2\ HSO_4^{-} \underset{\text{carga}}{\overset{\text{descarga}}{\rightleftharpoons}} 2\ PbSO_4 + 2\ H_2O$$

Quando se faz passar corrente pela célula o chumbo metálico da chapa positiva é convertido em peróxido de chumbo, enquanto que a chapa negativa não sofre alteração química, mas modifica-se de chumbo maciço para chumbo esponjoso, mais macio e mais poroso que o chumbo metálico comum.

Quando a célula é descarregada, o peróxido de chumbo da placa positiva transforma-se em sulfato de chumbo e o chumbo esponjoso da placa negativa também converte-se em sulfato de modo que ambas as placas tendem a igualar-se eletroquimicamente e sendo idênticas do ponto de vista eletroquímico, isto é, encontrando-se ambas sob a forma de sulfato de chumbo, não há diferença de potencial entre as mesmas.

Se entretanto, pela ação da corrente de carga, a placa positiva modifica-se para peróxido e a negativa para chumbo esponjoso, passa a existir uma força eletromotriz (f.e.m) entre as mesmas e fechando-se o circuito elétrico, a célula pode fornecer corrente elétrica até o po-

tencial elétrico entre as duas placas se iguale.

Isto é o que foi observado por Planté, levando-o a introduzir o sistema chumbo-ácido como acumulador reversível de energia eletroquímica.

Logicamente, um grande número de outras células e sistemas eletroquímicos foram propostos. A maior parte porém possue desvantagens que impedem a sua adoção comercial..

Uma célula de estocagem ideal deve possuir baixa resistência elétrica, deve ter uma construção simples e resistente, ser durável e produtível a um baixo custo.

O sistema de chumbo-ácido é de uso universal, o que se justifica pelas seguintes vantagens : ele não sofre por efeitos de deterioração química, apresenta uma transformação quase reversível da energia química em energia elétrica e vice-versa, baixa resistência interna e baixo custo dos constituintes, grande capacidade de recuperação sob várias centenas de ciclos de carga e descarga, flexibilidade de desempenho sob uma intensa gama de variações de razão de descarga e temperatura e boas características de estocagem de energia em estados de carga seca.

Como principais desvantagens o acumulador de chumbo-ácido não possue uma alta capacidade por unidade de massa, como deve se desejar, e enquanto sua construção é simples, a resistência mecânica das placas é baixa.

III.8.2 A CONSTRUÇÃO DOS COMPONENTES INTERNOS

A - As Placas

Não seria prática a construção de acumuladores com placas feitas de folhas de chumbo compactas, como se fez nas explicações anteriores. Um acumulador construído desta forma teria uma capacidade tão pequena que não permitiria o fornecimento de uma corrente com finalidades comerciais durante um tempo apreciável, a não ser que as placas possuissem dimensões proibitivamente exageradas para assegurar a superfície ativa necessária.

Além disso um fornecimento prolongado de carga a um acumulador deste tipo levaria ao desprendimento da camada escura de óxido de chumbo da placa positiva, que se esfolaria indo para o fundo da cuba. Portanto num acumulador comercial são necessárias modificações que impeçam o desprendimento do material ativo e proporcionem uma capacidade adequada de acumulação de energia dentro de dimensões limitadas.

Para atender a estas finalidades, foram desenvolvidas numerosos tipos de placas positivas (PbO_2) e negativas (Pb^0 esponjoso) em uma grande variedade de tamanhos e configurações, sendo que o uso de um determinado tipo de placa depende das aplicações para as quais a bateria chumbo-ácido é destinada.

Os principais tipos de placa podem ser resumidos nas seguintes categorias :

a - Placas de massa (Placas Faure)

As placas do tipo Faure são as mais usadas. Elas consistem de uma grade de chumbo-antimônio, à qual se aplica uma pasta ou massa constituída de óxido de chumbo (PbO).

Após a aplicação da pasta a bateria é carregada eletroliticamente. Sob a ação da corrente elétrica a pasta na placa positiva transforma-se em peróxido de chumbo (PbO_2) e na placa negativa transforma-se em chumbo esponjoso. As reações de formação do material ativo podem ser esquematizadas como :

Placa positiva $\left\{ \right.$ $PbO + H_2O \rightleftharpoons PbO_2 + 2\,H^+ + 2\,e^-$

Placa negativa $\left\{ \right.$ $PbO + 2\,H^+ + 2\,e^- \rightleftharpoons Pb^o + H_2O$

As placas positivas são distinguíveis pelo material ativo mais escuro em comparação com o cinza claro das negativas, devido a adição de carvão ativo em sua composição.

Normalmente as placas positivas em uma bateria chumbo-ácido são feitas com grades mais grossas devido à estrutura intrinsicamente instável da placa positiva, que é o resultado da corrosão da grade devido à ação galvânica local entre o chumbo da grade e o PbO da massa ativa.

A FIG.III.5 é uma representação esquemática de uma grade, mostrando as barras verticais interceptadas pelas barras horizontais mais finas.

O objetivo de uma grade não é apenas reter o material ativo das placas. A grade precisa propiciar uma distribuição uniforme do poten-

cial e da densidade de corrente da placa quando da participação do material ativo.

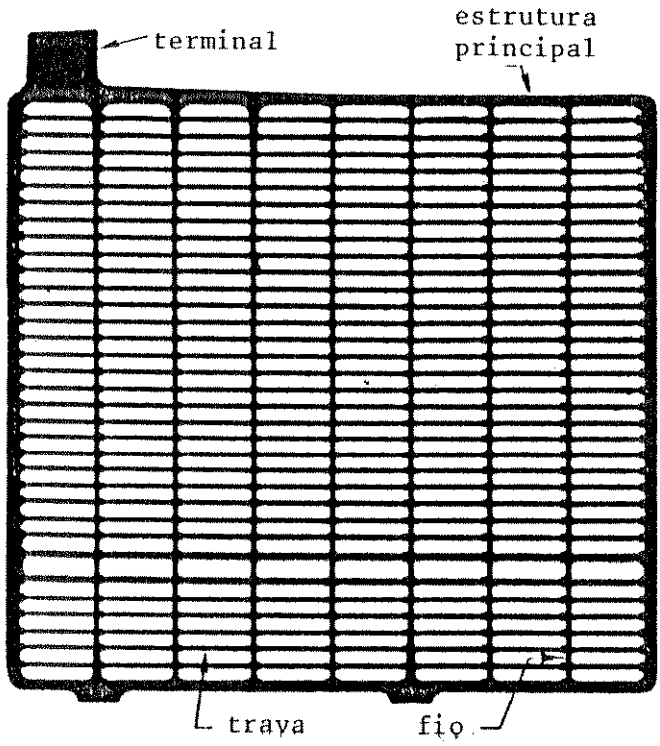


FIG.III.5 Exemplo de uma grade convencional utilizada em uma bateria chumbo-ácido.

Vaaler e Brooman (19) apresentam um trabalho de modelamento matemático para projetos de grades para baterias a serem utilizadas em veículos elétricos visando minimizar a resistência ôhmica global da grade, obtendo desta maneira uma distribuição mais uniforme da densidade de corrente na placa quando da utilização da bateria.

Há sempre duas placas negativas para cada placa positiva proporcionando assim, uma igual atividade em ambas as faces da mesma. Este cuidado é tomado em virtude da fragilidade mecânica da placa positiva, que se for operada de um lado só sofrerá um empenamento devido à desi-

gualdade dos esforços provocados pela transformação do material ativo em peróxido durante a carga.

A área de superfície específica do material ativo da placa positiva é de 10 a 20 vezes maior que as das placas negativas.

	Área de superfície específica
Placa positiva	α PbO = 0.5 m^2/g
	β PbO = 7.5 a 9.5 m^2/g
Placa negativa	Pb° (esponjoso) = 0.03 a 0.08 m^2/g

Esta diferença nas superfícies ativas permite que o número de placas positivas seja menor do que o de placas negativas.

Uma variação deste desenho de placas é as chamadas placas de caixa usadas nas placas negativas de algumas baterias estacionárias e que consistem de um sanduíche do material ativo entre duas grades presas entre si.

As vantagens das placas de massa são :

- Grande capacidade de produção de corrente
- Pequeno tamanho
- Baixo preço de custo
- Pouco peso

Pelo pequeno volume e pouco peso, são indicadas para veículos

elétricos e para baterias de ignição e arranque em automóveis.

b - Placas Planté

Nas placas Planté o material ativo também é formado eletroquimicamente, porém, nesse caso o material de partida é o chumbo metálico.

As reações de formação do material ativo são :

Placa positiva : $Pb^{0} + 2\ H_2O \rightleftharpoons PbO_2 + 4\ H^{+} + 4\ e^{-}$

Placa negativa : Pb^{0} (maciço) $\rightleftharpoons$ Pb^{0} (esponjoso)

A placa Planté não possue grade metálica interna sendo que a sua estrutura é constituída por um substrato do mesmo chumbo que originou o material ativo da superfície.

A placa é primeiramente submetida à ação de cilindros rotativos de aço que tornam sua superfície enrugada aumentando assim a área lateral das faces. Como este processo enfraquece mecanicamente a placa, certas partes da mesma não são trabalhadas pelos cilindros, permanecendo como nervuras destinadas a suportar os esforços mecânicos da placa.

As placas Planté normalmente são maiores, mais pesadas e possuem menor capacidade em relação as Faure. São entretanto mais duráveis, sendo indicadas para baterias estacionárias onde as considerações de peso e espaço não são importantes.

c - Placas tubulares

As placas tubulares foram primeiramente desenvolvidas em 1920 e consistem de uma armação de barras verticais de chumbo-antimônio (Pb-Sb) rodeadas pelo material ativo que se mantém encerrado em tubos perfurados. As barras de Pb-Sb são de formato irregular e passam pelo centro de cada tubo constituindo a grade coletora de corrente.

O PbO_2 é prensado dentro dos tubos preenchendo todo espaço existente entre o núcleo irregular e a parede interna dos tubos. As perfurações são de um tamanho tal que não permitem o escape do material ativo com facilidade, sendo que o desgaste da placa positiva pelo desprendimento do material ativo fica praticamente eliminado.

Este tipo de desenho é planejado principalmente para as placas positivas (limitantes da vida e do desempenho da bateria) sendo que a placa negativa é feita da variedade usual de placa empastada ou Faure.

São três os principais tipos de construção em uso atualmente :

1 - Tubos de fibra de vidro trançada colados com resina, comumente usados nos Estados Unidos e no Japão.

2 - Tubos de fibra trançada revestidos de PVC perfurado.

3 - O sistema inglês de placas blindadas Exide, onde os tubos são inseridos em uma luva de Terilene trançada ou não (também conhecido como células Panzer na Alemanha) é considerado o modelo mais econômico.

Aparentemente a capacidade das placas tubulares é mais extensivamente influenciada pela concentração do eletrólito sendo menos sensível à densidade do material ativo.

Variações no comportamento podem ser conseguidas através de modificações no desenho dos tubos e na forma de secção transversal.

As placas tubulares são manufaturadas para possuir principalmente uma maior área superficial e uma maior capacidade com relação ao βPbO_2 (lembrando que o βPbO_2 possue uma maior superfície específica).

A pressão interna resultante da transformação do PbO_2 em $PbSO_4$ (que possue um volume específico 1.5 vezes maior é contido pelas paredes do tubo, havendo um desprendimento de material ativo desprezível. Tanto os tubos de secção transversal elíptica, como os de secção circular, são efetivos na contenção da pressão interna do material de descarga.

Secções transversais quadradas ou retangulares fornecem de 3 a 5 % a mais de capacidade, com um risco maior de desalojamento do material ativo durante os ciclos.

Para aplicações que exigem descargas profundas, como no caso de baterias para tração elétrica os desenhos circulares ou elipticos são os preferidos.

As placas tubulares são planejadas para aplicações que requerem longa vida e pouca manutenção. Seu custo mais elevado é compensado por uma mais alta reabilitação (ou regeneração da carga) quando usada

em descargas profundas (Exemplo : como baterias tracionárias). Além disso a duração das placas tubulares atinge o dobro ou mesmo o triplo da duração das placas equivalentes comuns (Faure).

d - Placas leves

As placas leves incorporam material polimérico na construção das grades.

São usadas grades de policarbonato com alguns arames de chumbo para coletar a corrente. Uma montagem alternativa é a moldagem de terminais coletores de Pb^{o} junto com uma grade de plástico recoberta com uma camada de Pb^{o}.

Deve-se notar que tais placas exibem baixas razões de auto descarga, devido ao chumbo usado com condutor ser usualmente puro.

B - Os Separadores

Com relação ainda aos constituintes internos da bateria chumbo-ácido, é necessário conhecer e avaliar com atenção os separadores das placas.

Os separadores entre os ânodos e cátodos são necessários em primeiro lugar para proporcionar uma estrutura que evite o contato entre placas de polos opostos e para retardar oa tanto quanto possível o desprendimento do material ativo, bem como a transferência de espécies indesejáveis como o antimônio.

Para certos tipos de baterias os separadores são do tipo "envelope" e envolvem a placa contribuindo para a retenção do material ativo em contato com a grade coletora de corrente.

Os tipos de separador presentemente em uso para as baterias chumbo-ácido dependem do tipo de aplicação. Podem ser feitos de :

- Derivados de celulose.
- Material polimérico microporoso como :
  PVC
  Polietileno
  Poliésteres
  Borracha
- Material sinterizados como :
  PVC
  Polietileno
- Papel ligado por resina

Muitos separadores possuem nervuras longitudinais que produzem um espaçamento adequado entre as placas permitindo a convecção natural da solução para minimizar os gradientes de temperatura e concentração no seio do eletrólito.

Em alguns casos o separador é uma variedade constituída por lã de vidro emaranhada e o espaçamento é proporcionado pela colocação de suportes plásticos de várias configurações como o PVC expandido em uma forma porosa.

Muitos separadores do tipo emaranhado são também usados as vezes como matrizes de imobilização do eletrólito no sentido de controlar a

agitação do mesmo (devido por exemplo a vibrações do veículo) e para proporcionar um controle na interface eletrodo-eletrólito.

Uma grande variedade de combinações de separadores usando vários tipos juntos é também encontrada na prática dependendo da aplicação.

Com o advento das baterias seladas que impedem o ingresso de constituintes atmosféricos na bateria minimizando assim a auto-descarga, pois uma das razões da auto-descarga é a reação expontânea que ocorre no ânodo da bateria :

$$Pb^{o} \xrightarrow{O_2} PbO_2 \xrightarrow{H_2SO_4} PbSO_4$$

Foram desenvolvidas grades não antimoniais e consequentemente mais propensas ao desprendimento do material ativo da placa positiva (especialmente quando se adiciona H_3PO_4 ao eletrólito visando minimizar a formação de Pb^{o} duro na placa positiva), os separadoresde cavidades microporosas tem se tornado populares em baterias chumbo-ácido. Eles são, neste caso, colocados de modo a envolver a placa positiva proporcionando um suporte junto ao material ativo.

Zehender (8) definiu a eficiência de um separador para uma bateria que usa Pb-Sb em termos da extensão de transporte de ^{124}Sb radiotivo do eletrólito adjascente à placa positiva para o eletrólito adjacente a placa negativa (A migração e Sb da placa positiva para a negativa é prejudicial, levando a reações de auto-descarga). Foi usado um critério quantitativo que consiste no produto da resistência elétrica pela difusividade do Sb. Baixos valores (por exemplo 1 - $2.10^{-4}\ \Omega\ cm^3$ / min para madeira) são características de bons separadores, que previnem o envenenamento da placa negativa pelo transporte de íons Sb da

placa positiva. Este critério pode ser usado para uma diferenciação quantitativa entre vários tipos de separadores feitos de material similar. Por exemplo :

$20 - 70.10^{-4}$ cm^3/min para materiais tipo papel

$2 - 90.10^{-4}$ cm^3/min para materiais plásticos

Em geral bons separadores contém tortuosos e pequenos capilares ou paredes porosas semi permeáveis, as quais são permeáveis a íons H , mas impermeáveis a espécies indesejáveis como o Sb .Numa faixa onde o tamanho de poro predominante é de 5 µm, limites até 25 µm são aceitáveis.

Além da migração de antimônio, a transferência de expansores (por exemplo, derivados de lignina) da placa negativa para a positiva onde são oxidados pode também ser um problema.

Um separador efetivo deve levar em conta uma variedade de critérios. Deve-se avaliar propriedades como :

- Permeabilidade
- Porosidade
- Distribuição do tamanho do poro
- Área de superfície específica (m^2/g)
- Formato (resistência mecânica)
- Condutividade iônica
- Compatibilidade química na solução do eletrólito

A FIG.III.6 indica o efeito da seleção do separador na vida da bateria.

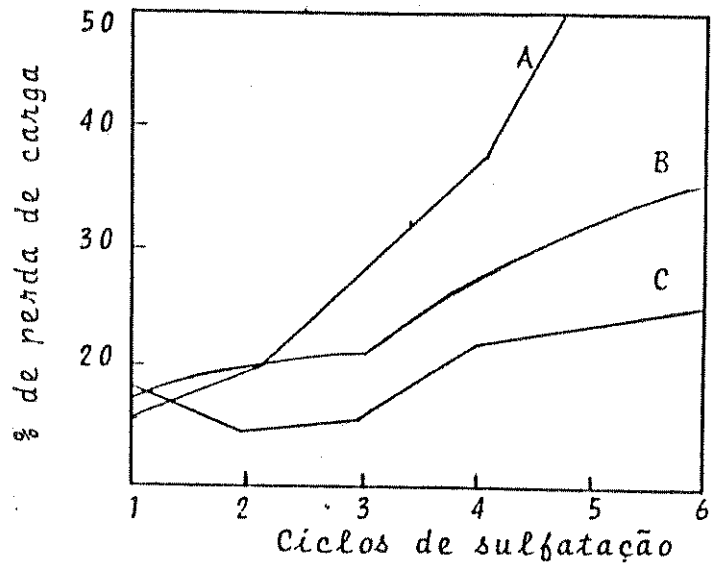


FIG.III.6 Teste de ciclos de sulfatação. A - bateria com separadores de papel colados com resina; B - bateria com separadores de PVC sinterizados; C - bateria com separadores microporosos de PVC.

Um ciclo de sulfatação é o ciclo de carga e descarga e a sulfatação ocorre durante o processo de carga por transformação incompleta do $PbSO_4$ em Pb e PbO_2 .

C - O Eletrólito

O eletrólito da bateria chumbo-ácido é uma solução aquosa de ácido sulfúrico.

Basicamente deve-se notar o fato de que o eletrólito, H_2SO_4 , em solução não é apenas um meio de transporte iônico, mas é também um reagente. O produto de descarga tanto da oxidação do ânodo de chumbo

como da redução do cátodo de dióxido de chumbo é o sulfato de chumbo ($PbSO_4$), de onde vem a terminologia "sulfato duplo", muitas vezes usada para designar a teoria de operação da bateria de chumbo-ácido.

Durante a operação de carga e descarga o eletrólito sofre variações em sua composição e densidade. A TAB.III.2 mostra as variações típicas para uma bateria chumbo-ácido tipo S.L.I..

	Condição da bateria	
	Carregada	Descarregada
% em peso de H_2SO_4	35	15
Molaridade (H_2SO_4)	4.5	1.7
pH	-0.7	-0.2
Densidade (25°C)	1.265	1.100
Tensão de uma célula	2.1	1.75

TAB.III.2 Características do eletrólito de uma bateria chumbo-ácido tipo S.L.I..

Um fator a se considerar é o grau de pureza do eletrólito. A placa negativa de chumbo esponjoso é afetada por impurezas que se depositam sobre sua superfície induzindo a auto-descarga através da ação galvânica local. O resultado é a evolução de hidrogênio e a sulfatação da placa.

Espécies de baixa sobretensão de hidrogênio tais como platina, são particularmente prejudiciais, e outros elementos como ferro, cobre, zinco, manganês, arsênio e antimônio pertencem à categoria de contaminantes indesejáveis.

A presença de ferro afeta tanto o elétrodo positivo como o negativo por ação redutora local. Contaminantes orgânicos também interferem com a operação da placa positiva aumentando as perdas por polarização.

Devido as altas densidades de corrente e altas concentrações de eletrólito, especialmente na sobrecarga, o arsênio e o antimônio podem desprender gases tóxicos conhecidos como : arsina (AsH_3) e estibina (SbH_3) respectivamente.

As especificações padrão para impurezas mudam de país para país. Critérios estabelecidos nos Estados Unidos e na Inglaterra estão exemplificados na TAB.III.3..

Impureza	Padrão Americano	Padrão Inglês
Resíduos sólidos	750.00	500.00
Fe	30.00	41.00
SO_2	15.00	17.00
As	0.40	6.80
Sb	0.40	
Mn	0.07	1.40
NO_3	2.00	
NH_4	4.00	
Cloreto	40.00	24.00
Cu	25.00	24.00
Zn	15.00	
Se	7.00	
Ni	0.40	

TAB.III.3 Especificação de impurezas máximas aceitáveis para o eletrólito de baterias (em ppm referente a H_2SO_4 100 %).

D - O Sulfato de Chumbo

O sulfato de chumbo ($PbSO_4$) tem um volume específico em torno de 1.4 vezes maior que o PbO_2 e 1.8 vezes maior que o chumbo metálico. Desta forma, durante os ciclos de carga e descarga as placas ficam submetidas a mudanças morfológicas que produzem uma deformação significativa.

Como resultado da combinação do efeito do íon comum e de variações no equilíbrio sulfato/bisulfato, a solubilidade do sulfato de chumbo, que é mais alta em água, passa por um mínimo seguido de um máximo a uma concentração de aproximadamente 10 % em peso de H_2SO_4 e depois decresce novamente. Esta variação pode ser visualizada na FIG. III.7..

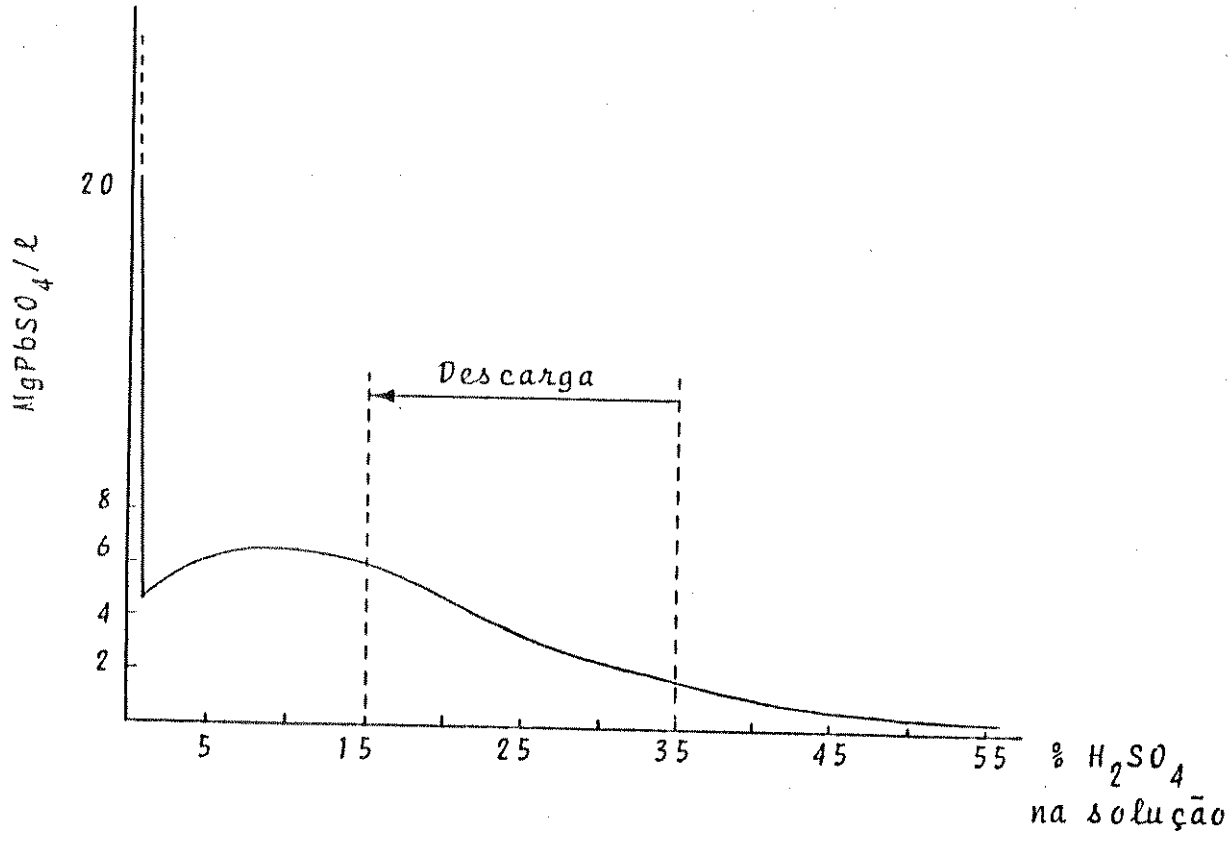


FIG.III.7 Variação da solubilidade do sulfato de chumbo em soluções de ácido sulfúrico.(Obtido a partir de dados da Ref.4)

Estas características de solubilidade são importantes do ponto de vista do desempenho das placas como se pode ver pelo seguinte :

O sulfato de chumbo é altamente resistivo (aproximadamente $10^8 \Omega$ - cm) e possue uma estrutura cristalina ortorômbica facilmente identificável por difração de raio X. Ele está presente em uma estrutura finamente granulada ou como grandes cristais, construindo o chamado SULFATO DURO que não é regenerável nas espécies Pb^o e PbO_2 , eletroquimicamente ativas. A aglomeração de quantidades significativas de sulfato duro usualmente determina o fim da vida útil da bateria.

Estudos recentes (17,18) por microscopia eletrônica e difração de raio X tem revelado diferenças morfológicas entre o $PbSO_4$ recarregável e o $PbSO_4$ refratário (duro) presentes sobre o chumbo puro. O $PbSO_4$ recarregável demonstrou nuclear preferencialmente nos primeiros estágios da oxidação anódica do chumbo e cresce dendriticamente em função das condições de descarga.

O fenômeno da nucleação do $PbSO_4$ pode ser interpretado através do seguinte esquema :

A reação de oxidação anódica do chumbo é :

$$Pb^o + HSO_4^- \rightleftharpoons PbSO_4 + H^+ + 2\ e^-$$

Nos primeiros estágios de descarga emos :

Concentração de H_4SO_4 na solução - 35 %

Solubilidade do $PbSO_4$ - 2.02 mg/l

Uma vez que a solubilidade do $PbSO_4$ aumenta durante a descarga variando aproximadamente de 2.02 a 6.28 mg/l, no início da descarga o $PbSO_4$ está em sua solubilidade mínima (para as condições da bateria) e assim a nucleação e a precipitação dos cristais é rápida levando à formação de cristais pequenos ("menos organizados"), que são os cristais "solúveis" ou regeneráveis.

A baixa solubilidade do $PbSO_4$ no início da descarga pode ser visualizada pelo equilíbrio de precipitação representado abaixo :

$$2\,e^- + H^+ + PbSO_4 \rightleftharpoons Pb + \boxed{HSO_4^-} \quad \boxed{HSO_4^-} + H^+ \rightleftharpoons H_2SO_4$$

Como a concentração de H_2SO_4 é alta no início da descarga, o equilíbrio acima é deslocado para a esquerda levando a uma precipitação rápida de $PbSO_4$ que origina os cristais finamente granulados. Com o prosseguimento da descarga a concentração de H_2SO_4 vai diminuindo e consequentemente a reação de precipitação de $PbSO_4$ é mais lenta permitindo, nas condições específicas para, tal a formação dos cristais grandes de $PbSO_4$ duro.

Logicamente, este fenômeno depende da razão de descarga a que a bateria será submetida. A uma alta razão de descarga, que leva a um rápido esgotamento da bateria, não se chega a produzir a condição necessária de concentração e tempo para que se forme o sulfato duro, sendo que o mesmo é mais susceptível de se formar às razões de descarga de moderada a baixa.

Cabe aqui assinalar que o esquema das reações é baseado na dissociação do eletrólito em íons H^+ e HSO_4^-, o que se aproxima mais da realidade uma vez que a dissociação do eletrólito em íons H^+ e SO_4^{--}, como é representada muitas vezes, aplica-se apenas a casos de diluição extrema.

O material ativo das placas, (tanto o chumbo como o dióxido de chumbo) não pode ser totalmente utilizado eletroquímicamente e a eficiência faradaica varia usulmente entre 25 a 60 %, dependendo da idade da bateria , temperatura e razão de descarga. Como é de se esperar, as placas finas (1 mm) e altamente porosas (65 - 70 %) descarregadas a baixas densidades de corrente (por exemplo, razões de 10 a 20 horas), resultam numa eficiência faradaica mais alta. Porém esta vantagem é contrabalanceada por um ciclo de vida reduzido, conforme se caminha pra extremos práticos de espessura e porosidade.

A eficiência de corrente em uma bateria padrão usando grades de chumbo-antimônio é da ordem de 85 - 95 % e aproxima-se de 100 % nos sistemas de chumbo-cálcio, devido à considerável diminuição na evolução de gás.

Skalozubov (9) usou ^{35}S para demonstrar como a área da superfície efetiva do material ativo primeiro aumenta em certa extensão, durante os ciclos, para depois decrescer devido ao crescimento dos cristais de $PbSO_4$. Isto confirma o fato conhecido de que a capacidade de uma bateria para entregar sua carga aumenta a 120 % da capacidade nominal para depois decrescer gradualmente até o ponto final da vida da bateria que é tomado como 80 % da capacidade nominal.

Estudos usando traçadores isotópicos foram feitos com o objetivo

de definir a distribuição da corrente e do material ativo nas placas como resultados da descarga

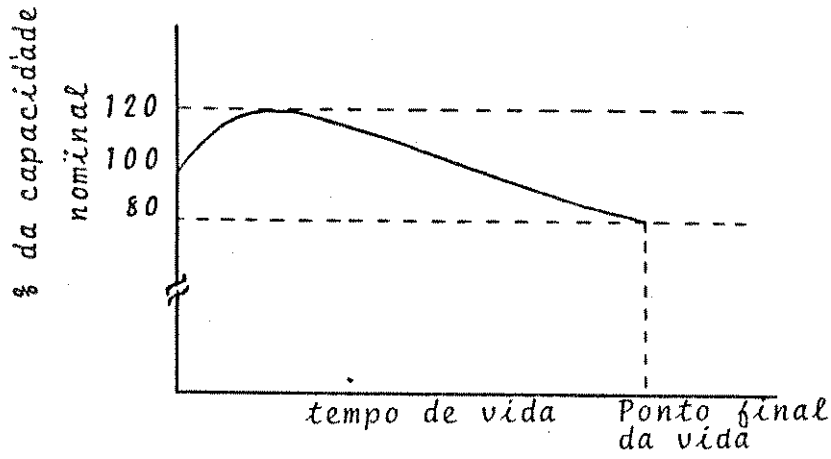


FIG.III.8 Variação da capacidade com o tempo de vida para uma bateria chumbo-ácido.(9)

Determinou-se que nas baixas densidades de corrente (<10 mA/cm), o $PbSO_4$ é uniformemente distribuído através da espessura da placa, enquanto que nas altas correntes de descargas, as concentrações de PbSO são maiores na superfície e nas regiões próximas à grade (para grades sem antimônio). A deposição preferencialmente do $PbSO_4$ próxima à grade não antimonial é responsável pelo subsequente desprendimento do material ativo e perda prematura da capacidade (especialmente na placa positiva). Este fenômeno, foi interpretado em termos dos efeitos do gradiente de concentração que envolve a transferência as espécies iônicas. Notou-se que em temperaturas muito baixas (-18 ºC), as limitações difusionais perdem seu significado e um conteúdo constante de $PbSO_4$ é observado através de toda a espessura da placa positiva.

Este tipo de concentração uniforme de $PbSO_4$ foi confirmado por microscópia eletrônica e difração de raio X.

Verificou-se que a intensidade da razão $Pb/PbSO_4$ é uma indicação útil do estado da bateria. A relação torna-se menor (mesmo para bateria totalmente carregada) conforme a bateria aproxima-se do fim de sua vida. A diminuição desta razão deve-se provavelmente ao $PbSO_4$ duro acumulado nas placas.(4)

III.9 MODELAMENTO DE UMA BATERIA CHUMBO - ÁCIDO

III.9.1 Introdução

O uso de expressões analíticas para descrever os vários fenômenos de uma bateria tem sido dificultado pela natureza complexa da eletroquímica da bateria e pelo grande número de sistemas de baterias em uso. Embora considerando que vários sistemas eletroquímicos de baterias sejam conhecidos, somente para alguns foi feita a tentativa de relacionar os parâmetros eletroquímicos com os elétricos da bateria.

Sómente em 1897 W.Peukert (7) modela o processo de descarga, tempo em função da corrente; em 1954 E.A.Hoxie (10) determina algumas características do processo de descarga e em 1965 C.M.Shepherd (11) apresenta uma equação para caracterizar a tensão em função do tempo e da corrente de descarga. Nos últimos 12 anos com o início da crise do petróleo é que os trabalhos na área de sistemas de baterias tem prosperado e apresentado resultados satisfatórios (aumento da densidade energética de 22 - 40 Wh/Kg e 300 ciclos em 1980 para 30 - 40 Wh/Kg e 400 ciclos em 1983 (12)).

Entre os vários modelamentos já existentes não encontramos um

único modelo capaz de descrever todos os fenômenos da bateria para qualquer condição.

A bateria para um veículo elétrico possue uma série de características especiais. Idealmente o modelo da bateria deveria ser capaz de descrever todas estas características. A seguir listaremos sumariamente as características de um modelo ideal de bateria.

III.9.2 Objetivos de um Modelo Ideal de Baterias (16).

1 - Descrever a energia, potência, tensão, corrente e eficiência da bateria como função do estado de carga durante as condições do ciclo carga-descarga existentes em um veículo elétrico ou em um percurso do VE.

2 - Calcular os parâmetros da bateria listados acima, em 1, para condições de potência constante na descarga e várias condições de carga.

3 - Determinar de maneira completa a eficiência energética na entrada e saída do sistema bateria para as condições listadas em 1 e 2.

4 - Descrever analiticamente a troca energética da bateria devido a :

- operação intermitente (efeitos de regeneração)
- pulsos de descarga rápidos
- razão de descarga
- auto-descarga
- efeitos da carga alternada

- variações de temperatura

5 - Descrever analiticamente variações na capacidade de potência e na eficiência devido a operação com pulsos rápidos e variações de temperatura.

6 - Determinar as limitações de aceitação de carga.

7 - Promover a operação de desligamento de uma bateria operando numa dada carga em termos de voltagem terminal, estado de carga ou capacidade de potência.

8 - Predizer o ciclo de vida útil sob as condições de operação de um VE ou VEH (Veículo Elétrico Híbrido).

9 - Descrever as mudanças nos parâmetros da bateria com sua vida ou tempo de serviço.

Até o presente não existe um modelo que possa prever todos estes objetivos.

Os principais elementos de um modelo de bateria por nós considerado são :

a - Relação entre voltagem terminal, corrente de carga e estado de carga.

b - Relação entre a capacidade energética e a corrente de carga.

c - O efeito de vários tipos de corrente de carga e recuperação,

como listados no item 4.

d - Os efeitos da idade da bateria.

Para executar todos os nove objetivos listados anteriormente uma grande quantidade de testes detalhados são necessários; muitos podem ser completamente realizados e outros apenas de modo parcial através de um modelo analítico de baterias. Contudo sempre precisaremos de um número mínimo de testes analíticos para termos um modelo adequado de baterias como veremos a seguir.

III.9.3 Modelo : Corrente Versus Tempo (Equação de Peukert). (7)

A equação de Peukert é de grande importância quando necessitamos relacionar o tempo de descarga de uma bateria chumbo-ácido a um valor constante de corrente de descarga :

A sua forma geral é dada por :

$$\tau = \frac{K}{I^n} \qquad (III.1)$$

onde : τ = tempo (h) requerido pra descarga completa a corrente I

I = corrente de descarga (A)

K, n = constantes

Utilizando-se uma bateria convencional S.L.I.(Starting - Light - Ignition) fabricada no Brasil, marca Good-Light, com massa de 11 Kg, capacidade nominal de 36 Ah, obtivemos os seguintes resultados :

corrente de descarga (A)	tempo de descarga (A)	% capacidade nominal
1.8	16.42	82.1
4.0	5.90	65.6
6.0	3.70	61.7
8.0	2.70	60.0
10.0	2.10	58.3
15.0	1.16	48.3

Dos resultados acima podemos obter a FIG.III.9 :

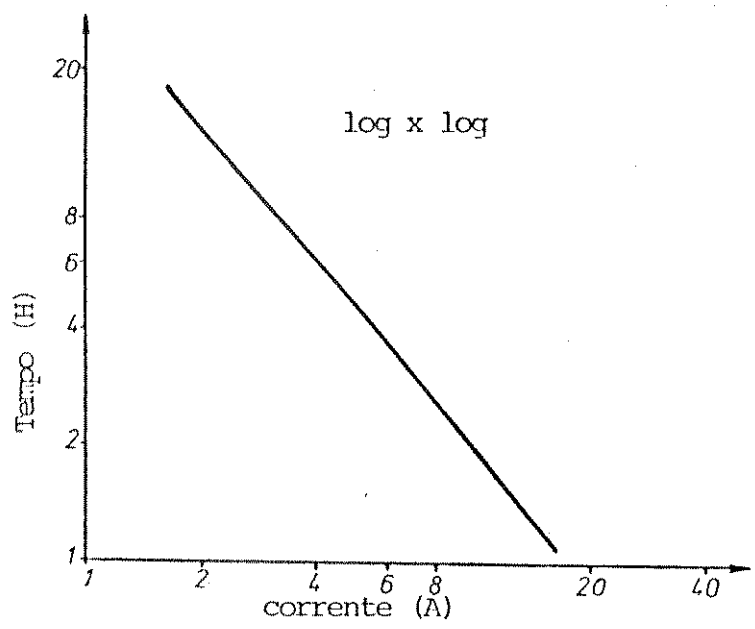


FIG.III.9 Gráfico corrente versus tempo de descarga para bateria chumbo-ácido

de onde determinamos os valores das constantes :

$$n = 1.23 \quad e \quad K = 33.48$$

O valor de n está entre $1.2 < n < 1.4$ dependendo das características da bateria.

A utilização da equação de Peukert tenderá a se popularizar com a necessidade do conhecimento do tempo de operação de sistemas "no-break", computadorização de veículos elétricos com avaliação de sua autonomia, bem como no cálculo do desempenho da bateria chumbo-ácido pelos fabricantes, onde os valores das constantes n e K deverão substituir o valor da capacidade nominal da bateria definido atualmente para um único tempo de descarga, aumentando o grau de informação dado o grande número de aplicações a que este tipo de bateria se destina atualmente.

III.9.4 O Estado de Carga

O estado de carga de uma bateria carregada pode ser definido através da estabilização do valor da densidade do eletrólito após um dado tempo de carga. O conceito de bateria descarregada irá depender da corrente de descarga , pois a sua capacidade de carga decresce com o aumento da corrente de descarga; a bateria pode ser considerada descarregada após sua tensão atingir um determinado nível (por exemplo, 1.75 volts por célula para bateria chumbo-ácido em circuito fechado).

Por exemplo, uma bateria tem uma capacidade nominal baseada num tempo de descarga para 8 horas; se esta bateria pode entregar uma corrente de 40 amperes, em serviço contínuo de 8 horas, diz-se que sua capacidade nominal é de $40 \times 8 = 320$ Ah.

Na hipótese desta bateria poder entregar exatamente 40 amperes em 8 horas, não lhe será possível fornecer 64 amperes em 5 horas (320 Ah) mas somente 88 % da capacidade nominal o que acarreta uma corrente de descarga de 56.4 amperes . Este novo índice de 56.4 amperes é o valor da corrente de descarga para cinco horas.

Esta redução da capacidade com altas correntes de descarga deve-se à incapacidade da solução livre penetrar com a necessária rapidez nos poros do material ativo. Não é possível, por conseguinte, obter a completa redução do material ativo durante um período de intensa descarga. Após um período de descanso, a bateria que foi submetida a uma intensa descarga recobra em parte sua capacidade e é, portanto capaz de fornecer mais corrente, ainda que aparentemente tivesse se mostrado, pouco antes, como que descarregada. Isto se deve à solução livre, que no período de descanso, completou sua penetração nos poros do material ativo.

Então o estado de carga (S) de uma bateria descarregada durante um tempo de descarga t_d com corrente de descarga I_d pode ser descrito em função da capacidade C_{I_d} para a corrente I_d (13).

$$S \triangleq 1 - \frac{I_d \, t_d}{C_{I_d}} \qquad \text{(III.2)}$$

e com a relação de Peukert (III.1) C_{I_d} pode ser expresso em função da capacidade nominal , C_N , para a descarga padrão I_N , logo de (III.1) temos :

$$I_d^n \, \tau = K \qquad \text{e} \qquad I_d^n \, \tau_N = K \qquad \text{logo,}$$

$$I_d^n \tau = I_N^n \tau_N \quad \text{mas,}$$

$$\tau = \frac{C_{I_d}}{I_d} \quad = \quad \text{e} \quad \tau_N = \frac{C_N}{I_N}$$

portanto

$$I_d^n \frac{C_{I_d}}{I_d} = I_N^{n-1} \frac{C_N}{I_N}$$

$$I_d^{n-1} C_{I_d} = I_N^n C_N$$

$$C_{I_d} = C_N \left(\frac{I_N}{I_d}\right)^{n-1} \qquad \text{(III.3)}$$

substituindo (III.3) em (III.2) obtemos

$$S = 1 - \frac{I_d t_d}{C_N} \left(\frac{I_d}{I_N}\right)^{n-1} \qquad \text{(III.4)}$$

onde (III.4) é o estado de carga em relação a qualquer valor de corrente relacionado com o valor padrão de corrente de descarga.

Usualmente é conveniente determinar o decremento no estado de carga ΔS_d após um período de utilização da bateria :

$$\Delta S_d = \frac{I_d \cdot \Delta t_d}{C_{I_d}} \qquad \text{(III.5)}$$

então de (III.4) e (III.5) podemos escrever :

$$\Delta S_d = \frac{I_d \Delta t_d}{C_N} \left(\frac{I_d}{I_N}\right)^{n-1} \qquad \text{(III.6)}$$

onde Δt_d é o intervalo de utilização da bateria a corrente constante.

Da mesma forma o incremento do estado de carga ΔS_c que poderá ocorrer com frenagem regenerativa será dado por :

$$\Delta S_c = \frac{I_c \cdot \Delta t_c}{C_{I_d}} \qquad (III.7)$$

onde **c** e **d** são indices referentes a carga e descarga respectivamente.

O incremento do estado de carga para uma carga completa na bateria previamente descarregada com corrente I_d durante um intervalo de tempo Δt_d será determinado a partir de (III.5) e (III.7); nestas condições o estado de carga é :

$$S = 1 - \Delta S_d$$

donde

$$C_{I_d} = \frac{I_d \ \Delta t_d}{1-s} \qquad (III.8)$$

Portanto substituindo (III.8) em (III.7) obtemos :

$$\Delta S_c = \frac{I_c \cdot \Delta t_c}{I_d \cdot \Delta t_d} \ (1 - S) \qquad (III.9)$$

que é o incremento do estado de carga para uma eficiência 1 do processo de carga, a corrente I_c num intervalo Δt_c, para uma bateria que foi descarregada a corrente I_d durante Δt_d atingindo o estado de carga S.

Devido a ocorrência da eletrólise da água ,que irá se opor à carga durante o final do processo, a eficiência , η , do processo de carga

leva-nos a descrever S como :

$$\Delta S_c = \frac{I_c \cdot \Delta t_c}{I_d \cdot \Delta t_d} \qquad (1 - S) \qquad \text{(III.9.a)}$$

A intensidade da eletrólise irá depender do estado de carga e da corrente de carga e ela será predominante para células chumbo-ácido com tensão superior a 2.35 volts (14.10 volts para bateria com 6 células).

III.9.5 Modelo : Tensão versus Tempo (Equação de Shepherd) (11)

A equação de Shepherd é utilizada para descrever a queda da tensão de uma bateria. Sua forma simplificada é :

$$E = E_s - N\ I - \left(\frac{Q}{Q - it}\right) \quad K\ I \qquad \text{(III.10)}$$

onde : E = tensão da bateria (V)

I = corrente de descarga (A)

t = tempo de descarga (s)

E = tensão de referência (V)

N, K = constantes relativas a resistência interna (ohms)

Q = capacidade de carga máxima (coul)

Observe que a capacidade nominal, C_N , é uma fração menor que 1 da capacidade de carga máxima Q.

Durante o processo de descarga ocorre um decaimento da tensão da bateria. Um indicador do momento de desligamento desta bateria para

que a mesma não se danifique é um dado valor da tensão nos terminais da bateria em processo de descarga (por exemplo 10.50 V para uma bateria chumbo-ácido de 6 células).

Os valores das constantes E_s , N, K e Q da bateria a ser modelada devem ser determinaddos experimentalmente (valores obtidos de outras baterias nacionais supostamente idênticas nos levam a resultados não satisfatórios).

Dentre os métodos (11), (12) existentes para a determinação destas constantes optamos pelo método gráfico apresentado por Shepherd. O modelo computacional apresentado por Taylor e Siwek (14) apresenta uma não linearidade no método proposto para o cálculo da constante K, tornando-se desta maneira inconveniente.

No método proposto por Shepherd, 2 curvas típicas de descarga para diferentes valores de corrente são necessárias (FIG.III.10) :

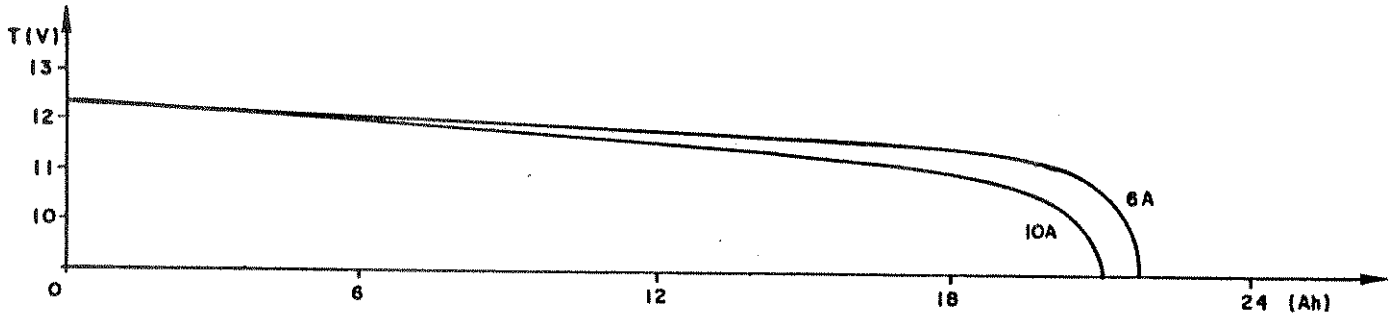


FIG.III.10 Curvas tensão versus capacidade energética para 2 valores de corrente de descarga.

Da FIG.III.10 podemos determinar os seguintes resultados :

I_a = 6 A	
E_2 = 12.0 volts	t_2 = 0.50 h
E_4 = 11.5 volts	t_4 = 1.42 h

I_b= 10 A	
E_1 = 12.0 volts	t_1 = 1.25 h
E_3 = 11.5 volts	t_3 = 3.00 h

Dado que :

$$E_2 = E_s - K\left(\frac{Q}{Q-I_a t_2}\right) \quad I - N\, I_a \qquad \text{(III.10.a)}$$

$$E_4 = E_s - K\left(\frac{Q}{Q-I_a t_4}\right) \quad I - N\, I_a \qquad \text{(III.10.b)}$$

subtraindo $E_2 - E_4$ temos :

$$E_2 - E_4 = K\, I_a \left[\frac{Q\,(I_a t_4 - I_a t_2)}{(Q-I_a t_4)\,(Q-I_a t_2)}\right] \qquad \text{(III.11)}$$

Obtendo $(E_1 - E_3)$ de maneira similar e dividindo por (III.11) :

$$\frac{E_2 - E_4}{E_1 - E_3} \qquad \frac{I_a\,(I_a t_4 - I_a t_2)\,(Q - I_b t_3)(Q - I_b t_1)}{I_b\,(I_a t_3 - I_b t_1)\,(Q-I_a t_4)\,(Q-I_a t_2)}$$

Então os valores das constantes poderão ser obtidos. De (III.12) temos o valor de Q; substituindo este valor em (III.11) obtemos K e consequentemente temos N e E_s em (III.10.a) e (III.10.b).

Para a bateria em estudo obtivemos :

Q = 108267.43 coulombs

K = 0.07192 ohms

N = -0.07194 ohms

E_s = 12.14 volts

III.9.6 Modelo da Auto-Descarga : Tensão versus Tempo

A auto-descarga de uma bateria é proveniente de processos internos na bateria e que se realiza predominantemente em circuito aberto.

O processo de auto-descarga é pouco significativo nas baterias recém-construídas, quando submetidas à condições normais de uso, ficando em torno de 10 % ao mês. Em baterias usadas o efeito da auto-descarga corresponde a valores de perda de capacidade da ordem de 32 % ao mês.(15).

A perda percentual de capacidade, p, devida ao armazenamento é dada por :

$$p = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \quad 100\ \% \qquad \text{(III.13)}$$

onde C_1 = capacidade antes do armazenamento

C_2 = capacidade após o armazenamento

Durante 28 dias armazenamos uma bateria comercial de 36 Ah, marca

Good-Light, massa de 11 Kg com 6 meses de uso. Após o período de armazenagem determinamos novamente sua capacidade energética e constatamos uma queda de 31.75 %.

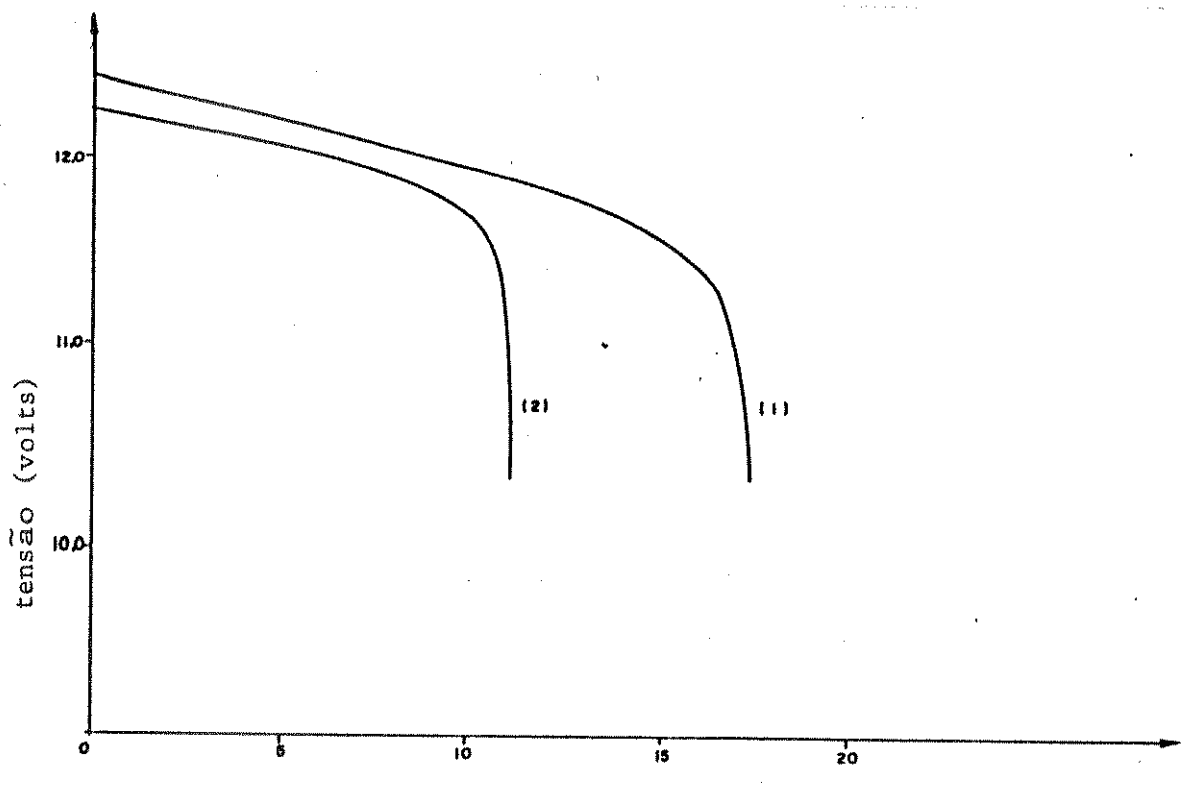


FIG.III.11 Curvas tensão versus tempo para bateria chumbo-ácido

1 - Ensaio antes do armazenamento

2 - Ensaio depois do armazanemento

Com os dados obtidos na FIG.III.11 podemos determinar um valor de corrente para manutenção desta bateria em seu estado energético máximo. A perda da capacidade energética determinada experimentalmente foi de 31.75 % e a capacidade inicial desta bateria era de 31.40 Ah definida para 20 horas.

Portanto temos : $C_I = 31.40$ Ah

$C_N = (1 - 0.3175)C = 21.43$ Ah

$I_N = 1.80$ A

$n = 1.23$ (constante de Peukert)

então utilizando a expressão (III.3) temos

$$C_{I_d} = C_N - \left(\frac{I_N}{I_d}\right)^{n-1}$$

substituindo os valores obtidos na expressão determinamos que o valor de corrente que deverá ser cedido à bateria para compensar o processo de auto-descarga é de 0.22 A.

A importância da determinação deste valor é que podemos utilizá-lo em corrente de manutenção para sistemas "no-break"; bem como em veículos elétricos de uso esporádico.

Além disso durante o período de armazenamento, t_a , foi feito um acompanhamento diário do valor da tensão da bateria. Os dados obtidos são mostrados na FIG.12.

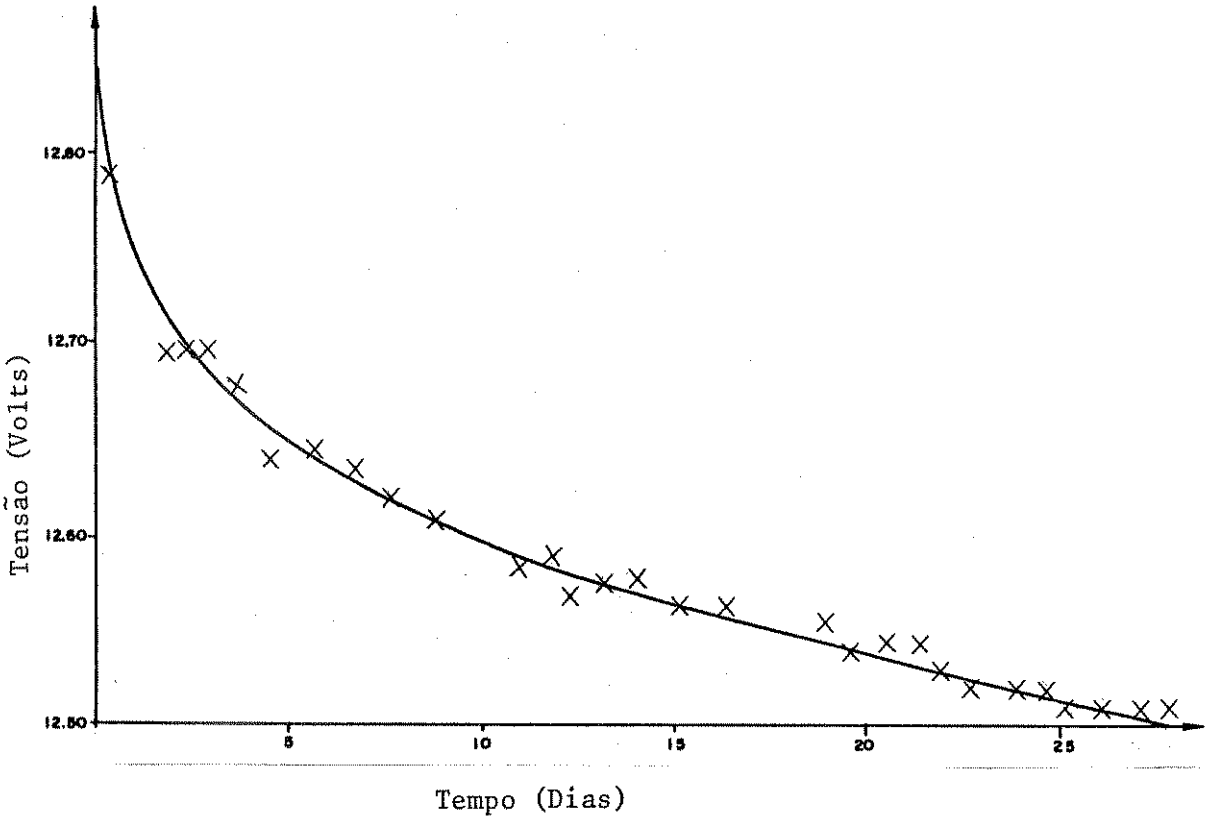


FIG.III.12 Tensão de uma bateria chumbo-ácido durante o período de armazenamento.

Observa-se que a FIG.III.12 pode ser plotada em escala logaritmica como mostrada na FIG.III.13.

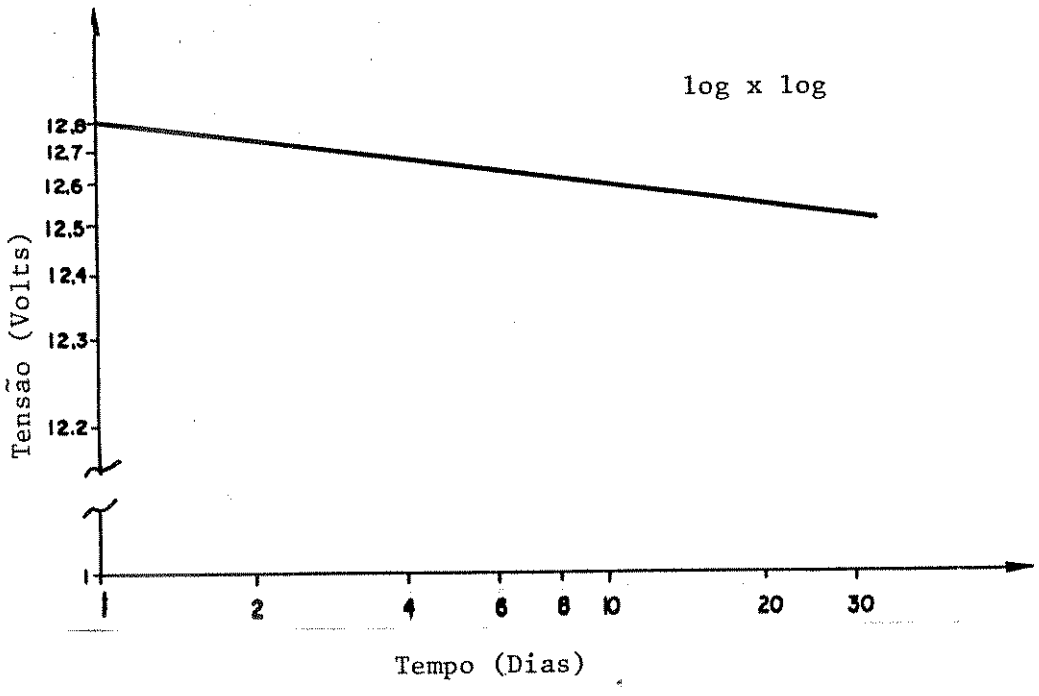


FIG.III.13 Valor da tensão de uma bateria chumbo-ácido durante o período de armazenagem.

Logo podemos concluir que o valor da tensão da bateria em estudo no período de armazenamento teve o seguinte comportamento.

$$V = \frac{K^*}{t_a^m} \qquad \text{para } t_a \geqslant 1 \qquad [III.14]$$

onde V é a tensão da bateria após t_a dias de armazenamento e K^* e m são constantes.

Para a bateria em estudo determinamos K = 12.76 e m = 0.0056. A partir destes dados podemos estimar o período de armazenagem de uma bateria a partir do valor de sua tensão terminal em vazio.

III.10 PARTE EXPERIMENTAL

Os resultados experimentais apresentados nas FIG.III.9, III.10, III.11, III.12, III.13, deste capítulo e as FIG.V.2, V.7, V.8, V.10, V.12, V.13, V.14, V.15, V.16. do capítulo V foram obtidas a partir de dados obtidos no Laboratório de Eletroquímica do Departamento de Engenharia Elétrica da UNICAMP, que foi desenvolvido para esta finalidade.

Os equipamentos utilizados na realização dos testes consistiram basicamente dos seguintes :

- 1 voltímetro Elaviscript 1 (± 1.5 %)
- 1 voltímetro digital Grundig DV3 (± 0.01 V)
- 1 amperímetro Elavi 5n (± 1.5 %)
- 1 banco de resistências variáveis refrigeradas em banho de água.
- Baterias comerciais de 12 V, vários valores de capacidades, e de diferentes marcas.

A seguir listaremos alguns comentários que julgamos necessários para a reprodução dos testes apresentados :

1 - As resistências utilizadas como carga são do tipo comumente empregado para aquecimento de água. Elas foram calibradas para um valor de 2.0 ohms cada uma e montadas individualmente em número de 8 em um recipiente plástico no qual adicionamos 10 litros de água. Apesar das 8 resistências nos darem mais de 100 valores diferentes de carga utilizados na descarga das baterias, para a finalidade de obtenção da valores contínuos de corrente utilizamos uma resistência variável em paralelo com o conjunto inicial.

2 - Quando da realização dos primeiros testes de capacidade nominal, definido para 20 horas, fazíamos turnos de trabalho no labaratório, visando manter o valor da corrente de descarga constante independente da queda de tensão da bateria. O acompanhamento do experimento durante 20 horas consecutivas é bastante cansativo e inconveniente para o operador humano. Para evitar esta forma monótona de trabalho experimental desenvolvemos no Laboratório de Controle de Acionamento e Eletrônica de Potência um dispositivo automático que através da Modulação em Largura de Pulsos mantém o valor da corrente de descarga constante independente do valor da tensão da bateria que vai decrescendo durante a descarga. O relato do projeto e implementação do propótipo deste dispositivo encontra-se no Relatório Técnico nº 2 do Projeto Controle de Acionamento e Eletrônica de Potência - UNICAMP - FUNCAMP - FINEP.

3 - Todos os valores de capacidades apresentados foram normalizados para 27 $^{\circ}C$, conforme NBR - Norma Brasileira (ABNT - MB - 1405/80) (05.008 Abril 1981) - " Verificação das Características Elétricas e Mecânicas de Baterias" :

A capacidade nominal, C, sendo verificada numa temperatura, T, diferente da de referência (27 $^{\circ}C$) deve ser corrigida pela seguinte fórmula :

$$C_{27\,^{\circ}C} = \frac{C_T}{1 + 0{,}01\ (T - 27\,^{\circ}C)}$$

Atualmente as atividades desenvolvidas no Laboratório de Eletroquímica são :

- comprovação experimental do valor de corrente para a manutenção de uma bateria em seu estado energético máximo; compensando o efeito da auto-descarga através do fornecimento constante de um valor de corrente durante o período de armazenamento desta bateria,

- avaliação das características de desempenho de baterias comerciais chumbo-ácido fabricadas no país,

As atividades futuras a serem desenvolvidas neste laboratório são :

- projeto e construção de um medidor contínuo do estado de carga de uma bateria independente do seu regime de trabalho.

- projeto e construção de uma bateria chumbo-ácido.

III.11 SUMÁRIO

Neste capítulo vimos as características que uma bateria deve possuir para atender às necessidades de um veículo. Dentro dos vários tipos de células disponíveis o acumulador de chumbo-ácido possui as condições para uma utilização atual até que os novos sistemas existentes se tornem viáveis (tecnologia dominada e custo baixo).

Um histórico e as partes constituintes de uma bateria foram revistos e comentados.

Modelos matemáticos das características elétricas da bateria utilizando relações para :

a - corrente de descarga x tempo de descarga : Peukert

b - tensão terminal x tempo de descarga e corrente de descarga em função da capacidade de referência : Shepherd

c - estado de carga em função da capacidade nominal

d - auto-descarga em função da capacidade nominal

foram apresentados utilizando uma bateria S.L.I. convencional de fabricação nacional.

Procedimentos adotados na parte experimental deste trabalho foram relatados.

As referências bibliográficas apresentadas constituem um ponto inicial para um aprofundamento no tema dado que seria inviável abordá-lo totalmente neste capítulo.

III.12 BIBLIOGRAFIA

1 - Damaskin,B.; Petri,O. "Fundamentos da Electroquímica", Editora Mir - 1985.

2 - Salamon,K.;Kramer,"Traction Batteries for Existing and Future Electric Road Vehicles" - Fourth International Vehicle Symposium Dusseldof - 1976.

3 - Labat,J.;e outros,"Nickel-Iron Battery for Electric Vehicles" - Septième Symposium International du Véhicule électrique Routier-Versailles - France - pag.25 a 30 - 1984.

4 - Kordesch,K.V. "Batteries" Vol.2 - Marcel Dekker - 1977.

5 - Collie M.J. "Electric and Hibrid Vehicles"- Noyes Data Corporation , USA - 1979.

6 - Gillibrand,M.I. ;Lomax,G.R. "The Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery Plates" , Eletrochima Acta ,8, 693 - 1963.

7 - Peukert,W. - 1897 - Elektrotech. Zeit , 18-287 - citado referência 6.

8 - Zehender,E.;Herman,W.;Lubssle,H. "Die Wirking von Separatoren auf die Antimonwanderugn in Bleibatterien" Eletrochima Acta, 9, 55, 1964.

9 - Skalozubov,M.F.; J. Appl. Chim. USSR, 35,1936, 1962 (citado

na referência 4).

10 - Hoxie,E.A.; "Some Discharge Characteristics of Lead-Acid Batteries" AIEE Transactions, Part II, Vol.73, 17 - 22, March 1954.

11 - Shepherd,.M. "Design of Primary and Secondary Cells - Part II - An Equation Describing Battery Discharge" U.S.Naval Research Laboratory - Journal of the Eletrochemical Society, 657 - 664, July 1965.

12 - Linndstrom,O ;"What Kind of Battery for Eletric Vechicles ?" Electric Vehicle Developments Issue, nº 9, 1984.

13 - Visscher,W. e Dongen,L."Battery State of Charge Model for Driving Cycle Operation" Proceedings of Drive Eletric Symposium - Amsterdam, 1982.

14 - Taylor,D.F. e Siwek,E.G. "The Dynamic Characterization of Lead-Acid Batteries for Vehicle Applications" paper 730252 International Automotive Engineering Congress, Detroit, Miching, 75 - 84, 01 - 1973.

15 - Avaca,L. e outros " O Problema da Auto-Descarga em Baterias Chumbo-Ácido" - Anais do III Congresso Brasileiro de Energia 1 - 10, 1984.

16 - Unnewher,L.E.; Nasar,S.A. "Eletric Vehicle Techonology" John Wiley & Sons.

17 - Chiku,T. and Nakajima,K. "Formation of PbSO Cristallites on Pb in the Lead-Acid Cell" J.Eletrochim. Society 118, 1395, 1971.

18 - Chiku,T. "X-ray Study of the Active Materials in the Lead-Acid Strorage Battery" J.Eletrochim. Society, 115, 982, 1968.

19 - Vaaler,L.E.; Brooman,E.W. "Mathematical Model for Design of Grids for Electric Vehicle Batteries" SAE - Society of Automotive Engineers - paper 780221, 926 - 933, 1979.

Além da bibliografia citada anteriormente devemos ressaltar alguns dos trabalhos e comunicações publicadas durante a elaboração deste capítulo.

A - Trabalhos publicados :

20 - Barreto,G.; Oliveira,M.G.; Bottura,C.P. "Desempenho de Baterias Chumbo-Ácido : Estudo Experimental e Modelamento do Processo de Descarga" III Congresso Brasileiro de Energia, 11 - 20, outubro de 1984.

21 - Barreto,G.; Bottura,C.P. " Performance of Lead-Acid Batteries - Experimental Study and Modeling of the Discharge Process" Proceedings of The Drive Electric Symposium - Sorrento ,Itália, 10 - 1985.

22 - Barreto,G.; Oliveira,M.G.; Bottura,C.P. "Relatório das Atividades de Andamento na Área de Baterias e Veículos Elétricos - período de 1980 a 1984" - publicação FEC 008/85.

B - Comunicações

23 - Baracat,M.C.; Barreto,G. "Materiais para Reservatórios de Ácido Sulfúrico em Indústrias de Baterias Chumbo-Ácido" 37º Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progesso da Ciência , julho de 1985, Belo Horizonte - M.G.

24 - Silva,O.F.; Barreto,G. "Modelamento Matemático da Descarga e Auto-Descarga em Acumuladores Chumbo Ácido " 4º Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. São Carlos dezembro de 1985.

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Gilmar Barreto aprovada pela comissão julgadora em 21/11/86 (em 2 volumes)

Celso Pascoli Bottura

VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA : CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE SEU DESEMPENHO E SEU PROJETO

(VOLUME II)

Autor : GILMAR BARRETO

ORIENTADOR : PROF. Dr. CELSO PASCOLI BOTTURA

TESE APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP - COMO PARTE DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

- NOVEMBRO DE 1986 -

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA :

CONTRIBUIÇÕES À ANÁLISE DE SEU DESEMPENHO E SEU PROJETO

(VOLUME I)

Resumo

Nota

Prefácio

CAPÍTULO I : CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

I.1 - Introdução, I.1

I.2 - Veículos com Diversidade Energética, I.3

I.3 - Histórico do Veículo Elétrico, I.6

I.4 - Vantagens e Desvantagens de Um Veículo Elétrico, I.11

I.5 - Sumário, I.19

I.6 - Bibliografia, I.19

CAPÍTULO II : VEÍCULOS ELÉTRICOS : CONFIGURAÇÕES E PARÂMETROS

II.1 - Introdução, II.1

II.2 - Configurações de Veículos Elétricos, II.4

II.3 - Parâmetros de Um Veículo Elétrico, II.17

II.4 - Sumário, II.39

II.5 - Bibliografia, II.40

CAPÍTULO III : FONTES DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

III.1 - Introdução, III.1

III.2 - Bateria Níquel-Ferro, III.4

III.3 - Bateria Níquel-Zinco, III.4

III.4 - Bateria Zinco-Cloro Hidratado, III.7

III.5 - Bateria Sódio Enxofre, III.8

III.6 - Baterias Diversas, III.9

III.7 - Bateria Chumbo-Ácido, III.10

III.8 - A Eletroquímica da Bateria de Chumbo-Ácido, III.12

III.9 - Modelamento de Uma Bateria Chumbo-Ácido, III.34

III.10 - Parte Experimental, III.50

III.11 - Sumário, III.53

III.12 - Bibliografia, III.54

(VOLUME II)

CAPÍTULO IV : SISTEMAS DE ACIONAMENTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

IV.1 - Introdução, IV.1

IV.2 - Motores Para Veículos Elétricos

1 - Introdução, IV.4

2 - Motor de Corrente Contínua, IV.11

3 - Motor de Corrente Alternada, IV.22

4 - Comparações, IV.40

IV.3 - Controle de Velocidade e Torque Para Veículos Elétricos

1 - Introdução, IV.44

2 - Controle Para Máquina de Corrente Contínua, IV.45

3 - Controle Para Máquina de Corrente Alternada, IV.66

IV.4 - Sumário, IV.103

IV.5 - Bibliografia, IV.104

V - MODELAMENTO DE VEíCULO ELÉTRICO

V.1 - Introdução, V.1

V.2 - Elementos Essenciais de Um Modelo de Veículo Elétrico, V.3

V.3 - Projeto e Simulação de Componentes do Veículo, V.7

1 - Especificação da Fonte de Energia, V.7

2 - Especificação da Máquina Elétrica, V.39

V.4 - Análise Econômica : Considerações, V.52

V.5 - Análise Dinâmica : Considerações, V.55

V.6 - Predição de Desempenho Através da Simulação, V.56

V.7 - Otimização : Considerações, V.73

V.8 - Sumário, V.74

V.9 - Bibliografia, V.75

VI - ANTEPROJETO DE UM VEíCULO ELÉTRICO

VI.1 - Introdução, VI.1

VI.2 - Como Projetar, VI.1

VI.3 - Exemplo Para Um Veículo Utilitário, VI.2

VI.4 - Sumário, VI.7

VI.5 - Bibliografia, VI.7

VII - CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

VII.1 - Introdução, VII.1

VII.2 - Descrição do Veículo, VII.2

VII.3 - Desempenho Apresentado, VII.10

VII.4 - Comparações e Conclusões Com o Modelo Proposto, VII.14

VII.5 - Sumário, VII.15

VII.6 - Bibliografia, VII.16

VIII - CONCLUSÕES e COMENTÁRIOS

- Conclusões, Comentários e Sugestões para trabalhos futuros, VIII.1

- APÊNDICE I

Características Gerais de Um Veículo Elétrico Utilitário

IV - SISTEMAS DE ACIONAMENTO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS-

IV.1 - INTRODUÇÃO

Um sistema de acionamento para um veículo elétrico é um conjunto formado por uma máquina elétrica e um controlador de velocidade ou torque desta máquina.

Um sistema de controle de velocidade ou torque de uma máquina elétrica é um sistema de processamento de potência.

A função de um processador de potência elétrica é converter a energia elétrica com um valor de tensão, corrente ou frequência para um diferente valor de tensão, corrente ou frequência.

Esta função pode ser realizada, idealmente, com 100 % de eficiência. Em muitas aplicações, incluindo aquelas de grande interesse técnico, a conversão pode ser acompanhada de um controle onde a saída de potência é regulada por uma realimentação que irá atuar na potência de entrada ajustando automaticamente o sistema.

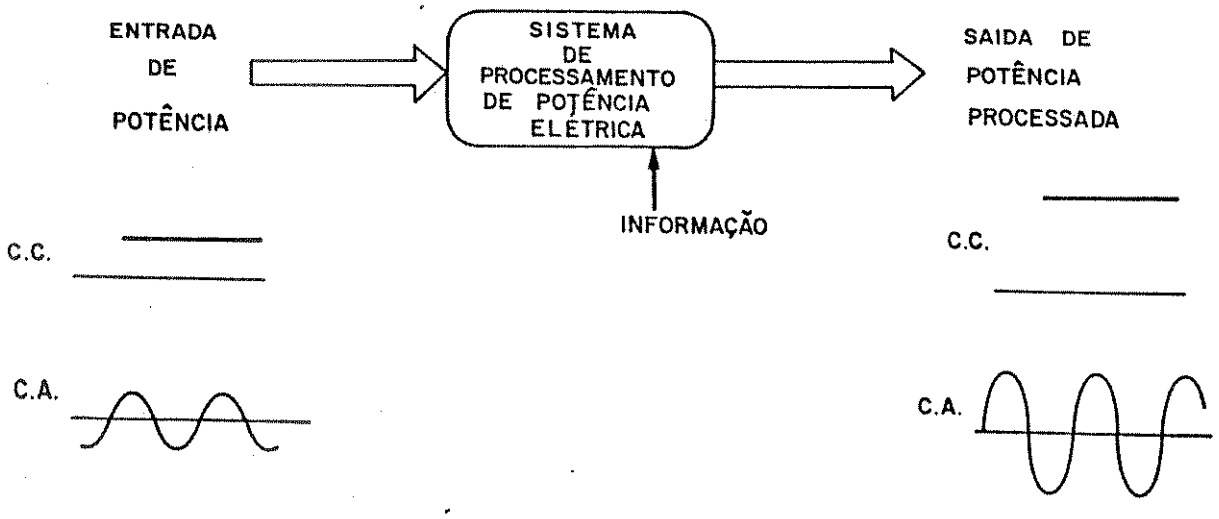


FIG.IV.1 Sistema de Processamento de Potência.

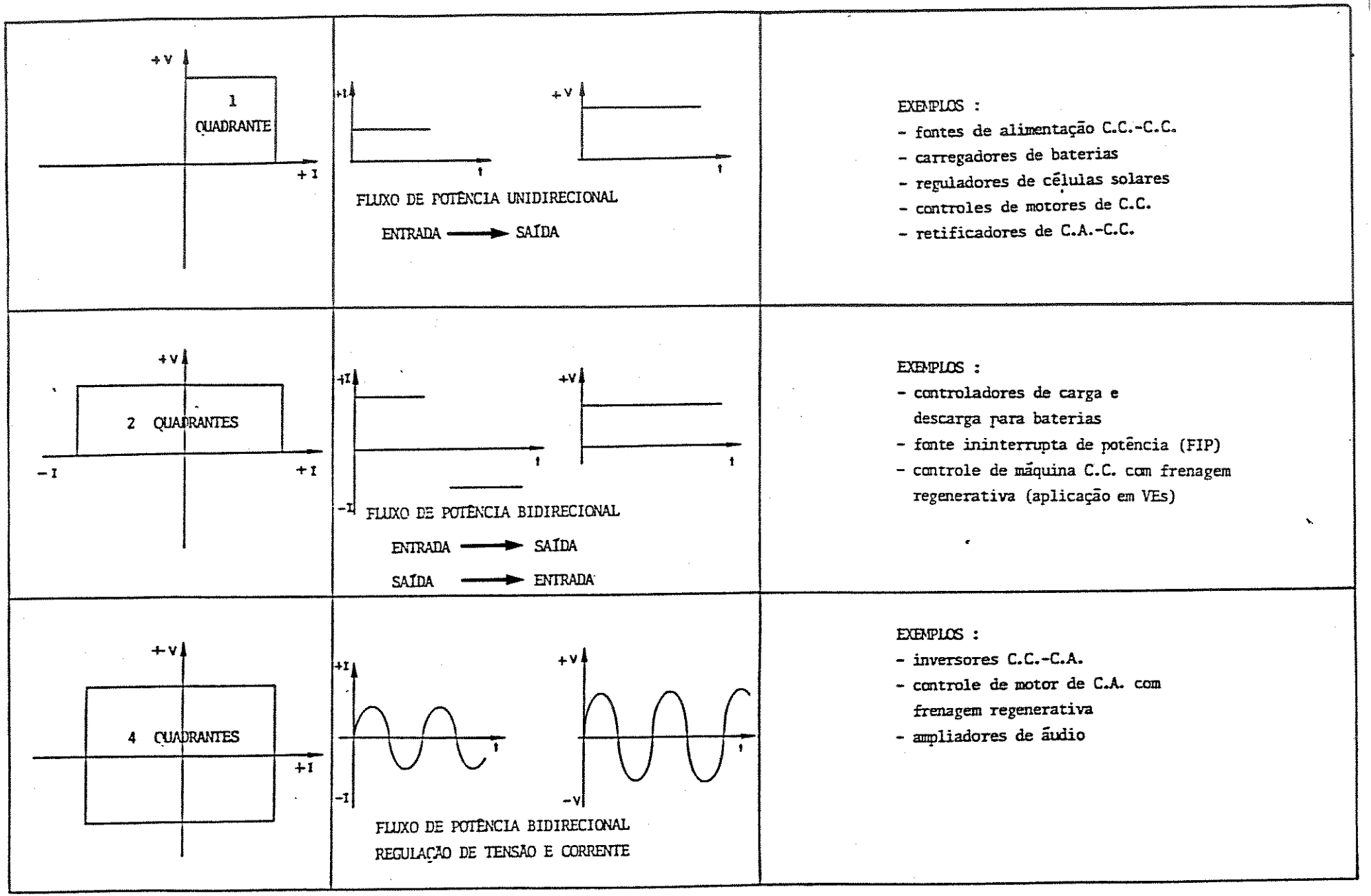


FIG.IV.2 EXEMPLOS TÍPICOS DE SAÍDA DE POTÊNCIA ELÉTRICA PROCESSADA

Exemplos típicos de sistemas de processamento de potência elétrica são conversores : C.C.-C.C. (recortadores), C.C.-C.A. (inversores), C.A.-C.C. (retificadores), C.A.-C.A. (cicloconversores).

A saída de potência elétrica processada pode ser de 1 Quadrante, 2 Quadrantes ou 4 Quadrantes como mostrado na FIG.IV.2.

Em um sistema de tração a tensão e corrente aplicadas à máquina elétrica corresponderão a um valor de velocidade e torque, portanto podemos de modo análogo a FIG.IV.2 apresentar a FIG.IV.3.

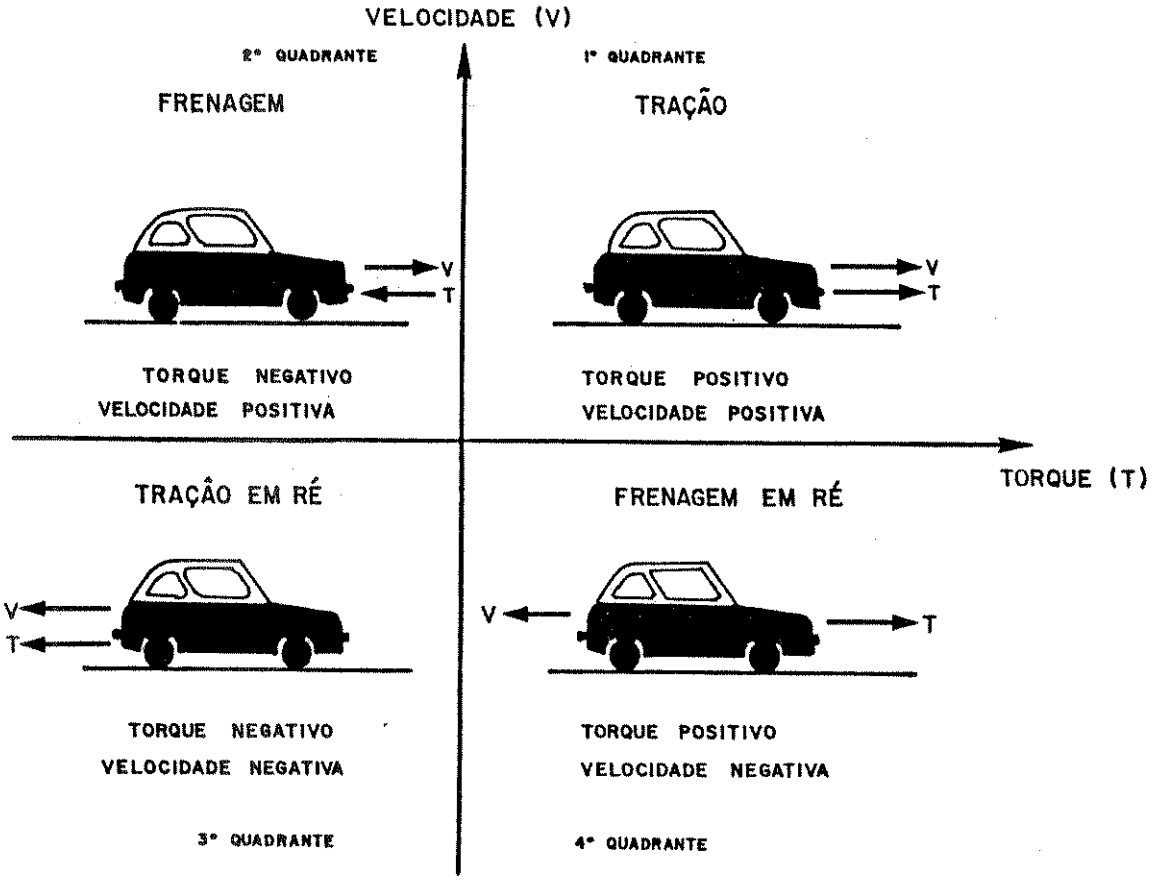


FIG.IV.3 Esquema do plano Torque x Velocidade para um VE.

A finalidade deste capítulo será descrever suscintamente os aspectos de máquinas elétricas e de acionamento abordando noções básicas para uma compreensão elementar de um sistema de acionamento com apli-

cação em Veículos Elétricos (VEs).

Para uma abordagem mais profunda no tema damos como sugestão as Referências 1 a 15 que foram teses desenvolvidas nesta área na ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNICAMP.

IV.2 - MOTORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

IV.2.1. INTRODUÇÃO

Até 1819, não havia sido mostrada conexão alguma entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Naquele ano, o cientista dinamarquês Hans Christian Oersted (1777 - 1851) observou que uma bússola era defletida quando colocada na vizinhança de um fio por onde passava uma corrente.

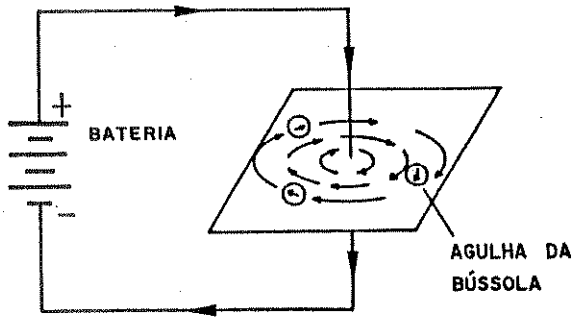
Em 1831, Michael Faraday (1791 -1867) verificou que aparecia uma corrente momentânea em um circuito quando, em um circuito vizinho, se iniciava ou se interrompia uma corrente. Seguiu-se a descoberta de que o movimento de um imã se aproximando ou se afastando de um circuito produziria o mesmo efeito. O trabalho de Oersted demonstrou que efeitos magnéticos podiam ser produzidos por cargas elétricas em movimento, enquanto os de Faraday mostraram que correntes podiam ser produzidas por imãs em movimento.

Acredita-se que os chamados fenômenos magnéticos resultam de forças entre cargas elétricas em movimentos. Como os elétrons nos átomos estão em movimento em torno dos núcleos atômicos e como cada elétron parece estar em rotação contínua em torno de um eixo passando por

ele, espera-se que todos os átomos exibam efeitos magnéticos.

A possibilidade de que as propriedades magnéticas da matéria resultassem de minúsculas correntes atômicas foi primeiramente sugerida por André Marie Ampere (1775 - 1836) em 1820. A verificação dessas idéias só foi possível em anos recentes.

A descoberta experimental de Oersted mostra que se uma bússola for colocada nas vizinhanças de um condutor por onde circula uma corrente, a agulha da bússola se alinhará em ângulo reto ao condutor, indicando, dessa forma, a presença de uma força magnética. Tal experimento pode ser comprovado, mostrando a presença desta força pela passagem de uma corrente elétrica por um condutor vertical, que atravessa um pedaço de cartolina no qual colocamos limalhas de ferro como observado na FIG.IV.4.



Obs : O sentido da corrente adotado é oposto ao fluxo de elétrons

FIG.IV.4 Campo magnético em torno de um condutor.

A orientação das limalhas de ferro mostra que existe um campo magnético de forma circular ao redor do condutor.

A grandeza e sentido da força podem ser determinados pela colocação de uma bússola em vários pontos da cartolina, observando a deflexão.

Quando a corrente flui para baixo (sentido anti-horário na FIG. IV.4), o sentido do campo é no sentido horário, olhando-se de cima para baixo. Se a polaridade da fonte for invertida de maneira que a corrente flua para cima, FIG.IV.4, o sentido de campo é anti-horário.

A relação entre o sentido da corrente e o sentido das linhas de forças magnéticas ao redor de um condutor pode ser determinada por meio da regra da mão direita. Se o condutor for segurado com a mão direita, com o polegar estendido no sentido da corrente (+ para -), os demais dedos apontarão o sentido das linhas de força magnética, FIG. IV.5.

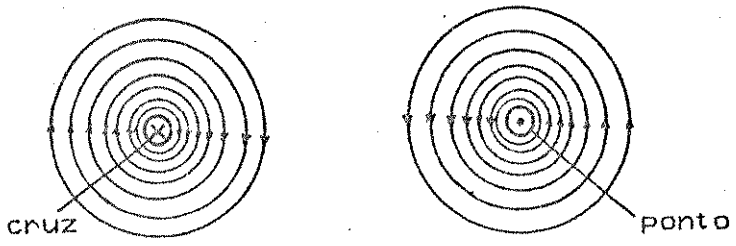


FIG.IV.5 Campo magnético em torno de um condutor

a - corrente fluindo para dentro do papel

b - corrente fluindo para fora do papel

Quando dois condutores paralelos conduzem corrente no mesmo sentido, os campos magnéticos que se estabelecem tendem a envolver ambos os condutores forçando a união dos mesmos. Na FIG.IV.6 mostramos a interação entre estes dois campos magnéticos.

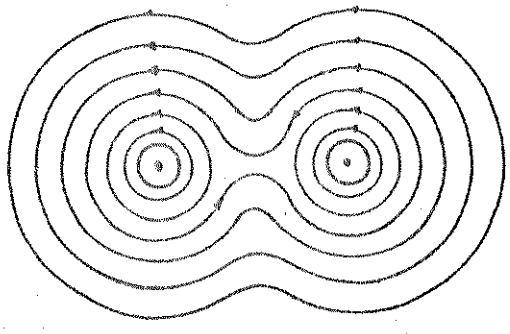


FIG.IV.6
Campo magnético em torno de dois condutores paralelos onde a corrente flui no mesmo sentido.

Dois condutores paralelos conduzindo correntes em sentidos opostos são mostrados na FIG.IV.7. O campo magnético ao redor de um condutor é de sentido oposto ao campo do outro condutor. As linhas de força resultantes ficam aglomeradas no espaço entre os fios, e tendem a separá-los.

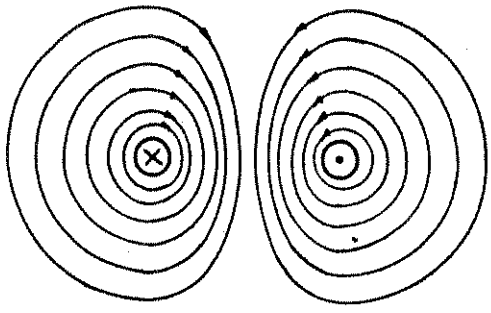


FIG.IV.7 Campo magnético em torno de dois condutores paralelos com a corrente fluindo em sentido contrário.

Quando o fio condutor, visto anteriormente, for enrolado, como mostra a FIG.IV.8, ele se torna uma bobina e o campo magnético assume uma forma diferente. Quando a corrente passa através do condutor bobinado, como indicado, o campo magnético de cada espira do fio se une com campos das espiras adjacentes, como visto na FIG.IV.7. A influência combinada de todas as espiras produz um campo bipolar semelhante àquele de uma barra de imã simples. Uma extremidade da bobina será pólo norte e a outra pólo sul.

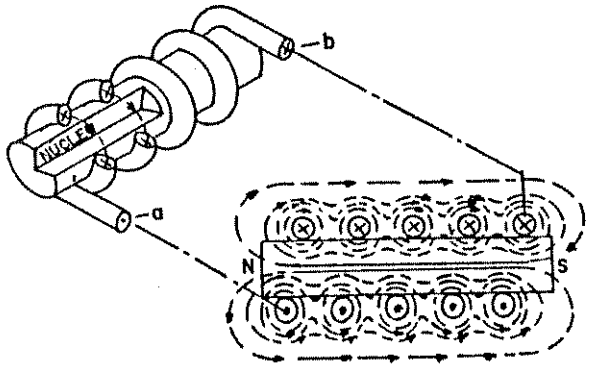


FIG.IV.8 Campo magnético produzido pela corrente em uma bobina.

Na FIG.IV.7 mostramos que o sentido do campo magnético em torno de um condutor reto depende do sentido da corrente através daquele condutor. Assim uma inversão de corrente no condutor causa uma inversão no sentido do campo magnético que é por ela produzido. Portanto, se for invertido o campo de cada espira conclui-se que o campo total (campo da bobina) também será invertido.

Quando for conhecido o sentido da corrente através de uma bobina sua polaridade pode ser determinada pelo uso da regra da mão direita : segurando-se a bobina com a mão direita e envolvendo-a com os dedos no sentido da corrente o polegarapontará para o pólo norte, FIG.IV.9.

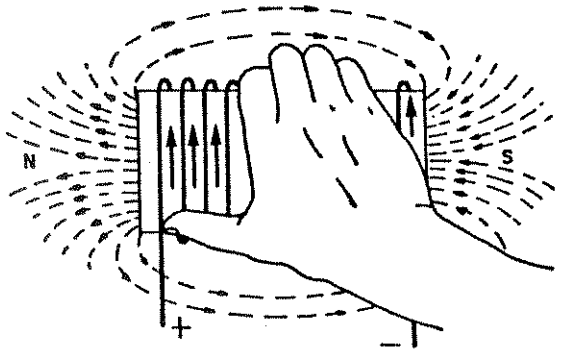


FIG.IV.9 Regra da mão direita para polaridade de bobinas.

Utilizando estes princípios básicos foram desenvolvidos, no século passado, muitos tipos de motores elétricos. Virtualmente qualquer motor elétrico pode ser proposto para utilização em veículos elétricos.

Neste capítulo estudaremos alguns destes motores com ênfase nas características necessárias para VEs, as quais irão requerer motores apropriados para cada tipo de serviço específico.

Os motores precisam ter condições mínimas para serem utilizados em tração elétrica e avaliando estas condições vemos que a escolha não é tão simples, e estará associada à finalidade do VE, ao sistema de energia e às características veiculares, como pode ser visto na FIG. IV.10.

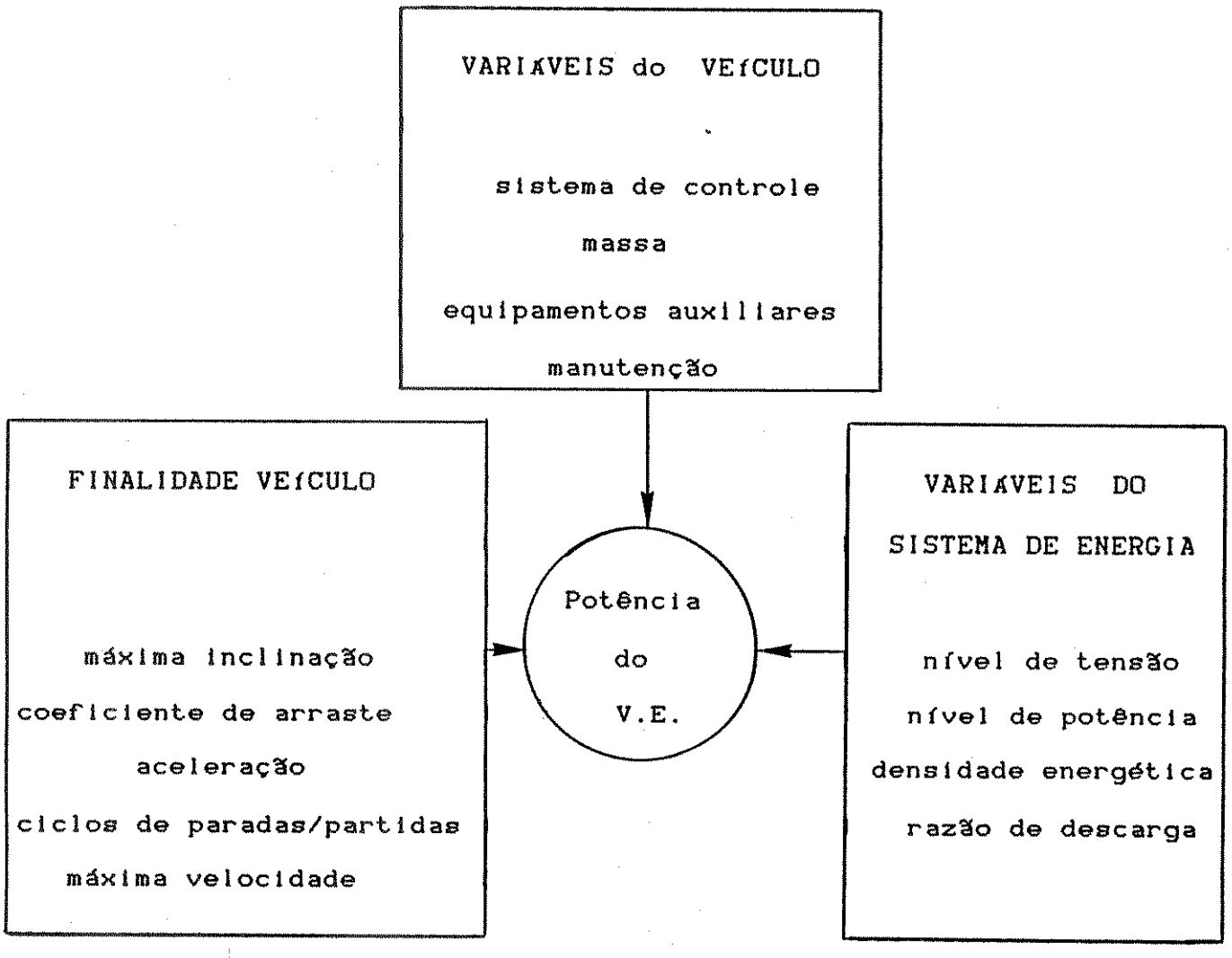


FIG.IV.10 Interfaces de Potência para Escolha de um Motor para um Veículo Elétrico.

Além das condições vistas na FIG.IV.10 um motor elétrico deverá satisfazer certas condições práticas tais como:

-Capacidade de potência constante na faixa de 25-100% da velocidade máxima.

-Alta capacidade de torque na faixa de 0-25% da velocidade máxima.

-Capacidade de frenagem regenerativa.

-Ter rápido e suave controle de aceleração e frenagem para toda faixa de velocidade.

-Alta eficiência energética no ciclo de percurso definido.

-Alta razão de potência de saída para massa total do sistema.

-Ser robusto, confiável e de baixo custo.

Alguns motores elétricos disponíveis podem ser representados pela FIG.IV.11.

Neste capítulo apenas pretendemos introduzir as bases mínimas necessárias para uma especificação adequada de um motor para um VE.

Além disso, não devemos nos esquecer que a escolha do motor estará associada com o tipo de controle disponível.

MOTORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

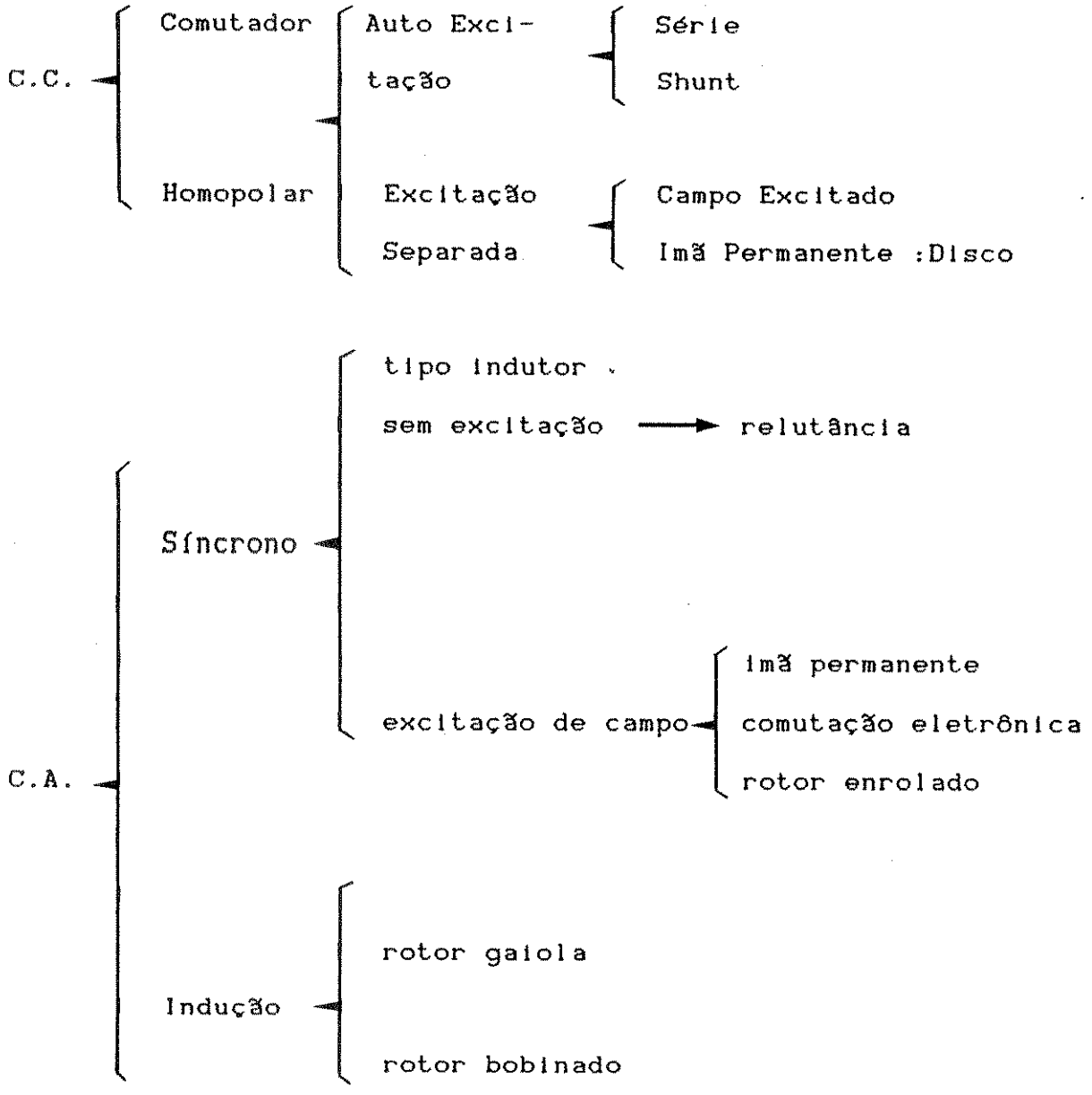


FIG.IV.11. Vários tipos de motores utilizáveis em VEs.

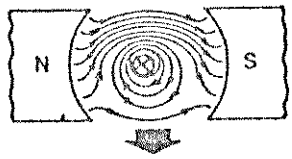
IV.2.2 - MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

A operação dos motores de C.C. baseia-se no princípio de que um condutor que conduz corrente, colocado em um campo magnético, tende a se mover em ângulo reto a direção do campo, FIG.IV.12.

a - Fluxo de campo

b - Campo magnético em torno de um condutor

c - Movimento do condutor para cima



d - Movimento do condutor para baixo

FIG.IV.12 Força atuando em um condutor no interior de um campo magnético.

A seção reta de um condutor conduzindo corrente é mostrada na FIG.IV.12.b . O sinal (•) no condutor indica que a corrente saí do papel se aproximando do observador. Como mostrado, a direção dos círculos do fluxo em torno do condutor é no sentido anti-horário. O sentido indicado concorda com a regra da mão direita, apresentada anteriormente.

Se o condutor (conduzindo corrente no sentido de aproximação do observador) for colocado entre os pólos de um imã, FIG.IV.12.c. ambos os campos sofrerão distorção. Na parte superior do condutor, a resultante do campo magnético será tal que o campo fica enfraquecido e o condutor tende a se mover para cima.

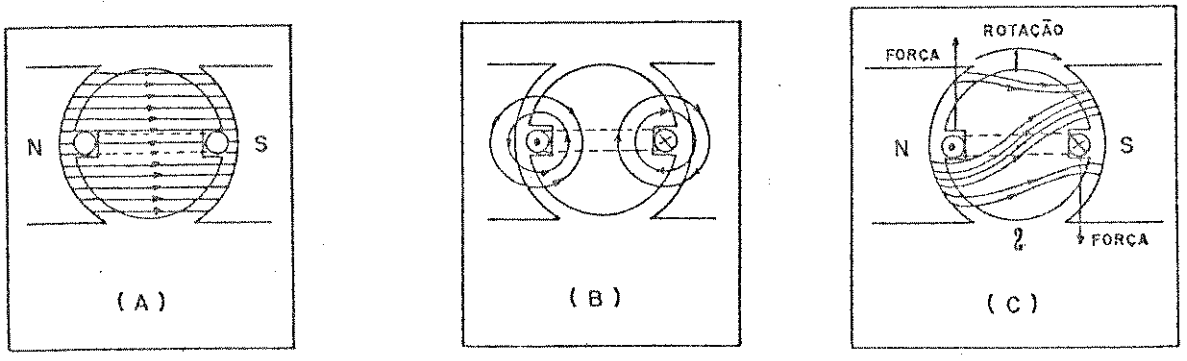
A intensidade da força que pressiona o condutor para cima depende da intensidade do campo entre os pólos e da intensidade da corrente

que flui no condutor.

Se o sentido da corrente no condutor for invertido, FIG.IV.12.d, o sentido do fluxo em torno do condutor também será invertido. O enfraquecimento do campo agora ocorrerá na parte de baixo do condutor e ele tenderá a se mover para baixo.

Na prática, os motores de C.C. dependem para a sua operação da interação entre o fluxo do campo e o número de condutores que conduzem corrente dentro desse campo. Nos motores de C.C. os condutores são enrolados e alojados em ranhuras na armadura; e esta é mantida em rolamentos de modo que pode girar livremente dentro do campo magnético.

Na FIG.IV.13 mostramos um motor elementar de C.C. com uma bobina no rotor.



a - Campo magnético do campo.

b - Campo magnético dos condutores

c - Campo magnético resultante

FIG.IV.13 Esquema de uma máquina elementar de C.C..

A FIG.IV.13.a mostra a distribuição uniforme do fluxo no campo principal quando os imãs do campo são alimentados e não flui corrente na armadura.

A FIG.IV.13.b mostra os campos magnéticos que envolvem os dois condutores ativos quando flue corrente na bobina da armadura no sentido indicado e as bobinas do campo não estão alimentadas. O sentido dos campos magnéticos que envolvem os dois condutores é determinado pela regra da mão direita.

A FIG.IV.13.c mostra o campo magnético resultante produzido pela interação das forças magnéticas. Observe que há uma intensificação de fluxo sob o condutor localizado próximo ao pólo norte, o mesmo ocorre no condutor localizado próximo ao pólo sul. Tal fato ocorre em virtude das linhas estarem na mesma direção naqueles pontos. O campo é mais fraco acima do condutor do pólo norte porque as linhas se estendem em direções opostas e se cancelam; o mesmo ocorre abaixo do pólo sul. Então a composição das forças atuantes no rotor fara este girar no sentido horário.

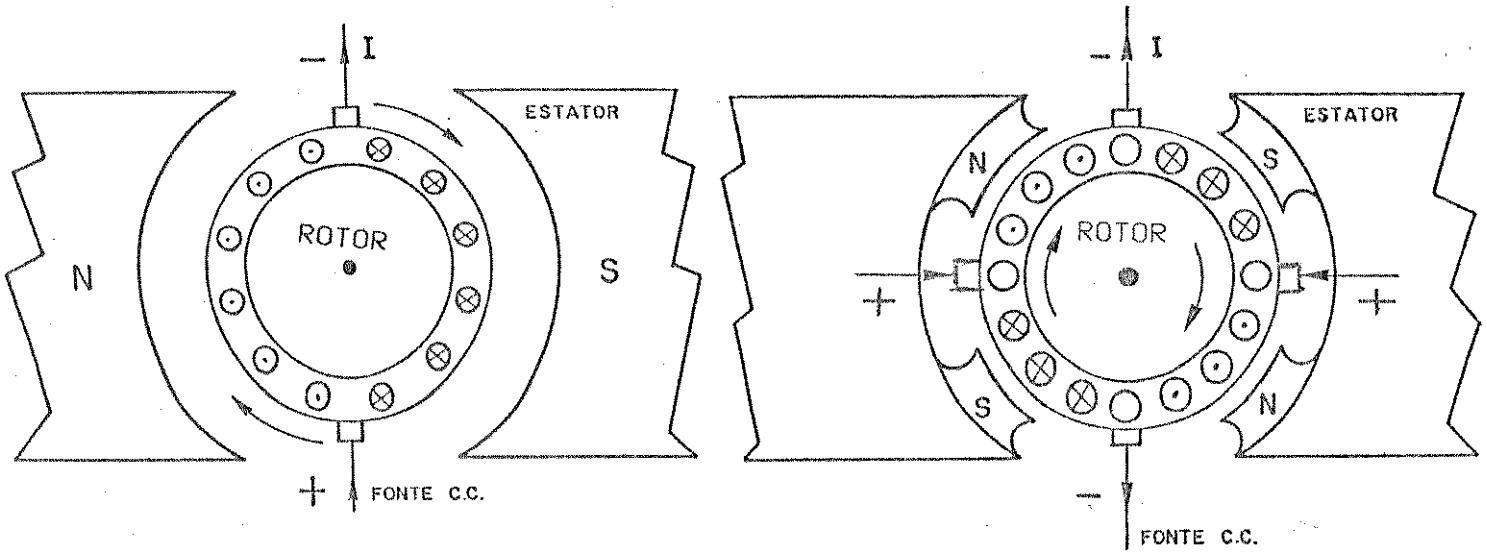
Quando os condutores atingirem as posições 1 e 2 ocorre a inversão de corrente nas espiras através de um comutador e o motor continua a girar no sentido horário.

Torque na máquina de corrente contínua.

O torque no eixo é o produto da força atuante na superfície da armadura vezes a distância perpendicular ao centro de rotação da armadura.

No motor de dois pólos FIG.IV.14.a a corrente se divide igualmente por dois caminhos. A corrente flui em um sentido nos condutores sob o pólo norte e em sentido oposto sob o pólo sul. Para que seja desen-

volvido um torque contínuo, a corrente na bobina deve inverter quando a espira passa na posição dos extremos superior e inferior. A função do comutador é inverter a corrente para manter o fluxo de corrente no mesmo sentido em todos os condutores sob um dado pólo.



- a - Dois Pólos

- b - Quatro Pólos

FIG.IV.14 Tipos diferentes de máquina de C.C.

No enrolamento, em paralelo de uma armadura para 4 pólos, a corrente se divide em quatro caminhos como mostrado na FIG.IV.14.b. A corrente flui em sentido oposto sob pólos alternados como na armadura para dois pólos e desenvolve uma força unidirecional em todos os condutores da armadura. O torque total produzido pela corrente da armadura é igual à soma dos torques individuais desenvolvidos por cada condutor. Esse torque, T, é proporcional ao produto da corrente da armadura pela intensidade do campo :

$$T = K_t \Phi I_a \qquad [4.1]$$

onde K é uma constante que se refere ao número de condutores da armadura, número de percursos elétricos em paralelo e outros fatores que são constantes para uma determinada máquina. Φ é fluxo por pólo e I_a é a corrente total da armadura.

Força Contra - Eletromotriz

Quando um condutor que conduz uma corrente I_a é deslocado em um campo magnético, uma tensão neste condutor será induzida. Esta tensão gerada se opõe a f.em. aplicada. Essa tensão em oposição é induzida nos enrolamentos de qualquer armadura girante do motor, e sempre se opõe à tensão aplicada. Ela é denominada força contra-eletromotriz (f.c.e.m.), e é diretamente proporcional à velocidade da armadura e intensidade do campo.

Para produzir uma corrente, I_a , numa armadura de resistência, R_a , é necessário uma tensão efetiva igual a $I_a R_a$.

A corrente que flui na armadura pode ser determinada pela seguinte equação :

$$I_a = \frac{E_a - E_c}{R_a} \qquad [4.2]$$

onde : I_a : corrente de armadura (A)

E_a : tensão aplicada (volts)

E_c : f.c.e.m. (volts)

R_a : resistência da armadura (ohms)

Rearranjando (4.2) temos :

$$E_a = E_c + I_a R_a$$

Se a máquina de C.C. estiver gerando, a tensão nos terminais de saída será igual a f.em. gerada mais a queda de tensão na resistência da armadura. Se a máquina estiver funcionando como motor a tensão gerada ou f.c.e.m. é igual à tensão nos terminais de saída menos a queda de tensão na resistência da armadura :

$$E_c = \frac{\Phi \; Z \; n \; p}{60 \; a \; 10^8} \qquad [4.3]$$

onde : Φ : fluxo por pólo (webers)

Z : número de condutores da armadura

n : velocidade da armadura (r.p.m.)

a : número de circuitos em paralelo entre os terminais

p : número de pólos

a equação (4.3) pode ser simplificada para :

$$E_c = K \; \Phi \; n \qquad [4.4.a]$$

onde : $K = \frac{Z \; p}{60 \; a \; 10^8}$ = constante

Substituindo (4.4.a) em (4.2) e rearranjando temos :

$$n = \frac{E_a - I_a R_a}{K \; \Phi} \qquad [4.4.b]$$

TIPOS DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Os motores de corrente contínua podem ser classificados de acordo com o tipo de ligação dos mesmos, como é mostrado na FIG.IV.15.

O motor série tem os enrolamentos da armadura e do campo ligados em série e os dois tem a mesma corrente. A velocidade depende da tensão e da carga. O torque é o produto da corrente de armadura e do campo magnético; ambos dependem da corrente. Em qualquer carga a corrente é constante e a velocidade é proporcional à tensão aplicada. Quando a carga se altera, a velocidade também se modifica.

Os motores de corrente contínua compostos (compound) têm campos em série e em paralelo. A adição de um pequeno campo em série ajuda a obter a regulagem apropriada da velocidade entre a plena carga e a carga nula. Estes motores encontram ampla aplicação em dispositivos com velocidade ajustável. A prática usual é a de ligar o campo em série de modo que ele se adicione ao campo em paralelo (composto acumulado), o que possibilita a regulação suave e estável da velocidade com a carga crescente.

O motor com excitação separada (independente) é o mais usual quando for utilizado como controlador de velocidade e ou torque um recortador. Através do recortador posso obter as características dos motores em outros tipos de configuração, por exemplo posso simular um motor série através da aplicação, pelo recortador, de um igual valor de corrente na armadura e no campo da máquina com excitação separada.

O motor shunt é pouco usual em sistemas que exigem velocidades variáveis.

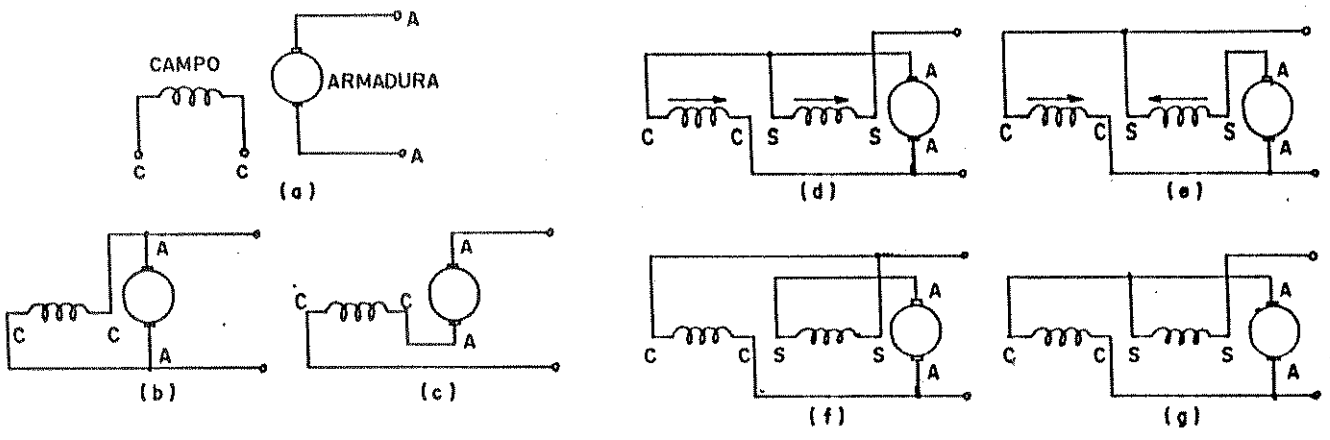


FIG.IV.15 Classificação de Motores de C.C.: a) excitação separada, b) shunt, c) série, d) coumpound acumulado, e) coumpound diferencial, f) shunt-longo, e g) shunt-curto.

A grande flexibilidade dos motores a C.C., proveniente das suas características intrínsecas e da forma de operação, torna-os idealmente apropriados para operar as unidades de velocidade ajustável.

Dos vários tipos de motores vistos anteriormente, o motor série é o mais comum em VEs convencionais (controle por resistências). Nesta configuração o campo e o circuito de armadura do motor são conectados eletricamente em série como mostra a FIG.IV.15.c. A principal característica do motor série é um torque muito alto para baixas velocidades, usualmente, considerado ser o maior torque por unidade de corrente para todos tipos de motores elétricos. Esta característica torna o motor série ideal para tração elétrica, embora com o avanço dos controles eletrônicos, o motor com excitação separada possa realizar aproximadamente idênticas características além de outras não viáveis em um motor série.

PERDAS E EFICIÊNCIAS

Em adição às características de corrente-tensão e torque-velocidade, o desempenho da máquina de C.C. é também medido pela sua eficiência, usualmente definida como:

$$\text{EFICIÊNCIA} = \frac{\text{POTÊNCIA DE ENTRADA - PERDAS}}{\text{POTÊNCIA DE ENTRADA}}$$

Existem vários tipos de perdas mecânicas e elétricas nos motores de C.C., algumas das quais são comuns a outros tipos de motores.

Uma das perdas ocorre por força do atrito nos rolamentos. Esse tipo de perda pode ser reduzido pela lubrificação correta dos mancais e rolamentos. Os rolamentos oferecem menos perda do que os mancais. Todavia, em alta velocidade ou sob carga excessiva, a perda devido ao atrito no rolamento pode se tornar apreciável.

Ocorre também a perda por atrito nas escovas que pode ser reduzida mediante o emprego de comutadores perfeitamente lisos e polidos e usando escovas perfeitamente ajustadas aos comutadores.

A perda por atrito com o ar é uma forma de perda motivada pela resistência oferecida pelo ar à rotação da armadura. As perdas no ferro incluem as perdas por correntes parasitas e perdas por histerese no ferro da armadura. As perdas no cobre ou ôhmica incluem as perdas por queda $I^2 R$ nos enrolamentos da armadura e do campo.

DENSIDADE DE POTÊNCIA

Se definirmos a relação potência/massa como densidade de potência , d, os valores obtidos para uma máquina de C.C., sem ventilação com dissipação por irradiação será dado pela TAB.IV.1.

Para máquina, com ventilação própria com ventilador interno,montado sobre o eixo teremos os valores da TAB.IV.2.

Tensão de armadura : 260 V		
Rotação nominal : 1800 r.p.m.		
Potência [KW]	Massa[Kg]	d [KW/Kg]
5,60	160	0,035
6,15	191	0,032
8,00	245	0,033
9,25	280	0,033
9,50	321	0,030
11,50	350	0,033
12,80	380	0,034
15,50	420	0,037

TAB.IV.1 - Densidades de Potência para Máquinas C.C. sem ventilação.

Tensão de armadura : 260 V		
Rotação nominal : 1800 r.p.m.		
Potência [KW]	Massa [Kg]	d [KW/Kg]
5,8	136	0,043
7,1	156	0,046
8,0	186	0,043
9,25	214	0,043
10,30	240	0,043
11,80	274	0,043
12,50	313	0,040

TAB.IV.2 - Densidades de Potência para Máquinas C.C. com ventilação própria.

Podemos concluir das tabelas acima que as condições de refrigeração influenciam de maneira direta na densidade de potência da máquina.

IV.2.3- MOTOR DE CORRENTE ALTERNADA

O motor de indução inventado por Nikola Tesla em 1888 (29), constituiu a partir de então o motor de uso mais intenso devido a sua robustez, simplicidade e ausência de coletor.

Tesla sabia que um pedaço de metal podia ser arrastado passando-se um imã sobre ele e que um campo magnético poderia ser movido (girado) fazendo-se crescer a corrente em uma bobina enquanto a corrente em

uma bobina adjacente decrescia. Isto é alimentando-se bobinas sucessivas de um motor com correntes fora de fase temporal, o campo magnético girava.

PRINCíPIO DE FUNCIONAMENTO

Seja uma fita condutora linear que se desloca a velocidade constante dentro de um campo magnético formado por um imã. Pela Lei de Lenz ("quer o fluxo aumente ou diminua, a força eletro-motriz induzida pela variação do fluxo tende a gerar uma corrente de sentido tal que se opõe à variação do fluxo") serão induzidos dois campos magnéticos de polaridades opostas na fita condutora conforme mostrado na FIG. IV.16.a.

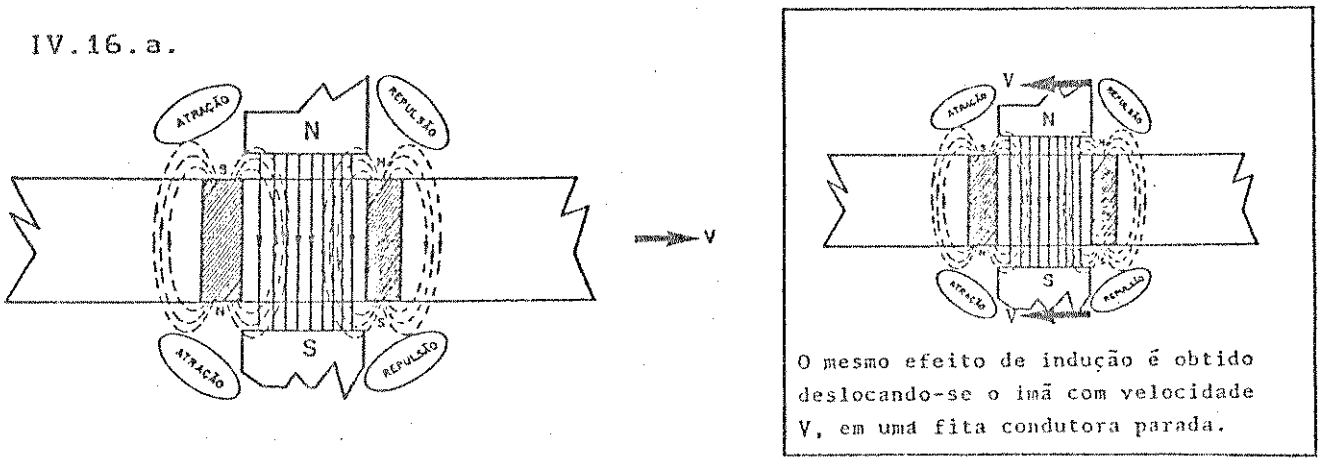


FIG.IV.16.a Fita Condutora Deslocando-se Num Campo Magnético

Na FIG.IV.16.a visualizamos também como são as linhas de força induzidas na fita condutora. E se esta fita condutora for a secção de um disco condutor ?

Para respondermos está pergunta imaginemos o seguinte experimento : seja um disco que pode girar livremente em torno de um eixo vertical, e feito de qualquer material bom condutor elétrico, como ferro, cobre ou alumínio.

Um imã que pode girar sem restrições sobre o mesmo eixo do disco está colocado acima deste e tem suas extremidades encurvadas para baixo a fim de permitir que seu fluxo magnético atravesse o referido disco, FIG.IV.16.b. O imã ao girar faz com que suas linhas magnéticas cortem o disco e aí induzam correntes como as da FIG.IV.16.a.Visto estas correntes acharem-se no interior de um campo magnético, procuram locomover-se através do mesmo. Pela Lei de Lenz o sentido da força desenvolvida entre estas correntes do disco e o fluxo que as induz será de tal ordem que o disco tende a acompanhar o movimento do imã.

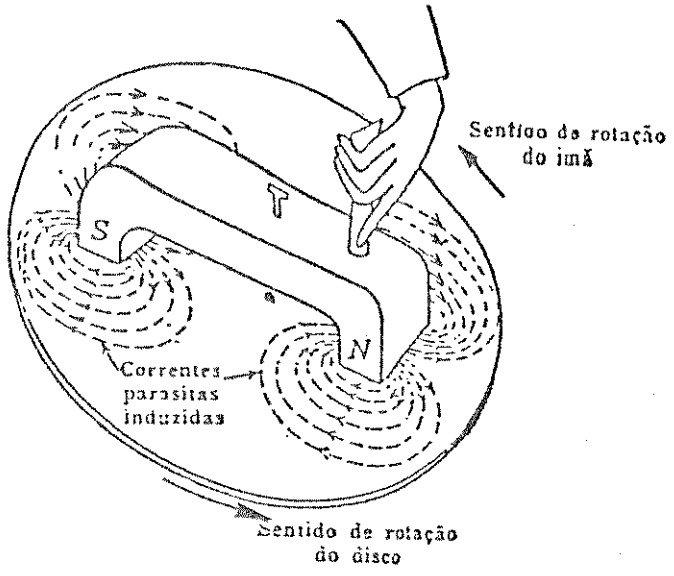


FIG.IV.16.b Princípio de um Motor de indução

Em um motor de C.A. o princípio de funcionamento se aplica, mas em lugar de um imã girando cria-se um campo magnético girante da seguinte forma.

O esquema da FIG.IV.17 mostra um estator trifásico alimentado por uma fonte de C.A. trifásica. Os enrolamentos estão ligados em Y. As duas bobinas de cada fase estão enroladas no mesmo sentido.

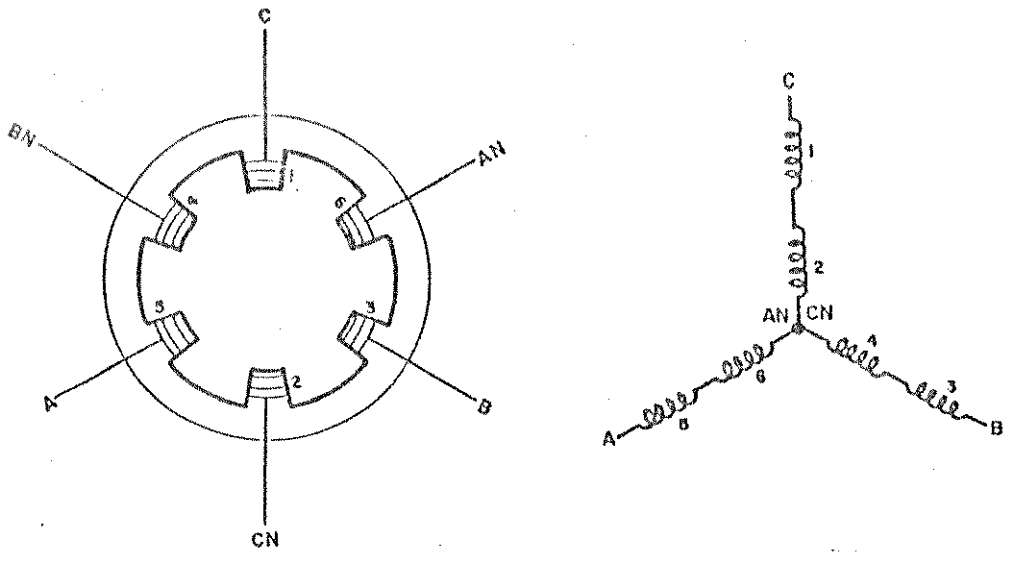


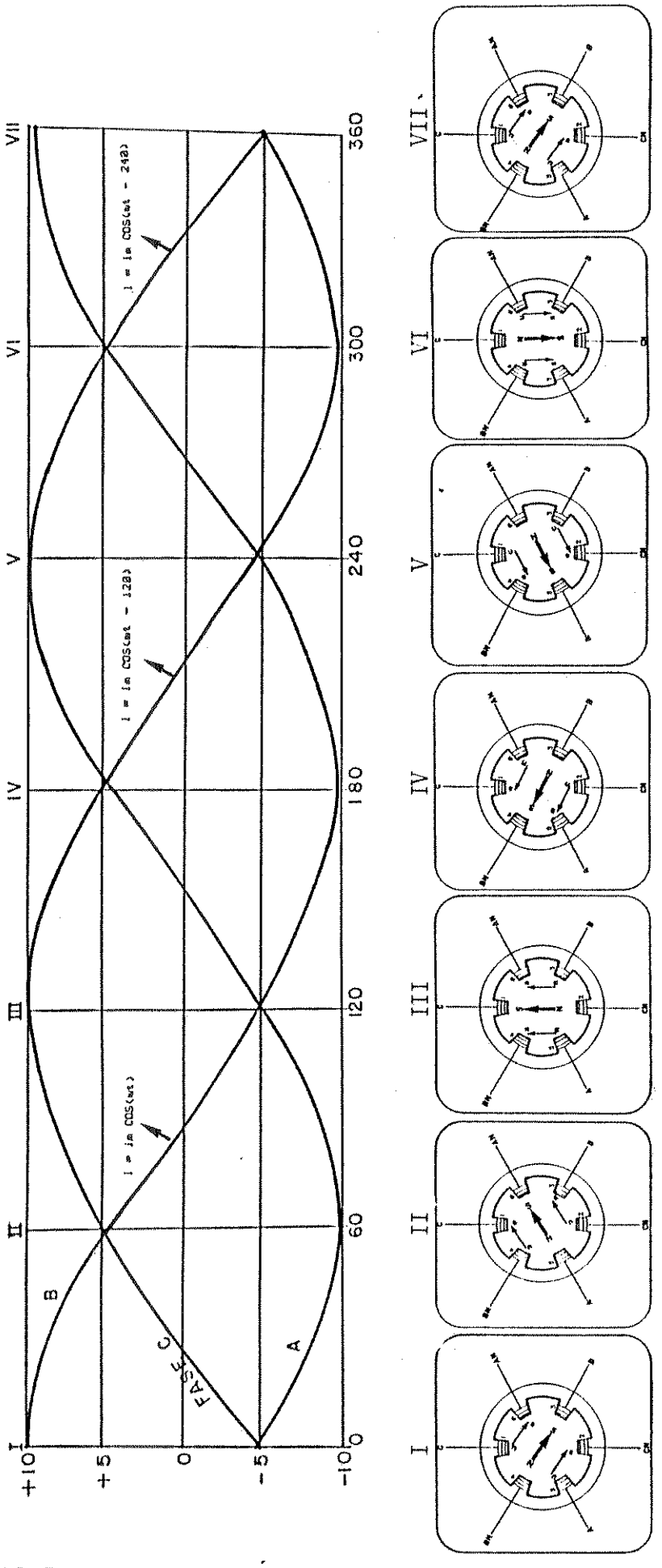
FIG.IV.17 Esquema de um estator elementar trifásico.

Como as correntes nos três enrolamentos estão defasadas de 120^{o}, os campos magnéticos que produzem apresentam a mesma defasagem. Os três campos combinam-se em um único que atua sobre o rotor. Na FIG. IV.18 mostramos que os campos se combinam dando um campo único cuja posição varia com o tempo. Ao fim de um ciclo de C.A., o campo terá girado 360^{o}, ou uma rotação completa.

Na FIG.IV.18 representamos como podemos obter um campo girante. Caso representassemos as formas de onda de tensão as mesmas estariam adiantadas de 90^{o} em relação a corrente; caso as bobinas fossem ideais (indutância ideal).

No instante I, da FIG.IV.18 a corrente da fase B é máxima positiva (10 A). A corrente é considerada positiva quando está fluindo no sentido de saída do terminal do motor e negativa quando flui entrando no terminal do motor.

Nesse instante flui corrente nos terminais A e C com valores iguais a metade do valor máximo (5 A). Essas correntes se combinam no neutro (ligação comum) para fornecer 10 A na saída através da fase B.



O ESTATOR DESTA FIGURA CORRESPONDE AO ESTATOR DA FIG.IV.17.

FIG.IV.18 Produção de Um Campo Magnético Rotativo.

O campo resultante no instante I se estabelece para baixo e para a direita conforme mostra a seta N ⟶ S. A maior parte do campo é produzida pela fase B (máximo de intensidade neste instante) e é complementada pelas fases adjacentes, A e C (metade do valor máximo). As regiões de menor intensidade do campo estão indicadas pelas letras "n" e "s". O campo é bipolar e se situa no espaço que normalmente conteria o rotor.

No instante II, a corrente na fase B é reduzida à metade do valor (5 A). A corrente na fase C inverteu o sentido (idem o fluxo) de - 5 A para + 5 A e a corrente na fase A variou de - 5 para - 10 A.

O campo resultante no instante II se estabelece agora para cima e para a direita conforme mostrado pela seta N ⟶ S . A maior parte do campo é produzida pela fase A (máximo de intensidade) e a contribuição menos intensa é produzida pelas fases B e C (metade da intensidade total).

No instante III, a corrente da fase C é + 10 A e o campo se estabelece na vertical para cima.

No instante IV, a corrente na fase b atinge o valor de -10 A e o campo se estabelece para cima e para a esquerda.

No instante V, a corrente na fase A atinge o valor de + 10 A e o campo se estabelece para baixo e para a esquerda.

No instante VI, a corrente da fase C atinge - 10 A e o campo se estabelece no sentido vertical para baixo.

O instante VII é correspondente ao instante I, e repete-se o processo.

O estator trifásico apresentado irá produzir 2 pólos magnéticos. Para obtermos 4 pólos a configuração das bobinas no estator deve ser semelhante a apresentada na FIG.IV.19.

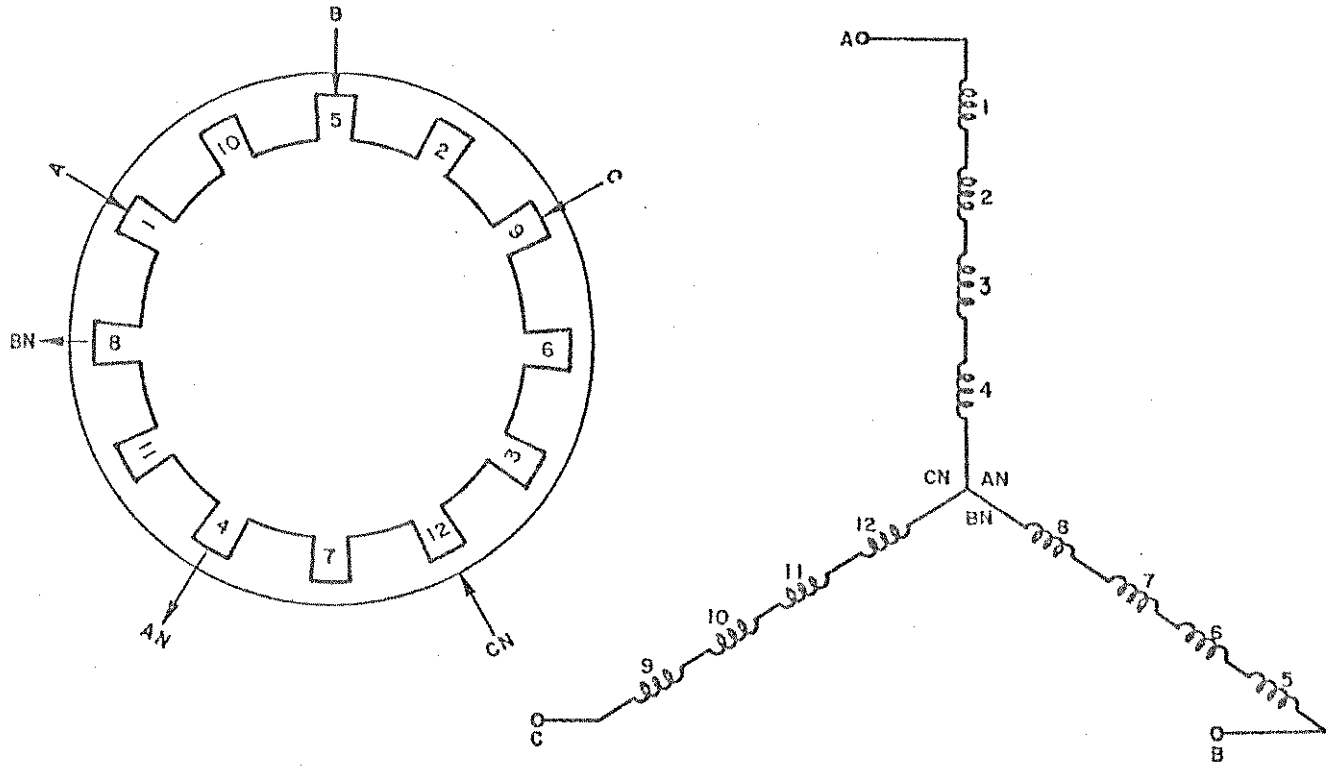


FIG.IV.19 Representação esquemática de um estator trifásico de 4 pólos

Os exemplos apresentados são recursos didáticos. No projeto de máquinas de C.A. são feitos sérios esforços para distribuir o enrolamento no estator de modo a produzir uma indução mais uniforme ao longo do rotor.

Portanto qualquer número de fases produzirá um campo girante. Com um sistema monofásico, contudo, não haverá partida, logo são necessá-

rios arranjos especiais para fazê-los operar adequadamente.

O estator de uma máquina de indução de C.A. é alimentado por uma fonte C.A. com frequência, f1, que ira induzir correntes no rotor.

A frequência, f1, de alimentação do estator irá determinar a velocidade de rotação do campo girante produzido no estator e consequentemente a velocidade do rotor.

O estator da máquina de C.A. é formado por bobinas colocadas uniformemente ao longo de um cilindro. O valor da corrente de uma bobina do estator passa por um ciclo completo toda vez que um par de pólos (N→S) passa por ela ou p/2 vezes cada rotação, onde p é o número de pólos .

Na FIG.IV.18 um par de pólos do estator corresponde a 2π radianos (360° graus) elétricos do campo girante, que correspondem a p/2 θm, onde θm são ângulos mecânicos.

Portanto : $\theta s = p\ \theta m / 2$ onde θs = ângulos elétricos

θm = ângulos mecânicos

donde a frequência angular da onda de corrente, Ws, esta ligada à velocidade angular mecânica Wm por :

$$Ws = p\ Wm / 2 \qquad \text{onde } Ws = 2\pi f1 \quad [4.5.a]$$

$$Wm = 2\pi n1$$

A frequência da onda de corrente é portanto : $f1 = p\ n1/ 2$ Hz, onde n1 é a velocidade em rotações por segundo (r.p.s.), do campo do estator.

Para uma máquina de p pólos, a velocidade síncrona de rotação do campo girante formado pelo enrolamento do estator é dada por :

$$n1 = 2\ f1/\ p \quad (r.p.s.) \qquad [4.5.b]$$

ou,

$$n1 = 120 * f1/\ p \quad (r.p.m.) \qquad [4.5.c]$$

onde :

n1 : velocidade de rotação do campo magnético do estator.

f1 : frequência da fonte, hertz (ciclos/s)

p : número de pólos.

Se n1 for a velocidade do campo girante do estator, então o rotor estará girando a velocidade n tal que n < n1.

Os condutores do rotor são cortados por um fluxo de velocidade angular, n2 :

$$n2 = n1 - n \qquad [4.6.a]$$

onde : n2 - velocidade relativa entre o rotor e o estator,

Dividindo e multiplicando [4.6.a] por n1 :

$$n2 = \frac{n1 - n}{n1}\ n1 \qquad \text{onde } (n1 - n)\ /\ n1 = s \qquad [4.6.b]$$

sendo s definido como escorregamento. O valor operacional do escorregamento, ou deslizamento, é usualmente pequeno (0.2 a 0.05)

A frequência das correntes induzidas no rotor, f2, será dada por : $f2 = s\ f1$, onde f1 é a frequência da corrente do estator, e o campo magnético produzido no rotor por estas correntes girará com sn1 rotações em relação ao rotor, no sentido do campo do estator; mas adicionada a está rotação temos a rotação mecânica do rotor n. A velocidade do campo girante do rotor no espaço é a soma destas duas velocidades.

$$\text{Velocidade do campo magnético do rotor} = sn1 + n = sn1 + n1(1-s) = n1$$

Seja $fn = f1 - f2$, a frequência relativa entre o estator e o rotor; a velocidade de rotação do eixo do motor será dada por :

$$n = 120\ fn\ /\ p \quad (r.p.m.)$$

Como os campos do estator e do rotor estão estacionários entre si, o torque desenvolvido é estável.

A seguir na TAB.IV.3 descrevemos algumas das características operacionais da máquina de C.A..

Potência na Saída :

$$P = T * n \qquad [4.7]$$

$$P = V * I * y * e \quad [\text{monofásico}] \qquad [4.8]$$

$$P = \sqrt{3} * V * I * y * e \quad [\text{trifásico}] \qquad [4.9]$$

Potência na entrada :

$$P = V * I * y \quad [\text{monofásico}] \qquad [4.10]$$

$$P = \sqrt{3} * V * I * y \quad [\text{trifásico}] \qquad [4.11]$$

$$S = P/y \qquad [4.12]$$

onde:

e : eficiência, fração decimal

I : corrente na linha , A

n : velocidade rotação, r.p.m.

P : potência, KW

y : fator de potência, fração decimal

S : potência aparente, KVA

V : voltagem aplicada, V

T : torque, Kg.m.

TAB.IV.3 - Equações Para Motores De C.A.

O circuito equivalente de uma máquina de indução assíncrona.

A máquina de indução pode ser encarada como um transformador girante com a característica adicional de transformação de frequência, f2 = s f1, e o circuito equivalente deste pode ser utilizado para a máquina de indução em regime permanente.[Ref.35]

Entre os aspectos importantes de desempenho em regime permanente de uma máquina de indução estão as variações de corrente, velocidade, e perdas, em função do torque de carga, do torque de partida e do torque máximo. Todas estas características podem ser determinadas através do circuito equivalente determinado para um sistema de alimentação balanceado em que a forma de onda tensão é senoidal [Ref.41]. O circuito equivalente foi criado baseado em raciocínio físico onde através de reatâncias e resistências pode-se descrever o comportamento real de uma máquina de indução.

Em um transformador a corrente do estator cria um fluxo no entreferro da máquina que concatena ou liga o estator ao rotor e parte dele é disperso no próprio estator sendo este efeito representado por uma reatância série de dispersão X_1 , para cada fase do estator. A resistência elétrica do estator é representada por R_1 e asssim a impedância do estator é $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$.

A f.e.m. , E_1, produzida pelo estator é responsável pelo aparecimento do fluxo O no entreferrro.

A corrente do estator I_1, é composta por duas componentes : uma a corrente de excitação I_0 e outra responsável pela anulação da f.c.e.m. produzida pela corrente do rotor. A corrente de excitação I_0 consiste

também de duas componentes : a de magnetização I_m e a de perdas cobre e ferro I_p .

Se considerarmos R_2 como a resistência equivalente do rotor por fase assim como X_2 a sua reatância, em repouso o modelo da máquina pode ser representado pela FIG.IV.20.a

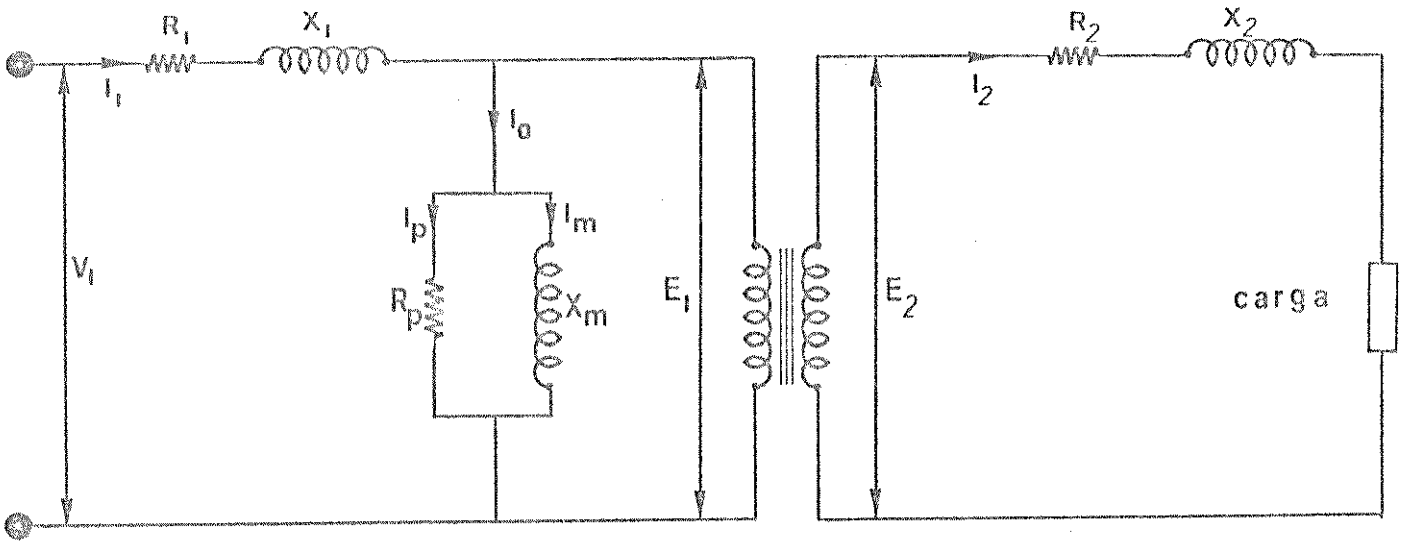


FIG.IV.20.a Circuito equivalente por fase de uma máquina de indução.

No transformador, a carga existente do lado secundário é elétrica enquanto que no motor de indução vem a ser mecânica. No circuito elétrico equivalente do motor de indução, entretanto, a carga mecânica pode ser substituída por uma resistência pura. Considerando uma fase do rotor temos :

$$I_2 = s\ E_1 \ / \ \sqrt{R_2^2 + s^2\ X^2_2}$$

Se dividirmos e multiplicarmos a equação acima por s teremos :

$$I_2 = E_1 \ / \ \sqrt{(\ R_2 \ / \ s)^2 + X_2^2}$$

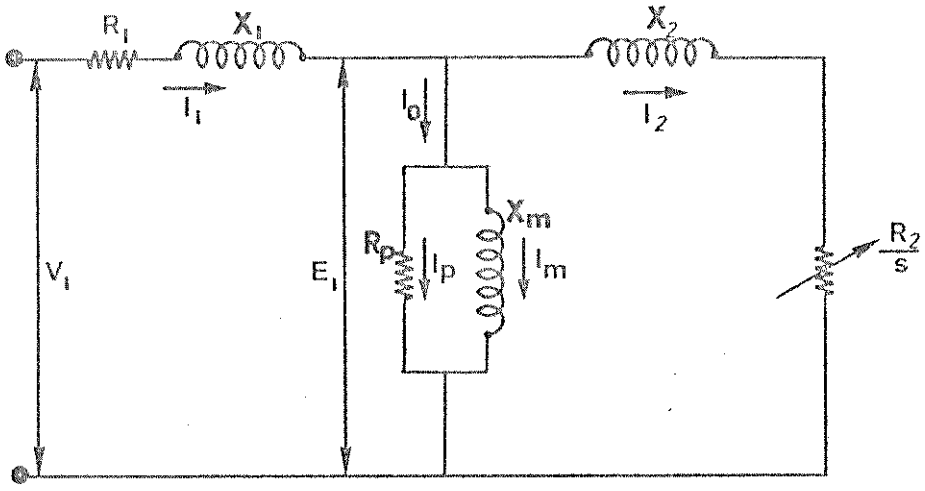
Agora se intercalarmos no rotor uma resistência, R_3 , cuja combinação com R_2 seja R_2/s, a corrente no rotor se este estiver travado será igual a corrente do rotor funcionando em regime com escorregamento s.

Se a resistência, R_3, for intercalada em série teremos :

$$R_3 + R_2 = R_2 / s$$

$$R_3 = R_2(1 - s)/s$$

O circuito equivalente do motor de indução pode ser simplificado e é apresentado pela FIG.IV.20.b.



onde :

V_1 - tensão aplicada ao estator

E_1 - tensão induzida equivalente no rotor

I_2 - corrente no rotor

R_p - valores adequados para tornar a corrente I_o igual a corrente

X_m - excitadora e a corrente devido as perdas no ferro, tanto em grandeza como em defasagem.

FIG.IV.20.b Circuito equivalente de uma máquina assíncrona.

A potência transferida, Pf, do estator para o rotor só pode ser dissipada na parte resistiva do circuito. Deste modo :

$$Pf = m_1 \frac{R_2}{s} I_2^2 \qquad [4.13.a]$$

onde m_1 é o número de fases do estator.

Como,

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \left(\frac{1 - s}{s}\right) R_2$$

substituíndo o valor de R_2/s em [4.13.a] :

$$Pf = m_1 \left[R_2 + \left(\frac{1 - s}{s}\right) R_2 \right] I_2^2 \qquad [4.13.b]$$

Na equação [4.13.b] o termo $[m_1 R_2 I_2^2]$ representa as perdas resistivas no enrolamento do rotor e o termo $[m_1((1 - s)/s)\ R_2\ I_2^2]$ representa a potência eletromecânica, que vai suprir as perdas rotacionais e a potência mecânica do rotor .

Portanto o torque eletromagnético T será dado por :

$$T\ w_r = m_1\ R_2\ \frac{(1 - s)}{s}\ I_2^2 / s \qquad [4.14]$$

onde $w_r = 2\pi n$ é a velocidade do rotor.

O torque, T, é interno ao motor, e parte dele será utilizada para vencer as perdas rotacionais.

Sabemos que : $w_r = w_m\ (1 - s)$

onde w_m é a velocidade síncrona do campo girante do estator. Substituíndo o termo w_m em [4.14] :

$$T = m_1 \, I_2^2 \, R_2 \, / \, (w_m \, s) \qquad [4.15.a]$$

De [4.5.a] e [4.5.b] temos :

$$w_m = 2 \pi n_1 = 4 \pi f_1 \, / \, p$$

substituíndo em [4.15] :

$$T = \frac{m_1 \quad I_2^2 \quad p \; R_2}{4 \pi f_1 \qquad s} \qquad [4.15.b]$$

Do circuito equivalente temos :

$$I_2 = E_1 \, / \sqrt{(R_2 / s)^2 + X_2^2}$$

substituíndo em [4.15.b]

$$T = \frac{m_1 \; p \; E_1^2 \quad s \; R_2}{4 \pi f_1 \; \left(R_2^2 + s^2 X_2^2 \right)} \qquad [4.15.c]$$

É conveniente expressarmos o torque em função da tensão terminal, V_1 , e não da f.e.m , E_1 , produzida pelo estator. Para isso fazemos uso das seguintes relações :

$$E_1 = V_1 - I_1 \, Z_1$$

onde Z_1 é a impedância do estator.

Na prática a queda $I_1 \, Z_1$ é muito pequena quando comparada com a tensão V_1 e pode ser desprezada, neste caso $E_1 \simeq V_1$.

Do mesmo modo que as máquinas de C.C. as máquinas de C.A. apresentam perdas magnetelétricas que irão determinar sua eficiência.

Para um dado motor de C.A. trifásico de 15 HP, 1800 rpm, funcionando a plena carga, teríamos o seguinte esquema de perdas :

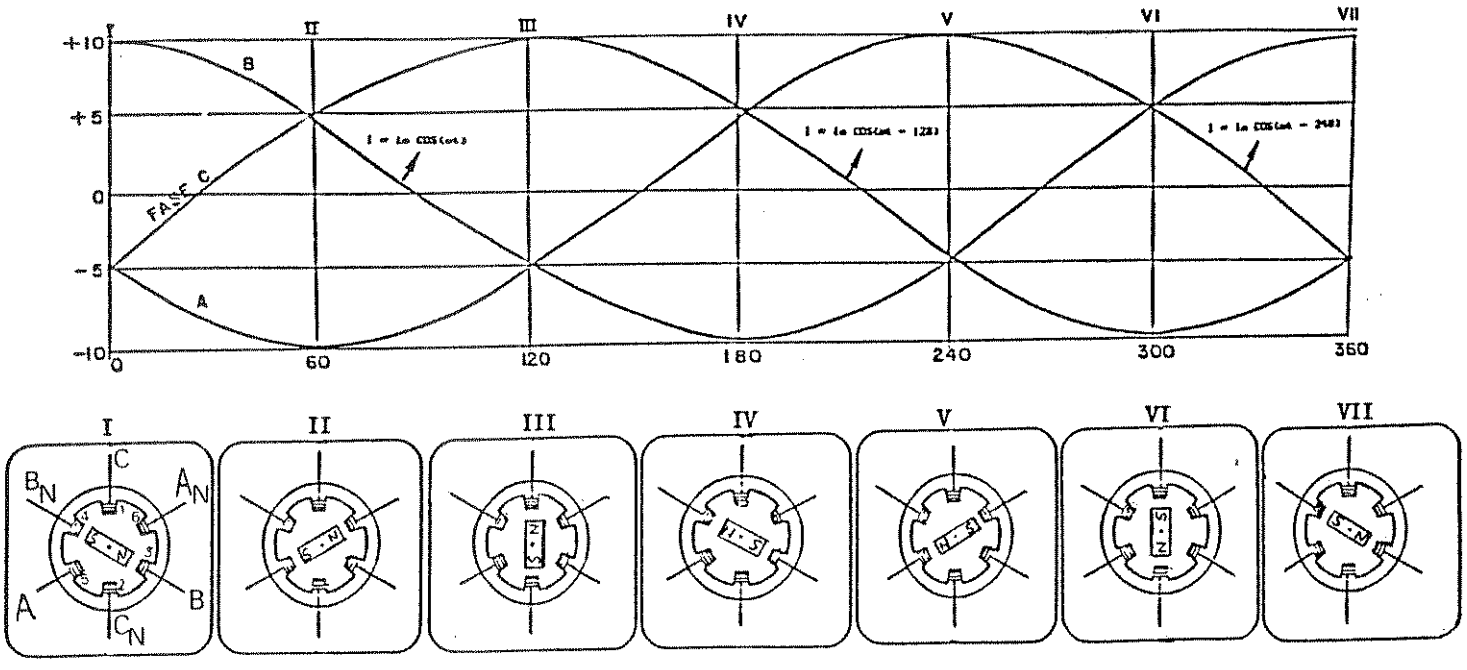
	[%]
Potência fornecida ao estator = $3\ V_1 I_1 \cos \varphi_1$	100
Perda no cobre do estator = $3\ I_1^2 R_1$	3.5
Perda no ferro do estator :	2.5
Potência transferida ao rotor através do entreferro = $= 3\ E_2 I_2 \cos \varphi_2$	94
Perda no cobre do rotor :	3.5
Perda por atrito e resistência do ar :	2.0
Potência mecânica disponível no eixo :	88.5

onde V_1 é a tensão em relação ao neutro.

MOTOR SÍNCRONO

Os motores de corrente alternada síncronos operam em sincronia exata com o sistema de potência; ou seja o seu rotor é sincronizado com o campo girante estabelecido no estator.

No motor de C.A. vimos que a aplicação de uma corrente alternada trifásica ao estator produz um campo magnético girante em torno do rotor. Quando o rotor é energizado com C.C. através de escovas, ele atua como um imã em barra suspenso que procura se alinhar com o campo magnético produzido pela aplicação da C.A. trifásica ao estator. Quando o campo magnético gira, o rotor gira em sincronismo com o campo.



Obs. : O estator corresponde ao da FIG.IV.17.

FIG.IV.21 Esquema elementar de um motor síncrono.

Uma das desvantagens do motor síncrono é que ele não pode partir de uma posição de repouso apenas com a aplicação da C.A. ao estator.

Normalmente ele é posto em movimento com auxílio de um pequeno motor de indução ou enrolamento equivalente (gaiola) incorporado ao motor síncrono. Quando o rotor se aproxima da velocidade síncrona graças ao dispositivo de partida ele passa a ser energizado pela fonte de C.C.. O rotor passa então a acompanhar o campo girante.

DENSIDADE DE POTÊNCIA

Na TAB.IV.4 apresentamos valores para a densidade de potência de um motor C.A. :

Potência [KW]	Massa [Kg]	Densidade [KW/Kg]
5,5	58	0,09
7,5	67	0,11
9,2	74	0,12
11,0	119	0,09
15,0	130	0,11
18,5	189	0,09
22,0	203	0,11
30,0	258	0,12

TAB.IV.4. Densidade de potência para motores de indução assíncronos trifásicos - velocidade nominal 1800 r.p.m.- 60 Hz.

IV.2.4 COMPARAÇÕES [17]

Apesar de não termos abordado ainda o tema controle de velocidade

e torque, acreditamos que a escolha do motor se dá em primeiro lugar, principalmente devido as características de torque que o veículo irá requisitar; a partir de então iniciamos a escolha do tipo de controle.

Como foi visto anteriormente a escolha de um motor para VE estará associada a vários fatores. Apresentamos na TAB.IV.5 comparações entre os vários tipos de motores e acionamentos elétricos existentes. Nesta tabela estão representados valores de eficiências medidos na faixa nominal de operação; devemos ressaltar que a eficiência do motor elétrico será função da velocidade e do torque de operação.

Tipo de Motor	Eficiência
C.C. comutador	0.84
C.A. indução	0,94
C.A.-síncrono-rotor enrolado	0,93
C.A.-síncrono-induzido [5]	0,80
C.A.-síncrono-imã permanente	0,94

TAB.IV.5. Parâmetros de Eficiência de Motores.

MASSA : Uma comparação entre várias massas de sistemas de acionamento é mostrada na FIG.IV.22. Um número grande de observações pode ser tirado desta figura. Primeiro, a massa do motor corresponde a linha cheia do desenho, enquanto que a massa do conversor a linha pontilhada.. A massa do sistema C.C. é dominada pelo motor. Nos sistemas de C.A. a massa dos conversores é mais significativa. Note que a massa do inversor de corrente (SCR) é muito grande. Isto se deve ao tamanho dos capacitores de comutação requeridos para baixa tensão e alta corrente do sistema.

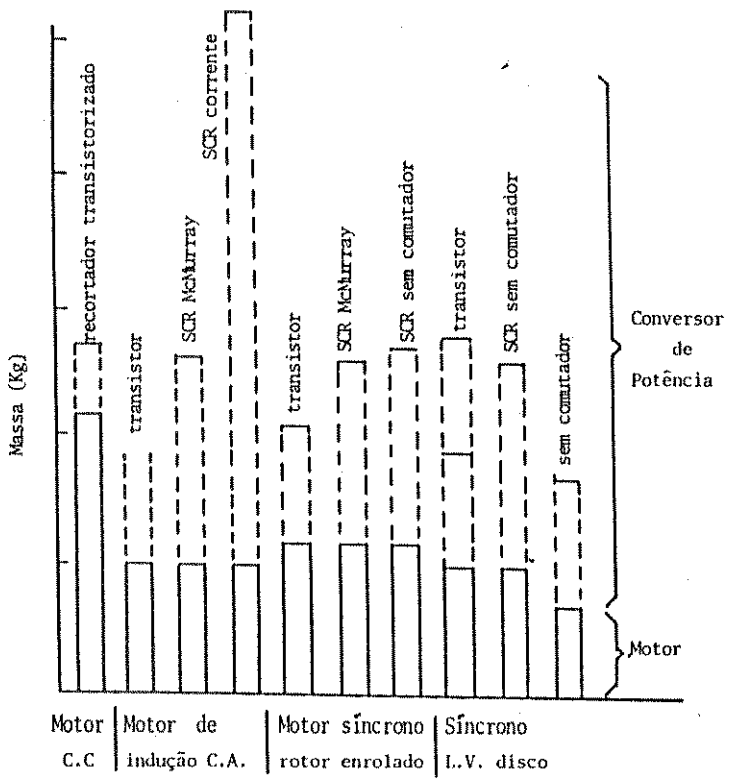


FIG.IV.22 - Comparação entre a massa de vários sistemas de acionamento para VEs.

EFICIÊNCIA - Na FIG.IV.23 é apresentada a eficiência média para cada sistema de acionamento em um ciclo padrão para VE - SAE J 277d (Vide II-3.8).As eficiências não são muito diferentes exceto que em um sistema C.C. ela é menor do que em um motor de C.A. acionado por inversor transistorizado.

CUSTO - O fator chave para escolha de um tipo de acionamento é o custo. Uma comparação do custo de vários tipos de acionamento usando como referência o sistema C.C. com um motor com comutador e um recortador é mostrado na FIG.IV.24.

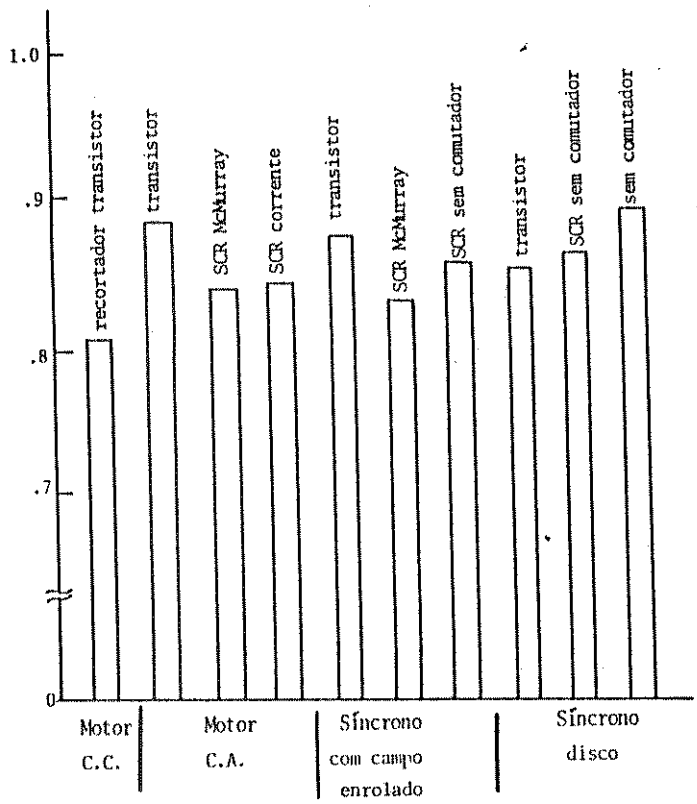


FIG.IV.23 Eficiência dos sistemas de acionamento utilizados em VEs.

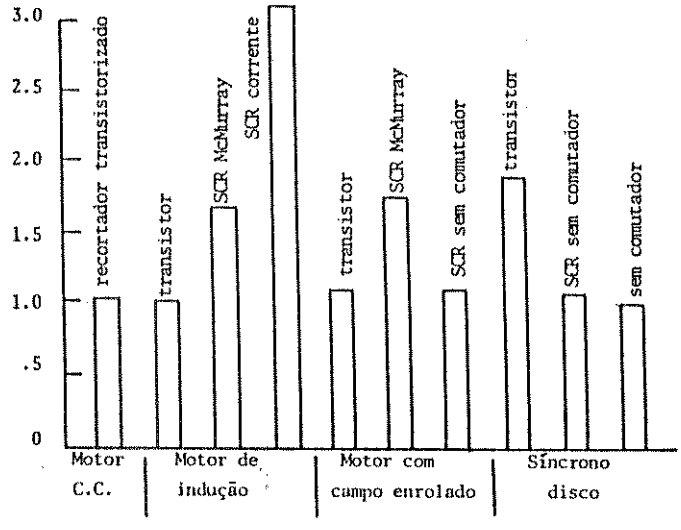


FIG.IV.24 - Comparação de custos de sistemas de acionamento.

Note que vários tipos de acionamento possuem aproximadamente custos iguais, e portanto, são candidatos para trabalhos e utilização futuras. As tabelas acima mostram a tendência de uma época passada, pois foram montadas com dados obtidos em 1979. Atualmente a implementação de sistemas de acionamento em C.A. tende a igualar os custos dos sistemas de acionamento em C.C..

IV.3. CONTROLE DE VELOCIDADE E TORQUE PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

IV.3.1. INTRODUÇÃO

Na parte IV.2 deste trabalho apresentamos as máquinas elétricas que podem ser utilizadas em VEs. É evidente que independentemente do tipo de motor que escolhermos ele necessita ter um controlador, para controlar as características do motor. De fato, em um VE a máquina e o controlador são avaliados juntos (FIG.IV.22 a IV.24) para que possamos obter uma avaliação sobre o sistema de acionamento ideal para uma determinada utilização.

É evidente que o objetivo do projeto será encontrar um sistema com a máxima eficiência e com o mínimo de custo e de peso. Como mostramos no Capítulo II o controlador pode ser encarado como um acoplamento entre as baterias e o motor. Desta maneira o controlador influência na eficiência da transferência do fluxo de energia entre a bateria e a máquina elétrica. Consequentemente, a eficiência do sistema de controle é um importante fator no desempenho do VE.

Em adição a alta eficiência algumas outras características devem ser procuradas :

- resposta rápida e suave quando da variação da velocidade do veículo, para termos conforto e segurança.

- perdas internas mínimas da bateria e do motor resultando na máxima autonomia do veículo a bateria.

- proteção contra sobreesforços.

- capacidade de regeneração, durante a frenagem, aumentando a autonomia do veículo a bateria.

IV.3.2 CONTROLE DE MAQUINAS DE CORRENTE CONTINUA

O torque, a velocidade e as características de regeneração da máquina de C.C. são essencialmente governadas pelas equações abaixo:

$$E_c = \frac{\Phi\ Z\ n\ p}{60\ a\ 10^8} = K\ \Phi\ n \qquad [4.16a]=[4.3]$$

$$T = K_t\ \Phi\ Ia \qquad [4.16b]=[4.1]$$

$$n = \frac{E_a - Ia\ Ra}{K\ \Phi} \qquad [4.17]=[4.5]$$

onde: E_c : tensão induzida na armadura (volts)

Ia : corrente na armadura (amperes)

Φ : fluxo por polo (webers)

Z : número de condutores da armadura

a : número de circuitos em paralelo entre os terminais

p : número de pólos

n : velocidade da armadura, (rotações por minuto)

E_a : tensão aplicada na armadura (volts)

R_a : resistência da armadura (ohms)

T : torque (N.m)

K : Z p / 60 a 10^8 = constante

K_t : constante que depende das dimensões físicas do motor.

As equações 4.16a, 4.16b e 4.17 ressaltam a grande flexibilidade de controle da máquina de C.C.. A velocidade da máquina de C.C. pode ser controlada pela variação de Vt, Ra ou Φ (isto é a corrente de campo).A tensão gerada para carga da bateria, por exemplo na frenagem regenerativa, é dada por [4.16.a]. Está claro que o controle da velocidade e do torque da máquina de C.C. podem ser obtidos através do controle do campo, da armadura ou uma combinação dos dois.

Na FIG.IV.25 mostramos os vários tipos de máquinas de C.C. com seus respectivos sistemas de controle.

A - CONTROLE POR RESISTÊNCIAS

Este método consiste em associar resistências entre a bateria e o motor. Na prática esta resistência é variada pela combinação de vários resistores ligados em série e/ou paralelo, resultando desta maneira uma variação discreta dos valores das resistências.

As várias combinações possíveis de resistências são obtidas pelo acionamento de um conjunto de contatores. Os contatores podem ser acionados por sensores de velocidade e ou torque do motor (ou do veículo), ou manualmente.

Na FIG.IV.26 encontramos 2 esquemas de controle para variação de resistências. Na FIG.IV.26.a temos o controle da armadura, enquanto na FIG.IV.26.b o campo e a armadura são controlados.

Embora o controle por resistências seja simples e de baixo custo, o método é altamente ineficiente (devido as perdas : I * I * R) e tam-

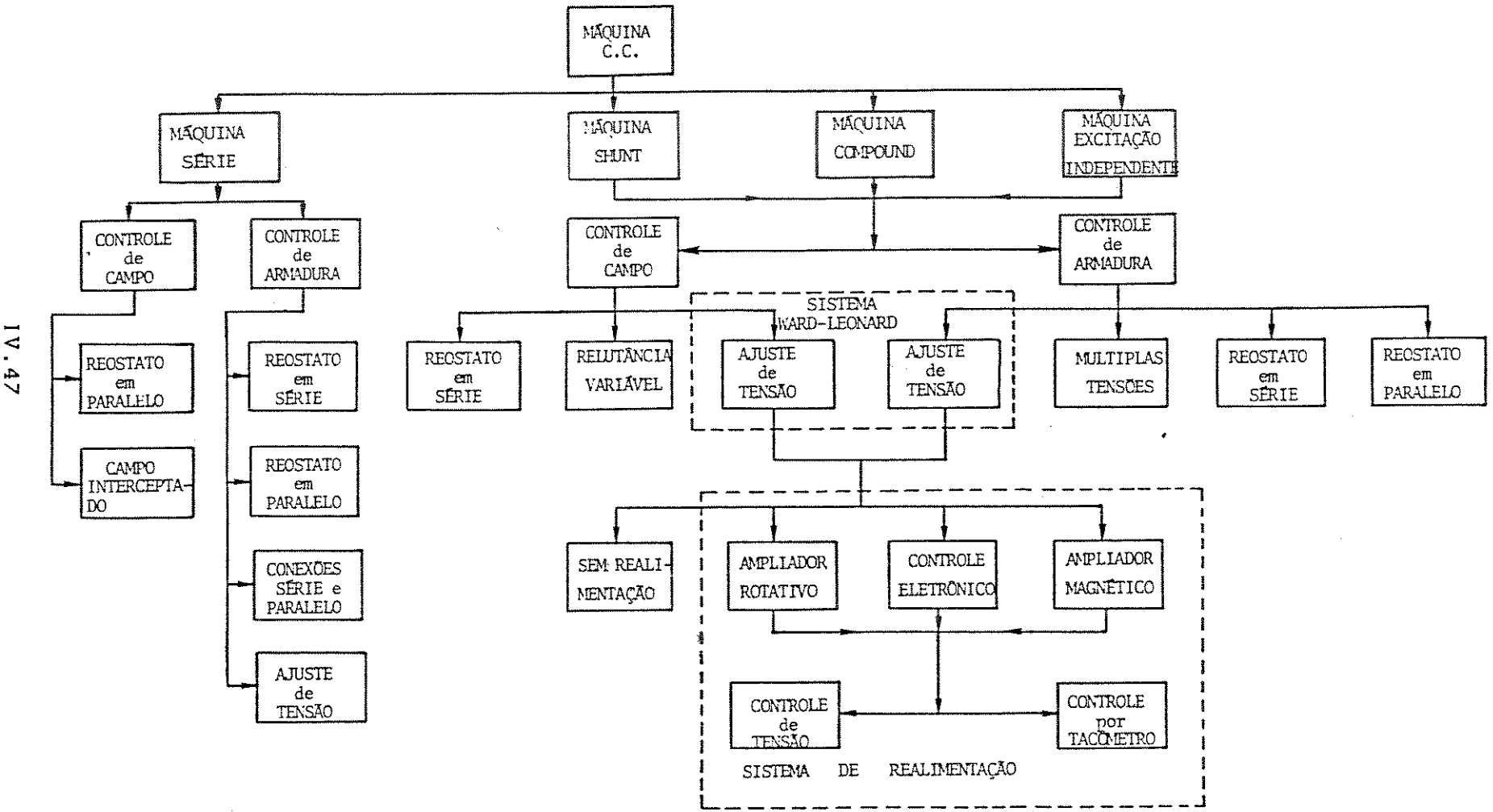


FIG.IV.25 ALGUNS SISTEMAS DE ACIONAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA

JANELA COMPLEMENTAR DA FIG.IV.25 ,

A FIG.IV.25 apresenta as máquinas de C.C. mais usuais e seus dispositivos de controle. Ressaltamos que alguns dos sistemas citados representam a tecnologia de épocas passadas, que sem dúvida representam a criatividade e engenhosidade dos cientistas e engenheiros do início do século. Todas as máquinas apresentadas podem ser controladas por recortadores; apesar deste fato os recortadores são particularmente utilizados para o controle de máquinas com excitação independente devido a versatilidade desta máquina como visto anteriormente quando apresentamos a FIG.IV.15.

Com o advento da eletrônica de potência o uso de conversores eletrônicos C.C.-C.C. chaveados, recortadores (chopper), está atualmente bastante difundido. Os controladores que utilizam reostatos ou reguladores de tensão com retificadores ou o sistema Ward-Leonard que obtém a tensão variável para utilização na máquina de C.C.através de um gerador e motor independentes, tendem a serem substituídos gradativamente pelos conversores eletrônicos, dadas as inúmeras vantagens destes últimos :

- economia na manutenção.

- facilidade de operação.

- redução do quociente peso-potência do sistema (vantagem em VE).

- rapidez na manutenção.

Com o controle apropriado da armadura e do campo pode-se obter as seguintes funções para aplicação do usuário :

- ajuste de velocidade
- regulação de velocidade
- limite de velocidade
- reversão
- controle de torque
- limite de torque
- controle a potência constante
- partida controlada
- parada controlada
- controle de posição angular
- coordenação com outros motores

o que evidência o grande número da aplicações de sistemas de C.C.; apesar do que dissemos , os sistema de C.C. deverão ser gradativamente substituídos por sistemas de C.A. devido as vantagens de custo e manutenção que a máquina C.A. de indução apresenta.

bém devido ao fato de não termos uma variação contínua de velocidades. A variação discreta das resistências produz solavancos no veículo.

	Condição Operacional				
CONTATOR	Desligado	Lento ⟶ Rápido			
		1	2	3	4
A	O	F	O	O	O
B	O	O	F	O	O
C	O	O	O	F	O
D	O	O	O	O	F

Aberto : O

Fechado : F

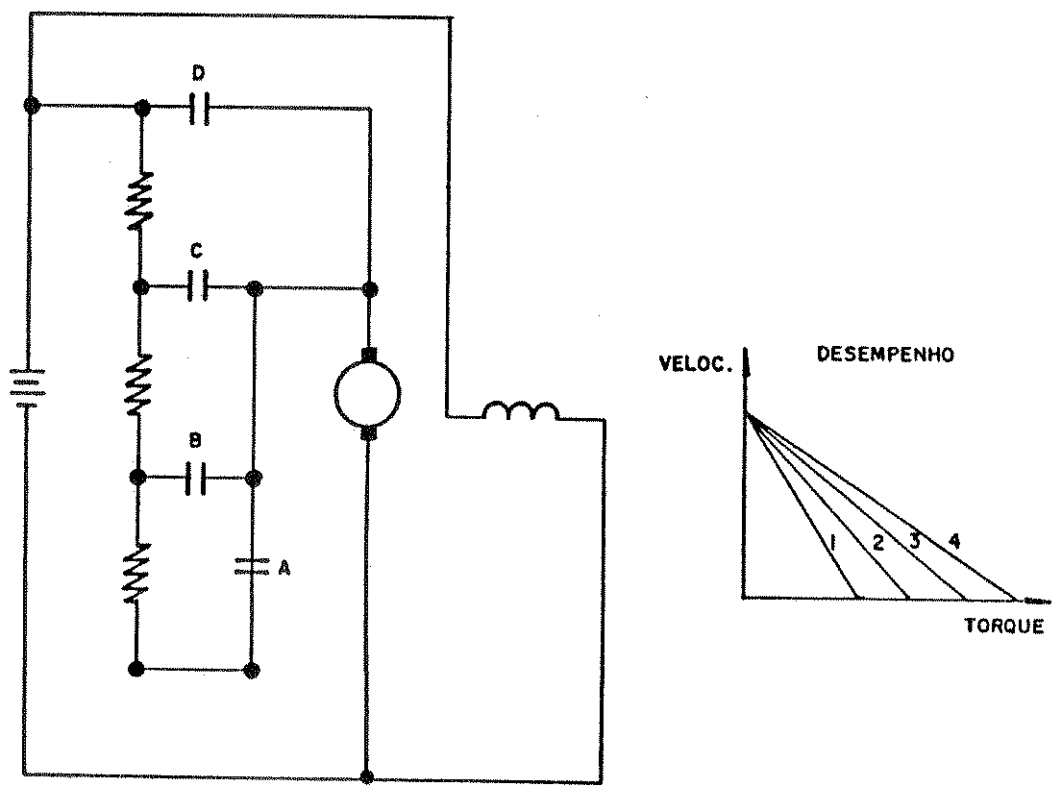
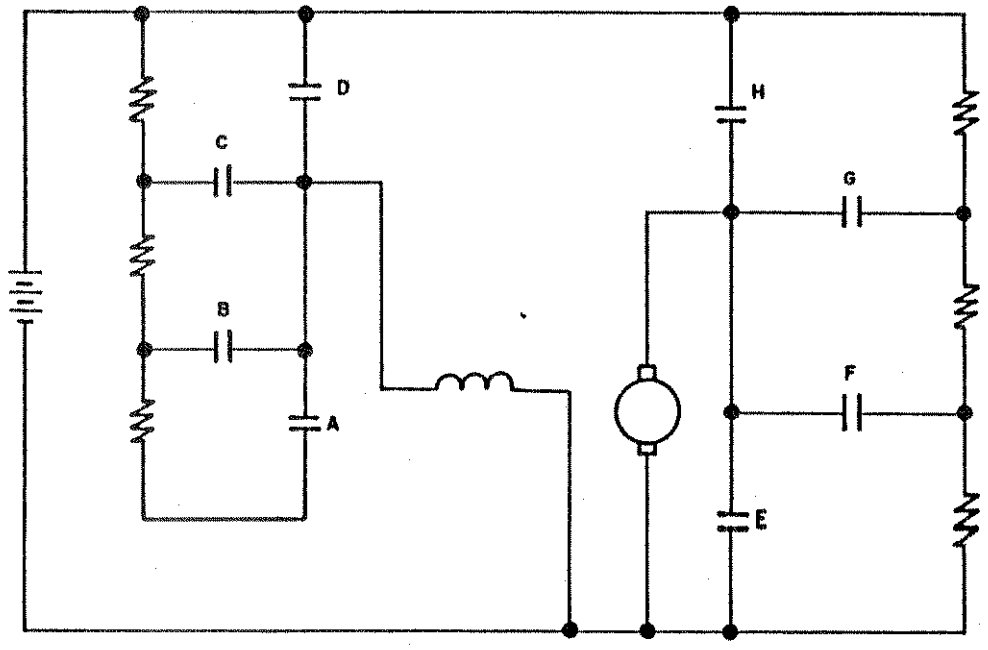


FIG.IV.26.a - Controle por Resistências na Armadura da Máquina de C.C.

Na FIG.IV.26.b na matriz apresentada não mostramos os valores intermediários de velocidade que podem ser obtidos variando a tensão de armadura e o campo simultaneamente.



	Condição Operacional							
CONTATOR	Desligado	Lento ⟶ Rápido						
A	O	O	O	O	O	O	O	F
B	O	O	O	O	O	O	F	O
C	O	O	O	O	O	F	O	O
D	O	F	F	F	F	O	O	O
E	O	F	O	O	O	O	O	O
F	O	O	F	O	O	O	O	O
G	O	O	O	F	O	O	O	O
H	O	O	O	O	F	F	F	F

FIG.IV.26.b - Controle por Resistência na Armadura e Campo da Máquina de C.C..

B - CONTROLE POR VARIAÇÃO DA TENSÃO

As baterias podem ser conectadas de diferentes maneiras série ou paralelo, resultando em múltiplos valores de saída de tensão. Três esquemas de possíveis ligações são mostrados nas FIG.IV.27.a, IV.27.b e IV.27.c. Tal método não possue as perdas proporcionadas pelo controle por resistências, mas não elimina os solavancos do veículo.

Na FIG.IV.27.a temos um método de controle de um conjunto de baterias por variação de tensão. A desvantagem deste método além dos solavancos, é o fato de que as primeiras baterias ligadas se descarregam em primeiro lugar ocasionando uma desigualdade de cargas no conjunto e dificultando a operação posterior de carga das baterias.

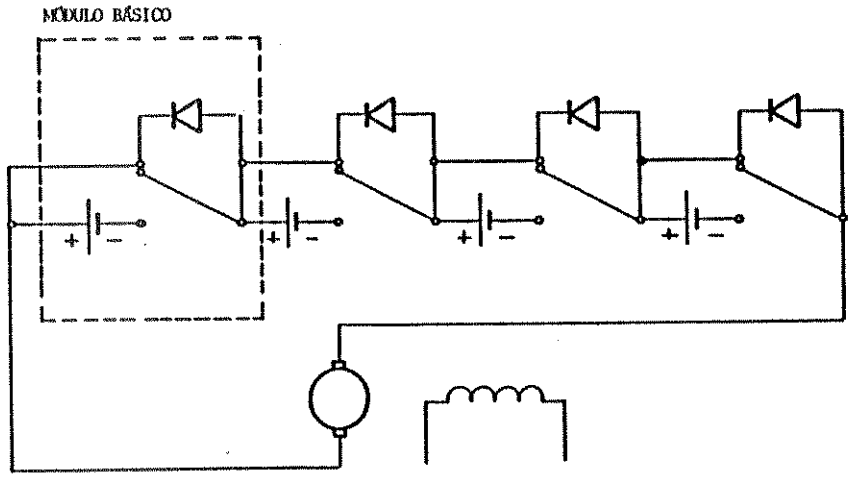


FIG.IV.27.a. Controle de velocidade e torque da máquina de C.C. através da variação de tensão das baterias.

O esquema apresentado na FIG.IV.27.b é bastante versátil. Com os contatores de 1 a 7 desligados a máquina elétrica na partida estará ligada ao conjunto de baterias na configuração paralelo. Assim o alto valor de corrente exigido na partida da máquina é distribuído igual-

mente entre todas as baterias, não ocasionando sobrecarga em algumas baterias durante a partida.

Contator	Condição Operacional Lento ⟶ Rápido							
1	O	F	F	F	F	F	F	F
2	O	O	F	F	F	F	F	F
3	O	O	O	F	F	F	F	F
4	O	O	O	O	F	F	F	F
5	O	O	O	F	O	O	O	F
6	O	O	F	F	O	O	F	F
7	O	F	F	F	O	F	F	F

Aberto : O

Fechado : F

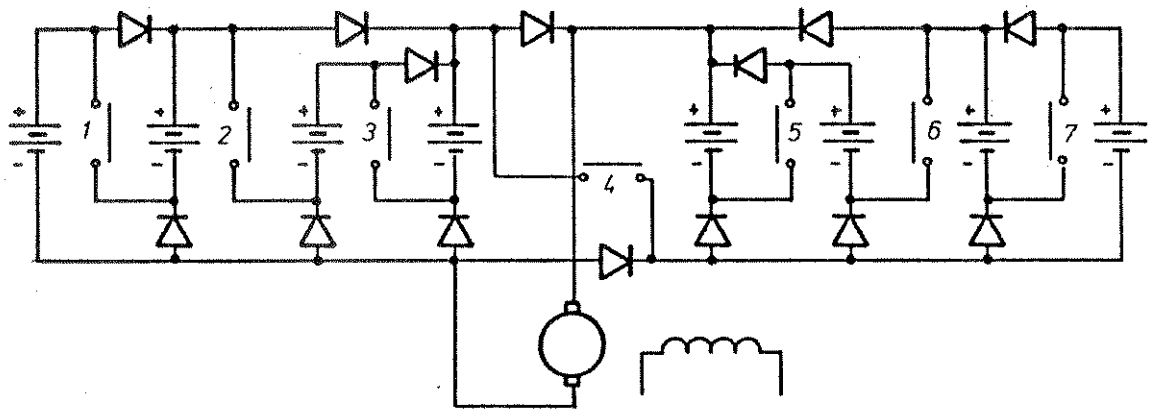


FIG.IV.27.b Controle por Variação de Tensão

Na FIG.IV.27.c , o método apresentado consiste em associar em série ou paralelo os conjuntos I e II de baterias; obtendo deste modo diferentes valores de tensão.

CONTATOR	Condição Operacional		
	Desligado	Paralelo	Série
A	O	O	F
B	O	F	O
C	O	F	O

Aberto : O

Fechado : F

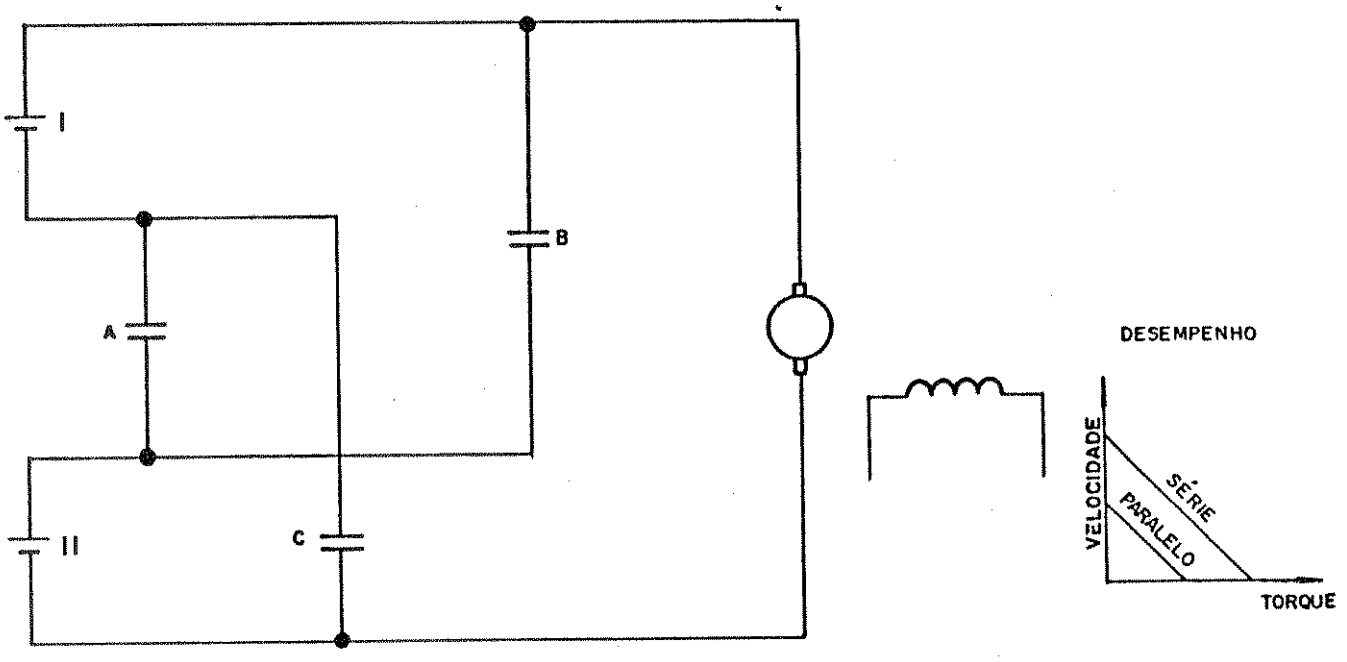


FIG.IV.27.c - Controle por Variação de Tensão

C - CONTROLE POR RECORTADOR (CHOPPER)

Os métodos discutidos anteriormente provocam solavancos no veículo e não apresentam uma variação contínua da velocidade. Em adição o controle por resistências apresenta baixa eficiência. A utilização de dispositivos de potência de estado sólido oferece o método mais prático e eficiente para o controle da máquina de C.C.. Os dispositivos

mais comuns utilizados são os transistores de potência e tiristores (SCR - Silicon Controlled Rectifier - Retificadores Controlados de Silício). Recentemente estão sendo desenvolvidos principalmente no Japão os GTOs (Gate Turn-Off Thyristors) que representam um dos maiores avanços na tecnologia de dispositivos chaveadores para altas potências, atingindo características próximas a 2500 V/1000 A, com tempos de desligamento inferiores a 10 ms possibilitando a não utilização de circuitos de comutação forçada. Por isso estes dispositivos estão tendo um grande interesse em aplicações com inversores, recortadores, retificadores e outras onde se requer comutação forçada, com a vantagem de se simplificarem os circuitos auxiliares necessários para que ela ocorra.

Quanto às diferenças entre os tiristores e transistores de potência podemos dizer que o transistor requer um sinal contínuo durante a condução e o tiristor requer sómente um pulso inicial para iniciar a condução.

Para interromper a condução o transistor irá necessitar a retirada do sinal, enquanto que no tiristor a corrente deverá ser reduzida a zero.

Utilizando dispositivos semicondutores, o recortador de C.C. é o controle eletrônico mais comum utilizado em VEs.

Em princípio, o recortador é uma chave liga-desliga conectada entre o motor e as baterias; a operação de chaveamento irá produzir uma tensão média que será aplicada ao motor. Simbolicamente um recortador é mostrado na FIG.IV.28.a e um circuito básico na FIG.IV.28.b. A função do diodo D da FIG.IV.28.b é permitir a livre circulação da corren-

te quando o tiristor não conduz.

A tensão média Vo na máquina elétrica é dada por:

$$Vo = \frac{Tligado}{Tligado + Tdeslig.} * Vb = \frac{Tligado}{T} * Vb = Vb \quad [4.17]$$

onde T : período de chaveamento

São três as formas pelas quais a tensão de saída do recortador pode ser variada para o controle do torque e velocidade da máquina; estas formas são mostradas na FIG.IV.28.

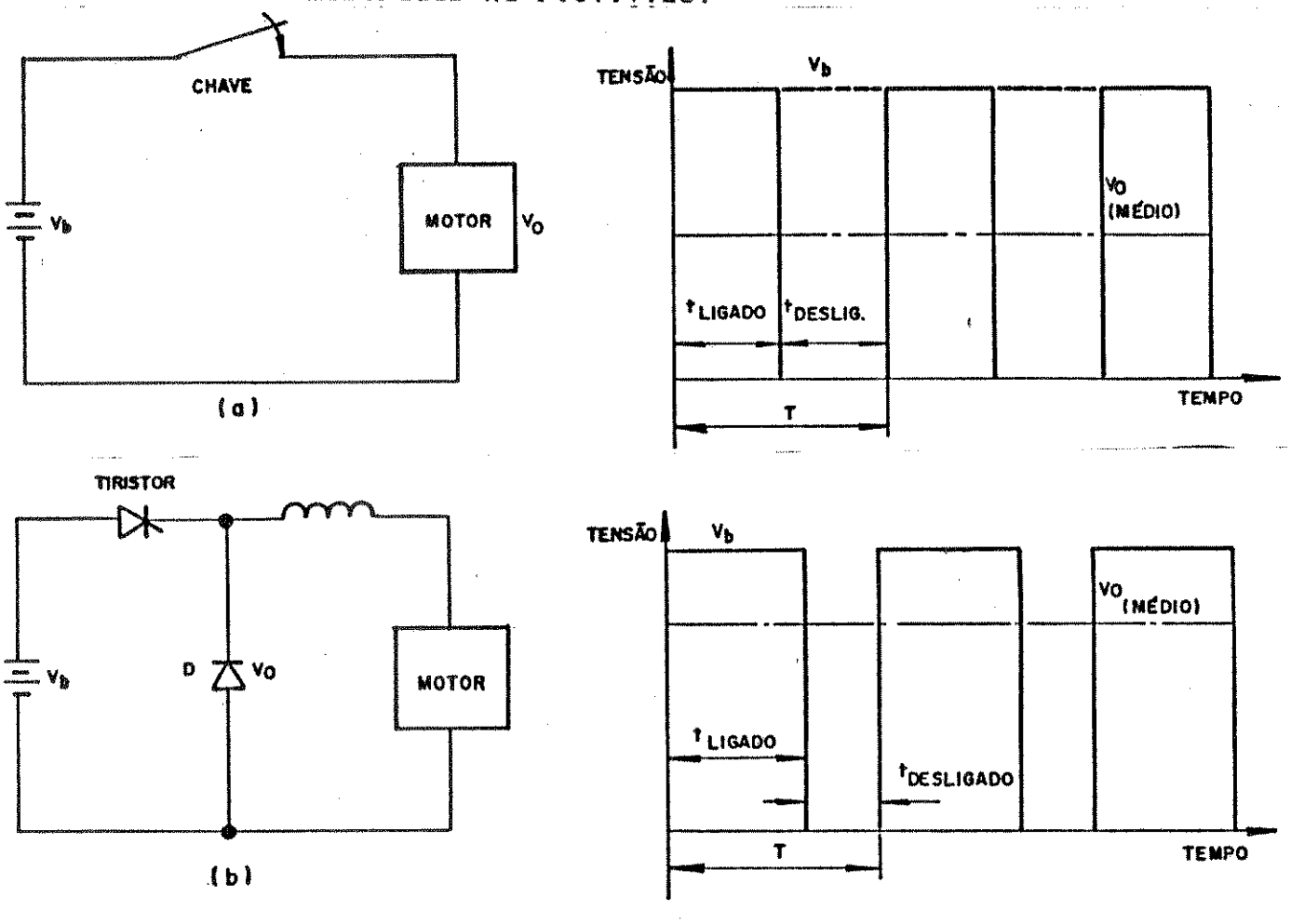


FIG.IV.28.(a) Representação Simbólica de um Recortador.
(b) Circuito Básico de um Recortador com Formas de Onda na Saída.

No primeiro método a frequência de chaveamento é constante e a largura de pulso (ou o tempo de condução) é variada, FIG.IV.29.a, este método é conhecido como modulação em largura de pulsos .No segundo método chamado de modulação em frequência mantemos fixa a largura de pulso e variamos o período de chaveamento como mostrado na FIG.IV.29. b. A união dos dois métodos resulta na modulação de frequência e largura de pulsos como mostrado na FIG.IV.29.c.

No método da modulação em frequência o valor desta não pode ser muito baixo devido a interrupção da corrente de armadura, e também não pode ser um valor muito alto devido as excessivas perdas no chaveamento.A faixa de operação dos recortadores tiristorizados para VEs esta entre 100 a 1000 pulsos por segundo. Uma desvantagem do recortador em alta frequência é que a interrupção de corrente ocasiona um som estridente.

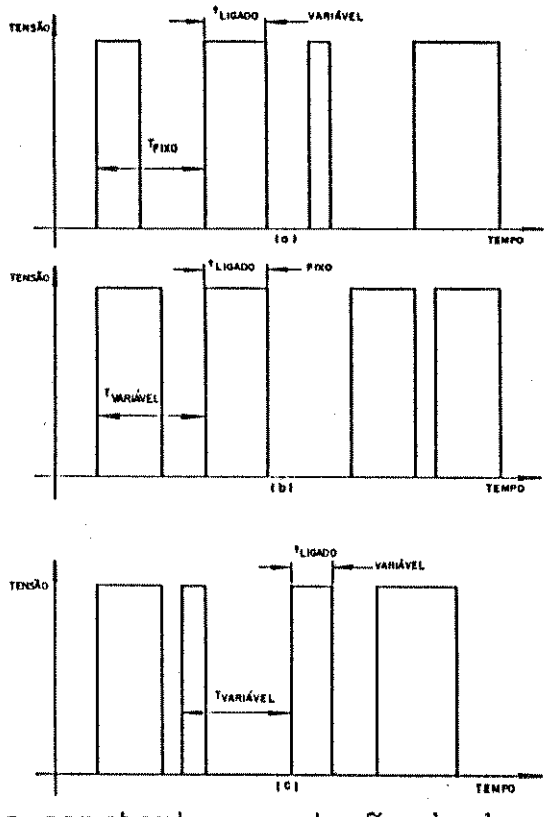


FIG.IV.29 - (a) Frequência constante, variação de largura de pulsos.
(b) Variação de frequência, largura de pulsos constante.
(c) Variação de frequência e de largura de pulsos.

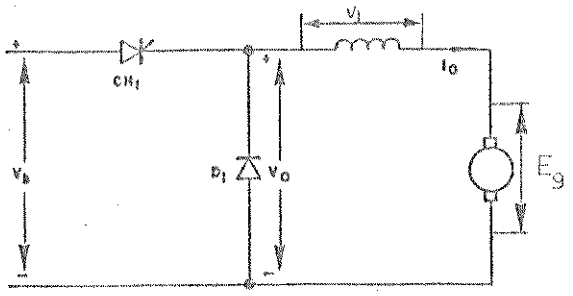
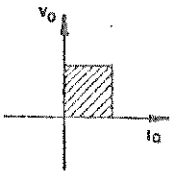
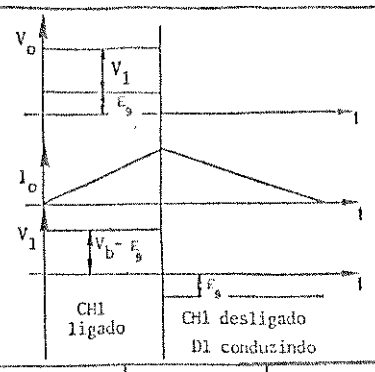
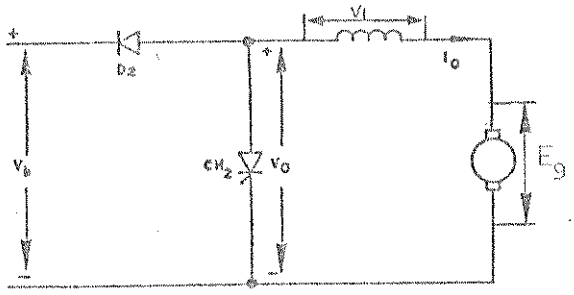
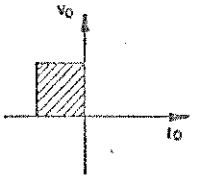
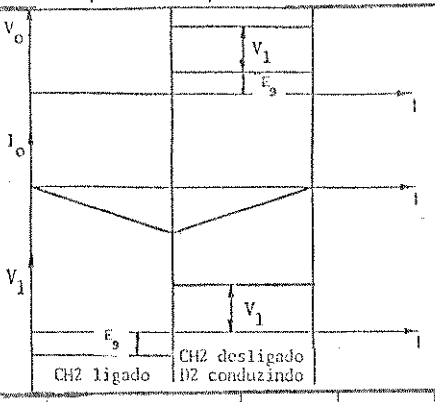
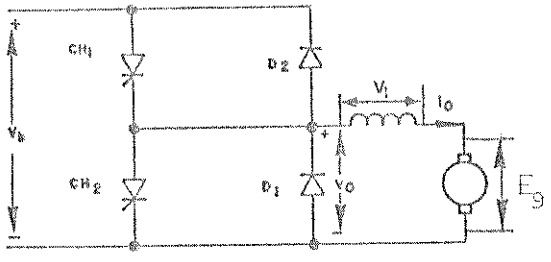
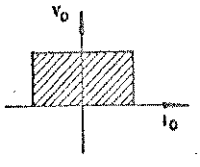
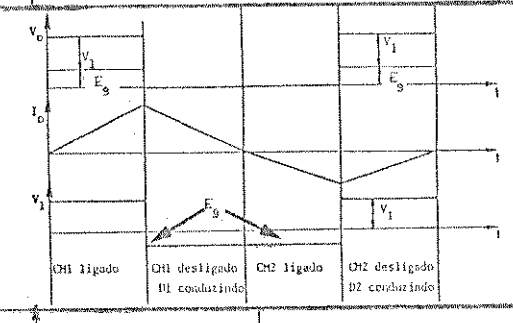
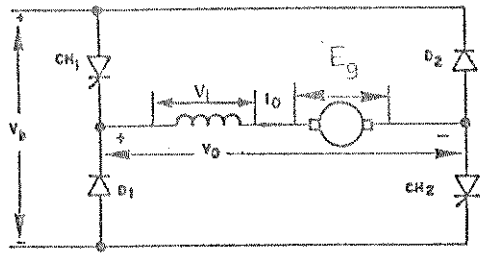
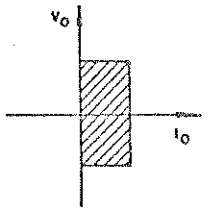
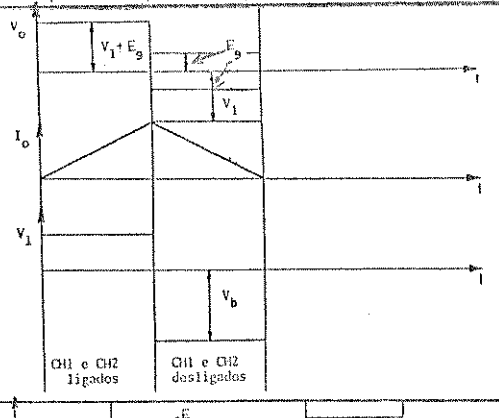
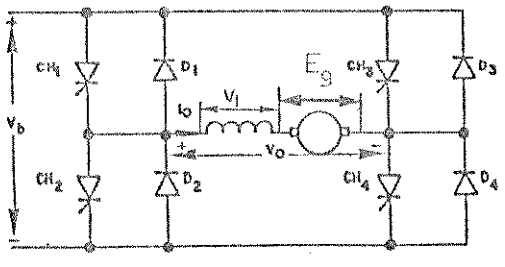
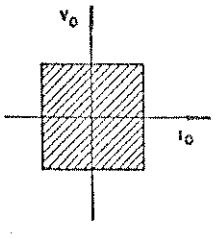
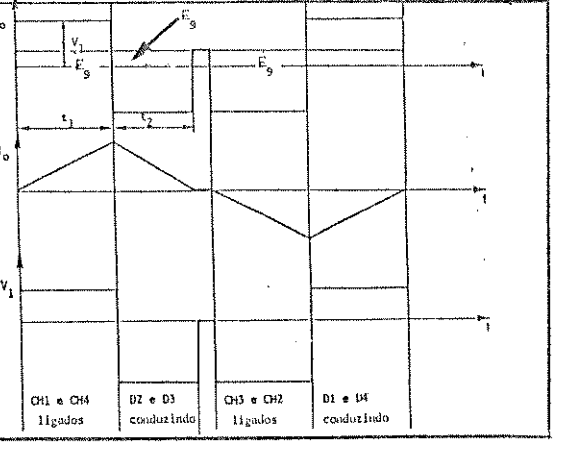
TIPO	CONFIGURAÇÕES DO RECORTADOR	CARACTERÍSTICAS V_o I_o	FORMAS DE ONDA
I QUADRANTE			
II QUADRANTE			
2 QUADRANTES A			
2 QUADRANTES B			
4 QUADRANTES			

FIG.IV.30 Configurações de Recortadores.

Na FIG.IV.30 temos diversas topologias de recortadores que serão abordadas individualmente a seguir :

1º Quadrante

O recortador está operando no primeiro quadrante e é o mais simples.

A corrente i_0 não pode ser negativa, e o diodo D1 de retorno impede que V_0 assuma valores negativos. Se CH1 for desligada sem existir D1 a tensão instantânea no indutor se inverte e :

$$V_0 = \frac{L\ dI}{dt} - E_g$$

onde E_g = força contra eletromotriz

tenderia a infinito.

IIº Quadrante

O recortador operando no segundo quadrante também é conhecido como regenerativo, pois o fluxo de potência poderá recarregar as baterias. A utilização deste dispositivo permite a frenagem regenerativa.

Quando o motor está em frenagem regenerativa CH2 está desligada, a corrente flui da carga para a fonte, $i_0 < 0$, até o valor da tensão ser $V_0 = V_b$.

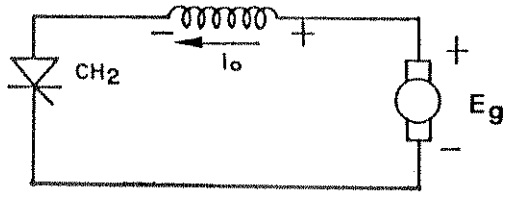
Quando $V_0 = V_b$, CH2 é ligada e a corrente flui por ela, CH2, logo $i_0 < 0$ e a tensão $V_0 = 0$, este processo armazena energia no indutor L.

Quando a chave, CH2, é aberta o diodo D2 passa a conduzir e a

energia armazenada no indutor (energia magnética) e no motor (energia cinética) fluem para as baterias.

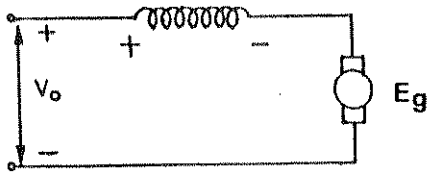
Isto ocorre porque momentaneamente a tensão $V_0 > V_b$. Como é possível $V_0 > V_b$?

O sentido de rotação não é alterado (por exemplo é mantido o sentido do modo tração). A chave CH2 está conduzindo logo temos que :



onde E_g = força contra eletromotriz.

Quando abro CH2, a indutância tende a manter a continuidade da corrente, então ocorre a inversão da polaridade no indutor, pois quando CH2 está ligado i_0 cresce negativamente, quando CH2 é desligado, a corrente tende a diminuir, logo L dI/dt se inverte (Lei de Lenz);



$$V_{\emptyset} = E_g + L\,\frac{dI}{dt} > V_b$$

então flui energia armazenada no indutor e no motor para as baterias até $V_0 = V_b$, então novamente CH2 é ligado e repete-se o processo proporcionando uma frenagem regenerativa.

Na frenagem convencional de um veículo a energia cinética é dissipada como calor nos freios os quais irão necessitar de manutenção após certo período de uso. Para aumentar a vida útil do sistema de

freios o motor do VE pode ser operado como um gerador fornecendo a energia gerada a um conjunto de resistências, e desse modo fazendo frear o veículo. Este tipo de frenagem, na qual a energia cinética é dissipada em resistências, é conhecido como frenagem dinâmica.

Frenagem mecânica (fricção) ou dinâmica são métodos que dissipam energia cinética na forma de calor. Na frenagem regenerativa do VE o motor irá operar como um gerador carregando as baterias, como visto anteriormente. Este tipo de frenagem irá depender de uma série de fatores tais como :

- posição da caixa de câmbio (utilizada em VEs devido a instabilidade de alguns sistemas de acionamentoo operando em baixas rotações).

- distância mínima de frenagem (velocidade do veículo e tempo de frenagem).

- estado energético das baterias.

- tipo do controlador eletrônico semelhante ao modelo tratado anteriormente.

A frenagem regenerativa não é eficiente em velocidades muito baixas; mas pode substituir a frenagem mecânica.

2 QUADRANTES A

Com CH1 ligado a corrente é positiva, $dI/dt > 0$, e $V_0 = V_b$. Quando desligo CH1 a corrente circula por D1 e a tensão no indutor troca de

polaridade (dI/dt < 0); depois de um certo tempo a corrente vai para zero, caso CH1 não seja ligado novamente.

Se o motor continua girando no mesmo sentido, tração, e CH2 é ligado o sentido da corrente se inverte e dI/dt < 0. Neste processo estou armazenando energia cinética do motor no indutor.

Quando desligo CH2, a tensão no indutor se inverte dI/dt > 0 , portanto a tensão $V_0 > V_b$ pois $V_0 = E_g + LdI/dt$; então D2 começa a conduzir e a energia do indutor mais a energia do motor irão para as baterias até $V_0 = V_b$.

Quando novamente ligo CH2 repito o processo de armazenamento de energia no indutor.

2 QUADRANTES B

Nesta configuração com CH1 e CH2 ligados a corrente flui pelo motor e é positiva.

Quando CH1 e CH2 são desligados o indutor inverte de polaridade e $V_0 = LdI/dt - E_g > V_b$ então flui corrente para as baterias através de D1 e D2.

Os diodos D1 e D2 podem operar como diodos de retorno; neste caso ligo CH2 ou CH1, independentemente, respectivamente, no caso da bateria não ser receptiva.

4 QUADRANTES

No modo tração ($I_0 > 0$).

Quando CH1 e CH4 conduzem $V_0 > 0$ e $I_0 > 0$.

Quando CH1 e CH4 são simultâneamente desligadas, $dI/dt < 0$, $I_0 > 0$ e a corrente flui por D2 e D3 até ficar nula.

Não ligando CH1 e CH4 a corrente se anula; e não é possível armazenar energia no indutor ligando individualmente CH1 ou CH4 pois não temos mais corrente.

No modo frenagem ($I_0 < 0$).

Ligo CH3 e CH2, a polaridade no indutor se inverte, $dI/dt < 0$, a corrente cresce, armazenando energia magnética proveniente do movimento motor e das baterias.

A tensão no indutor será $V_b + E_g$ e tenho um dI/dt alto no indutor. V_0 será negativo.

Desligando CH3 e CH2, D1 e D4 conduzem, a polaridade no indutor se inverte pois $dI/dt < 0$ e $V_L + E_g > V_b$, e ocorre regeneração.

Na tração se a circulação da corrente for pelas baterias : $t_1 > t_2$ enquanto que na frenagem : $t_1 > t_2$ para termos corrente circulando pelas baterias.

Na FIG.IV.30 apresentamos também as formas de onda de tensão no motor, V_0 ; a corrente, I_0 e a tensão, V_L , no indutor; para cada modo

de operação dos recortadores apresentados.

Na FIG.IV.31.a é apresentado um diagrama de um sistema de acionamento controlado por "chopper"."Através do "chopper" a tensão de alimentação V_2 constante é comutada com frequência constante e aplicada ao motor. Por meio de um transdutor mede-se a corrente I do motor que é comparada com a corrente de referência I_r no detetor de erro. O sinal resultante é manipulado por um controlador de corrente, que envia unm sinal de controle para o "chopper". .

Durante o intervalo de condução do "chopper" a tensão V_2 é aplicada ao motor e a corrente no mesmo deve crescer. Durante o intervalo de não condução do "chopper" a corrente no motor deve decrescer. Pela variação do intervalo de condução por período, ciclo de trabalho do "chopper", controlamos o valor médio da corrente no motor e consequentemente o seu torque médio. Por construção física, a configuração correspondente ao modo tração, FIG.IV.31.a, não admite corrente negativa no motor".[13]

Na FIG.IV.31.b mostramos a configuração na qual temos um controle automático da frenagem regenerativa.

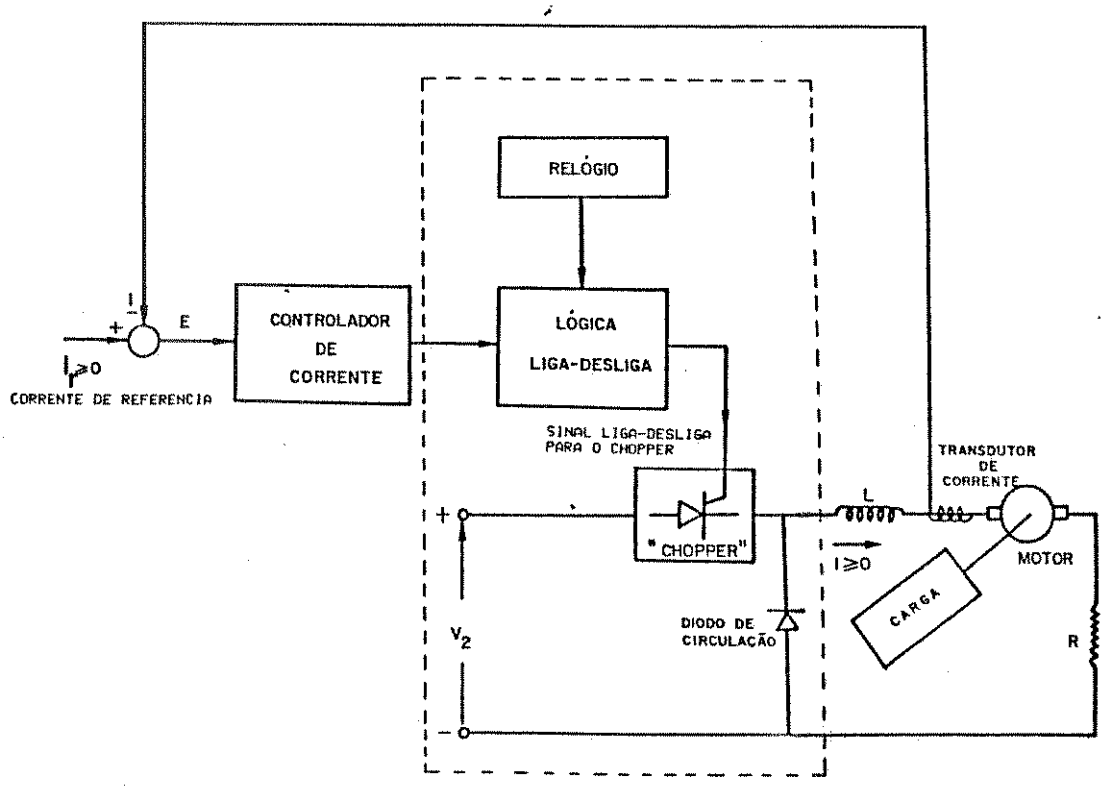


FIG.IV.31.a Representação de um sistema controlado por "chopper".

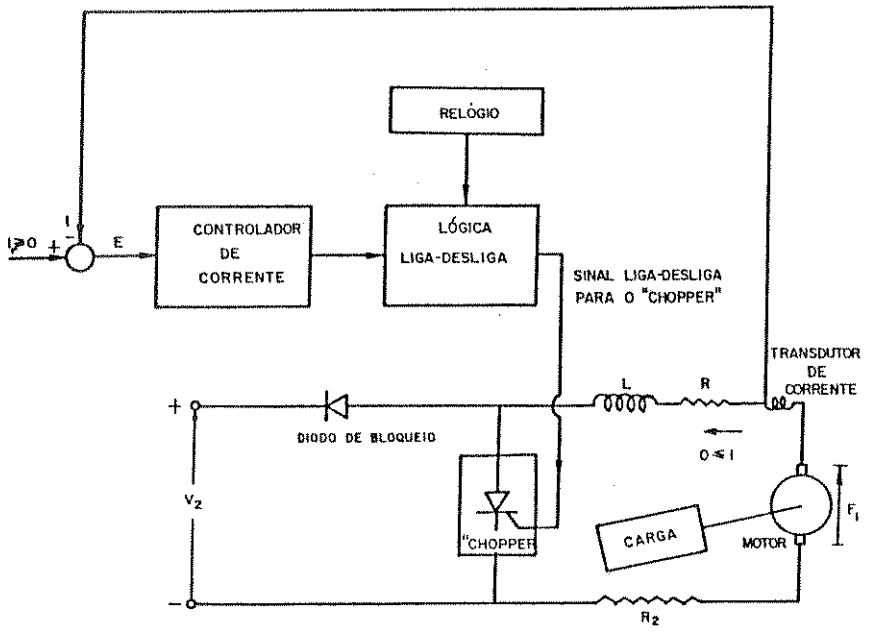


FIG.IV.31.b Representação de um sistema controlado por "chopper" com regeneração [13]

IV.3.3. CONTROLE PARA MAQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA

As máquinas de C.A., apresentadas anteriormente, possuem algumas vantagens sobre as máquinas de C.C., que as tornaram populares e a sua utilização em sistemas de tração elétrica começa a se difundir.

Dentre as vantagens das máquinas de C.A.em relação as máquinas de C.C.quando da utilização em veículos elétricos podemos destacar :

- maior densidade de potência [KW/Kg]

- vantagens de ordem construtiva, por exemplo : o rotor sendo alimentado por indução magnética não requer comutadores e escovas, o que elimina a manutenção periódica como ocorre na máquina de C.C..

- menor densidade volumétrica de potência [KW/cm^3].

- custo reduzido.

Na FIG.IV.32 apresentamos um diagrama de blocos com os vários tipos de motores de C.A. e as várias técnicas de controle de velocidade e torque destes sistemas.

Dos tipos apresentados na FIG.IV.32 o motor de indução gaiola de esquilo é o mais utilizado devido a sua simplicidade de construção e baixo custo. A seguir veremos como a velocidade ou o torque deste motor pode ser controlado.

Num motor de indução trifásico gaiola de esquilo, o enrolamento

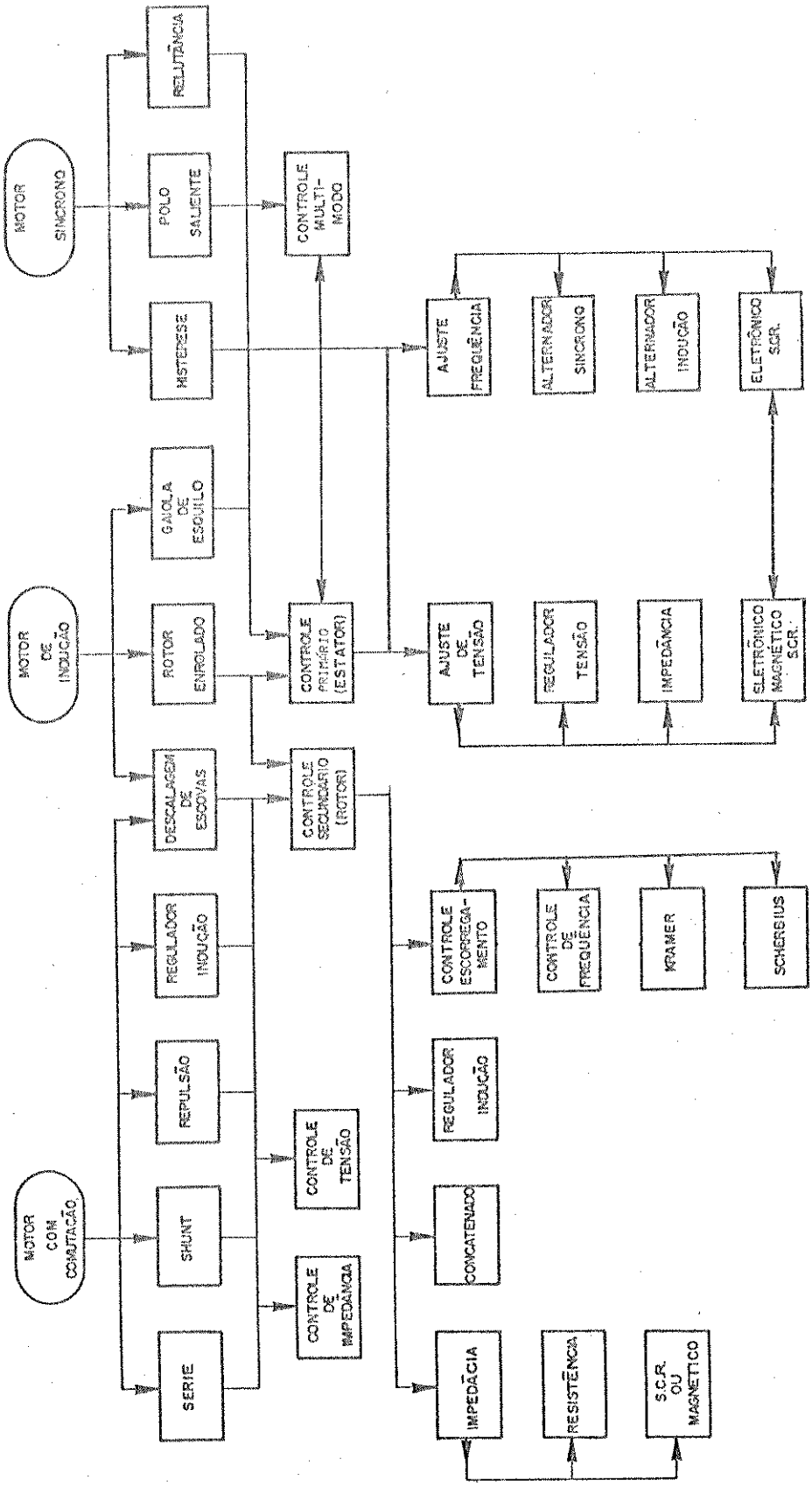


FIG.IV.32 Tipos de Acionamento Em Corrente Alternada [37].

JANELA COMPLEMENTAR DA FIG.IV.32

Nesta figura estão representados vários tipos de máquinas elétricas de C.A. com seus possíveis controles de velocidade e ou torque. Muitos dos tipos de máquinas e controladores citados foram projetados e desenvolvidos para atender certas aplicações especificas; por exemplo o motor com descalagem de escovas foi desenvolvido inicialmente para a indústria tipográfica.

Os níveis de atuação das máquinas representadas nesta figura abrangem toda a faixa de potências usuais; desde um motor de histerese utilizado em um relógio analógico de controle de horário utilizado em empresas, até uma máquina utilizada em uma locomotiva.

Devemos ressaltar que com o advento da eletrônica de potência; principalmente devido ao desenvolvimento de componentes de estado sólido para utilização em altas potências (> 10 KW), muitos tipos de controle representados nesta figura, hoje são obsoletos e onerosos para uma nova implantação; é evidente que os sistemas já existentes por exemplo, Kramer, Scherbius; continuarão a existir sendo substituídos gradativamente por controles eletrônicos.

Cada bloco da figura representa uma área considerável de conhecimento com respeito a máquinas elétricas e seus tipos de controle, resultando de cada bloco inúmeras alternativas e criações engenhosas para aplicações específicas.

Em todos os sistemas de acionamento elétrico a serem descritos deseja-se um controle contínuo e preciso da velocidade com estabilidade e desempenho aceitável em regimes transistórios, o que nem sempre é

possível.

A seguir daremos uma visão geral do que representa cada um destes blocos.

Classificação de máquinas de C.A.

Motor de Indução : o rotor é alimentado por indução magnética. A velocidade do rotor é menor que a do campo girante formado no estator.

Motor Síncrono : O rotor gira na velocidade do campo girante formado no estator. Requer componentes especiais para a partida.

Motor com Comutador : o rotor e o estator são alimentados por C.A., logo o rotor possue escovas para sua alimentação; normalmente são monofásicos e a grande vantagem do seu uso é o baixo custo de fabricação e o fato de não utilizarem fonte trifásica de energia.

Tipos de máquinas de C.A.

Série :um motor série tem a característica conveniente de poder funcionar seja em C.A., seja com C.C.. Quando um motor série é ligado, as intensidades do campo do estator e rotor variam exatamente em fase no tempo mas em oposições devido aos comutadores; os campos se invertem no mesmo instante, e consequentemente o conjugado estará sempre na mesma direção.

Shunt : as escovas de alimentação do rotor estão ligadas em paralelo com as bobinas do estator (excitação em derivação).

Repulsão : construtivamente o motor de repulsão assemelha-se ao motor série monofásico, ou seja, o motor de partida por repulsão é dotado de um rotor bobinado, comutador e escovas. O estator é laminado e suporta um enrolamento monofásico que cobre toda a sua superfície. O motor é dotado com um dispositivo centrífugo que remove as escovas do comutador e coloca um anel de curto-circuito em torno do comutador, passando a funcionar como um motor de indução.

Regulador de Indução : é uma máquina de indução com rotor enrolado, o qual gera energia para um rotor de C.A., cujo estator é alimentado por uma fonte externa de C.A..

Descalagem de Escovas : o baixo rendimento obtido com o motor de indução com rotor enrolado, quando este é controlado pelo rotor através da intercalação de resistências (perdas I^2R), levou a construção de um motor com boa regulação de velocidade e rendimento razoável, cuja velocidade pode ser regulada mediante a descalagem das escovas no rotor da máquina (uma aplicação doméstica deste tipo de motor são as batedeiras de bolo).

Gaiola de Esquilo : devido à simplicidade de construção solidez e compacidade, o motor de rotor gaiola de esquilo é o mais difundido atualmente. Seu rotor não possui enrolamento, mas uma série de barras normalmente de alumínio ou cobre, unidas por dois anéis terminais do mesmo material, que as colocam em curto-circuito.

Rotor Enrolado : neste tipo de motor, o barramento do rotor é substituído por um enrolamento convencional cujos fios são agrupados de maneira a formarem uma ligação em estrela ou triângulo para o motor

trifásico. Os três terminais do enrolamento são ligados a três anéis de contato, montados no eixo do rotor cuja única função é a inserção de resistências no circuito, para aumentar o torque na partida. Este recurso possibilita uma partida suave, o que não é possível com o motor gaiola de esquilo.

Histerese : O fenômeno de histerese pode ser usado para produzir conjugado mecânico. Em sua forma mais simples, o rotor de um motor de histerese é um cilindro liso de aço magneticamente duro (possue grandes perdas histeréticas), sem enrolamentos ou dentes. O torque produzido no eixo é devido as perdas por histerese induzidas no rotor pelo campo C.A. do estator, a partir daí o rotor fica imantado de modo definitivo comportando-se então como um imã permanente.

Pólo Saliente : O rotor é um eletroimã de pólos (bobinas) salientes, cujo enrolamento é alimentado por C.C. através de anéis coletores e escovas desde uma fonte externa de C.C. de excitação. O estator é alimentado por C.A..

Relutância : no motor de relutância o rotor consiste de uma peça magnética com pólos salientes enquanto que o estator é composto de pelo menos uma bobina alimentada com C.A.. O movimento de rotação decorre da tendência do rotor em se alinhar com o campo girante do estator. Uma vez em sincronismo, o rotor pode entregar potência mecânica através do eixo. Fora do sincronismo, o torque médio é nulo, fazendo a máquina parar; por esta razão um motor de relutância não possui torque de partida.

Modos de Controle

Controle de Impedância : a velocidade e ou torque são controlados pela variação de uma impedância em série com o motor.

Controle de Tensão : variando a tensão aplicada por meio de variacs, ou transformadores.

Controle Secundário (Rotor) : é efetuado no rotor da máquina de C.A.. O acesso aos enrolamentos do rotor se dá através de escovas colocadas no eixo da máquina (uma máquina de C.A. é um transformador rotativo onde o estator é o primário e o rotor é o secundário).

Controle Primário (Estator) : é efetuado no estator da máquina de C.A.

Controle Multi-Modo : A variação de velocidade em uma máquina de C.A. pode ser obtida pela variação do número de enrolamentos do estator, obtendo deste modo o número número de pólos que se deseja. Obtém-se, assim velocidades síncronas independentes uma da outra.

Classificação do Controle

Impedância : variando a resistência do circuito do rotor.

Concatenado : este método requer 2 motores um dos quais deve ser de rotor enrolado. O controle de velocidade é obtido variando o escorregamento em umas das máquinas, com a aplicação de uma tensão obtida de uma fonte externa controlada. Os dois rotores acham-se acoplados mecanicamente.

Regulador de Indução : *geração de C.A. com frequência variável através de uma máquina de indução com rotor enrolado.*

Controle de Escorregamento : *são utilizadas máquinas auxiliares que produzem forças eletromotrizes no rotor com deslizamento de fase ou frequência.*

Ajuste de Tensão : *está baseado no fato do conjugado interno desenvolvido por um motor de indução ser proporcional ao quadrado da tensão aplicada a seus terminais.*

Ajuste de Frequência : *a velocidade do campo girante do estator é dado por* $n_1 = 120 f_1/p$ *(Eq.4.5), portanto variando a frequência aplicada ao estator, variamos a velocidade do campo girante e portanto a velocidade do rotor.*

Tipos de Controladores

Resistência : *são inseridas resistências no circuito do rotor*

S.C.R. ou Magnéticos : *através de um controlador eletrônico atuamos no circuito do rotor, variando a corrente que circula pelo mesmo.*

Controle de Frequência :*através de geradores auxiliares pode-se obter o controle desejado; por exemplo propulsão elétrica de navios.*

Kramer : *controle de uma máquina de indução com rotor enrolado síncrono e um motor de C.C. ligados mecanicamente. Inúmeras variações eletro-mecânicas foram desenvolvidas a partir deste projeto inicial.*

Scherbius : neste sistema temos 3 máquinas de C.A. (um motor de indução de rotor enrolado, um conversor de frequência variável e um conversor de frequência fixa) interligadas mecânica e eletricamente.

Regulador de Tensão : variando a tensão aplicada por meio de variacs ou transformadores de múltiplas saídas.

Impedância : intercalando resistências no circuito do estator.

Eletrônico S.C.R. : através de retificadores e inversores de C.A. controlados obtenho tensão, corrente e frequência variáveis a serem aplicadas a máquina de C.A..

Alternador Síncrono : é uma máquina síncrona que gera corrente na frequência desejada.

Alternador de Indução : é uma máquina de indução que gera corrente na frequência desejada.

Eletrônico S.C.R. : o ajuste de frequência é efetuado através de um inversor de frequência variável. No texto principal descreveremos com detalhes o princípio de funcionamento de um inversor, também conhecido como conversor estático de frequência (conversor porque uma conversão de frequência é feita e estático porque antigamente tais conversores eram constituídos por conjuntos de máquinas interligadas mecânica e eletricamente, por exemplo Kramer e Scherbius).

do rotor, que na verdade são barras curto-circuitadas, é acoplado por indução magnética ao estator. O estator possui um enrolamento trifásico que é alimentado diretamente de uma fonte de C.A. trifásica. É produzido assim, no entreferro do motor um campo magnético de amplitude constante que gira à uma velocidade síncrona n1 dada por [4.5.c].

A partir do circuito equivalente obtivemos a equação 4.15.c, onde o torque e a velocidade (dada através do escorregamento) são funções da tensão e frequência aplicadas a máquina elétrica de C.A..

Logo uma das maneiras (ver REF.46 outras maneiras) de controlar a velocidade ou o torque da máquina de indução é variando a tensão e ou a frequência de alimentação. O controle de tensão e frequência podem ser realizados simultaneamente ou não; dependendo das características de torque e velocidade que desejamos.

Para que se possa ter controle sobre o fluxo do entreferro da máquina necessita-se de um sistema que utilize a variação da frequência de alimentação, e que tenha também a possibilidade do controle da tensão aplicada, este sistema é conhecido como inversor.

A curva característica torque versus velocidade para um motor de indução operando com uma frequência fixa é mostrada na FIG.IV.33, (ver Eq.4.14). Podemos observar que na velocidade síncrona ou seja s = 0, o torque desenvolvido pela máquina é nulo. Quando o torque solicitado aumenta, aumenta também o escorregamento s e isto faz com que a frequência f2 cresça e também o defasamento $\varphi 2$, entre a corrente I2 do rotor e a força eletromotriz induzida. Este aumento torna as perdas reativas significantes, devido ao aumento da indutância de dispersão no rotor (ver Eq. 4.21 apresentada a seguir).

Existe um valor máximo de torque que o motor pode oferecer acima do qual ele pára.

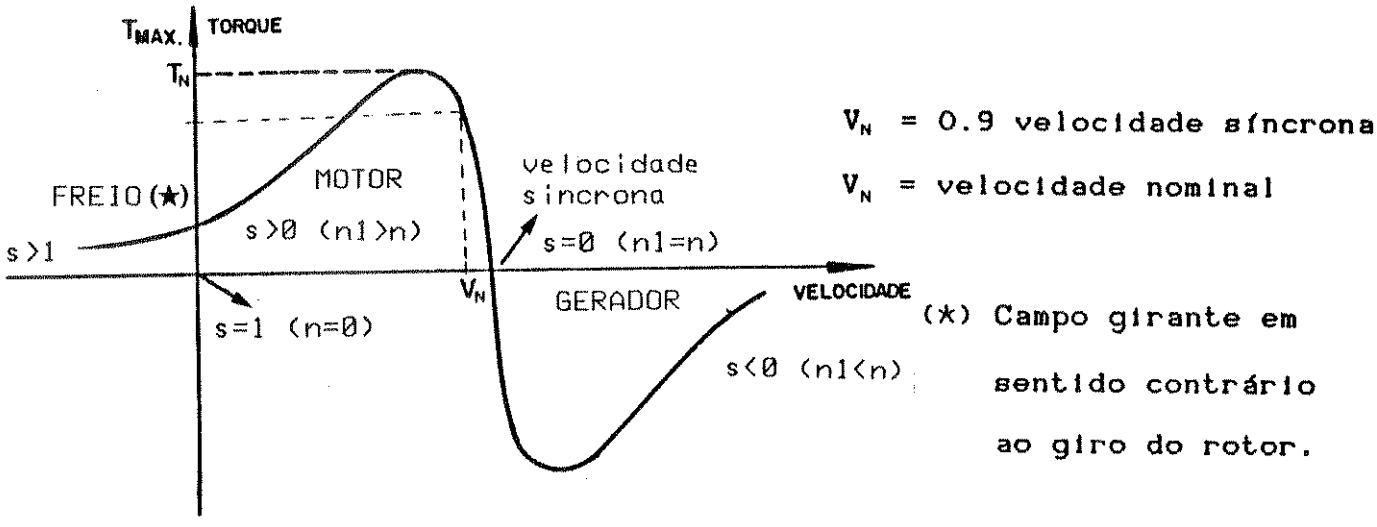


FIG.IV.33 Curva característica torque versus velocidade para um motor de indução gaiola de esquilo.

Se no eixo do motor "introduzirmos" uma energia mecânica que o leve a girar acima da velocidade síncrona, ele se comportará como um gerador síncrono, transformando a energia mecânica em elétrica, como vemos na FIG.IV.33.

Por outro lado podemos frear o motor convertendo a energia cinética da carga em elétrica (frenagem regenerativa) atuando na velocidade n1 do campo girante através de um conversor, fazendo com que a velocidade do rotor seja sempre maior que a velocidade do campo girante do estator.

Duas maneiras de operação dos motores de indução através de conversores variando a tensão e frequência, que nos vão interessar são aquelas em que o torque ou a potência são mantidos constantes.

A primeira delas, torque constante, FIG.IV.34.b, implica em operarmos o motor com a relação tensão/frequência constante (V/f = constante). O torque mecânico de saída do motor, T, é proporcional ao fluxo Φ do entreferro, esta relação pode ser obtida do circuito equivalente da máquina de indução :

Do circuito equivalente temos :

$$I_2 = \frac{s\,E_1}{\sqrt{R_2^2 + s^2X_2^2}} \qquad [4.18]$$

e

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2X_2^2}} \qquad [4.19]$$

onde φ_2 - ângulo de defazagem de I_2 em atraso sobre a tensão induzida no circuito do rotor.

Substituíndo [4.19] em [4.18] temos :

$$I_2 = \frac{s\,E_1\cos\varphi_2}{R_2} \qquad [4.20]$$

Substituíndo [4.20] em [4.15.a] obtemos :

$$T = \frac{m_1\,I_2}{w_m s} \quad \frac{s\,E_1\cos\varphi_2}{R_2}\,R_2$$

mas $w_m = 4\pi f_1 / p$

$$T = \frac{m_1 p\ I_2}{4\pi f_1 s}\ s\ E_1 \cos\varphi_2$$

$$T = \frac{m_1 p}{4\pi}\ \frac{E_1}{f_1}\ I_2 \cos\varphi_2$$

$$T = K \Phi I_2 \cos\varphi_2 \qquad [4.21]$$

onde : K : constante de proporcionalidade

Φ : fluxo no entreferro.

O valor do torque máximo visto na FIG.IV.33 pode ser obtido a partir de 4.15.c.

$$T = \frac{m_1 p}{4\pi}\ \frac{E_1^2}{f_1}\ \frac{sR_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}.$$

$$T = \frac{m_1 p\ E_1^2\ R_2}{4\pi f_1}\ \left[\frac{s}{R_2^2 + s^2 X_2^2}\right]$$

ou

$$T = K \frac{s}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \qquad [4.22.a]$$

O valor de escorregamento onde ocorre o máximo torque será obtido derivando [4.22.a] em relação ao escorregamento e igualando a zero.

$$\frac{\partial T}{\partial s} = K \frac{(R_2^2 + s_{cr}^2 X_2^2) - 2s X_2^2 - s_{cr}}{(R_2^2 + s_{cr}^2 X_2^2)^2} = 0$$

$$= \frac{R_2^2 + s_{cr}^2 X_2^2 - 2s_{cr}^2 X_2^2}{(R_2^2 + s_{cr}^2 X_2^2)^2} = 0$$

$$s_{cr} = \sqrt{\frac{R_2^2}{X_2^2}} = \pm \frac{R_2}{X^2} \qquad [4.22]$$

onde s_{cr} : escorregamento onde o torque desenvolvido é máximo. O sinal - significa a operação da máquina como gerador.

Substituíndo [4.22] em [4.5.c] temos :

$$T_{max} = \frac{m_1 p}{4\pi} \frac{E_1^2}{f_1} \frac{1}{2X_2} \qquad [4.23]$$

Da equação 4.21 vemos que o torque será função sómente da amplitude do fluxo do entreferro se mantivermos o escorregamento constante através de uma malha externa de realimentação dado que a componente I2 cos ℘2 é função de s. Na prática, os dispositivos magnéticos operam perto da região de saturação, para obter uma ótima utilização do material ferro magnético. Quando a frequência de operação é reduzida, a tensão aplicada aos enrolamentos deve ser proporcionalmente reduzida ou a densidade de fluxo ($\vec{B}$) atinge a saturação, resultando em perdas e não manutenção do torque constante como é nosso desejo. Para demonstramos este fato recorremos à alguns princípios básicos .

Faraday ao aproximar de um imã uma bobina de uma espira ligada a um galvanômetro ou vice-versa observou que havia uma deflexão do ponteiro do galvanômetro e formulou a lei de indução eletromagnética : "O valor da tensão induzida, E, em uma simples espira de fio é proporcional à razão de variação das linhas de força que passam através daquela espira (ou se concatenam com ela)".

Se λ (t) é o fluxo concatenado pela bobina ou seja o número de linhas do fluxo magnético passando através da superfície limitada pela malha definida pela bobina podemos exprimir a Lei de Faraday por :

$$E = d\lambda / dt$$

Se a bobina tem N espiras, λ é convenientemente visualizado como o número de linhas de fluxo concatenadas com todas as espiras. Então se Φ é o número de linhas de fluxo passando através de uma bobina de N espiras , $\lambda = N\Phi$ e a Lei de Faraday pode ser reescrita como :

$$E = d\lambda(t) / dt = N\, d\Phi(t) / dt$$

Como exemplo mostramos a FIG.IV.34.a onde em uma bobina com 5 espiras, 13 linhas de fluxo são concatenadas com cada espira. Neste caso N é 5, Φ é 13 e λ é 65.

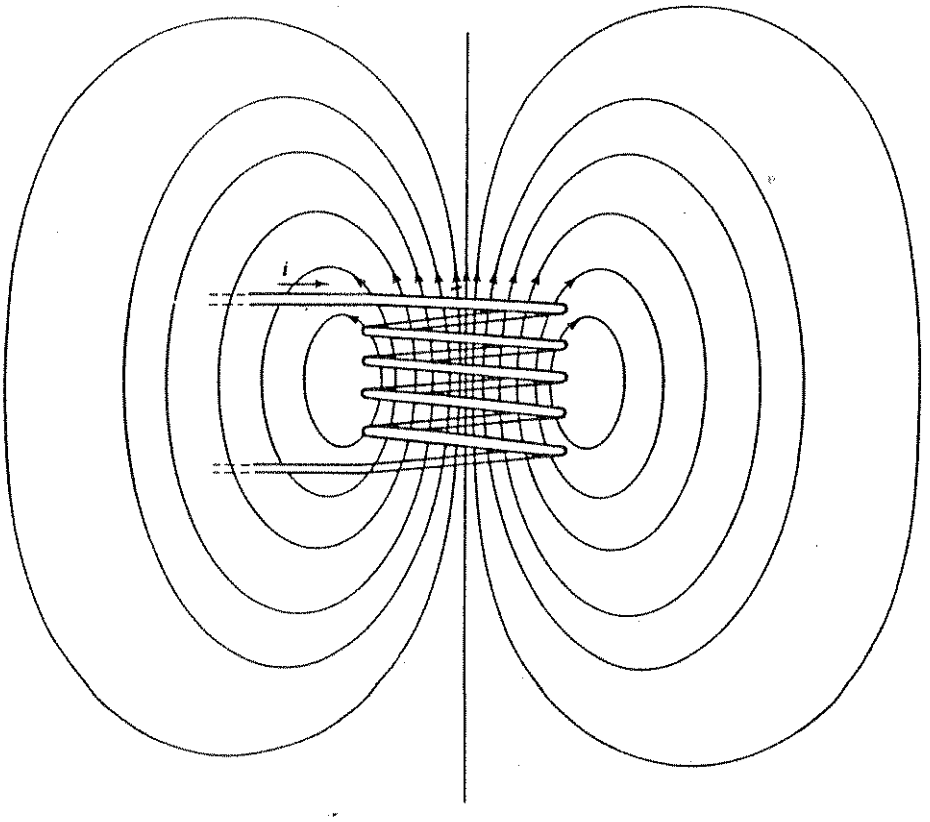


FIG.IV.34.a Bobina concatenando linhas de fluxo.

Suponha que no exemplo anterior as linhas de fluxo variassem no tempo e no espaço devido elas serem geradas por uma fonte de C.A. senoidal, então o fluxo concatenado instantâneo para uma dada espira teria uma variação temporal dada por :

$$\lambda = \overline{\lambda} \text{ sen } w_s \ t$$

com $w_s = 2 \pi \ f1$ e $\overline{\lambda}$ = constante.

Da Lei de Faraday a tensão induzida para esta espira será :

$$E_1(t) = d \ \lambda(t)/dt = w_s \ \overline{\lambda} \cos w_s t$$

Se esta espira faz parte de uma bobina em um estator de uma máquina de indução, juntamente com outras N-1 espiras ligadas convenientemente, a tensão induzida na fase correspondente desta máquina será dada por:

$$E_1(t) = d \ \lambda(t)/dt = w_s \ N \ \Phi \cos w_s t$$

pois $\overline{\lambda} = N \ \Phi$ onde Φ é o número de linhas de fluxo de entreferro por pólo, que supomos constante.

O valor máximo da tensão induzida será dado por :

$$E_{1\ \text{máximo}}(t) = w_1 N \ \Phi = 2 \pi f1 \ N \Phi$$

e o se valor eficaz será dado por :

$$E = 2 \pi f1 \ N \ \Phi \ / \ \sqrt{2}.$$

Como já vimos na equação 4.15.c podemos fazer $E_1 \simeq V$; logo a amplitude do fluxo é função de N que é um parâmetro fixo (enrolamento) e de V e f1. Fica óbvio então que para mantermos a amplitude do fluxo constante é necessário manter a relação V/f1 (Volts/Hz) constante.

Em tração elétrica quando em velocidade de cruzeiro nos interessa operar o veículo com potência, P, constante.

Das equações 4.15.c e 4.7 temos :

$$P = \frac{m_1 \; p \; E_1^2 \; s \; R_2 \; n}{4 \pi \; f_1 \left(R_2^2 + s^2 \; X_2^2 \right)} = \text{constante} \qquad [4.25]$$

De 4.6.b e 4.5 : $n = 120 \; f1 \; (1 - s)/p$ [4.26]

Substituindo 4.26 em 4.25 e simplificando :

$$P = K \; E_1^2 \; s \; R_2 \; (1 - s) \; / \; R_2^2 + s^2 \; X_2^2 = \text{constante}$$

Portanto a frequência de alimentação não irá alterar o valor potência exigida pela máquina; se mantivermos a tensão do estator constante enquanto a frequência é variada, o fluxo do entreferro assim como o torque irão variar aproximadamente de uma forma hiperbólica, linha tracejada da FIG.IV.35.a.

Na FIG.IV.35.a mostramos que se o motor estiver com sua tensão nominal a relação V / f1 não se mantém constante com o aumento da frequência e o torque irá decrescer; neste caso o motor está operando a potência constante. Notamos que o torque do motor de indução diminui rapidamente quando a frequência do estator é aumentada. Isto ocorre devido a redução do fluxo magnético no entreferro [Eq. 4.21].

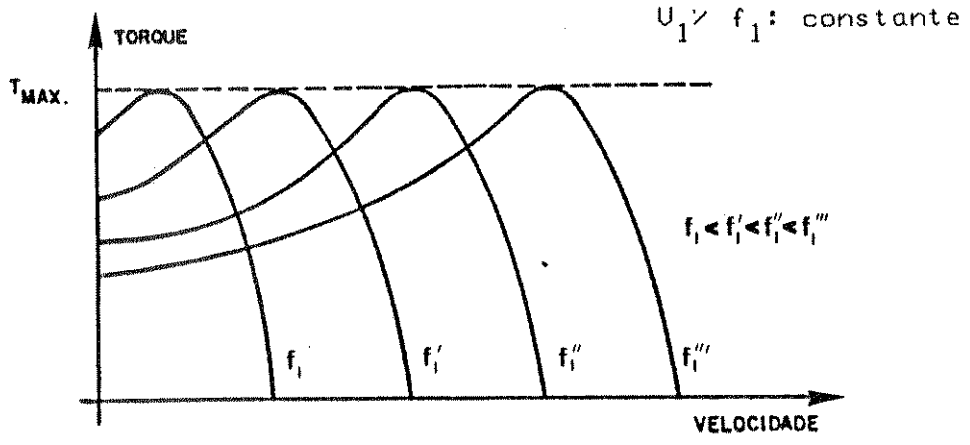


FIG.IV.34.b Curva característica de velocidade X torque para várias frequências, mantendo o fluxo do entreferro constante.

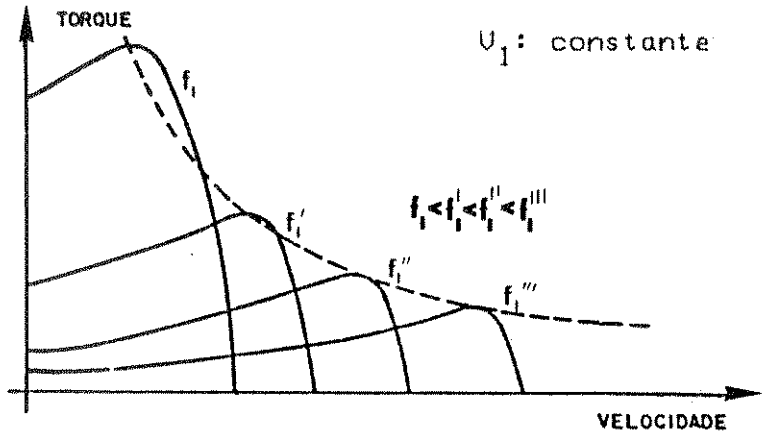


FIG.IV.35.a Curva característica mantendo constante a tensão de alimentação.

Um motor de indução pode ser acionado com V / f1 constante desde a partida até as condições nominais de tensão e frequência. A partir daí, a tensão é mantida em seu valor nominal e a frequência é aumentada, mantendo-se a potência constante; o comportamento do motor (torque versus velocidade) para este modo de operação pode ser visualizado na FIG.IV.35.b. Este modo de operação da máquina é comumente utilizado em tração elétrica.

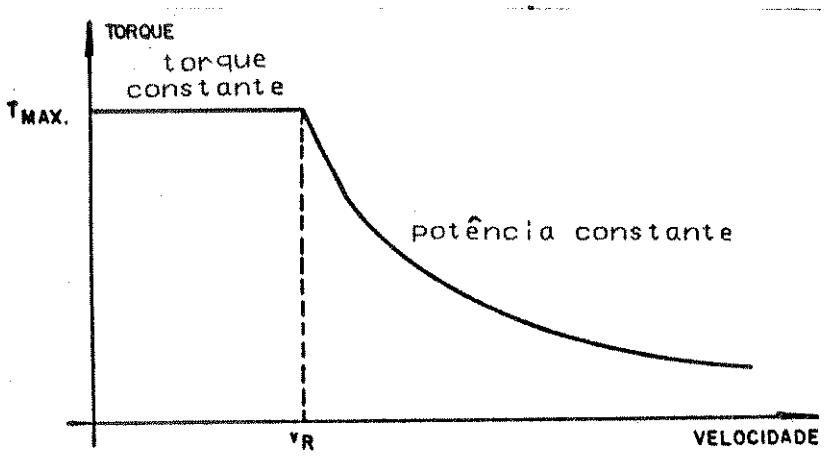


FIG.IV.35.b Curva característica de torque versus velocidade em tração.

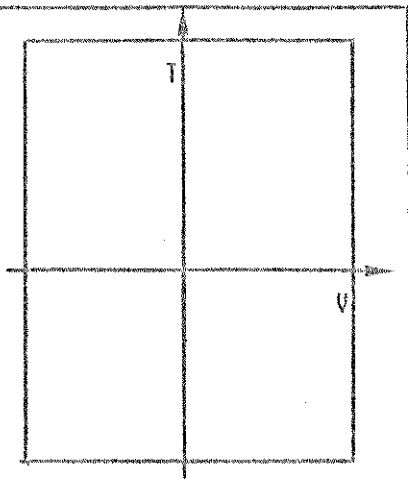
Na FIG.IV.35.c apresentamos um resumo das curvas características de uma máquina de indução.

Quando do projeto de uma máquina de indução de C.A. para funcionamento em condições constantes de frequência e tensão são considerados alguns fatores tais como :

- Corrente máxima no rotor e estator.
- Tensão máxima no rotor e estator
- Velocidade máxima (tipo de enrolamento nos mancais).
- Características de isolamento, temperatura de funcionamento e vida útil.

Com o advento da eletrônica de potência precisamos também levar em consideração o funcionamento da máquina com correntes próximas da forma senoidal.

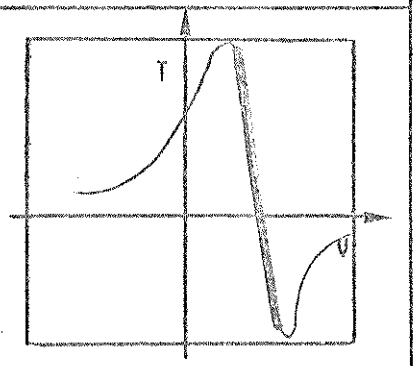
Tais fatores determinam o torque e a velocidade máximos da máquina.



Para valores fixos de tensão e frequência aplicada ao estator da máquina a curva característica é mostrada na figura ao lado.

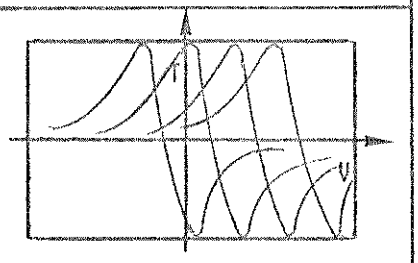
A região de operação da máquina de C.A. onde obtemos um rendimento satisfatório (perdas minimizadas, fator de potência elevado, baixo escorregamento e valores de corrente dentro do limite de projeto) é na região assinalada.

(VER FIG. IV.33)



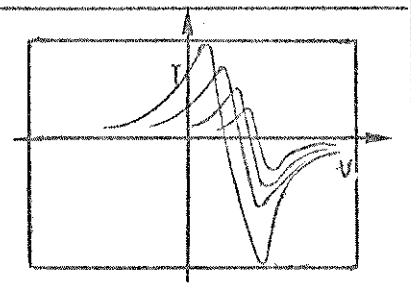
Através, por exemplo, de controle eletrônico adequado mantendo fixo V /f1, deslocamos a curva T x V ao longo do plano de funcionamento da máquina.

(VER FIG. IV.34.b)



Aumentando a relação V / f1 através da diminuição de f1, aumentamos o fluxo até o ponto de saturação da máquina (altas correntes no rotor)

(VER FIG. IV.35.a)



Vimos que atuando sobre a frequência e a tensão podemos colocar a máquina de C.A. em qualquer região do plano T x V, mas tais curvas representadas anteriormente são estáticas. A transição de um ponto de operação para outro se dá conforme a estratégia de controle adotada para a mudança das características de acionamento . Está estratégia deve ser adotada visando a estabilidade da máquina elétrica de tal maneira que proporcione uma suave e rápida adaptação ao novo ponto de operação.

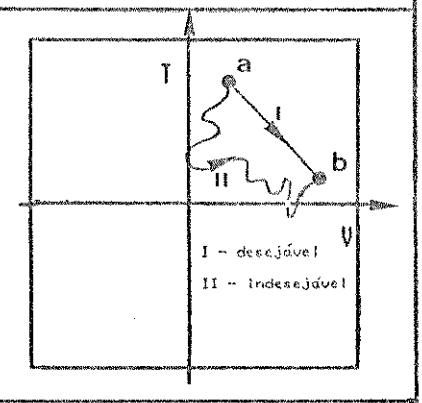


FIG. IV.35.c Curvas Características da Máquina de Indução.

FRENAGEM E REGENERAÇÃO EM MOTORES DE INDUÇÃO

Um motor de indução quando utilizado adequadamente substitue os freios convencionais com a vantagem da energia cinética disponível na carga, anteriormente tracionada, poder ser parcialmente recuperada.

Primeiramente veremos dois modos de frear a máquina de indução.

1 - A frenagem por contra-corrente de um motor de indução trifásico pode ser obtida pela inversão de duas quaisquer fases do estator.

2 - A frenagem dinâmica a C.C. do motor de indução utiliza corrente contínua aplicada diretamente ao enrolamento do estator. Inicialmente, remove-se a potência alternada, por exemplo abrindo-se uma chave de alimentação do motor; uma segunda chave então é acionada para aplicar a C.C.. O fluxo magnético desta corrente é estacionário, em contraste com o campo girante da C.A.. As barras do rotor cortam as linhas deste campo, induzindo correntes que reagem com o fluxo contínuo desenvolvendo um conjugado de frenagem. O esforço de alentecimento pode ser facilmente regulado pelo ajuste da C.C.. Uma característica deste método, desejável em motores normais, é a ação relativamente suave de frenagem em velocidade de plena carga, com isso reduzindo o solavanco; além disto o esforço de frenagem aumenta com a diminuição da velocidade, atingindo um máximo nas vizinhanças da velocidade zero.

Quando da frenagem dinâmica temos no início da frenagem $s \longrightarrow 1$, dado que o campo produzido no estator é estacionário ($f1 = 0$) e quando a máquina tende a parar $s \longrightarrow 0$.

A equação do torque pode ser obtida a partir do circuito equiva-

lente da frenagem dinâmica [Ref. 44 e 45] :

$$T = q\ I_2^2\ \ (\ R_p + R_2' / s) / w_s$$

onde T - o torque eletromagnético (Nm)

q - número de fases

w_s - velocidade síncrona (rad/s)

R_2 - resistência por fase do rotor referida ao estator (Ω)

R_d - resistência de saturação por fase referida ao estator (Ω)

$R_2' = R_2 + R_d$

Várias curvas de torque versus velocidade para diferentes valores de corrente contínua aplicada ao estator da máquina de indução são mostradas na FIG.IV.36.a.

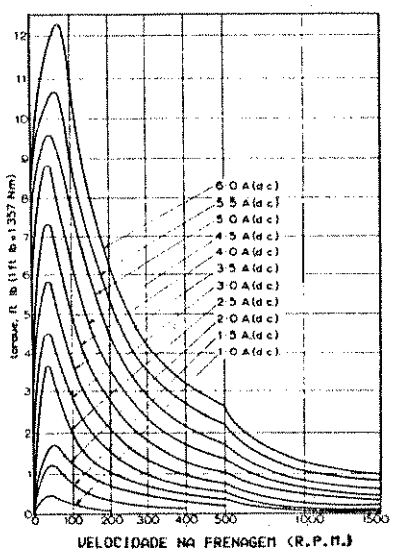


FIG.IV.36.a Curvas características de um motor de indução gaiola de esquilo durante a frenagem dinâmica [45]

Na frenagem regenerativa o motor de indução passa a funcionar como um gerador que pode fornecer à fonte uma potência igual a potência nominal do motor, desde que a fonte de energia possa ser receptiva . Podemos supor que se o rotor for acionado por uma fonte externa, por

exemplo um veículo elétrico descendo uma ladeira, a partir de uma certa velocidade a máquina de indução passa a funcionar com gerador (ver FIG.IV.3 - 2º Quadrante). Este tipo de regeneração só pode ser usado nos sistemas de potência capazes de absorver a energia gerada.

A frenagem regenerativa pode ser obtida pela variação da frequência do motor, sem provocar altas correntes no estator como na frenagem por inversão de fases do estator.

Se temos uma máquina de indução alimentada através de uma fonte de frequência variável, pela redução na frequência de entrada do estator podemos fazer com que o motor funcione como um gerador de indução, desde que a velocidade do rotor seja maior que a velocidade de sincronismo correspondente a frequência do estator: para a máquina operando como motor temos n1 > n, por outro lado para que a máquina opere como gerador n1 < n onde n1 é a velocidade do campo girante formado pelo estator e n é a velocidade do rotor, ver FIG.IV.36.b.

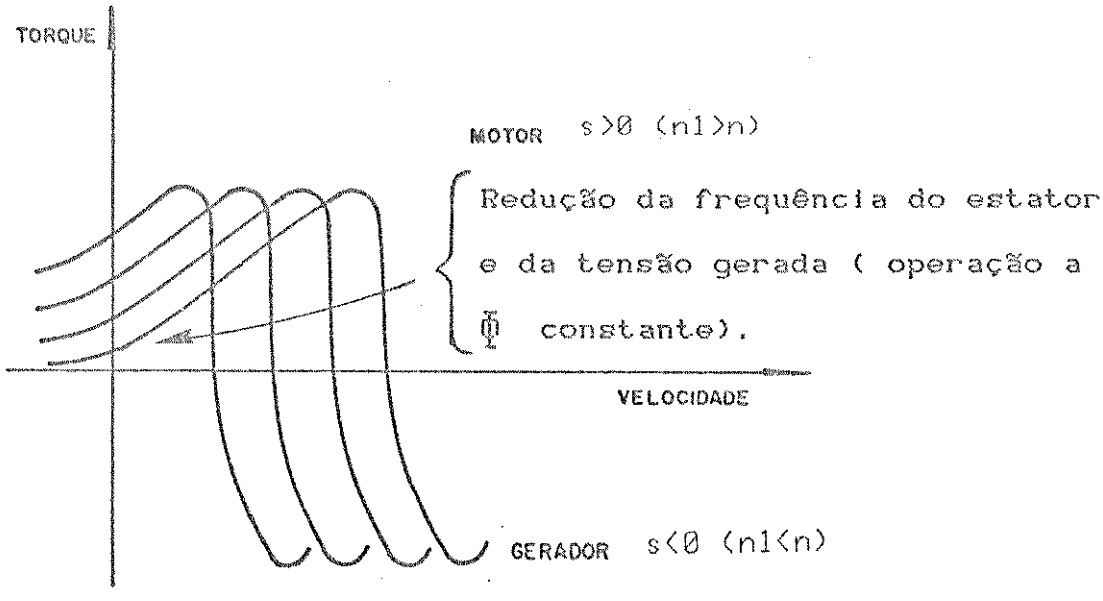


FIG.IV.36.b Curvas de operação de um motor de indução variando a frequência

CONTROLE DE MAQUINAS DE INDUÇXO VIA INVERSOR TRIFASICO

Neste item veremos como o controle de uma máquina assíncrona tipo gaiola pode ser realizado através de um inversor obtido pela associação de 6 tiristores ou 6 transistores de potência que quando abertos ou fechados convenientemente produzem, a partir de uma fonte de C.C., C.A. trifásica com amplitude e frequência variáveis.

Nos últimos 20 anos, um grande número de estratégias de controle para inversores alimentando motores de indução tem sido desenvolvida. A complexidade dos esquemas de controle tem exigido uma grande quantidade de estudos e pesquisas, em particular para o entendimento da capacidade e da limitação de cada esquema de acionamento e suas influências na dinâmica do acionamento do motor.

As dificuldades do controle de um motor de C.A., ao contrário do motor de C.C. onde sómente duas tensões devem ser controladas, estão no fato de que três tensões alternadas com variação de amplitude, frequência e fase devem ser controladas.

Um sistema de acionamento em C.A. constitui um sistema de controle multivariável. Neste sistema a tensão e a frequência são as variáveis de controle e as variáveis controladas podem ser : velocidade, posição, torque, fluxo, corrente no estator ou uma combinação entre elas.

Existem também interações complexas entre as variáveis de entrada e as variáveis internas de controle. Além disso, quando se trata de um motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo, as correntes do rotor não são acessíveis para medida.

Um sistema de acionamento em C.A. ressaltando um esboço do sistema de controle é mostrado na FIG.IV.37.

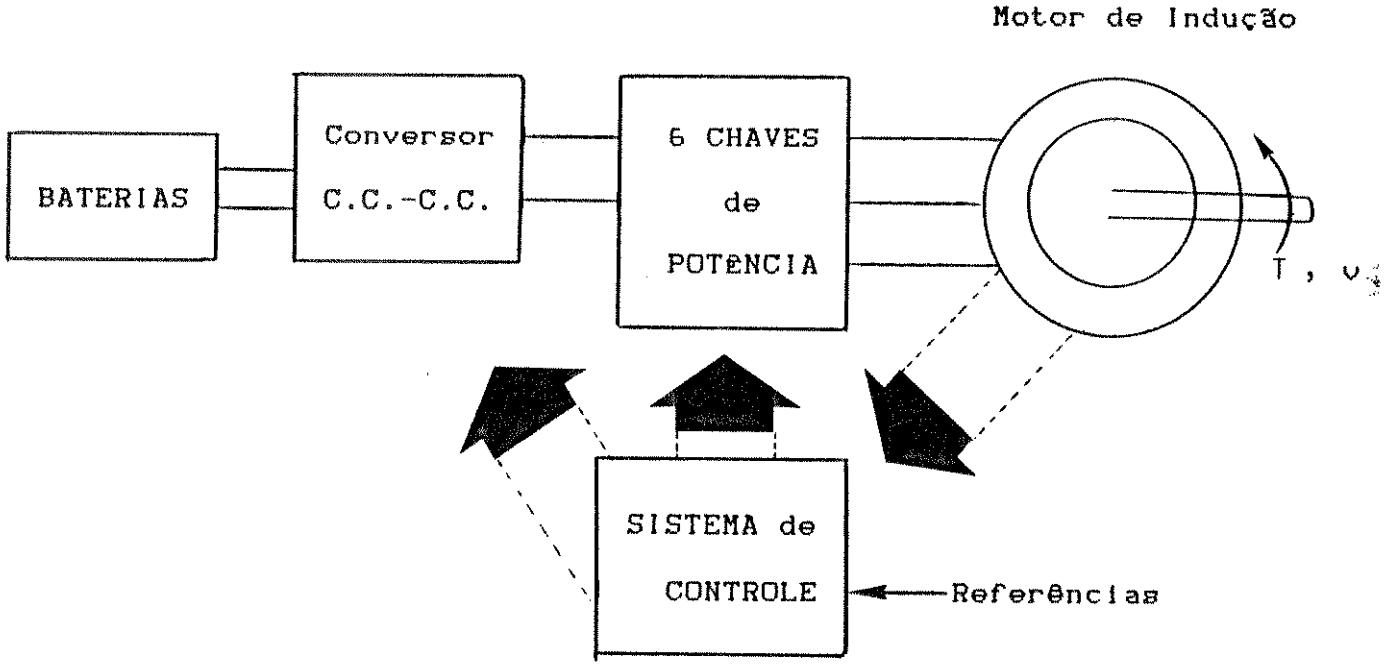


FIG.IV.37 Sistema de Acionamento e Controle em C.A.

A seguir apresentamos 3 modos diferentes de controlar uma máquina de indução.

O primeiro esquema a ser apresentado mostra uma maneira pela qual podemos controlar o fluxo da máquina de indução.

Do circuito equivalente, FIG.IV.20.b, desprezando as perdas cobre e ferro, temos :

$$I_1 = I_m + I_2 \qquad [4.27]$$

Para uma fonte que fornece C.A. com frequência f1 teríamos que a tensão induzida E_1 em regime permanente e dada por :

$$E_1 = I_m X_m$$

onde X_m é a reatância de magnetização : $X_m = 2\pi f_1 L_m$, sendo L_m a indutância de magnetização.

$$E_1 / f1 = I_m \, 2\pi L_m \qquad [4.28]$$

A corrente I_2 é dada por :

$$I_2 = s \, E_1 / \sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}$$

como $s = f2 / f1$

$$I_2 = (E_1 / f1) / (\sqrt{R_2^2 / f2 + 4\pi^2 L_2^2}) \qquad [4.29]$$

As correntes I_2 e I_m podem ser calculadas de 4.29 e 4.28 respectivamente para vários valores de frequências, f2, e adicionadas para obtermos o valor da corrente do motor I_1 para o controle de fluxo.

A relação entre I_1 e s é mostrada na FIG.IV.38 e foi obtida experimentalmente por Sen [Ref.47] para um motor de indução operando com fluxo constante.

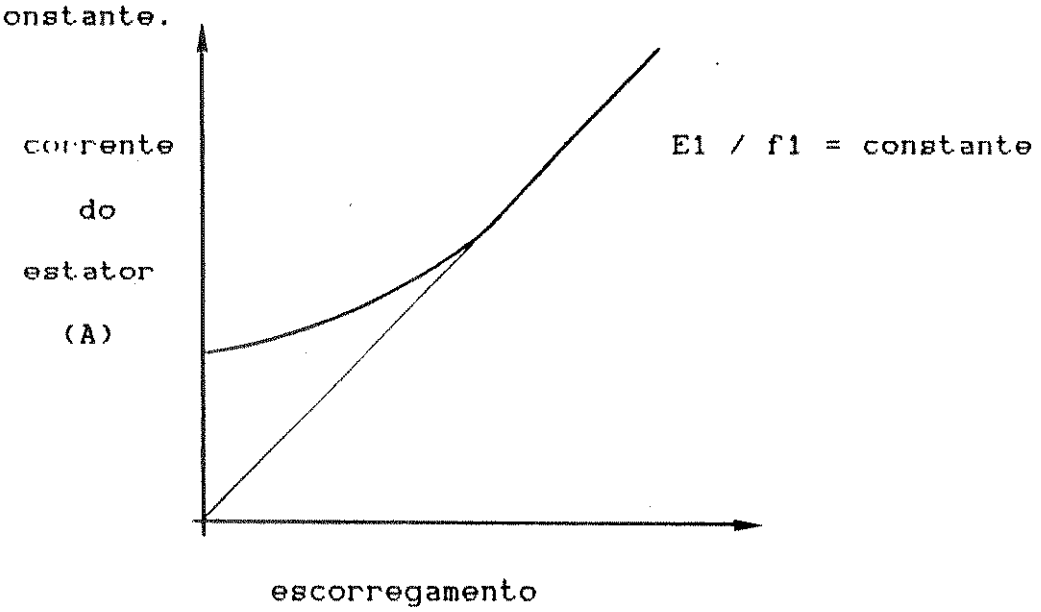


FIG.IV.38 Curva escorregamento versus corrente

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Das equações 4.15 a 4.29 ressaltamos que podemos obter várias maneiras de controlar uma máquina de C.A. .A seguir destacaremos algumas destas maneiras.

Primeiramente, na FIG.IV.39 apresentamos um sistema de controle utilizando realimentação da corrente do estator e da velocidade do rotor.

Na FIG.IV.39 a velocidade de rotação é medida através de um tacogerador e comparada com uma velocidade de referência. A amplitude do sinal de erro é usada para determinar os valores de referência da corrente do estator e da frequência do rotor. A corrente do estator é medida através de um transformador de corrente e o sinal é comparado com um valor determinado pelo sinal de erro. A finalidade da malha de corrente é limitar o valor máximo de corrente do estator com a finalidade de evitar uma falha de comutação do inversor. O valor da frequência do rotor determinado pelo sinal de erro é somado, ou subtraído da frequência rotacional medida pelo tacogerador, afim de determinar uma frequência de excitação f1, a qual deve ser aplicada ao motor. Se o valor da velocidade medido é menor que a velocidade desejada, a frequência f2 é somada a frequência rotacional e o motor e acelerado rapidamente à velocidade desejada. Caso contrário, a frequência f2 é subtraída à frequência rotacional e o motor desacelera rapidamente para a velocidade desejada [Ref.46].

Um limite de torque é incorporado ao circuito afim de que este não exceda ao valor correspondente ao torque máximo.

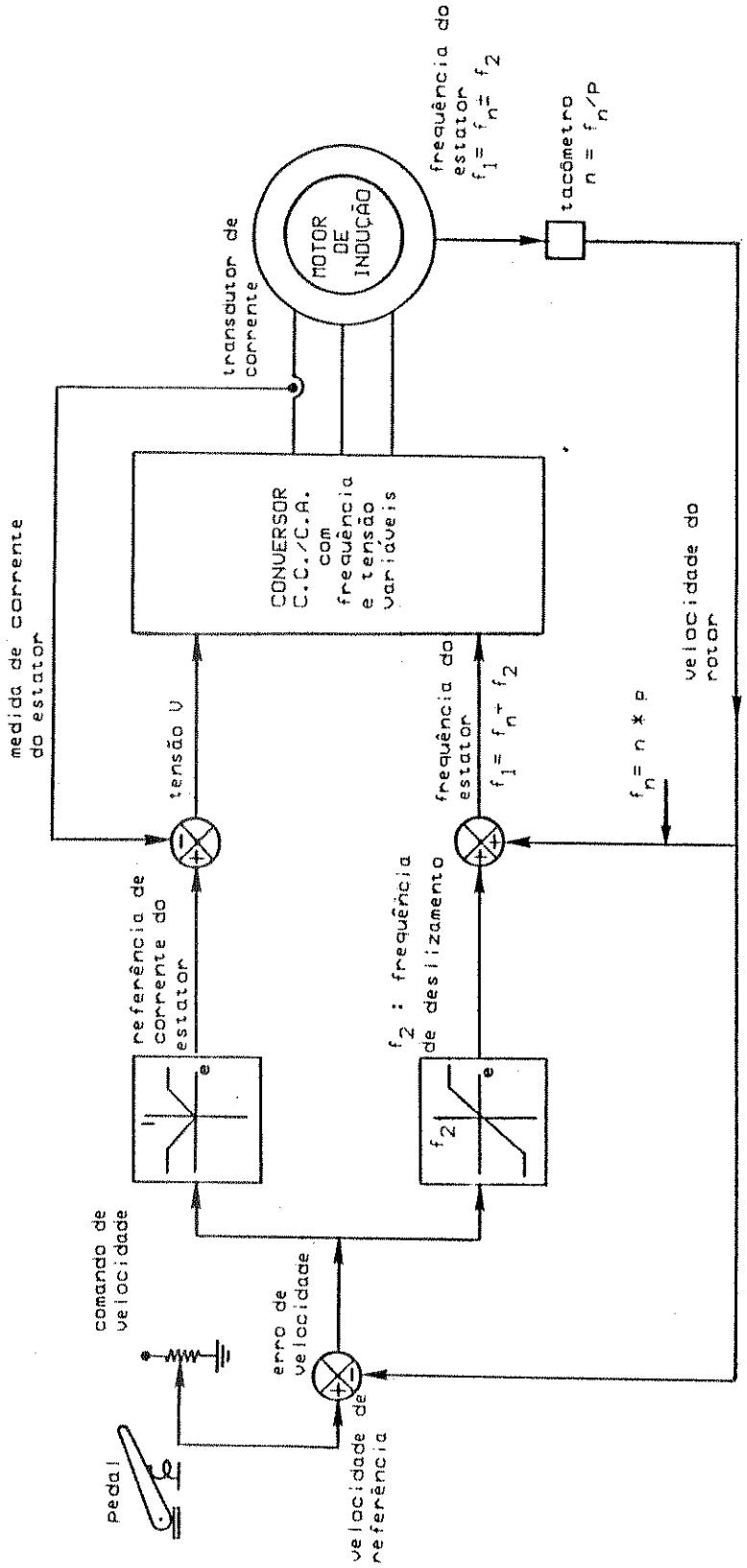


FIG.IV.39 Diagrama de Blocos para Controle de um Motor de C.A.

No 2º esquema para controle de uma máquina de indução apresentamos um modo que foi implementado por Schuffner [Ref.11].

Na FIG.IV.40.a se encontra um diagrama de blocos que mostra as principais funções deste modo de controle efetuado através de uma realimentação de corrente e velocidade.

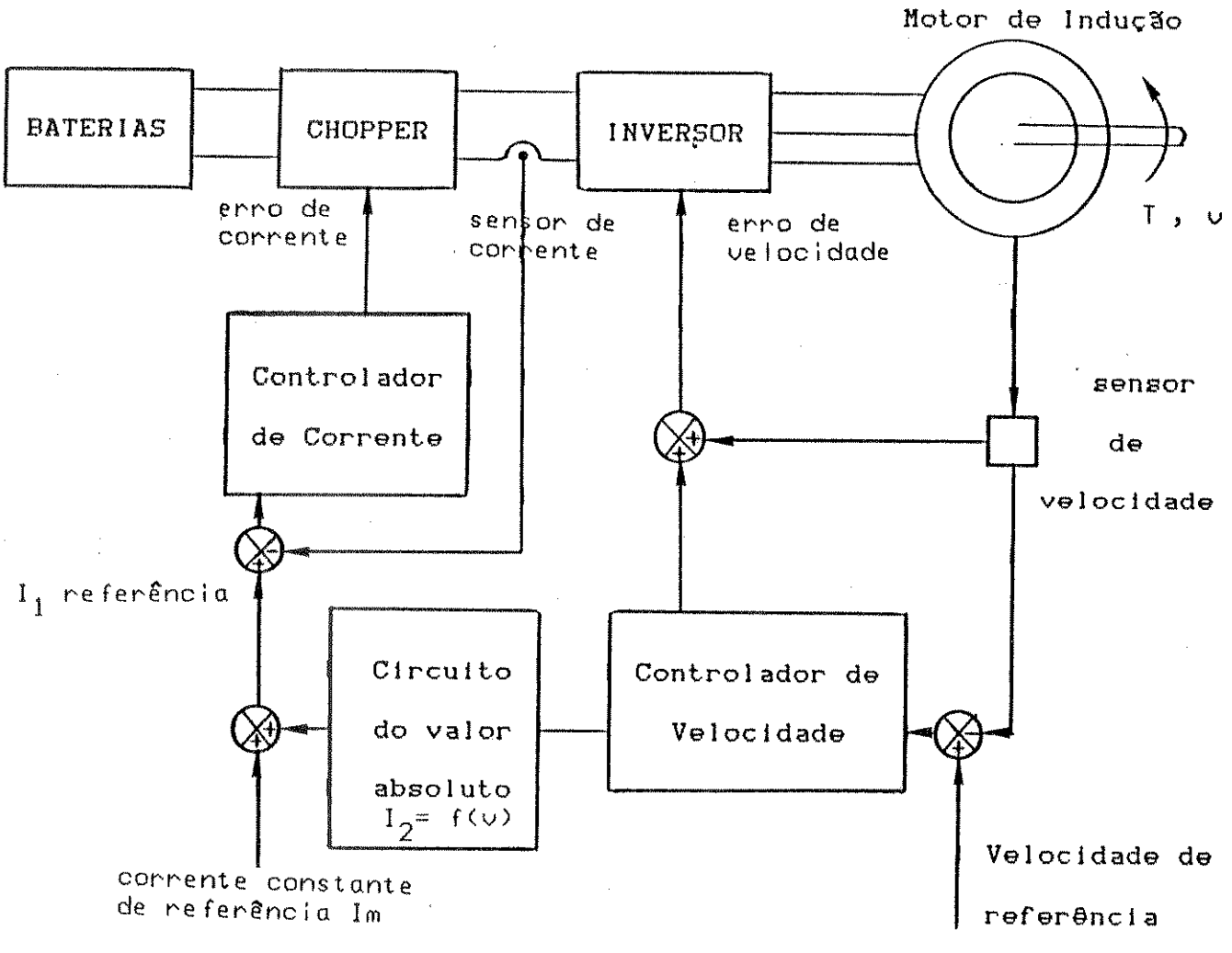


FIG.IV.40.a Diagrama de blocos de um sistema de acionamento em CA

Observe que a função do circuito do valor absoluto na FIG.IV.40.a é relacionar um valor de velocidade a um valor I_2 de corrente que somado a I_m de referência nós dá o valor da corrente I_1 de referência do estator, função esta que pode ser realizada por um computador FIG. IV.40.b [Ref.47].

Apesar de aparentemente simples este tipo de controlador de fluxo para uma máquina de indução só foi implementado em anos recentes com o advento dos microprocessadores capazes de guardar em suas memórias relações como I_1 x s obtida anteriormente.

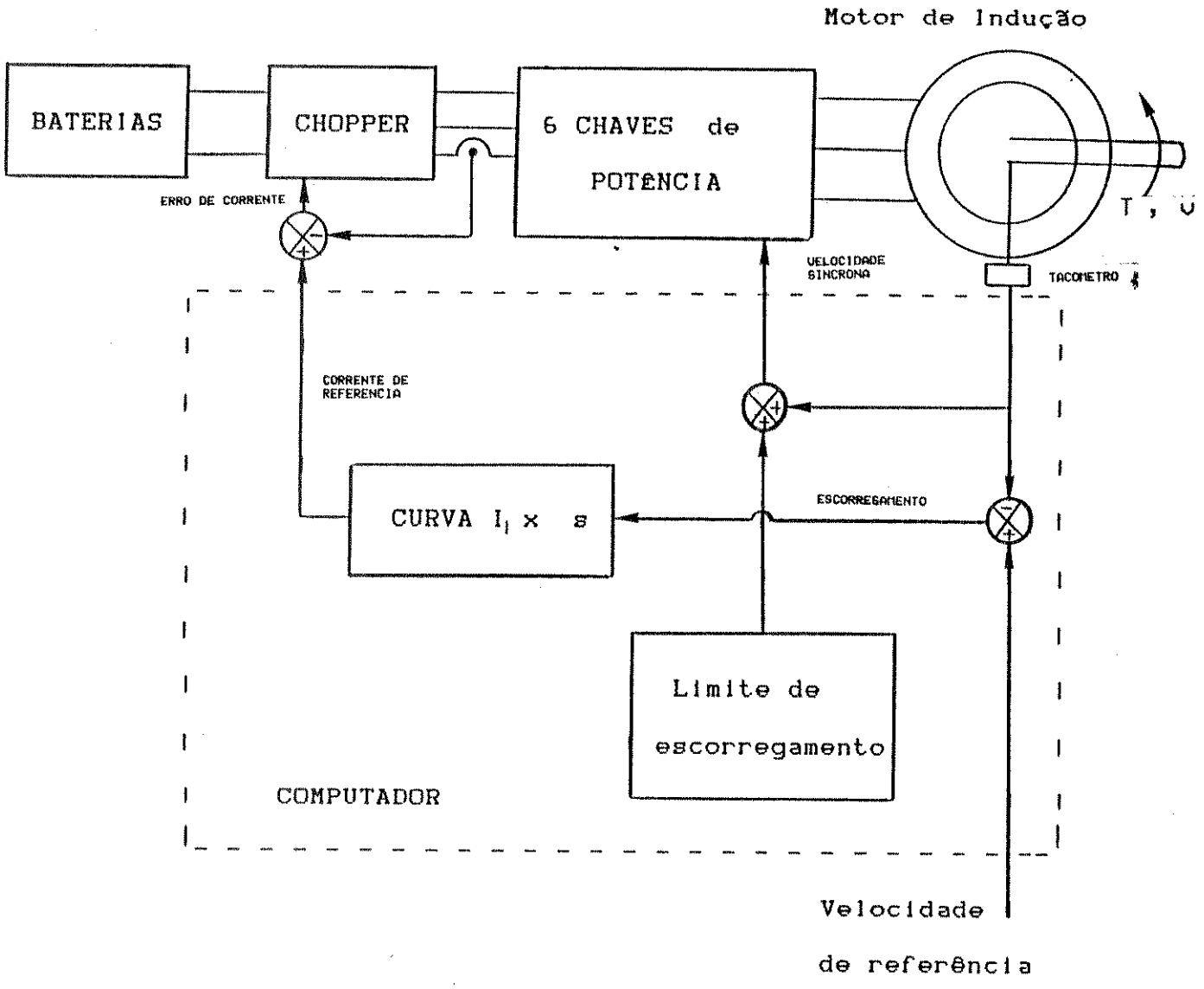


FIG.IV.40. Diagrama de blocos de um sistema de acionamento em C.A. utilizando computador.

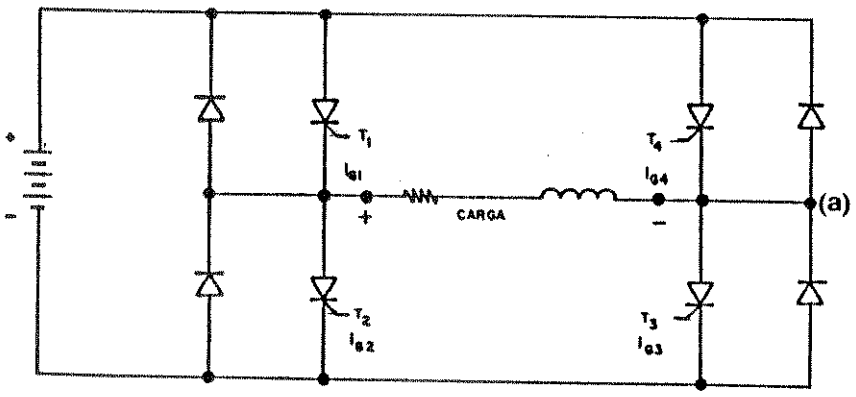
A implantação de um sistema de controle por microprocessador é flexível. A operação do motor de indução com torque ou potência constante pode ser obtida pela simples troca do algoritmo de controle, o que tende a popularizar a suá utilização nos próximos anos.

Na FIG.IV.41.a mostramos como as chaves de potência de um inversor monofásico precisam atuar para gerar uma onda quase senoidal; observe que a configuração deste inversor é idêntica a de um recortador operando nos quatro quadrantes.

Note que quando T1 e T3 conduzem a tensão da bateria sobre a carga tem a polaridade da fonte. Mas quando T4 e T2 conduzem a tensão sobre a fonte terá polaridade trocada. É evidente que a frequência do ligamento e desligamento dos tiristores irá determinar a frequência da tensão sobre a carga.

Se a carga não for puramente resistiva, a corrente sobre ela não reverte instantaneamente como a tensão, logo temos que utilizar diodos conectados em posição antiparalelo como mostrada na FIG.IV.41.a., para a circulação da corrente após o desligamento dos tiristores.

O princípio do inversor monofásico mostrado na FIG.IV.41.a pode ser extendido para uma ponte inversora trifásica como mostrado na FIG. IV.42.a.



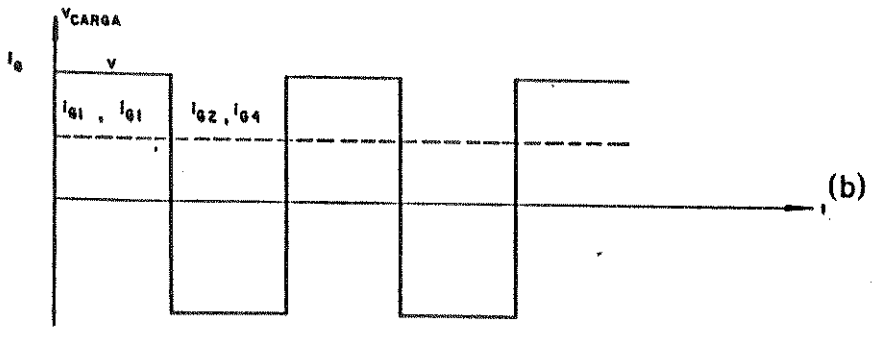


FIG.IV.41

a - Inversor Monofásico

b - Formas de onda na carga.

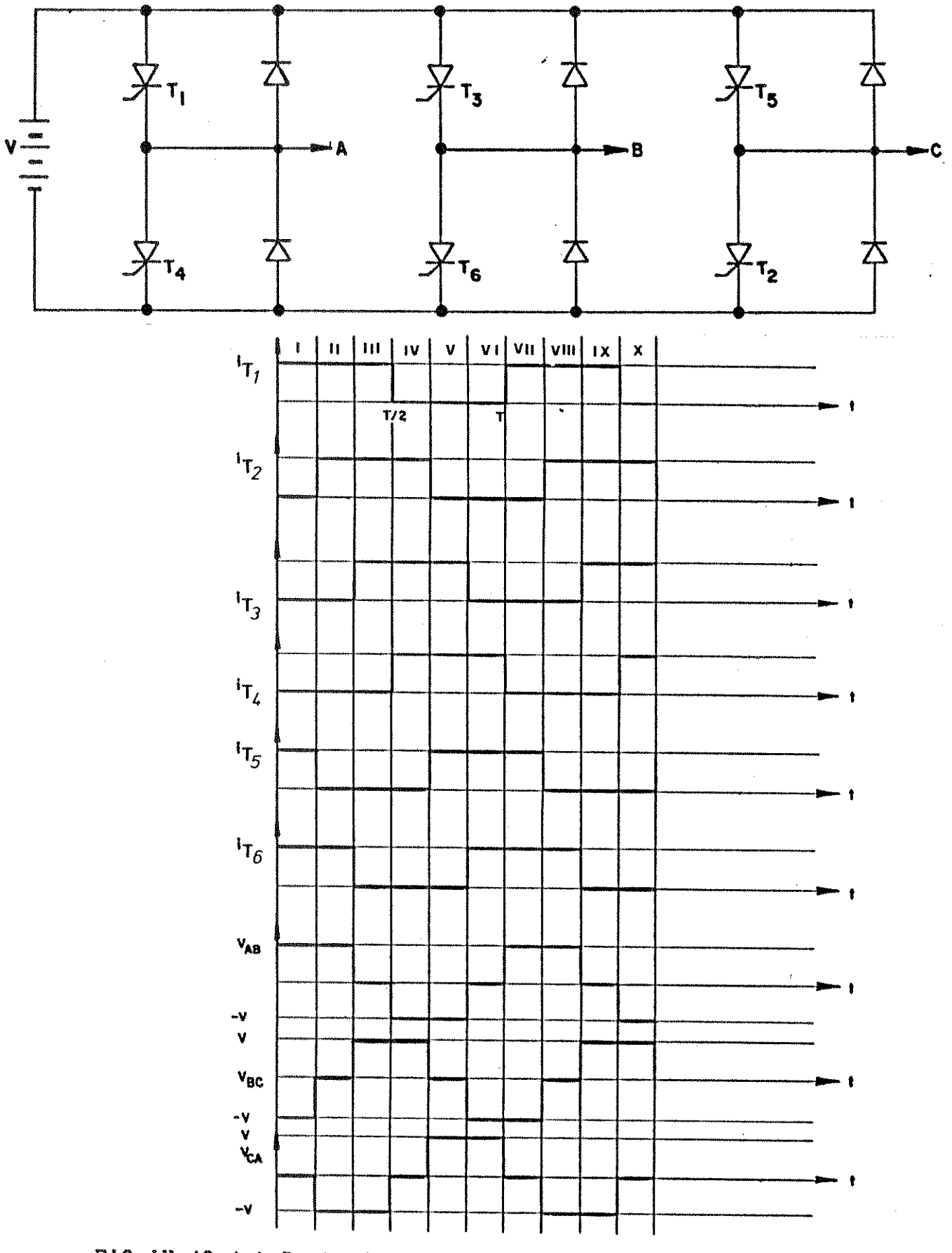


FIG.IV.42 (a) Ponte Inversora trifásica.

(b) Formas de onda dos pulsos de ligamento dos tiristores da tensão de saída.

Janela Complementar da FIG.IV.42

Tabela da sequência de disparo dos tiristores

- Sequência adotada de fases : ABCABC....

Instante	I	II	III	IV	V	VI.	VII	VIII	IX	X
Tiristores	1	1	1	2	3	4	1	1	1	2
	5	2	2	3	4	5	5	2	2	3
Ligados	6	6	3	4	5	6	6	6	3	4
V_{AB}	+	+	0	-	-	0	+	+	0	-
V_{BC}	-	0	+	+	0	-	-	0	+	+
V_{CA}	0	-	-	0	+	+	0	-	-	0

Os sinais de ligamento e as formas de onda na saída do inversor são mostrados na FIG.IV.41.b. Evidente que o sistema de controle para este inversor é mais complexo. A função dos diodos, e a mesma citada anteriormente ou seja permitir a passagem de corrente após o desligamento dos tiristores.

Existe a necessidade da variação da tensão de saída em um inversor. Esta variação pode ser feita de 3 maneiras distintas [9]:

1 - pela variação da tensão alternada na saída do inversor por um transformador com relação de transformação ajustável, ou através da utilização de dois inversores trabalhando com um defasamento variável.

2 - pela variação da tensão contínua na entrada do inversor ;dentre as muitas formas deste tipo de controle destacam-se :
- um retificador controlado
- um retificador fixo e um recortador
- um recortador quando a fonte de alimentação for C.C..

3 - por um chaveamento da tensão feito internamente ao inversor, através de modulação em largura de pulsos (MLP).

CIRCUITOS USUAIS DE INVERSORES

Os veículos elétricos a bateria tracionados com máquinas de C.A. utilizam-se de inversores como parte do sistema de controle e acionamento.

Nas FIG.IV.43 a IV.46 mostramos alguns tipos usuais de inversores. Não cabe aqui descrever cada um deles abordando a função de cada componente; um tratamento mais profundo nas topologias apresentadas a seguir é dado por Plunkett e Kliman [Ref.17].

A FIG.IV.43 mostra um inversor fonte de tensão com topologia Mc-Murray o qual utiliza impulsos auxiliares para chavear o circuito de potência - este método é denominado comutação por impulso auxiliar. O princípio de funcionamento deste inversor é mostrado na Ref.[9].

Na FIG.IV.44 temos um inversor de corrente autosequencial usando um recortador para controle de tensão. A comutação do tiristor principal ocorre automaticamente depois do disparo do tiristor principal adjacente. Nesta topologia nenhum tiristor auxiliar é utilizado [REF.11]. O inversor da FIG.IV.45 não requer componentes extras para comutação mas sim um recortador para controle da tensão, a comutação é efetuada pela carga.

Na FIG.IV.46 apresentamos um inversor utilizando transistores de potência substituindo tiristores. A vantagem desta topologia é que a comutação de cada transistor é obtida simplesmente retirando o sinal na base do transistor [REF.11].

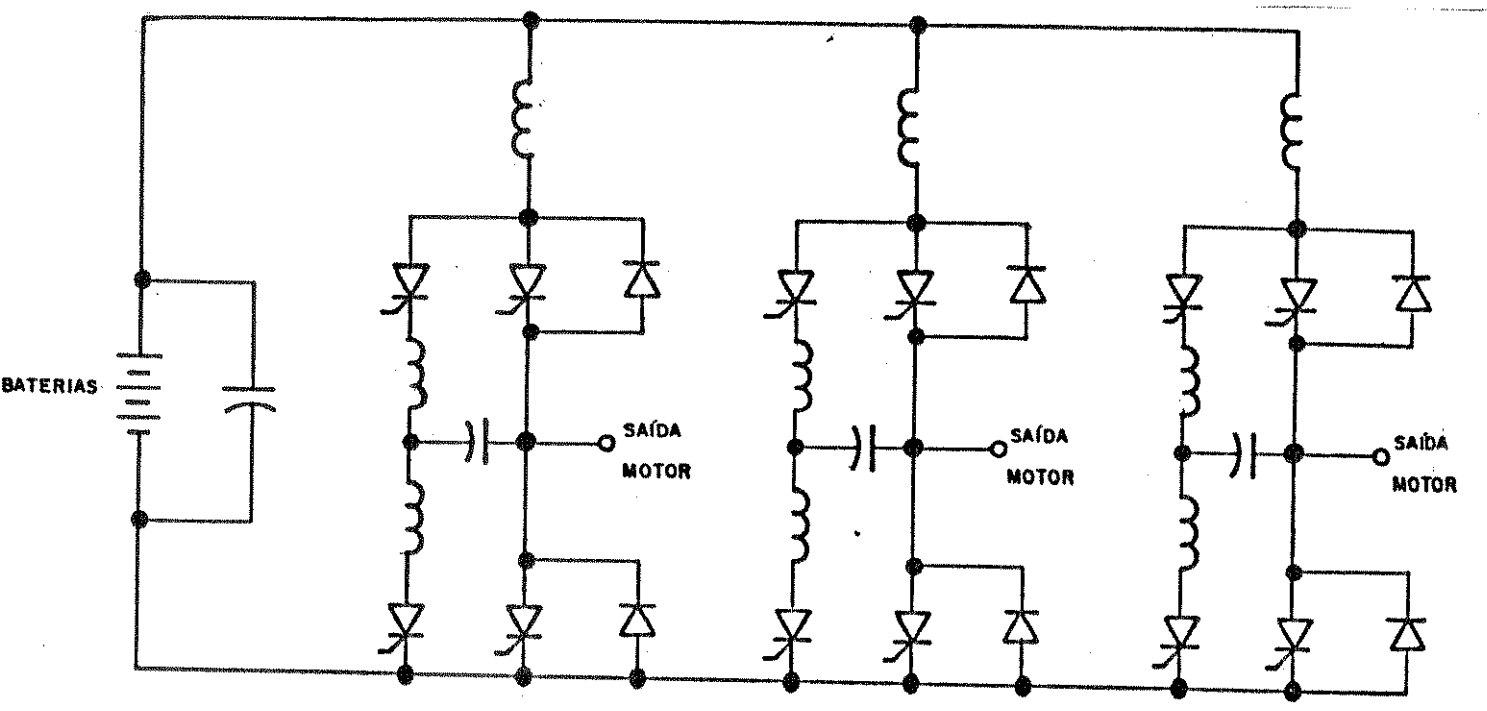


FIG.IV.43 Inversor McMurray com tiristores.

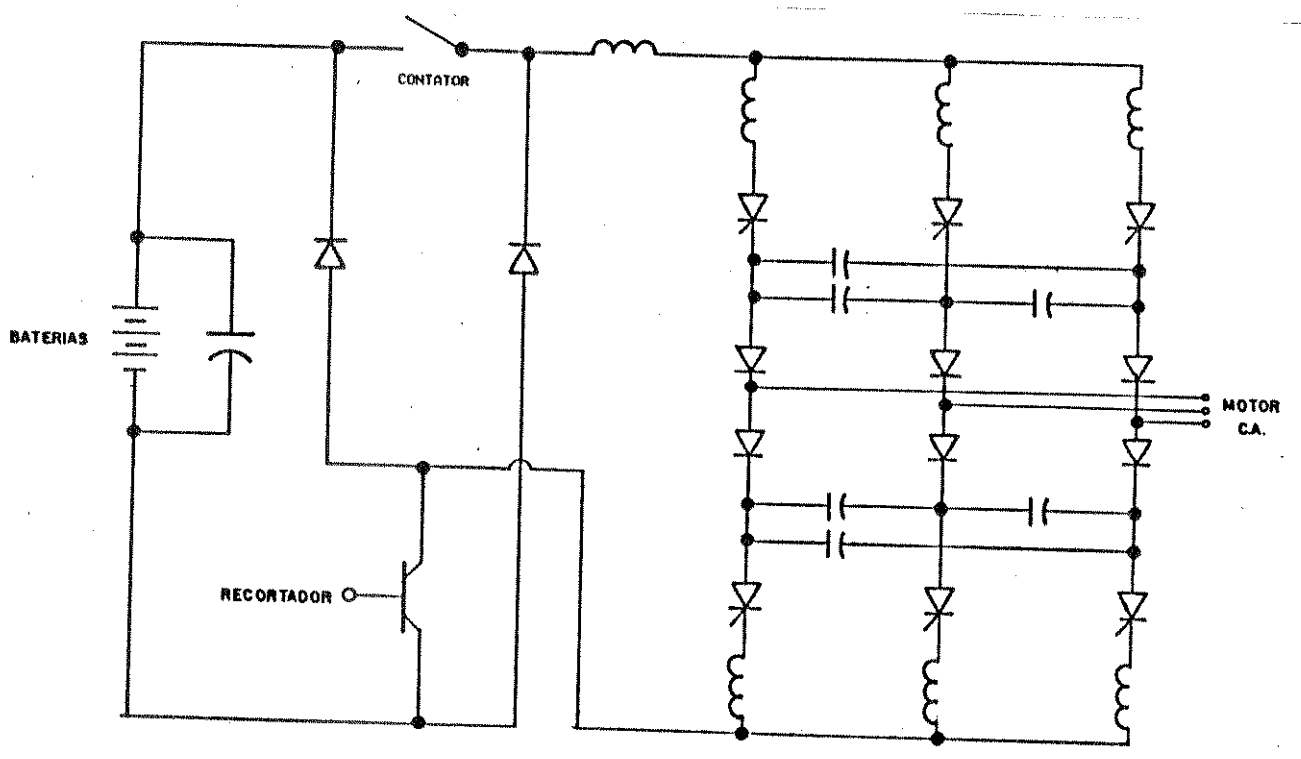


FIG.IV.44 Inversor Autosequencial.

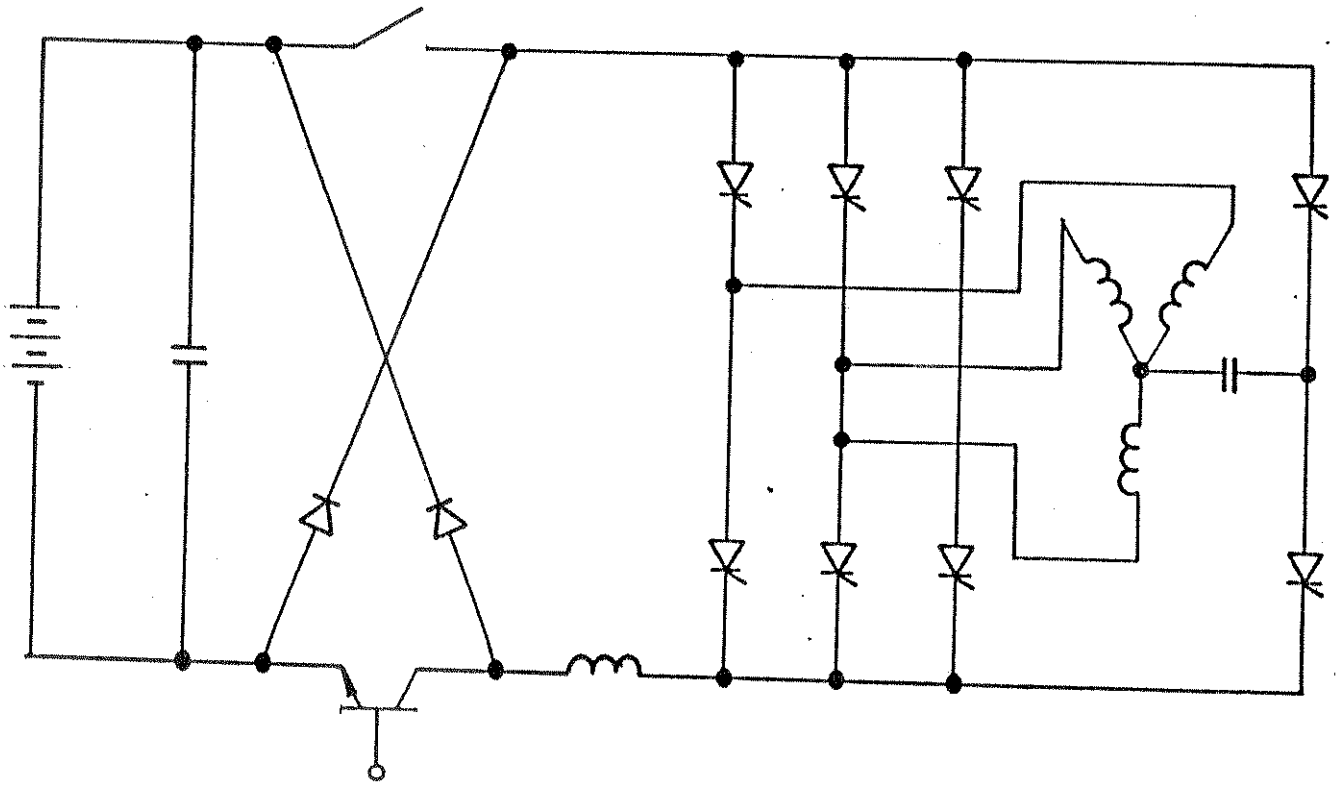


FIG.IV.45 Inversor Com Tiristores Comutados pela Carga

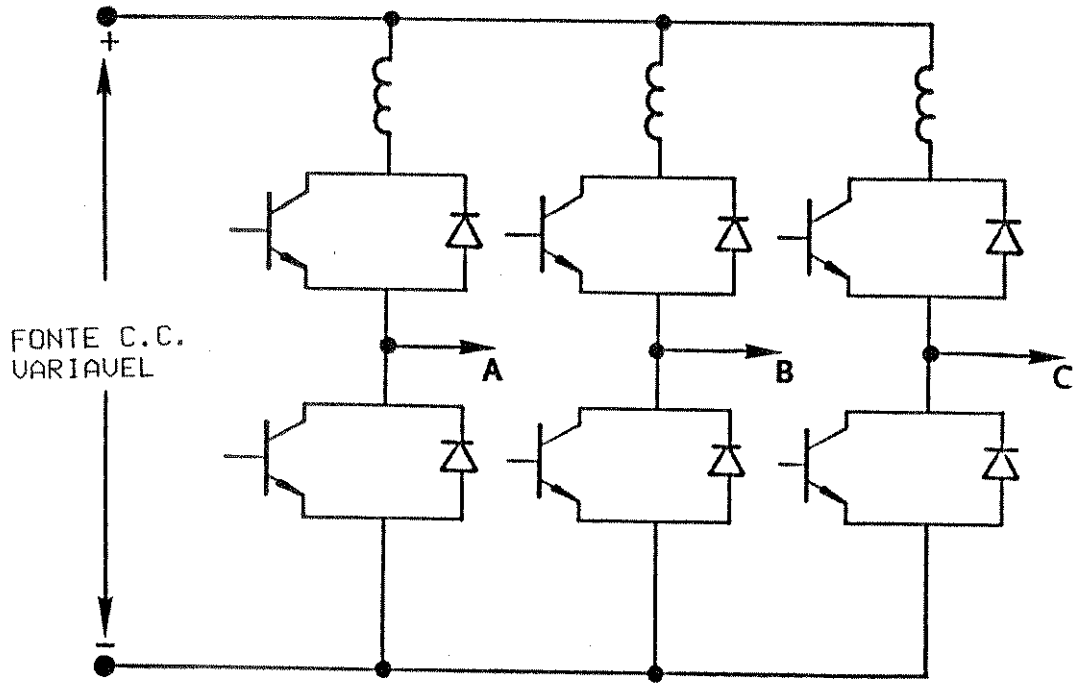


FIG.IV.46 Inversor fonte de corrente transistorizado [Ref.11].

IV.4 Sumário

Os princípios de funcionamento, e as condições para utilização de uma máquina elétrica em um veículo elétrico foram tratadas neste capítulo. Para o motor de corrente contínua ressaltamos as relações matemáticas básicas do comportamento deste motor, os vários tipos de máquinas de corrente contínua e suas características físicas e de desempenho.

A máquina de corrente alternada é tratada de maneira similar a de corrente contínua. Comparações entre os dois tipos de máquina foram realizadas.

Para a máquina de corrente contínua mostramos algumas maneiras de se efetuar o controle de velocidade e torque ressaltando diversas topologias de recortadores existentes.

Para as máquinas de corrente alternada vimos diversas topologias de inversores através dos quais podemos efetuar o controle desejado. Devemos ressaltar a FIG.IV.32 na qual encontramos vários tipos de controle de velocidade para máquina de corrente alternada; também abordamos o princípio de frenagem regenerativa.

Na bibliografia apresentada ressalta-se as várias teses de mestrado e doutorado na área de controle e eletrônica de potência desenvolvidas na Engenharia Elétrica da UNICAMP.

IV.5 BIBLIOGRAFIA

IV.5.1 Relação de teses de mestrado na área de sistemas de acionamento defendidas na Engenharia Elétrica da UNICAMP.

1 - Ruppert, E.F. "Modelamento de Motor de Indução: Uma Contribuição ao Estudo de Chaveamento das Correntes do Rotor e do Motor de Indução Enrolado".1974.

2 - Miskulin, M. "Modelamento de Motores de Indução: Uma Contribuição ao Estudo do Controle de Torque e Velocidade".1974

3 - Palhares, A.G.B. "Aplicação de Recorrência a um Sistema Dinâmico Degenerado".1976.

4 - Geromel, J.C. "Controle em Tempo Mínimo de um Sistema Linear Utilizando Modulação em Largura de Pulsos".1976.

5 - Guazzelli, M.B.P. "Estudo da Estabilidade de uma Máquina Síncrona".1977.

6 - Bim,E. " Contribuição ao Estudo do Gerador de Indução Auto-Excitado". 1981.

7 - Val, J.B.R.do "Estudo do Controle de Sistemas Chaveados à Entradas Constantes".1981.

8 - Oliveira, A. "Uma Contribuição ao Estudo da Estabilidade Causada por Conversores Estáticos".1983.

9 - Moreira, J.C. "Projeto Via Programação Matemática e Implementação de Conversores C.C.-C.A. de Frequência Variável".1983.

10 - Fischer, B.R. "Análise e Implementação de Algoritmos de Controle ótimo pelo Método do Gradiente Conjugado".1983.

11 - Schuffner Neto, F.H. "Controle de Motor de Indução de Gaiola Via Inversor Fonte de Corrente Transistorizado".1984

12 - Oliveira,A.M. "Estratégia de Controle de Um Sistema com Bifurcação de Potência". 1986.

IV.5.2 A nível de doutorado temos :

13 - Bottura, C.P."Contribuição ao Estudo do Controle de Torque em Máquina Série por Modulação em Largura de Pulsos".1973.

14 - Palhares, A.G.B. "Controle por Realimentação de Estado e Modulação em Largura de Pulso de Um Servoposicionador Eletrohidraúlico: Análise das Oscilações Instáveis".1980

15 - Miskulin, M.S. "An Investigation of Hole-Storage Transients : A Contribution to the Determination of the Protection Requirements for Semiconductors in Thyristor Controlled Locomotives". Tese de Doutorado defendida no Cranfield Inst.of Tech., Inglaterra em 1980.

IV.5.3 - Máquinas Elétricas e Sistemas de Acionamento.

16 - Unnewehr, L.E. ;Nasar, S.A. "Eletric Vehicle Technology" 1982.

17 - Plunkett, A.B.; Klíman, G.B. "Eletric Vehicle AC Drive Development", Society of Automotive Engineers - SAE-80061 - pag.424 a 436 - 1980.

18 - Fitzgerald, A.E. e outros "Máquinas Elétricas" - McGraw Hill - 1975.

19 - I Seminário Sobre Veículos Elétricos Utilitários a Baterias - Protran Engenharia - FINEP - São Paulo - agosto de 1984.

20 - Ivanov, A.; Smolenskky "Eletrical Machines" - Mir Publishers Vol.2 - Moscou - 1982.

21 - Cornell,E.P.; Guess,R.H.; Turnbull,FF.G. "Advanced Motor Developments for Eletric Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol,VT-26, n.02, 128-134, may, 1977.

22 - Laithwaite, E.R. "Exciting Eletrical Machines" Wheatom (A division of Pergamon Press), 1979.

23 - Graumlich, A.J.; Kern,C.V. "Battery Powered Small Off-High Way Vehicles" paper SAE-740730 , 2650-2670, 1974.

24 - Berman,B.; Gelb,G.H. "Propulsion Systems for Eletric Cars" - IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol.VT-23, n.3,

63-72, august 1974.

25 - Alger P.L. Arnold,R.E. "The History of Induction Motors in America" Proceedings of the IEEE - vol.64. nº9, pg.1380 - 1383, september, 1976.

26 - Dawes,C.L. " Curso de Eletrotécnica" V.2 - 16º edição - editora Globo, 1977.

27 - Hancock, N.N. "Eletric Power Utilization" London - Sir Isacc Pitaman & Sons Ltda. 197 .

28 - Finch,J.K. " The Story of Engineering" Anchor Books , Garden City, New York, 1960.

29 - Tesla,N. "A New System of Alternate Current Motors and Transformes", AIEE Trans., vol.5, pp.308 - 324, 1888.

30 - Steinmetz,C.P. "The Alternating Current Induction Motor", AIEE Trans., vol.14, pp.185 -217, 1897.

31 - Steinmetz,C.P. "The Single Phase Induction Motor" AIEE Trans., vol.15, pp.35 - 115, 1898.

32 - Arnold,R. ; Stehr,W. "Máquinas Elétricas", E.P.U. Editora Pedagógica e Universitária Ltda, São Paulo V.1 e 2, 1976.

33 - Ramamoorty,M. "An Introduction to Thyristors an Theirs Applications" The Macmillan Press Limited - 1977.

34 - Kusko,A. "Solid State DC Motor Drive" M.I.T. Press - 1969.

35 - Murphy,J.M.D. "Thyristor Control of A.C. Motors" Pergamon Press - 1973.

36 - Berman,B. "Variable - Speed DC Drives" - Product Engineering - April 2 , 58 - 67, 1962.

37 - Berman, B. " AC Adjustable - Speed Drives" - Product Engineering - July 8, 81 - 89, 1963.

38 - Almeida,J.L.A. "Eletrônica Industrial de Potência" - Livros Érica Editora - 1986.

39 - Bottura,C.P.; Val,J.B.R. do; Salles,H.C.A.S. "Sistema Chaveado à Entrada Constante Usando MLP para Acionamento de Máquinas C.C. no Modo Tração" 4º Congresso Brasileiro de Automática - Campinas - S.P.; V.2; 400 - 405, 1982.

40 - Copellovitch,S.; Santos,C.B. "Conversores Estáticos, Controle de Máquinas" 4º Congresso Brasileiro de Automática - Campinas - S.P.; Cursos; 103 - 141, 1982.

41 - Slemon, G.R. "Equipamentos Magnetelétricos" V.2 - Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 1975.

42 - Gray,A ; Wallace,G.A. "Eletrotécnica - Princípios e Aplicações" - Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 1982.

43 - Guazzelli, M.B.P. " Eletrônica de Potência" - Editora da UNICAMP - 1986.

44 - Dubey, G.K.; De, G.C. " D.C. Dynamic braking of induction motor with a saturistor in its rotor circuit", 1585 - 1592, Proc.IEE, vol. 118, nº 11, november, 1971.

45 - Krishnamurthy,M.R. "D.C. dynamic braking for direct determination of rotor impedance and power factor of induction machines ", 1299 - 1304, Proc.IEE, vol. 111, nº 7, july, 1964.

46 - Bose, B.K. "Adjustable Speed AC Drive Systems" - IEEE Press Books - 1980.

47 - Sen, P.C.; Trezise, J.C.; Sack, M. "Microprocessor Control of an Induction Motor With Flux Regulation" - 17, 20 - IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentations - vol. IECI 28, nº1, february, 1981.

CAPÍTULO V

MODELAMENTO DO VEÍCULO ELÉTRICO

V - MODELAMENTO DE VEÍCULO ELÉTRICO

V.1. INTRODUÇÃO

Iniciaremos este capítulo definindo dois conceitos bastante amplos e com inúmeras interpretações :SISTEMA e MODELO MATEMATICO.

Entendemos por SISTEMA uma disposição das partes de um todo, coordenadas entre si e que funcionam como uma estrutura organizada.

Um VE é um sistema formado por máquina elétrica, bateria, controle de velocidade e torque, comandos do motorista e carcaça.

Por MODELO MATEMATICO entendemos um conjunto de equações matemáticas representativas sobre o comportamento de um sistema pelo qual procuramos explicar ou prever dentro de uma teoria científica as propriedades deste sistema.

Existem muitas maneiras semelhantes para modelar um sistema; primeiramente como uma função dos meios e resultados finais deste processo. Por exemplo um gerador e um sistema de transmissão de energia elétrica podem ser modelados :

- pela avaliação das correntes da linha de transmissão e do gerador sob as condições atuais e futuras desta linha.

- pelo estudo da estabilidade do sistema durante falhas ou condições anormais de operação.

- pelo estudo de custos visando uma futura linha e geradores adicionais.

- pela otimização da potência de saída deste gerador com o mínimo consumo de combustível.

- pelo levantamento da estimativa de carga dos usuários para realizar um retorno no investimento da estação geradora e cobrir custos operacionais.

Muitos destes ítens são de interesse em um modelamento de um VE com a única diferença que um veículo não é um sistema de potência estacionário.

Em geral, o objetivo de um modelo será determinar como se comporta um sistema.

Alguns critérios de desempenho usuais para descrever uma análise de um veículo elétrico são:

- a aceleração do veículo nas condições de máxima potência (totalmente acelerado).

- economia : referente a energia consumida por distância percorrida; para VE a unidade de energia consumida sera kilowatt-hora por kilometro, ambos medidos para um percurso específico ou ciclo específico.

- máxima distância percorrida por carga da bateria, novamente em um percurso ou ciclo específico.

- carga máxima em relação ao tipo de veículo.

- eficiência energética como a razão entre a energia consumida para mover o veículo e a energia retirada das baterias durante um percurso ou ciclo específico.

V.2. ELEMENTOS_ESSENCIAIS_DE_UM_MODELO_DE_VE

Os elementos básicos (fonte de energia, controle, conversor, motor, transmissão) de um modelo de VE são evidentes através dos diagramas de blocos apresentados no Capítulo II. Aqui apresentaremos elementos que são essenciais para um modelamento de VE e que não aparecem naqueles diagramas. Os principais elementos de um modelo de VE são:

1 - Sistemas elétricos, mecânicos e químicos

2 - Massa e coeficientes de rolamento e arraste

3 - Modelo de percurso ou ciclo padrão

4 - Configurações

5 - Tipo de controle, incluindo uso de regeneração

6 - Tipo de transmissão mecânica e relação entre marchas

7 - Controle de carga da bateria e definição do ponto final de carga

8 - Tipo de conversor de potência.

Uma classificação geral para descrever vários tipos de modelos pode ser:

1º Projeto e Simulação de Componentes do Veículo

a - especificação da fonte de energia;

b - especificação da máquina elétrica;

c - especificação do conversor

d - especificação do tipo de controle;

e - especificação das variáveis mecânicas.

f - especificação do recarregador de baterias.

2º Análise Econômica

a - do construtor:

1 - do projeto

2 - da implementação até a fase do protótipo

3 - produção em série, distribuição e manutenção.

b - do usuário

1 - da aquisição

2 - da manutenção

c - comparativa com outros tipos de transporte.

3º Análise Dinâmica

- transistórios

1 - baixas velocidades

2 - acelerações

4º Predição do Desempenho Através da Simulação

a - aceleração

1 - potência necessária

2 - torque

3 - energia consumida

b - velocidade constante

1 - potência necessária

2 - torque

3 - energia consumida

c - frenagem regenerativa

1 - energia regenerada

d - autonomia

5º Otimização

a - componentes

b - projeto

c - utilização

Estes itens, em geral, abordam alguns dos diferentes tipos de modelos e em muitos casos o uso de um modelo depende do resultado de outro. Por exemplo um modelo de análise econômica por parte do usuário geralmente requer consideráveis conhecimentos da previsão de autonomia e do desempenho do veículo.

As configurações gerais do 3º, 4º e 5º modelos são muitos similares, mas a formulação matemática usada no modelo e na simulação podem ser bem diferentes.

Podemos frisar que:

- em geral, o modelamento de um VE não é diferente do modelamento de outros sistemas.

- a precisão e detalhes do modelo dependem das necessidades do estudo do problema, da capacidade computacional, dos custos, do número de dados e do tempo disponíveis.

O objetivo deste trabalho será tratar alguns dos tipos de modelos citados anteriormente. A análise de todos os ítens apresentados envolveria especialistas de várias áreas do conhecimento, portanto em alguns ítens daremos um enfoque de maneira concisa.

A seguir apresentamos os modelos desenvolvidos neste trabalho, ressaltando sua importância e utilização; exemplos aplicativos são utilizados sempre que possível.

V.3. PROJETO E SIMULACAO DE COMPONENTES DO VEÍCULO

V.3.1. Especificação da fonte de energia

Conforme foi justificado no Capítulo III a bateria de chumbo-ácido será nossa fonte de energia.

O procedimento adotado para especificarmos um conjunto de baterias para utilização em tração elétrica é o seguinte:

1 - Especificar a finalidade do veículo (tipo de utilização).

2 - Especificar as características físicas deste veículo (coeficientes de arraste, massa total do veículo).

3 - Especificar a autonomia desejada.

4 - Determinar através do programa computacional apresentado no ítem V-6 a energia necessária para atender as especificações previstas.

5 - Com o valor da energia total necessária para atender um período de utilização obtém-se a energia por bateria considerando a tensão total do sistema.

6 - A potência necessária será obtida dividindo o valor obtido no ítem 5 pelo tempo de utilização da bateria especificado no ítem 1.

7 - Através da relação de Peukert determinamos se podemos atender o valor previsto com a bateria disponível.

8 - Através da relação de Shepherd podemos prever se a queda de tensão verificada no conjunto de baterias terá alguma influência no comportamento do veículo (observar que o valor 10.50 V é o valor mínimo de tensão previsto por bateria).

O procedimento descrito precisa ter como auxílio as equações de Peukert e Shepherd que programaremos inicialmente.

V.3.1.a Equação de Peukert (Simulação da corrente de descarga versus tempo).

Um programa computacional em BASIC para o cálculo das constantes K e n, da equação de Peukert:

$$t = \frac{K}{(I \wedge n)}$$

conforme visto no item III.10.3 é mostrado na FIG.IV.1..

O programa computacional desenvolvido permite traçar a curva de corrente de descarga versus tempo de uma dada bateria, bem como plotar os pontos que determinam esta curva.

O funcionamento do programa está baseado em:

I - Entrada de Dados.

- Corrente de descarga (A)
- Duração da descarga à corrente constante (h)
- Comando para execução: DEF A

II - Saída de Resultados

- n

- K

- Coeficiente de correlação

- Curva corrente versus tempo

- Comando para execução: DEF S

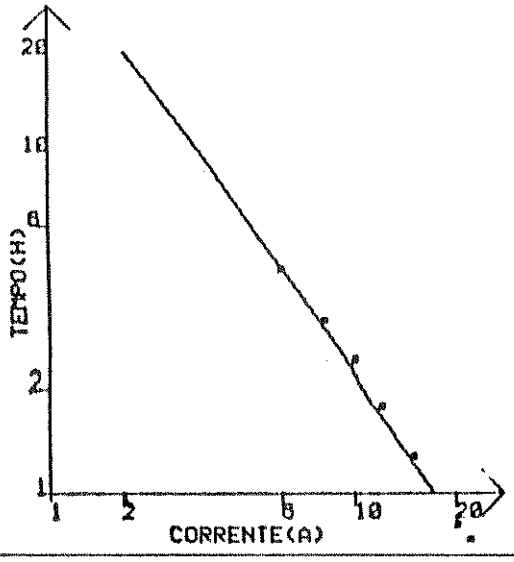
```
10:"A"CLEAR
14:CSIZE 1:USING "###.##"
15:LPRINT "   CORRENTE(A)
    TEMPO(H)        "
20:DIM X(9),Y(9)
30:FOR B=1TO 10
40:X(B-1)=0:Y(B-1)=0
50:NEXT B
60:N=0
70:FOR B=1TO 10
80:INPUT "I="¦U:LPRINT TAB 05¦U:U=
   LOG U:X(B-1)=U:GOTO 94
90:GOTO 120
94:LF -1
95:INPUT "T="¦V:LPRINT TAB 25¦U:U=
   LOG V:Y(B-1)=V
100:N=N+1
110:NEXT B
120:END
130:"S"I=0:J=0:K=0:L=0:M=0
140:P=10^(98):O=-P:R=P:Q=O
150:FOR B=1TO N
155:Z=B-1
160:I=I+X(Z)
170:J=J+Y(Z)
180:K=K+X(Z)*X(Z)
190:L=L+X(Z)*Y(Z)
200:M=M+Y(Z)*Y(Z)
210:IF P>X(Z)LET P=X(Z)
220:IF O<X(Z)LET O=X(Z)
230:IF R>Y(Z)LET R=Y(Z)
240:IF Q<Y(Z)LET Q=Y(Z)
250:NEXT B
260:I=I/N:J=J/N
270:K=K-N*I*I
280:L=L-N*I*J
290:M=M-N*J*J
305:H=SQR(K*M)
307:H=L/H
308:USING "###.##"
309:CSIZE 1
310:COLOR 1:LPRINT "CORRELACAO"¦H
330:LPRINT "CONSTANTES PEUKERT"
340:S=L/K:T=J-S*I
345:U=10^T:G=-S
350:LPRINT "N="¦G
360:LPRINT "K="¦U
510:A=180/1.3
520:B=A
960:F=(U/20)^(1/G):H=U^(1/G)
970:F=LOG F*180/1.3
980:H=LOG H*180/1.3
1000:GRAPH
1020:GLCURSOR (10,-100)
1030:SORGN :CSIZE 1
1040:LINE (10,-105)-(10,100),0,2
1045:LINE (10,100)-(0,90),0,2
1046:LINE (10,100)-(20,90),0,2
1050:LINE (05,-100)-(200,-100),0,2
1055:LINE (200,-100)-(190,-90),0,2
1056:LINE (200,-100)-(190,-110),0,2
1060:ROTATE 3:COLOR 3
1070:GLCURSOR (0,-40):LPRINT "TEMPO
     (H)"
1080:GLCURSOR (60,-120):ROTATE 0:
     COLOR 3
1090:LPRINT "CORRENTE(A)":COLOR 2
1100:GLCURSOR (10,-110):LPRINT "1"
1110:GLCURSOR (41,-110):LPRINT "2"
1115:LINE (41,-100)-(43,-105),0,2
1120:GLCURSOR (107,-110):LPRINT "6"
1130:GLCURSOR (138,-110):LPRINT "10
     "
1140:GLCURSOR (180,-110):LPRINT "20
     "
1150:LINE (41,-100)-(41,-105),0,2
1160:LINE (107,-100)-(107,-105),0,2
1170:LINE (138,-100)-(138,-105),0,2
1180:LINE (180,-100)-(180,-105),0,2
1190:GLCURSOR (4,-100):LPRINT "1"
1200:GLCURSOR (2,-59):LPRINT "2"
1210:GLCURSOR (2,07):LPRINT "6"
1220:GLCURSOR (0,38):LPRINT "10"
1230:GLCURSOR (0,80):LPRINT "20"
1240:LINE (8,-59)-(10,-59),0,2
1250:LINE (8,07)-(10,07),0,2
1260:LINE (8,38)-(10,38),0,2
1270:LINE (8,80)-(10,80),0,2
1280:LINE (F,80)-(H,-100),0,1
1600:COLOR 3
1690:FOR E=1TO N
1700:X=(X(E-1))*A:Y=((Y(E-1))*B)-10
     0
1710:GOSUB 1920
1720:NEXT E:END
1920:LINE (X,Y)-(X+2,Y+2),0,1,B
1930:RETURN
2000:"K
```

FIG.V.1 Programa computacional em BASIC para avaliação da Equação de Peukert.

A

CORRENTE(A)	TEMPO(H)
6.00	4.26
8.00	2.98
10.00	2.20
12.00	1.74
15.00	1.25
20.00	0.79
22.00	0.71

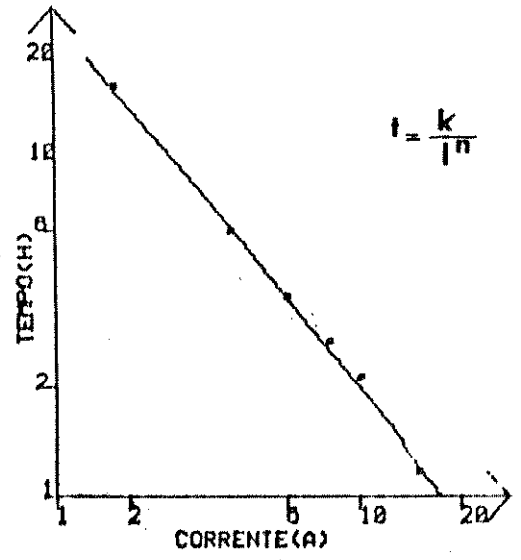
CORRELACAO -0.99
CONSTANTES PEUKERT
N= 1.40
K= 55.38



B

CORRENTE(A)	TEMPO(H)
1.00	10.42
4.00	5.90
6.00	3.70
8.00	2.70
10.00	2.10
15.00	1.16

CORRELACAO -0.99
CONSTANTES PEUKERT
N= 1.22
K= 33.47

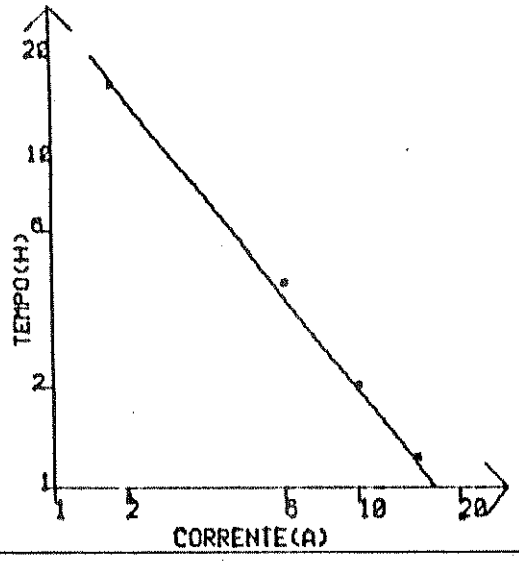


$$t = \frac{k}{I^n}$$

C

CORRENTE(A)	TEMPO(H)
1.00	10.38
6.00	4.08
10.00	1.97
15.00	1.20
20.00	0.83
22.00	0.66

CORRELACAO -0.99
CONSTANTES PEUKERT
N= 1.26
K= 36.94



D

CORRENTE(A)	TEMPO(H)
1.00	20.51
6.00	4.38
10.00	2.28
15.00	1.25
20.00	0.79

CORRELACAO -0.99
CONSTANTES PEUKERT
N= 1.33
K= 46.09

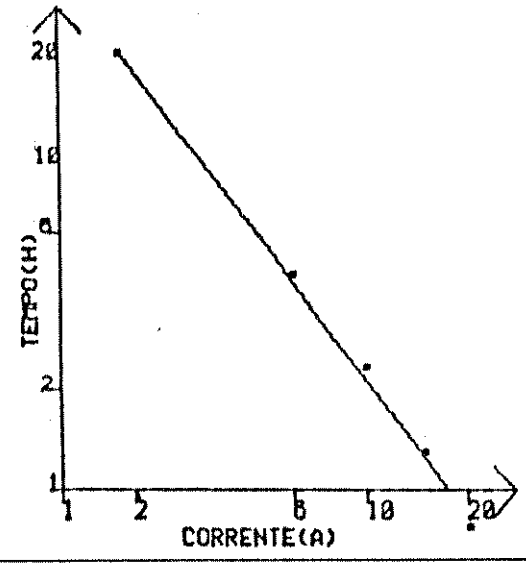


FIG.V.2 Exemplos do cálculo das constantes de Peukert e seu respectivo gráfico de corrente versus tempo de descarga.

As 4 curvas da FIG.V.2 foram traçadas a partir de dados experimentais, obtidos em nosso laboratório, de 4 diferentes baterias chumbo-ácido tipo S.L.I..

Todos os testes foram efetuados dentro das normas da ABNT e o valor da capacidade nominal de cada bateria , definido para 20 horas, foi corrigido para 27 °C.

Os valores obtidos do expoente, n, estão coerentes com o esperado: $1.22 < n < 1.40$. Devemos ressaltar que o valor de K é diretamente proporcional a capacidade da bateria.

A seguir resumimos os dados obtidos e comparamos com os valores nominais.

CURVA	CAPACIDADE NOMINAL (Ah)	K	n	CAPACIDADE EXPERIMENTAL (Ah)
A	48	55.38	1.40	39
B	36	33.47	1.22	29
C	36	36.34	1.26	31
D	36	46.69	1.33	38

A diferença entre os valores experimentais e os determinados pelos fabricantes evidência a necessidade de um rígido controle de qualidade para termos no mercado nacional um produto de qualidade aceitável e confiável. Realizamos perto de 300 testes de descarga em vários valores de corrente em diferentes baterias de fabricação nacional e julgamos que as 4 curvas apresentadas são um reflexo da totalidade dos testes efetuados.

V.3.1.b. Equação de Shepherd (Simulação da tensão versus tempo para um determinado valor de corrente de descarga)

Na FIG.V.3 apresentamos um fluxograma para cálculo das constantes da equação de Shepherd:

$$E = Es - K * (Q/(Q - I*t)*I - N*I$$

onde temos na saída os valores das constantes, Es, K, Q e N. O programa ainda permite obter as curvas de tensão versus tempo para um determinado valor de corrente.

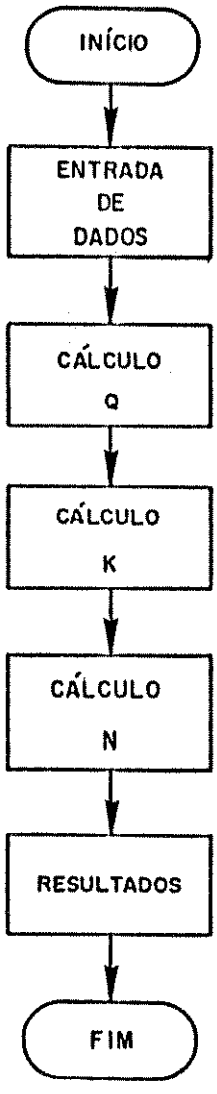


FIG.V.3 - Fluxograma para o cálculo das equações de Shepherd

Para a execução do programa precisamos:

I - Entrada de Dados.

- 2 curvas tensão versus tempo como mostrado na FIG.V.4.

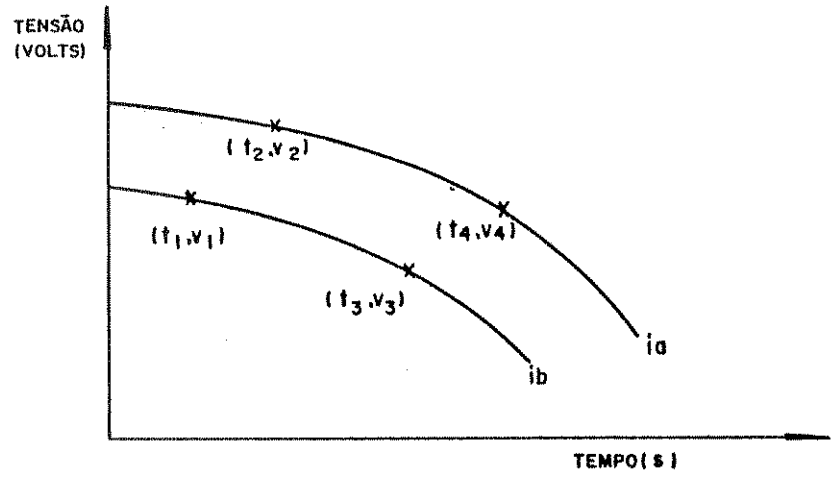


FIG.V.4 - Curvas tensão versus tempo com indicação das variáveis de entrada do programa para a determinação da equação de Shepherd.

A entrada de dados se dá através de 2 pontos de tensão versus tempo de cada curva conforme indicado na FIG.V.4.; ou seja :

$$ia < ib \quad e \quad t1 < t2 < t3 < t4.$$

II - Saída de Dados:

- As constantes da equação de Shepherd.

Na FIG.V.5 apresentamos a listagem deste programa.

```
  4:USING "#####
    ###.##"
  5:PRINT "CORRE
    NTE AMP."
 10:INPUT "IA=(A
    )";I:PRINT "
    IA=";I
 20:INPUT "IB=(A
    )";B:PRINT "
    IB=";B
 25:PRINT "TEMPO
      SEGUNDOS"
 30:INPUT "T1=";
    T:PRINT "T1=
    ";T
 40:INPUT "T2=";
    V:PRINT "T2=
    ";V
 50:INPUT "T3=";
    X:PRINT "T3=
    ";X
 60:INPUT "T4=";
    Y:PRINT "T4=
    ";Y
 65:PRINT "TENSA
    O EM VOLTS"
 70:INPUT "E1=";
    U:PRINT "E1=
    ";U
 80:INPUT "E2=";
    D:PRINT "E2=
    ";D
 90:INPUT "E3=";
    R:PRINT "E3=
    ";R
100:INPUT "E4=";
    P:PRINT "E4=
    ";P
110:E=(D-P)/(U-R
    )
120:G=I*V:H=I*Y
130:J=B*T:L=B*X
140:E=(E*B*(L-J)
    )/(I*(H-G)
150:IF E<>1GOTO
    187
160:Q=(J*L-G*H)/
    (J+L-G-H)
170:GOTO 190
180:Q=(E*(G+H)-J
    -L)+J((E*(G+
    H)-J+L)^2-4*
    (E-1)*(E*G*H
    -J*L))/(2*(E
    -1))
187:Q=(-(-E*(G+H
    )+J+L))/(2*(
    E-1))
188:A=ABS (E*(G+
    H)-(J+L)):A=
    A^2:A=A-4*(E
    -1)*(E*H*G-J
    *L)
189:Q=Q+ABS ((IA
    )/(2*(E-1)))
190:PRINT "Q=";Q
200:K=((D-P)*(Q-
    H)*(Q-G))/(I
    *Q*(H-G))
205:USING "##.##
    ##^^"
210:PRINT "K=";K
220:N=(P-U+K*(Q/
    (Q-H))*I-K*(
    Q/(Q-J))*B)/
    (B-I)
230:PRINT "N=";N
235:S=P+K*(Q/(Q-
    H))*I+N*I
236:USING "#####
    #.##"
238:PRINT "ES=";
    S
240:END
```

FIG.V.5 - Programa computacional para o cálculo das constantes da equação Shepherd.

Um programa adicional permite traçar as curvas tensão versus tempo para valores constantes de corrente.

I - Entrada de Dados

- Constantes da equação de Shepherd
- Valor da corrente de descarga (A)

II - Saída de Dados

- Curva tensão versus tempo.

Este programa é apresentado na FIG.V.6.

```
2000:"K":CSIZE 1:COLOR 3:LPRINT "EQ
     UACAO  DE SHEPHERD"
2001:USING "########.####"
2010:INPUT "ES=";S:LPRINT "ES=";S
2020:INPUT "N=";N:LPRINT "N=";N
2030:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q
2040:INPUT "K=";K:LPRINT "K=";K
2050:INPUT "I=";I:LPRINT "I=";I
2060:INPUT "T=";T:LPRINT "T=";T
2070:T=T*3600
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,2
2120:LINE (10,110)-(0,100),0,2
2130:LINE (10,110)-(20,100),0,2
2140:LINE (05,-100)-(200,-100),0,2
2150:LINE (200,-100)-(190,-90),0,2
2160:LINE (200,-100)-(190,-110),0,2
2165:COLOR 3
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "TENSAO(U)"
2180:GLCURSOR (60,-120):ROTATE 0:
     COLOR 3
2190:LPRINT "  TEMPO (H)":COLOR 2
2200:GLCURSOR (0,-100):LPRINT "10.5
     "
2210:GLCURSOR (0,-50):LPRINT "11"
2220:GLCURSOR (0,0):LPRINT "11.5"
2230:GLCURSOR (0,50):LPRINT "12"
2240:GLCURSOR (0,100):LPRINT "12.5"
2250:LINE (6,-50)-(10,-50),0,2
2260:LINE (6,0)-(10,0),0,2
2270:LINE (6,50)-(10,50),0,2
2280:LINE (6,100)-(10,100),0,2
2290:LINE (40,-100)-(40,-106),0,2
2300:LINE (70,-100)-(70,-106),0,2
2310:LINE (100,-100)-(100,-106),0,2
2320:LINE (130,-100)-(130,-106),0,2
2330:LINE (160,-100)-(160,-106),0,2
2340:LINE (190,-100)-(190,-106),0,2
2350:A=T/12:W=0:X2=10
2360:FOR D=1TO 12
2370:GOSUB 2800
2380:Y1=L:X1=X2
2390:W=W+A
2400:GOSUB 2800
2410:Y2=L:X2=X1+15
2415:IF Y2<-100GOTO 2500
2416:IF Y2>Y1GOTO 2500
2420:LINE (X1,Y1)-(X2,Y2)
2430:NEXT D
2440:END
2500:LINE (X1,Y1)-(X2,-100)
2510:END
2800:E=S-(N*I)-(Q/(Q-(I*W)))*K*I
2900:L=-1150+100*E
3000:RETURN
4000:"M":CSIZE 1:LLIST 2000,
```

FIG.V.6 - Listagem para obtenção da curva tensão versus tempo para diferentes valores de corrente.

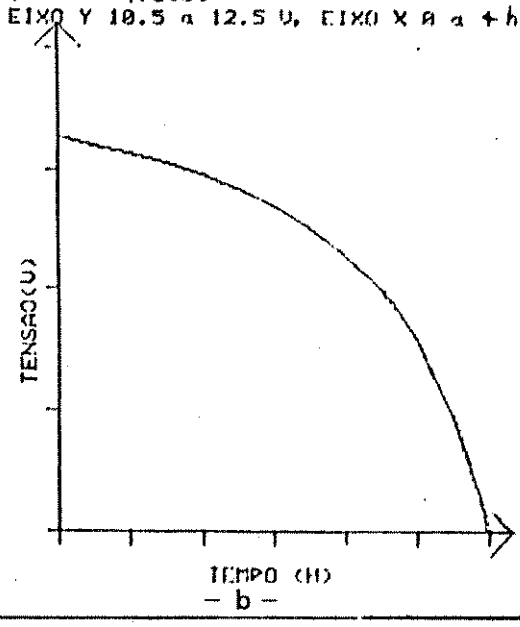
A seguir apresentamos na FIG.V.7 alguns exemplos ilustrativos da Equação de Shepherd.

-I-

```
CORRENTE AMP.
IA=        6.00
IB=       10.00
TEMPO  SEGUNDOS
T1=     1800.00
T2=     4500.00
T3=     5112.00
T4=    10800.00
TENSAO EM VOLTS
E1=       12.00
E2=       12.00
E3=       11.50
E4=       11.50
Q=   108267.43
K= 7.1929E-02
N=-7.1941E-02
ES=     12.14
```

- a -

```
EQUACAO  DE SHEPHERD
ES=      12.1400
N=       -0.0719
Q=  108267.4300
K=        0.0719
I=        6.0000
T=        4.0000
EIXO Y 10.5 a 12.5 V, EIXO X 0 a 4 h
```



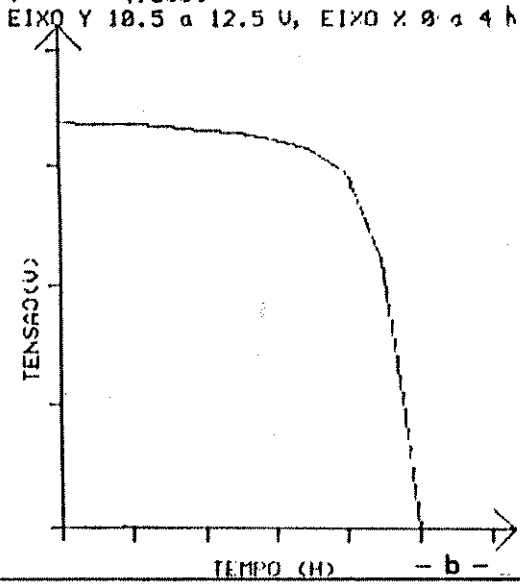
- b -

-II-

```
CORRENTE AMP.
IA=       15.00
IB=       20.00
TEMPO  SEGUNDOS
T1=     1080.00
T2=     1620.00
T3=     2880.00
T4=     4140.00
TENSAO EM VOLTS
E1=       11.74
E2=       11.87
E3=       11.08
E4=       11.01
Q=    70099.61
K= 7.9274E-03
N= 1.6568E-02
ES=     12.30
```

- a -

```
EQUACAO  DE SHEPHERD
ES=      12.3000
N=        0.0100
Q=   70099.6100
K=        0.0079
I=        6.0000
T=        4.0000
EIXO Y 10.5 a 12.5 V, EIXO X 0 a 4 h
```



- b -

FIG.V.7 Exemplos ilustrativos da Equação de Shepherd.

a - Cálculo das Constantes

b - Curvas para alguns valores de corrente

Para obtermos as curvas representadas na FIG.V.7 ressaltamos:

- o valor do tempo, T, em horas na entrada do programa determina o fundo de escala do eixo x dos gráficos I e II da FIG.V.7.

- na curva I a capacidade da bateria em estudo é de 108267.43 C enquanto que na curva II temos o valor de 70099.61 C. Esta diferença de capacidade irá determinar um maior tempo de duração da descarga a corrente constante de 6 A obtido na curva I.

A importância do conhecimento da curva de tensão versus tempo para um determinado valor constante de corrente de descarga esta em possibilita-nos determinar por exemplo o tempo restante de descarga desta bateria a partir do conhecimento do valor de sua tensão, desde que o histórico (estado de carga) desta bateria seja conhecido.

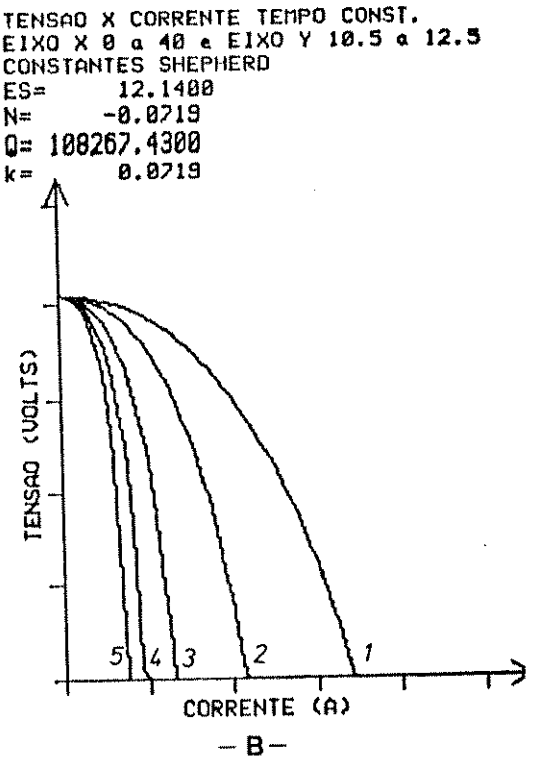
Atualmente estamos orientando um trabalho de iniciação científica,Ref. 13, visando determinar o desvio apresentado pela Equação de Shepherd quando estimamos um valor de tensão de uma bateria quando descarregada com uma corrente constante, i, fora da faixa valores de corrente limitado por ia e ib. Como resultados preliminares detectamos desvios da ordem de 10 % ; obtidos quando utilizamos valores de 10 A acima ou abaixo da faixa ia e ib.

O objetivo final do trabalho citado será modificar a Equação de Sherpherd visando aproximar os valores de tensão previstos dos valores obtidos experimentalmente, independentemente do valor de corrente de descarga a que a bateria, analisada previamente, for submetida.

Na FIG.V.8.a e b apresentamos o comportamento da tensão da bateria versus corrente de descarga para um dado tempo fixo.

```
2000:"K":CSIZE 1:COLOR 0:LPRINT "TE
     NSAO X CORRENTE TEMPO CONST."
2001:USING "########.####":CLEAR
2003:DIM X(2),Y(2)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 40 e EIXO Y
      10.5 a 12.5"
2025:B=1+B:Y(2)=2
2030:INPUT "T=";T
2031:IF B>16GOTO 2290
2035:LPRINT "CONSTANTES SHEPHERD"
2040:INPUT "ES=";S:LPRINT "ES=";S
2050:INPUT "N=";M:LPRINT "N=";M
2055:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q
2065:INPUT "k=";W:LPRINT "k=";W
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (05,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "TENSAO (VOLTS)"
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "CORRENTE (A)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (46,-100)-(46,-106),0,0
2215:LINE (82,-100)-(82,-106),0,0
2216:LINE (118,-100)-(118,-106),0,0
2217:LINE (154,-100)-(154,-106),0,0
2218:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2290:Y(1)=100*S-1150:X(1)=10:I=.5
2294:IF B=1THEN GOTO 2320
2295:IF Y(2)=-100THEN GOTO 2025
2320:GOSUB 3000
2330:GOTO 2295
3000:E=S-W*(Q/(Q-(I*T)))*I-M*I
3060:X(2)=4.5*I+10
3070:Y(2)=100*E-1150
3075:IF Y(2)<-100OR Y(2)>140THEN
     LET Y(2)=-100
3077:IF E<10.0OR J>13.5THEN LET Y(2
     )=-100
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
     ,0
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3110:I=I+.5
3120:RETURN
```

—A—



—B—

FIG.V.8.a. Programa computacional para avaliação da tensão versus corrente de descarga para um dado tempo fixo.

b. Exemplo aplicativo para uma dada bateria.

Tempos de descarga : 1 - 1800 s, 2 - 3600 s,

3 - 7200 s, 4 - 10800 s

5 - 14300 s

Na FIG.V.8.b. está representada uma outra forma da equação de Sherpherd. Anteriormente, FIG.V.7.b tinhamos :

$E = f(t)$ para I = constante, agora temos,

$E = f(I)$ para t = constante.

A popularização da forma apresentada na FIG.V.7 deve-se ao fato de que em um grande número de aplicações a bateria é descarregada a corrente constante.

A FIG.V.8.b se presta ao fato de precisarmos algumas vezes conhecer o comportamento de uma bateria após um tempo fixo de utilização, onde o valor da queda de tensão da bateria é importante. Por exemplo, para um veículo elétrico a tensão máxima fornecida pela bateria no início de um trajeto tende a diminuir, caso não haja frenagem regenerativa durante a utilização do veículo; desta forma fica evidenciada a necessidade no projeto da fonte de energia para o veículo elétrico de considerarmos um valor mínimo de tensão na bateria.

Portanto um valor mínimo de tensão da bateria prevendo uma futura recarga, 10.5 V para a bateria chumbo-ácido, será utilizado para especificar o conjunto de baterias. O número de baterias a ser utilizado será então a tensão nominal da máquina dividida pelo valor mínimo de tensão da bateria. Este valor mínimo de tensão irá nos levar a um aumento da tensão aplicada a máquina elétrica, ordem de 14 % para a bateria chumbo-ácido, no início da utilização do veículo quando supostamente temos baterias carregadas; este acréscimo no entanto não irá ocasionar danos por sobretensão a máquina quando do início da utilização.

V.3.1.c Potência instantanemente transferida da bateria após um dado período de tempo de descarga.

A potência cedida a cada instante pela bateria é:

$$P = E * I \qquad (V.I)$$

Substituindo a equação de Shepherd na equação acima temos:

$$P = (Es - K * (Q / (Q - I * t)) * I - N * I) * I \qquad (V.II)$$

Para determinarmos a potência máxima transferida após um dado período de tempo de descarga devemos observar a seguinte restrição:

$$Es - K * (Q / (Q - I * t)) * I - N * I = 10.50 \qquad (V.III)$$

que é o valor de tensão convencionada nos terminais abaixo do qual se considera a bateria tecnicamente descarregada quando em operação de descarga, logo resolvendo a equação V.III podemos obter o valor de corrente para a máxima transferência de potência sem danificar a bateria.

O programa computacional para o cálculo da potência instantaneamente transferida após um dado período de tempo de descarga é mostrado na FIG.V.9.

```
2000:"K":CSIZE 1:LPRINT "POTENCIA T
     RANSFERIDA DA BATERIA"
2001:USING "#######.####":CLEAR
2005:DIM X(3),Y(3)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 40 e EIXO Y
      0 a 300"
2025:B=1+B:Y(2)=2
2030:L=0:INPUT "T=";T
2031:IF B>1GOTO 2290
2035:LPRINT "CONSTANTES SHEPHERD"
2040:INPUT "ES=";S:LPRINT "ES=";S
2050:INPUT "N=";M:LPRINT "N=";M
2055:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q
2065:INPUT "k=";W:LPRINT "k=";W
2070:LF +1
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (85,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "POTENCIA (W)"
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "CORRENTE (A)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (46,-100)-(46,-106),0,0
2215:LINE (82,-100)-(82,-106),0,0
2216:LINE (118,-100)-(118,-106),0,0
2217:LINE (154,-100)-(154,-106),0,0
2218:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2290:X(1)=10:Y(1)=-100:I=.5
2294:IF B=1THEN GOTO 2320
2295:IF Y(2)=-100THEN GOTO 2025
2320:GOSUB 3000
2330:GOTO 2295
3000:P=S*I-W*(Q/(Q-(I*T)))*I*I-M*I*
     I:J=P/I
3060:X(2)=4.5*I+10
3070:Y(2)=.6667*P-100
3071:IF J<10.5GOTO 3120
3075:IF Y(2)<-100OR Y(2)>140THEN
     LET Y(2)=-100
3077:IF J<5.00OR J>13.5THEN LET Y(2
     )=-100
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
     ,0
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3110:I=I+.5
3111:RETURN
3120:IF L=1GOTO 3075
3130:L=1:LINE (X(1),Y(1))-(X(1)+4,Y
     (1)+4),0,0,B
3140:GOTO 3075
4000:"M":CSIZE 1:LLIST 2000,
```

FIG.V.9 Programa computacional para o cálculo da potência instantaneamente transferida após um dado período de tempo de descarga.

Na FIG.V.10 mostramos alguns exemplos aplicativos deste programa.

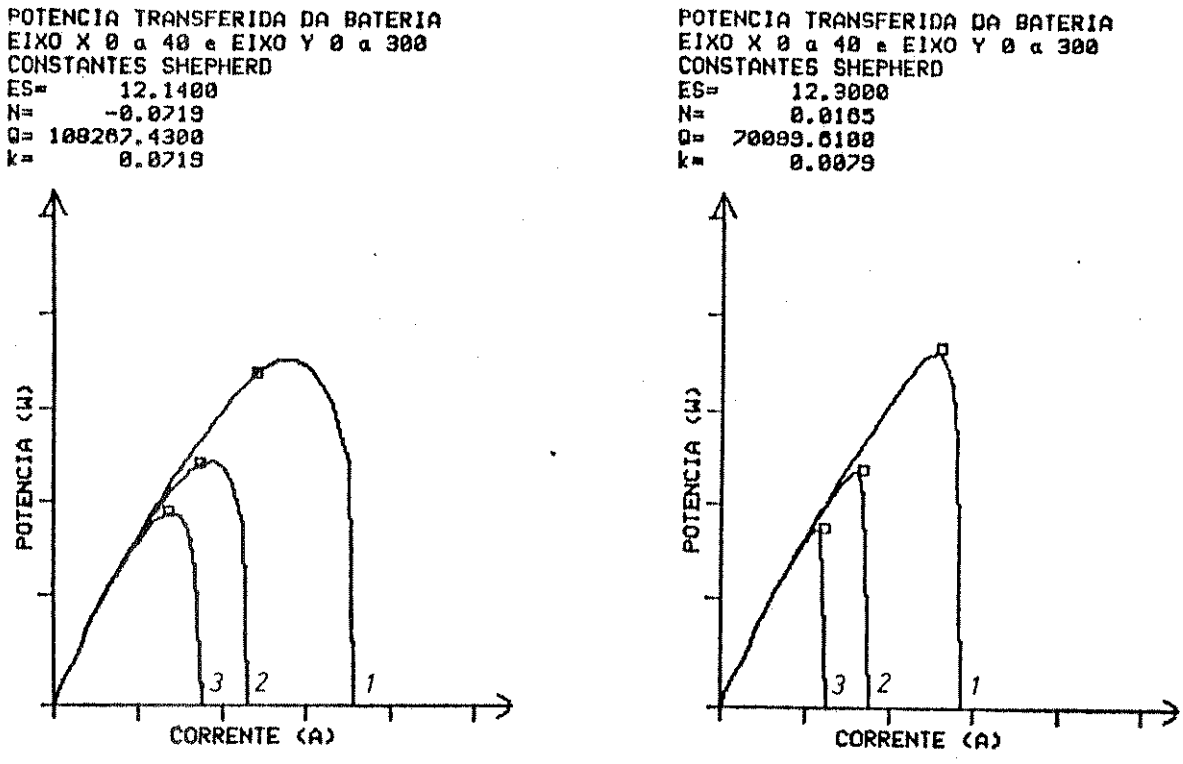


FIG.V.10 Potência versus corrente para diferentes valores de tempo de descarga : 1 - 3000 s, 2 - 5000 s, 3 - 7000 s.

Com a FIG.V.10 obtida a partir de dados experimentais determinados em nosso laboratório podemos prever o valor da corrente de descarga onde ocorre o máximo valor de potência transferida da bateria para um dado tempo fixo de descarga.

O pequeno quadrado assinalado nas curvas apresentadas representa o instante em que a bateria chumbo-ácido se encontra com o valor de tensão de 10.50 V.

A diferença deste modo de determinação do valor da corrente de descarga para a equação de Peukert, V.3.1.a, é que aqui estamos interessados em um valor instantâneo de corrente, que é função da queda de tensão da bateria.

V.3.1.d Potência instantaneamente transferida da bateria para um dado estado de descarga.

O estado de descarga de uma bateria é dado por :

$$f = \frac{i * t}{Q}$$

onde : i - corrente de descarga (A)

t - tempo de descarga (s)

Q - capacidade nominal da bateria (C).

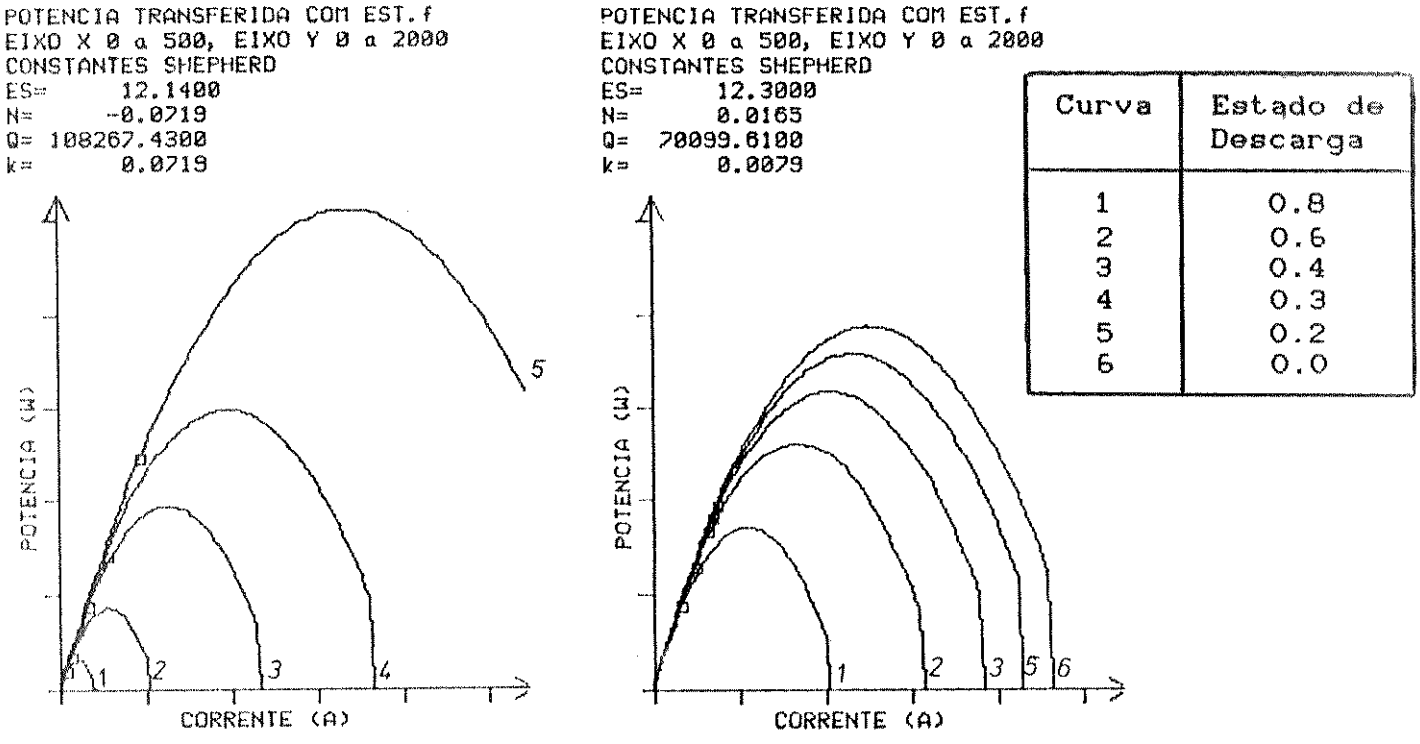
Portanto quando f $\rightarrow$ 1 temos a bateria descarregada e f $\rightarrow$ 0 a bateria carregada. As curvas de potência versus corrente de descarga, podem ser traçadas utilizando o programa computacional apresentado na FIG.V.11.

Na FIG.V.12.a mostramos as curvas obtidas com baterias de diferentes capacidades, Q = 108267.43 C e 70099.61 C, analisadas em nosso laboratório.

Curvas semelhantes foram obtidas por Herbert e Anderson (10). Nas curvas por nós obtidas assinalamos um ponto com um pequeno quadrado, a partir deste ponto a tensão da bateria está abaixo de 10.5 V, com o aumento do valor da corrente de descarga.

```
2000:"K":CSIZE 1:LPRINT "POTENCIA T
     RANSFERIDA COM EST.f"
2001:USING "########.####":CLEAR
2005:DIM X(3),Y(3)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 500, EIXO Y
     0 a 2000"
2025:B=1+B:Y(2)=2
2030:L=0:INPUT "f=";F
2031:IF B>1GOTO 2290
2035:LPRINT "CONSTANTES SHEPHERD"
2040:INPUT "ES=";S:LPRINT "ES=";S
2050:INPUT "N=";M:LPRINT "N=";M
2055:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q
2065:INPUT "k=";W:LPRINT "k=";W
2070:LF +1
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (05,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "POTENCIA (W)"
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "CORRENTE (A)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (46,-100)-(46,-106),0,0
2215:LINE (82,-100)-(82,-106),0,0
2216:LINE (118,-100)-(118,-106),0,0
2217:LINE (154,-100)-(154,-106),0,0
2218:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2290:X(1)=10:Y(1)=-100:I=.5
2293:IF B=1.0THEN GOTO 2320
2295:IF Y(2)=-100THEN GOTO 2025
2320:GOSUB 2990
2330:GOTO 2295
2990:T=(F*Q)/I
3000:P=S*I-W*(Q/(Q-(I*T)))*I*I-M*I*
     I:J=P/I
3060:X(2)=.36*I+10
3070:Y(2)=.10*P-100
3071:IF J<10.5GOTO 3120
3075:IF Y(2)<-100OR Y(2)>140THEN
     LET Y(2)=-100
3077:IF J<1THEN LET Y(2)=-100
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
     ,0
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3110:I=I+5
3111:RETURN
3120:IF L=1GOTO 3075
3130:L=1:LINE (X(1),Y(1))-(X(1)+4,Y
     (1)+4),0,0,B
3140:GOTO 3075
4000:"M":CSIZE 1:LLIST 2000,
```

FIG.V.11 Programa Computacional para o cálculo da potência versus corrente de descarga para um dado estado de descarga.



Curva	Estado de Descarga
1	0.8
2	0.6
3	0.4
4	0.3
5	0.2
6	0.0

FIG.V.12.a Potência versus corrente para um dado estado de descarga : 1 - 0.8, 2 - 0.6, 3 - 0.4.

Na FIG.V.12.a temos valores de corrente onde obtenho a máxima transferência de potência de uma bateria com um determinado estado de descarga f. Resumindo os dados da FIG.V.12.a para os pontos onde ocorre a máxima transferência de potência da bateria obtemos :

f	BATERIA I (Q = 108267.43 C)		BATERIA II (Q = 70099.61 C)	
	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)
0.8	20	100	100	600
0.6	60	300	160	1000
0.4	130	700	210	1050
0.3	200	1200	250	1200
0.2	350	2050	240	1450
0.0	-	-	260	1550

Pelos dados apresentados constatamos que os mesmos estão incorretos a partir do ponto em que a bateria apresenta valores de estado de descarga superiores a 0.3. Por que isto ocorre ?

Este erro deve-se a alguns fatores que ressaltamos a seguir :

1 - As constantes da Equação de Shepherd foram obtidos com valores de corrente entre 6 e 20 A. A faixa de corrente onde estão situados os pontos incorretos é de 20 a 250 A.

2 - O tempo de descarga das baterias com os valores de corrente acima de 20 A e com f > 0.4 é sempre inferior a 10 minutos (Ver FIG.

V.12.b). Na FIG.V.12.b mostramos o valor da tensão da bateria em função do tempo de descarga a corrente constante de 150 a 200 A. Observe que para a bateria totalmente carregada o tempo de descarga é da ordem de 6 minutos para 150 A e 4 minutos para 200 A.

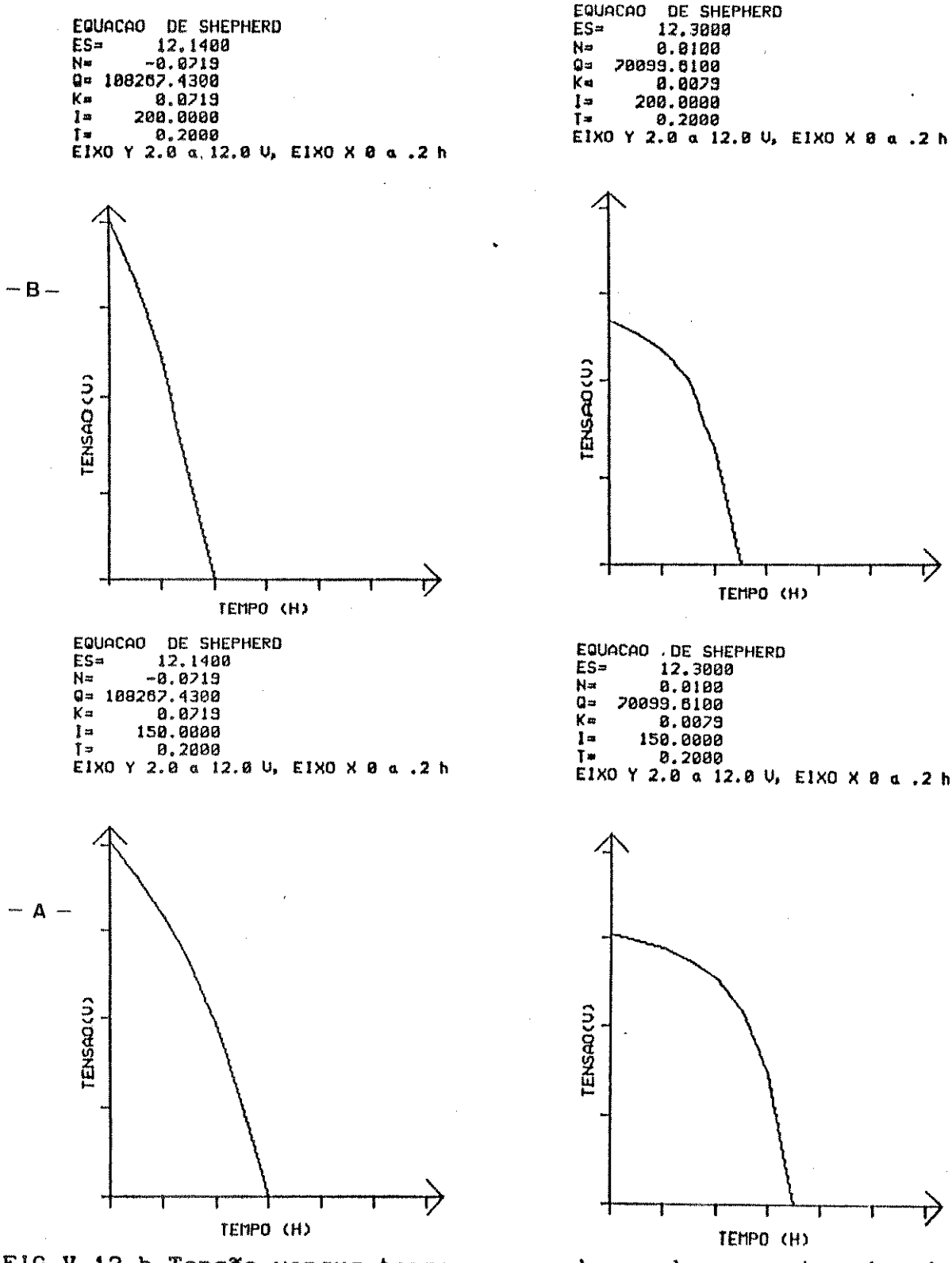


FIG.V.12.b Tensão versus tempo para valores de corrente de descarga mantidos constantes : A - 150 A e B - 200 A

3 - Os testes de descarga efetuados com baterias nacionais não são reprodutivos e apresentam variações de até 15 minutos em testes de 2.0 horas, portanto o modelo da equação de Shepherd nós dá desvios da ordem de 1 minuto para valores de corrente elevados (> 150 A) que provocam a incoerência nos dados dos valores instantâneos de potência.

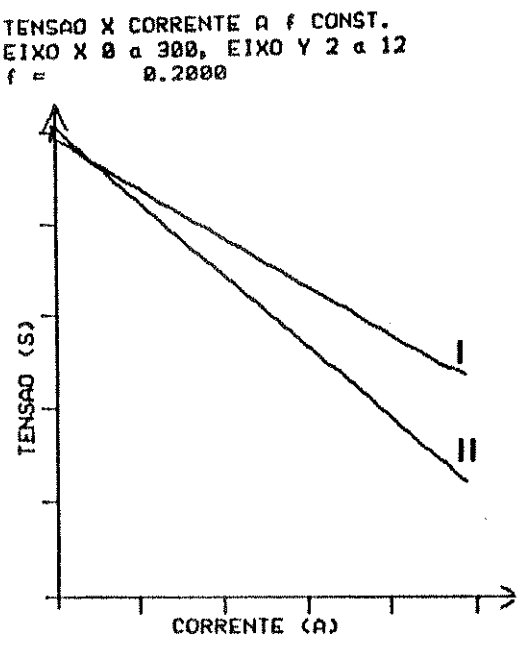
4 - Quando da determinação das constantes de Shepherd observamos o valor de 10.50 V como valor final da tensão de descarga da bateria, que no início do teste apresentava carga total (ponto onde o eletrólito da bateria atingiu o máximo valor de densidade para esta bateria, a partir do qual não apresenta mais variação de densidade, independente do valor da corrente de carga).

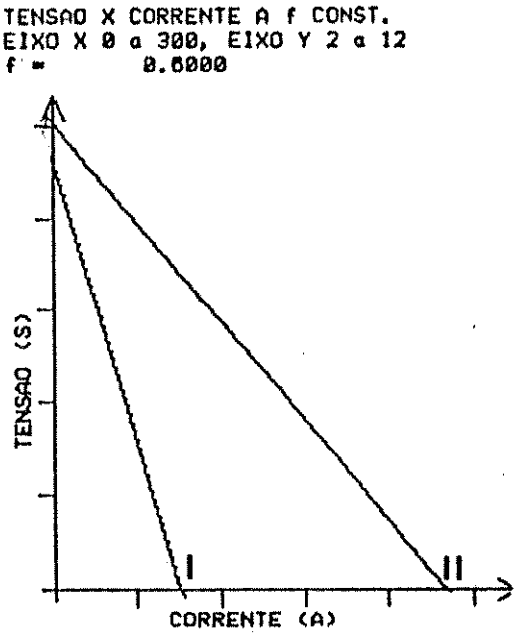
Com os dados da equação de Shepherd plotamos curvas de tensão versus tempo simulando diversos estados de descarga das baterias em estudo. Estas curvas foram plotadas 2 a 2 é são apresentadas na FIG. V.12.c.

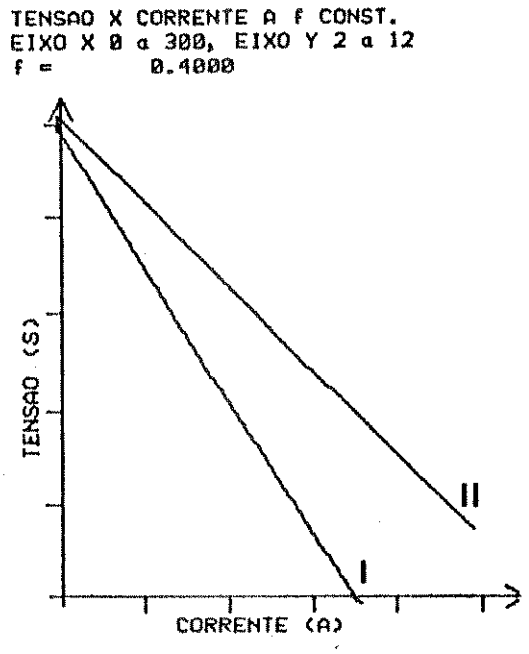
Observa-se na FIG.V.12.c que apenas no estado de descarga com valor de f = 0.2 a bateria I (Q = 108267.43 C) apresenta valores de tensão maiores que a bateria II (Q = 70099.61 C) para um mesmo valor de corrente de descarga; fato este incorreto (todas as curvas referentes a bateria I deveriam ser superiores as da bateria 2) e que motivou este comentário e os anteriores.

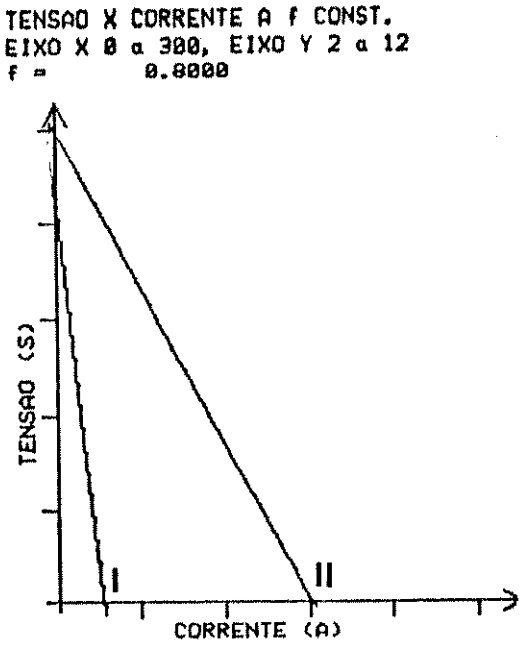
Portanto quando utilizamos a equação de Shepherd precisamos estar atentos à sua faixa de aplicabilidade.

Apesar destes fatos podemos determinar claramente que a bateria I possue capacidade superior a bateria II observando as FIG.V.13 e V.14.







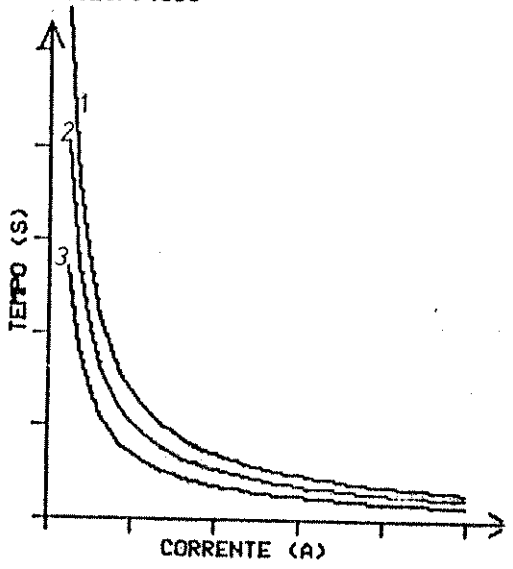


Bateria	Capacidade (C)
I	108267.43
II	70099.61

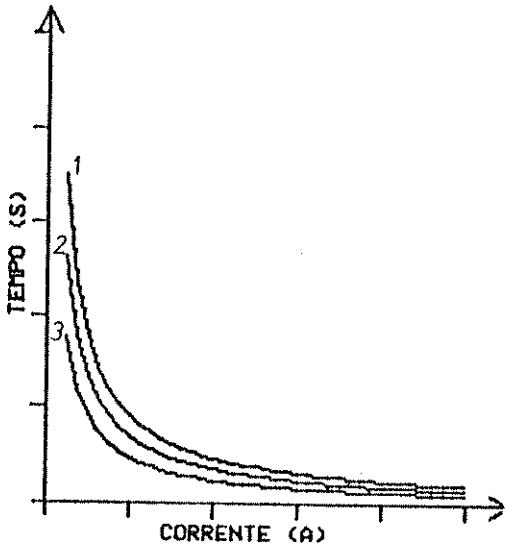
FIG.V.12.c Tensão versus tempo para diferentes valores de estado de descarga.

```
2000:"K":CLEAR :CSIZE 1:LPRINT "T =
     (F * Q)/I"
2001:USING "########.####"
2005:DIM X(3),Y(3)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 200, EIXO Y
     0 a 8000"
2025:B=B+1
2030:L=0:INPUT "f=";F
2031:IF B>1GOTO 2290
2040:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q:LF
     +1
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (05,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-20):ROTATE 3:
     LPRINT "TEMPO (S)"
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "CORRENTE (A)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (46,-100)-(46,-106),0,0
2215:LINE (82,-100)-(82,-106),0,0
2216:LINE (118,-100)-(118,-106),0,0
2217:LINE (154,-100)-(154,-106),0,0
2218:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2290:X(1)=10:Y(1)=.0025*F*Q-100:I=1
     5
2293:IF B=1THEN GOTO 2320
2295:IF I>200THEN GOTO 2025
2320:GOSUB 2990
2330:GOTO 2295
2990:T=(F*Q)/I
3060:X(2)=.9*I+10
3070:Y(2)=.025*T-100
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2))
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3110:I=I+5
3111:RETURN
4000:"M":CSIZE 1:LLIST 2000,
```

```
T = (F * Q)/I
EIXO X 0 a 200, EIXO Y 0 a 8000
Q= 108267.4300
```




```
T = (F * Q)/I
EIXO X 0 a 200, EIXO Y 0 a 8000
Q=  70099.6100
```



Curva	Estado de Descarga
1	0.8
2	0.6
3	0.4

FIG.V.13 Tempo de descarga versus corrente para um dado estado de descarga.(a) - Programa Computacional.

(b) - Exemplo Aplicativo.

Para uma máquina de p pólos, a velocidade síncrona de rotação do campo girante formado pelo enrolamento do estator é dada por :

$$n1 = 2\ f1/\ p \quad (r.p.s.) \qquad [4.5.b]$$

ou,

$$n1 = 120 * f1/\ p \quad (r.p.m.) \qquad [4.5.c]$$

onde :

n1 : velocidade de rotação do campo magnético do estator.

f1 : frequência da fonte, hertz (ciclos/s)

p : número de pólos.

Se n1 for a velocidade do campo girante do estator, então o rotor estará girando a velocidade n tal que n < n1.

Os condutores do rotor são cortados por um fluxo de velocidade angular, n2 :

$$n2 = n1 - n \qquad [4.6.a]$$

onde : n2 - velocidade relativa entre o rotor e o estator,

Dividindo e multiplicando [4.6.a] por n1 :

$$n2 = \frac{n1 - n}{n1}\ n1 \qquad \text{onde } (n1 - n) / n1 = s \qquad [4.6.b]$$

sendo s definido como escorregamento. O valor operacional do escorregamento, ou deslizamento, é usualmente pequeno (0.2 a 0.05)

Na FIG.V.13.a está ilustrado o programa computacional utilizado para obtermos as curvas apresentadas na FIG.V.13.b. Estas curvas foram obtidas a partir da relação :

$$t = f * Q / I$$

onde os valores das capacidades nominais, Q, das baterias foram obtidos experimentalmente.

Observa-se nestas curvas que quanto maior for o tempo de descarga da bateria um maior estado de descarga, $f \rightarrow 1$, é atingido, para um mesmo valor de corrente.

Na FIG.V.14.a temos um programa computacional utilizado para obtermos a comparação entre o tempo de descarga e valores de corrente para um dado estado de descarga entre duas baterias com a mesma capacidade nominal (dada pelo fabricante). Esta comparação é mostrada na FIG.V.14.b; nesta observamos em cada estado de descarga que para a bateria com maior capacidade energética real, maior valor de Q, o tempo de descarga é maior para um mesmo valor de corrente constante dentro da faixa de aplicabilidade da equação de Shepherd.

Após todos estes comentários sobre o item potência instantânea transferida da bateria para um dado de descarga; tivemos a motivação de realizar o seguinte experimento :

1 - Descarregamos uma bateria e determinamos suas constantes de Shepherd, FIG.V.14.c.

2 - Sabemos que o estado de descarga é dado por :

$$f = i * t / Q$$

A equação de Shepherd é dada por :

$$E = Es - K\ i\ (Q / (Q - i\ t)) - N\ i$$

dividindo e multiplicando o 2º termo do 2º membro por Q e substituindo pelo estado de descarga, f :

$$E = Es - K\ i\ (1 / (1 - f)) - N\ i$$

Na forma acima a equação de Shepherd nos dá o valor inicial de tensão que uma bateria com estado de descarga inicial, f, terá quando retirada uma corrente i.

3 - Provocamos vários picos de corrente em uma bateria inicialmente carregada é determinamos experimentalmente :

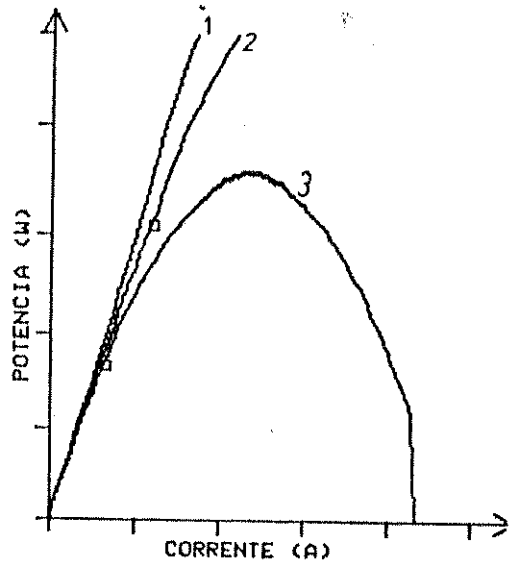
Tensão no pico (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Estado de Descarga
11.20	130	1456	0.085
11.12	130	1446	0.089
10.20	130	1326	0.091
10.10	130	1313	0.097
9.50	126	1197	0.096
9.50	121	1150	0.097
9.00	160	1440	0.095
9.00	120	1080	0.100

4 - Calculamos e traçamos de curvas potência instantaneamente transferida da bateria para os vários estados de descarga determinados experimentalmente, FIG.V.14.d. Através desta figura observamos que os resultados previstos estão coerentes com os resultados experimentais obtidos; observe no entanto que os valores dos estados de descarga são inferiores a 0.1.

```
CORRENTE AMP.
IA=        2.25
IB=       10.00
TEMPO  SEGUNDOS
T1=     1800.00
T2=     3000.00
T3=     3600.00
T4=    36000.00
TENSAO EM VOLTS
E1=       12.10
E2=       12.30
E3=       11.00
E4=       11.00
Q=   210384.70
K= 9.7450E-01
N=-1.0569E 00
ES=     12.18
```

- c -

```
POTENCIA MAXIMA TRANSF.COM EST.f
EIXO X 0 a 500, EIXO Y 0 a 2000
CONSTANTES SHEPHERD
ES=       12.1800
N=        -1.0569
Q= 210384.7000
k=        0.9745
```



Curva :

1 - f = 0.10

2 - f = 0.09

3 - f = 0.08

- d -

FIG.V.14.c Determinação das Constantes da Equação de Shepherd.

V.14.d Potência instantaneamente transferida versus corrente de descarga.

Quanto ao experimento realizado ressaltamos :

- Os valores de corrente foram obtidos utilizando como carga um motor de partida de automóvel Volkswagem convencional operando em vazio (com carga este motor de partida de automóvel, exige corrente da ordem de 400 A).

- Para medirmos os valores de corrente utilizamos 2 amperímetros com fundo de escala de 100 A ligados em paralelo entre si.

V.3.1.e Energia Transferida da Bateria.

A energia transferida da bateria para um dado sistema consumidor de energia pode ser calculada como :

$$K = E * I * t * 0.278\ E{-}6 \qquad (V.1)$$

onde : K - energia (KWh)

E - valor médio de tensão entre o tempo inicial e o tempo final de descarga (Volts)

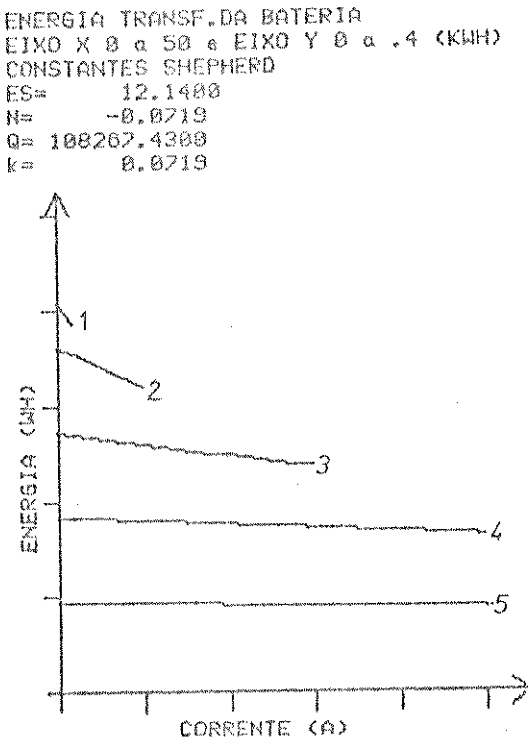
t - tempo de descarga (s)

I - corrente de descarga (A)

Nas FIG.V.15.a mostramos um programa computacional que permite calcular o comportamento de uma bateria até um dado estado de descarga, FIG.V.15.b..

```
2000:"K":CSIZE 1:COLOR 0:LPRINT "EN
     ERGIA TRANSF.DA BATERIA"
2001:USING "#####.####":CLEAR
2005:DIM X(3),Y(3)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 50 e EIXO Y
     0 a .4 (KWH)"
2025:B=1+B:Y(2)=2
2030:L=0:INPUT "f=";F
2031:IF B>1GOTO 2290
2035:LPRINT "CONSTANTES SHEPHERD"
2040:INPUT "ES=";S:LPRINT "ES=";S
2050:INPUT "N=";N:LPRINT "N=";N
2055:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q
2065:INPUT "k=";W:LPRINT "k=";W
2070:LF +1
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (05,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "ENERGIA (WH) "
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "CORRENTE (A)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (46,-100)-(46,-106),0,0
2215:LINE (82,-100)-(82,-106),0,0
2216:LINE (118,-100)-(118,-106),0,0
2217:LINE (154,-100)-(154,-106),0,0
2218:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2290:X(1)=10:T=F*Q/1:E=S-W*(1/(1-F)
     )*1-M*1
2292:E=(S+E)/2:Y(1)=T*1*E*.278E-6*5
     00-100:I=2
2294:IF B=1THEN GOTO 2320
2295:IF Y(2)=-100THEN GOTO 2025
2320:GOSUB 2990
2330:IF I>50GOTO 2025
2340:GOTO 2295
2990:T=(F*Q)/I
3000:E=S-W*(1/(1-F))*I-M*I:E=(S+E)/
     2:P=T*I*E
3010:P=P*.278E-6
3060:X(2)=3.6*I+10
3070:Y(2)=500*P-100
3075:IF Y(2)<-100OR Y(2)>100THEN
     GOTO 2025
3077:IF E<10.5OR E>5THEN GOTO 2025
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
     ,0
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3110:I=I+2
3111:RETURN
3120:IF L=1GOTO 3075
3130:L=1:LINE (X(1),Y(1))-(X(1)+4,Y
     (1)+4),0,0,B
3140:GOTO 3075
4000:"M":CSIZE 1:LLIST 2000,
```

FIG.V.15 Energia cedida por uma bateria até um dado estado de descarga. (a) - Programa Computacional.



Curva	Estado de Descarga
1	0.95
2	0.80
3	0.60
4	0.40
5	0.20

FIG.IV.15 Energia cedida por uma bateria até um dado estado de descarga.(b) - Exemplo Aplicativo.

Pela FIG.V.15.b observa-se que a máxima energia obtida de uma bateria é obtida com baixos valores de corrente.. Este efeito é previsto teoricamente, pois somente com uma baixa velocidade reacional obtemos uma homogeneidade do eletrólito próximo das placas, o que não ocorre com altos valores de corrente, que provocam uma alta reatividade do eletrólito próximo das placas, causando uma baixa concentração, impedindo desta maneira que a reação se processe uniformenente, sendo possível a utilização da bateria sómente após um período de repouso.

O valor médio de tensão, E_m, estimado para o cálculo da energia transferida da bateria é obtido a partir da equação de Shepherd.

Temos o valor da tensão no início da descarga, E_s, e o valor final da tensão é calculado a partir de um valor do estado de descarga final, f, obtido descarregando a bateria a corrente constante, I. O valor médio da tensão será dado por :

$$E_m = (E_s + E_s - (1 / (1-f)) * K * I - N * I)/ 2.$$

Na FIG.V.16.a e V.16.b temos o comportamento de uma bateria analisada experimentalmente em nosso laboratório para diferentes tempos de descarga.

Observa-se pela FIG.V.16.b que o valor de máxima transferência de energia nem sempre ocorre onde a tensão está acima de 10.50 V; este valor, 10.50 V, está indicado na curva por um pequeno quadrado.

O valor de corrente onde ocorreu a máxima transferência de energia num dado tempo de descarga também pode ser obtido pela equação de Peukert (a equação de Peukert nos dá o valor de corrente que irá descarregar completamente a bateria em função do tempo).

Para os dados apresentados na FIG.V.16.b comparamos os valores de corrente, para a máxima transferência de energia sem danificar a bateria obtidos utilizando a equação de Peukert, para diferentes tempos de descarga são :

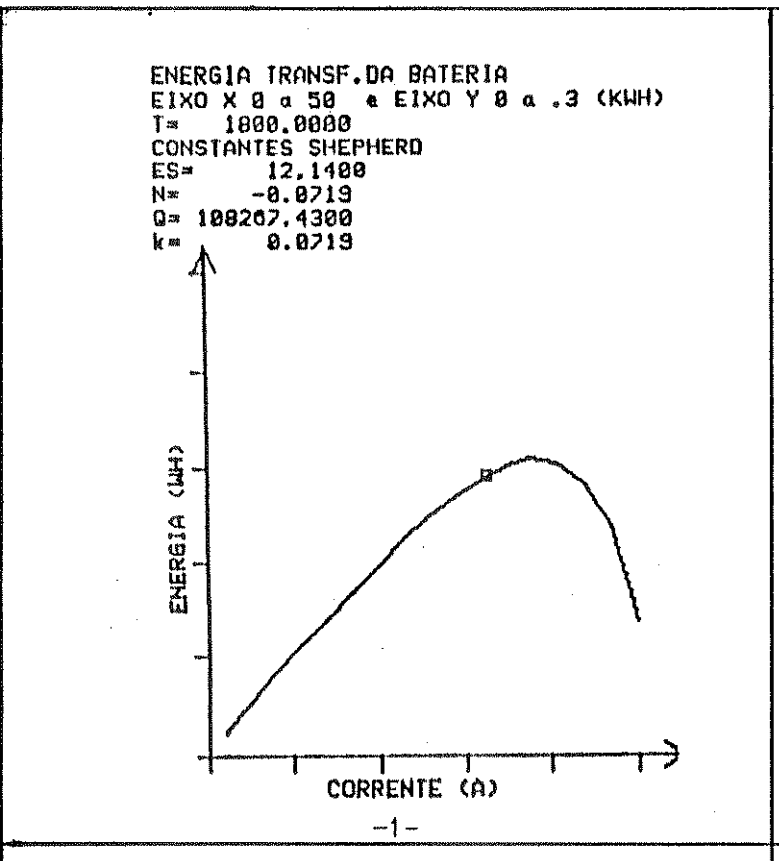
Tempo (s)	CORRENTE (A)		
	Equação de Peukert	Método Gráfico	Desvio (%)
1800	30.51	32.0	4.6
3600	17.36	21.0	17.0
7200	9.88	11.20	11.0
10800	7.11	8.30	14.0

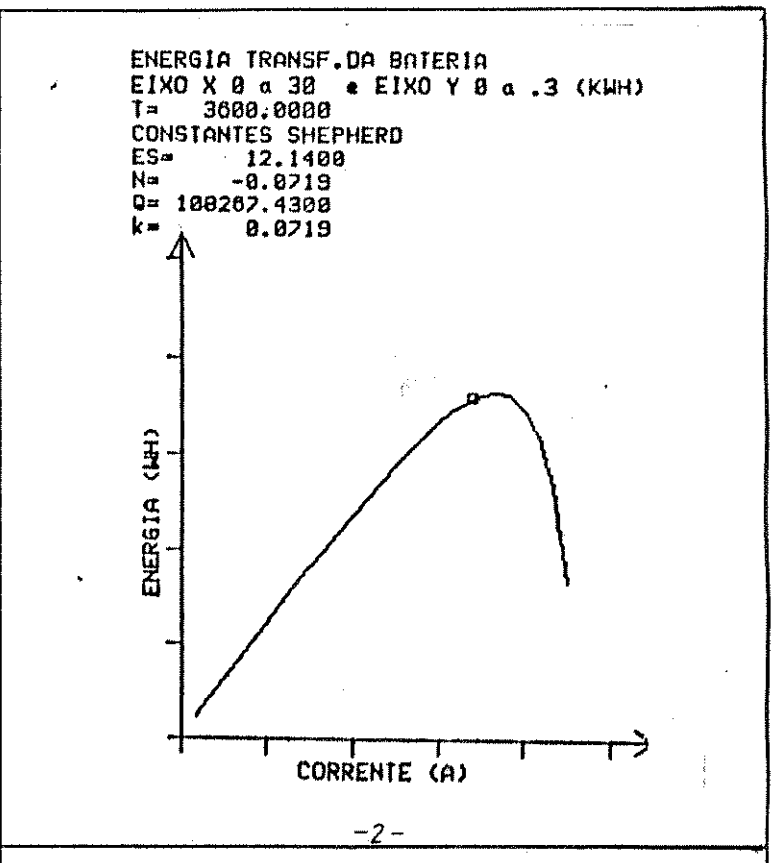
Nos desvios de até 17 % obtidos entre os dois métodos de cálculo representam os desvios experimentais. Acreditamos que o valor obtido

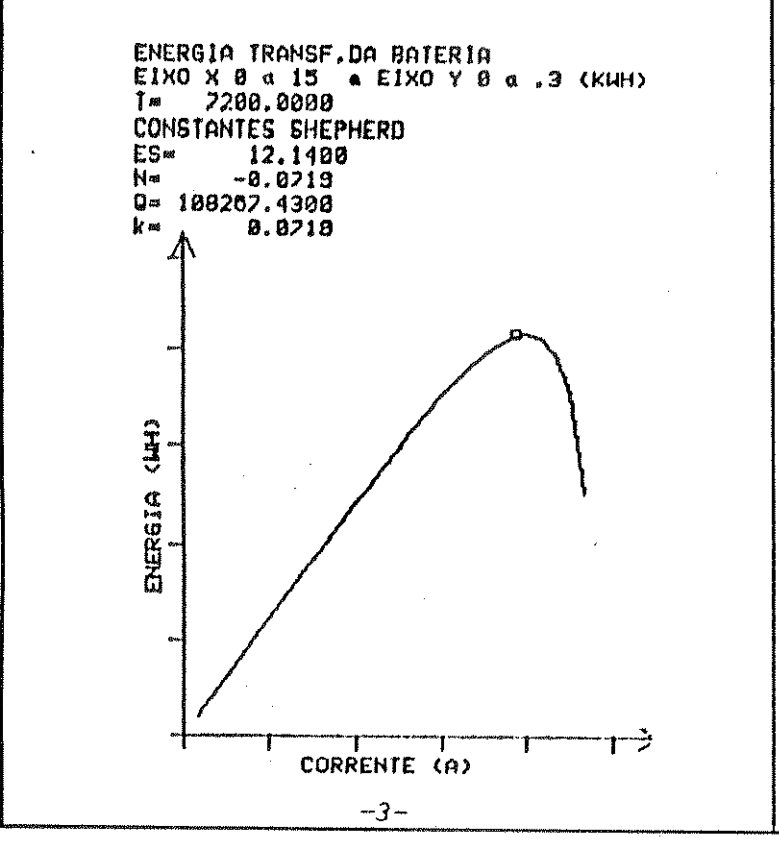
a partir da equação de Peukert é de maior interesse para dada utilização, pois ele apresenta valores inferiores de corrente, logo a opção por estes valores só tendem a prolongar a vida da bateria no caso deles não serem totalmente corretos. Apesar destes fato as curvas da FIG.V.16.b nos fornecem a ordem de grandeza de um valor de energia que uma bateria pode fornecer em uma dada condição de descarga.

```
2000:"K":CSIZE 1:COLOR 0:LPRINT "EN
     ERGIA TRANSF.DA BATERIA"
2001:USING "########.####":CLEAR
2005:DIM X(3),Y(3)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 10  e EIXO
     Y 0 a .3 (KWH)"
2025:B=1+B:Y(2)=2
2030:L=0:INPUT "T=";T:LPRINT "T=";T
2031:IF B>1GOTO 2290
2035:LPRINT "CONSTANTES SHEPHERD"
2040:INPUT "ES=";S:LPRINT "ES=";S
2050:INPUT "N=";M:LPRINT "N=";M
2055:INPUT "Q=";Q:LPRINT "Q=";Q
2065:INPUT "k=";W:LPRINT "k=";W
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (05,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "ENERGIA (WH) "
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "CORRENTE (A)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (46,-100)-(46,-106),0,0
2215:LINE (82,-100)-(82,-106),0,0
2216:LINE (118,-100)-(118,-106),0,0
2217:LINE (154,-100)-(154,-106),0,0
2218:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2290:X(1)=10.0:E=S-W*(Q/(Q-.5*T))*.
     5-M*.5
2292:E=(S+E)/2:Y(1)=T*.5*E*.220E-0*
     666.667-100:I=1
2294:IF B=1THEN GOTO 2320
2295:IF Y(2)=-100THEN GOTO 2025
2320:GOSUB 2990
2330:IF I>10GOTO 2025
2340:GOTO 2295
2990:F=T*I/Q
3000:E=S-W*(1/(1-F))*I-M*I:E=(S+E)/
     2:P=T*I*E
3010:P=P*.220E-6
3060:X(2)=18*I+10
3070:Y(2)=666.667*P-100
3073:IF E<10.56GOTO 3120
3075:IF Y(2)<-100OR Y(2)>100THEN
     GOTO 2025
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
     ,0
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3110:I=I+.4
3111:RETURN
3120:IF L=1GOTO 3075
3130:L=1:LINE (X(1),Y(1))-(X(1)+4,Y
     (1)+4),0,0,B
3140:GOTO 3075
4000:"M":CSIZE 1:LLIST 2000,
```

FIG.V.16 Energia cedida por uma bateria em vários tempos de descarga. (a) - Programa Computacional







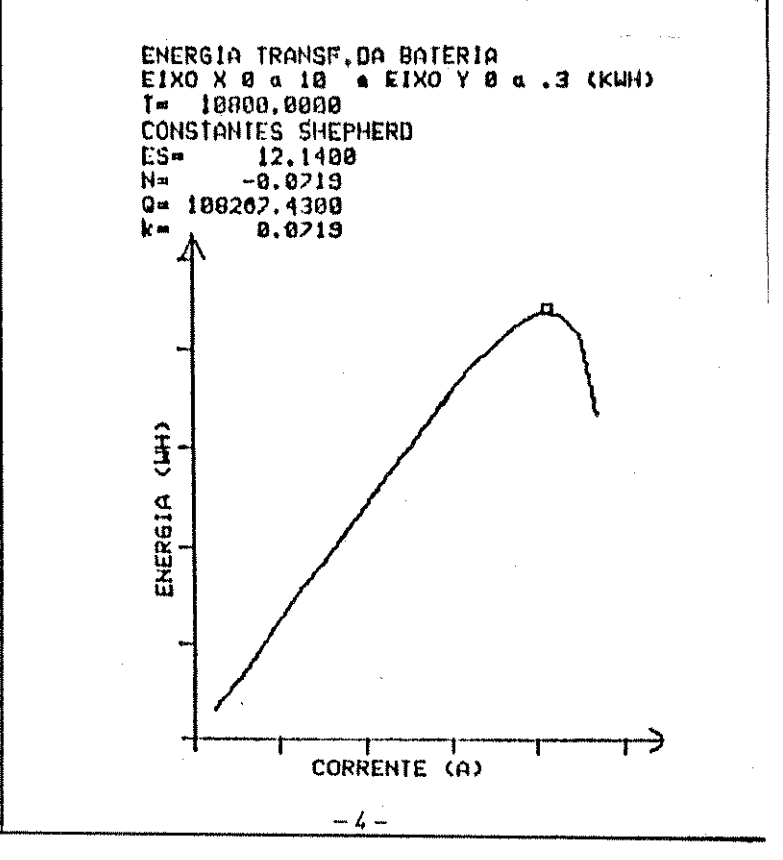


FIG.V.16 Energia cedida por uma bateria em vários tempos de descarga :

(b) - Exemplo Aplicativo : 1 - 1800 s, 2 - 3600 s

3 - 7200 s, 4 -10800 s

V.3.2 Especificação da Máquina do Veículo Elétrico.

A especificação da máquina de um Veículo Elétrico deve ser efetuada a partir de :

- pico de potência
- potência nominal
- velocidade máxima
- velocidade nominal

É preciso no entanto notar que quando fixamos um dos 4 parâmetros anteriores os outros ficam pré-estabelecidos, e na maioria das vezes precisarão ser adaptados as máquinas elétricas já existentes, a menos de projetos de máquinas especiais para aplicações específicas.

V.3.2.a - Potência da Máquina

A potência da máquina elétrica será especificada através de parâmetros do veículo:

- finalidade do veículo (velocidade de cruzeiro, velocidade máxima, tempo de aceleração; estes valores podem ser resumidos em um dos ciclos SAE-J 277a).

- coeficiente aerodinâmico.

O valor da potência máxima exigida pelo veículo será calculado durante o período de aceleração, utilizando as equações de potência vistas no item II.3.2.

Dois modos de cálculo nos levam a determinar a potência máxima da máquina :

1º - Determinando através da Eq.II.17 o instante de tempo durante a aceleração onde ocorre o pico de potência. Substituindo este valor de tempo na Eq.II.16 temos o valor de potência máximo requerido durante a aceleração para atingir a velocidade de cruzeiro nas condições dadas.

2º - Através da Eq.II.16 (potência durante a aceleração em função do tempo) traçamos um gráfico (Potência x Tempo), e determinamos o valor máximo de potência requerido para atingirmos uma determinada velocidade de cruzeiro em um dado tempo de aceleração.

Nos dois métodos propostos os resultados são idênticos.

Na FIG.V.17 apresentamos um programa computacional para cálculo da potência do motor, utilizando o 2º modo de cálculo, devemos lembrar que este valor deverá ser corrigido para um valor adequado conforme as máquinas elétricas existentes atualmente no mercado.

Os dados de entrada do programa são :

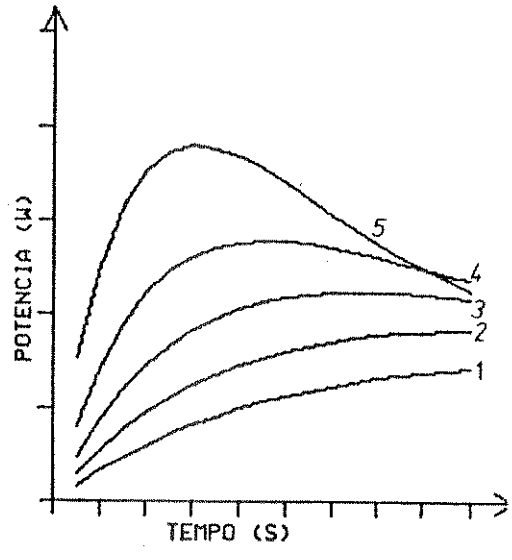
Vc - velocidade de cruzeiro que se deseja atingir (m/s).
Vl - velocidade máxima (limite) (m/s)
AF - área frontal (m^ 2)
CD - coeficiente aerodinâmico
Ta - tempo de aceleração até atingir Vc (s)
W - massa do veículo (Kg)
K - coeficiente de rolamento (K1)

Na FIG.V.18.a está um exemplo ilustrativo com a utilização do programa proposto.

```
2000:"K":CSIZE 1:COLOR 0:LPRINT "PO
     TENCIA DURAN.a ACELERACAO"
2001:USING "########.####":CLEAR
2005:DIM X(3),Y(3)
2010:LPRINT "EIXO X 0 a 18, EIXO Y
     (00 a 60)^3"
2039:INPUT "UC=";U:LPRINT "UC=";U
2040:INPUT "UL=";L:LPRINT "UL=";L
2041:INPUT "AF=";F:LPRINT "AF=";F
2042:INPUT "CD=";C:LPRINT "CD=";C
2045:INPUT "Ta=";T:LPRINT "Ta=";T
2047:INPUT "W=";W:LPRINT "W=";W
2050:INPUT "K=";K:LPRINT "K=";K:LF
     +1
2060:Z=K*W:B=.5*1.225*C*F
2080:GRAPH
2090:GLCURSOR (10,-100)
2100:SORGN :CSIZE 1
2110:LINE (10,-105)-(10,110),0,0
2120:LINE (10,110)-(5,100),0,0
2130:LINE (10,110)-(15,100),0,0
2140:LINE (05,-100)-(210,-100),0,0
2150:LINE (210,-100)-(200,-95),0,0
2160:LINE (210,-100)-(200,-105),0,0
2170:GLCURSOR (0,-40):ROTATE 3:
     LPRINT "POTENCIA (W)"
2180:GLCURSOR (60,-115):ROTATE 0
2190:LPRINT "TEMPO (S)"
2200:LINE (4,-60)-(10,-60),0,0
2210:LINE (4,-20)-(10,-20),0,0
2211:LINE (4,20)-(10,20),0,0
2212:LINE (4,60)-(10,60),0,0
2213:LINE (4,100)-(10,100),0,0
2214:LINE (30,-100)-(30,-106),2,0
2215:LINE (50,-100)-(50,-106),0,0
2216:LINE (70,-100)-(70,-106),0,0
2217:LINE (90,-100)-(90,-106),0,0
2218:LINE (110,-100)-(110,-106),0,0
2220:LINE (130,-100)-(130,-106),0,0
2225:LINE (150,-100)-(150,-106),0,0
2235:LINE (170,-100)-(170,-106),0,0
2240:LINE (190,-100)-(190,-106),0,0
2280:T=1
2282:I=-(L/18)*LN (1-U/L):E=EXP (-(
     I/L)*T)
2292:P=(Z+W*I*E)*(1-E)*L+B*(L^3)*((
     1-E)^3)
2293:X(1)=10*T+10
2294:Y(1)=.0033*P-100
2295:T=T+1
3000:E=EXP (-(I/L)*T)
3020:P=(Z+W*I*E)*(1-E)*L+B*(L^3)*((
     1-E)^3)
3060:X(2)=10*T+10
3070:Y(2)=.0033*P-100
3080:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
     ,0
3085:IF T=18GOTO 3100
3090:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
3095:GOTO 2295
3100:INPUT "UC=";U
3120:GOTO 2280
```

FIG.V.17 Programa Computacional para o Cálculo da Potência.

```
POTENCIA DURAN.a ACELERACAO
EIXO X 0 a 18, EIXO Y (00 a 60)^3
UC=      10.0000
UL=      20.0000
AF=       3.0000
CD=       0.4500
Ta=      18.0000
W=    3200.0000
K=       0.1270
```



Curva	Velocidade (m/s)
1	10
2	12
3	14
4	16
5	18

FIG.V.18.a Avaliação da Potência para Diferentes Valores de Velocidade a serem atingidos durante um tempo fixo de aceleração.

As curvas apresentadas na FIG.V.18.a representam a variação de potência durante o período de aceleração para vários valores de velocidade de cruzeiro, Vc, a serem atingidos.

Observa-se que conforme aumentamos Vc a ser atingida para um mesmo tempo de aceleração, o pico de potência não ocorre no tempo final de aceleração diferentemente dos valores obtidos a velocidades inferiores.

Na FIG.V.18.b mostramos o comportamento do torque (N.m) e da Potência (W) durante o tempo de aceleração para diferentes valores de velocidade, Vc, a serem atingidos.

Observa-se nesta figura que o valor do torque durante o período de aceleração não se mantém constante como na maioria dos trabalhos sobre tração.

Na FIG.V.18.c traçamos com auxílio do 1º modo de cálculo os pontos de máxima potência versus a velocidade final de cruzeiro para um dado tempo fixo de aceleração.

```
POTENCIA MAX. na ACELERACAO
EIXO X 10 a 19, EIXO Y (15 a 60)^3
VL=      20.0000
AF=       3.0000
CD=       0.4500
Ta=      18.0000
W=     3200.0000
K=        0.1270
```

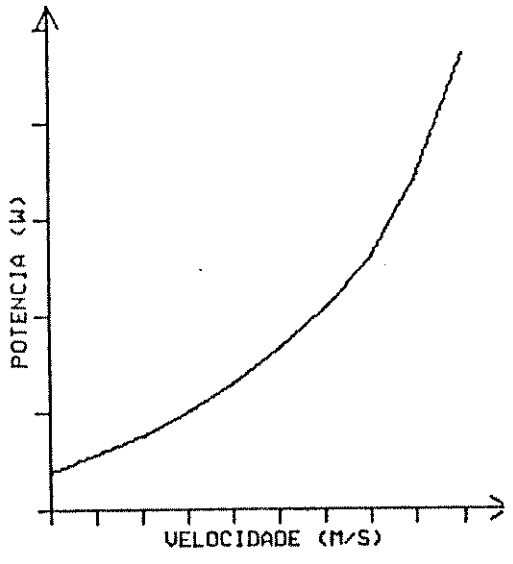


FIG.V.18.c Valores de Potência Máxima versus Velocidade para um tempo fixo de aceleração.

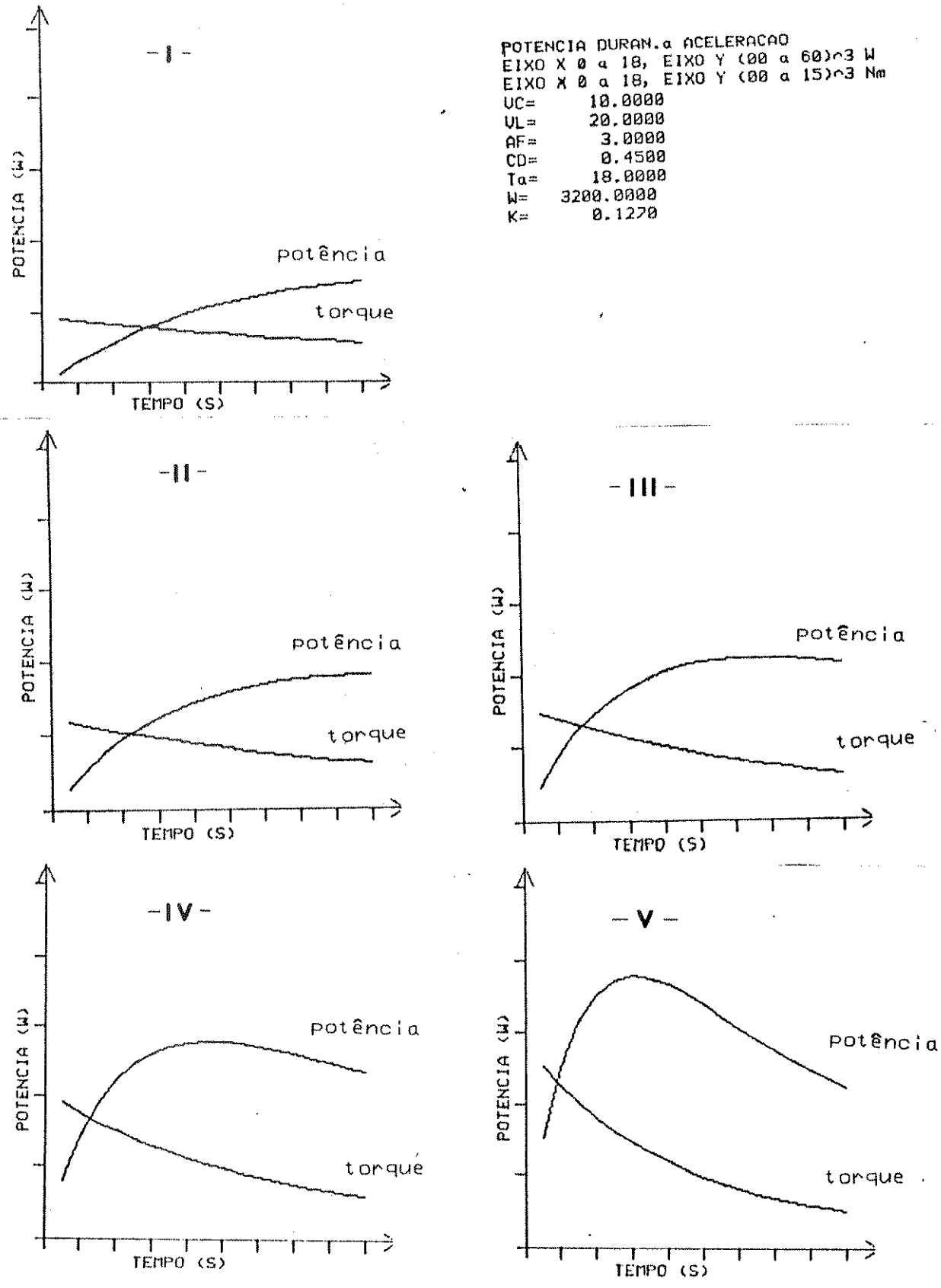


FIG.V.18.b Torque e Potência versus Tempo para diferentes valores de velocidade :

I - 10 m/s, II - 12 m/s III - 14 m/s

IV - 16 m/s, V - 18 m/s, a serem atingidos em 18 s de aceleração.

Na FIG.V.18.d traçamos uma curva que representa em ordenada o valor de potência no instante final da aceleração para uma dada velocidade de cruzeiro a ser atingida em um tempo constante, 18 s, de aceleração. Fica evidente que a partir de 16 m/s a potência no instante final de aceleração não é maxima.

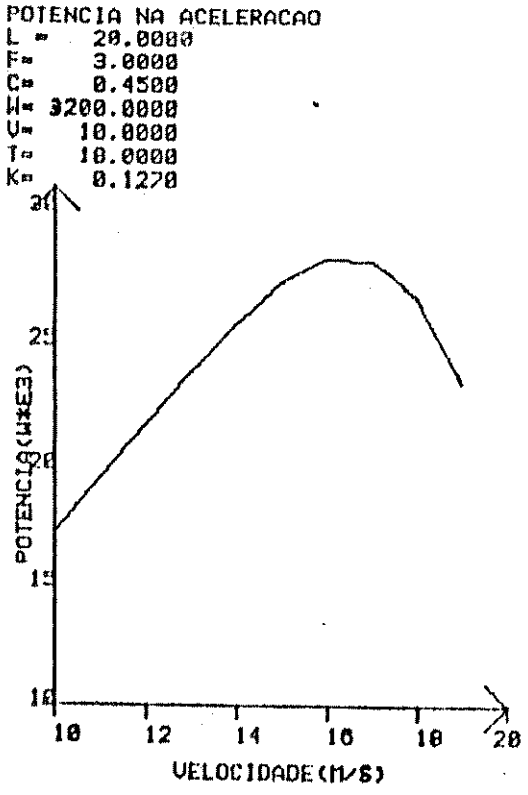


FIG.IV.18.d Avaliação da Potência no instante final de aceleração em função da velocidade.

O valor da potência a ser utilizado no projeto do veículo deve levar em consideração o fator de serviço da máquina elétrica, pois evitaremos ter uma especificação super-dimensionada.

V.3.2.b Torque, Velocidade e Eficiência.

Para sistemas onde a velocidade e o torque são mantidos constantes o cálculo da eficiência é simples. Em um veículo as condições de torque e velocidade estão variando durante o ciclo de utilização, logo se determinarmos que o valor máximo de eficiência é de 92%, este mesmo sistema pode ter uma eficiência de 25% em outras condições. Portanto, quando utilizamos um motor em um veículo é importante conhecermos o comportamento da eficiência na sua faixa de utilização.

O conhecimento da faixa de eficiência de uma máquina elétrica dentro de um ciclo de percurso de um V.E. é importante porque podemos otimizar a utilização da máquina através da operação na região onde ela apresentar maior rendimento; além disso em um V.E. a eficiência da máquina será um dos fatores que irão determinar a autonomia do veículo.

A seguir iremos apresentar e analisar dados obtidos por Unnewehr e Knoop [Ref.4] a título de ilustração. Tratamos computacionalmente o exemplo apresentado e os programas desenvolvidos podem ser utilizados para processar dados obtidos para qualquer máquina elétrica.

De um motor série de C.C. com velocidade nominal de 6000 rpm e com o valor máximo de torque de 136 N.m. mostramos um mapa de eficiência na faixa de utilização desta máquina na TAB.V.1; estes dados de eficiência estão coerentes com os dados de outras 5 máquinas elétricas que foram normalizados é são apresentados na TAB.V.2. Nesta tabela estão representados motores de C.C. tipo série com potência e velocidade nominais de 10 a 40 HP e 1200 a 5000 rpm respectivamente. Ressalta-se que nesta tabela vários pontos foram determinados a partir de dados obtidos com a máquina elétrica operando acima da sua potência nominal.

Torque (N.m)	Velocidade (rpm)					
	250	500	1000	3000	5000	8000
14	.49	.64	.76	.85	.86	.83
27	.47	.63	.76	.87	.88	.87
54	.42	.59	.73	.86	.89	.88
81	.37	.54	.69	.85	.88	-
108	.33	.49	.65	.83	.87	-
136	.29	.45	.62	.81	.86	-

TAB.V.1 Mapa de Eficiência para Máquina de C.C.

Torque (p.u.)	Velocidade (p.u.)								
	.05	.15	.25	,35	.45	.55	.65	.75	.85
.050	.283	.434	.536	.599	.630	.638	.632	.621	.612
.150	.362	.517	.624	.690	.725	.737	.735	.727	.722
.250	.409	.568	.678	.748	.787	.803	.804	.800	.799
.350	.429	.591	.705	.779	.822	.842	.847	.847	.850
.450	.429	.596	.713	.791	.837	.861	.870	.874	.880
.550	.417	.587	.708	.790	.840	.867	.880	.888	.898
.650	.398	.572	.697	.782	.836	.867	.884	.896	.910
.750	.379	.557	.686	.775	.833	.868	.889	.904	.920
.850	.368	.550	.682	.775	.837	.876	.900	.919	.920

TAB.V.2 Mapa de Eficiência Normalizado para um Motor de C.C..

Os autores sugerem como economia de memória computacional que os dados da TAB.V.2 sejam armazenados através de uma equação matemática; aplicando técnicas de regressão multivariável [Ref.11] eles obtiveram a seguinte equação :

$$ef = 0.1329 + 1.171\ T + 2.059\ S - 2.163\ T\wedge 2 - 3.07\ S\wedge 2 + 0.801\ T\ S \qquad [V.1]$$

onde: S = velocidade por unidade = (velocidade atual/velocidade máxima do motor)

T = torque por unidade = (torque atual/torque máximo do motor)

Analisando a equação anterior verificamos que a mesma só é representativa (desvios < 10 %) no canto esquerdo superior da TAB.V.2 em uma região 3 x 3.

Utilizando também técnicas de regressão multivariável [Ref.11] determinamos a equação :

$$ef = 0.23 - 3.53\ T + 5.53\ S + 3.97\ T\wedge 2 - 5.77\ S\wedge 2 + 0.371\ T*S \qquad [V.2]$$

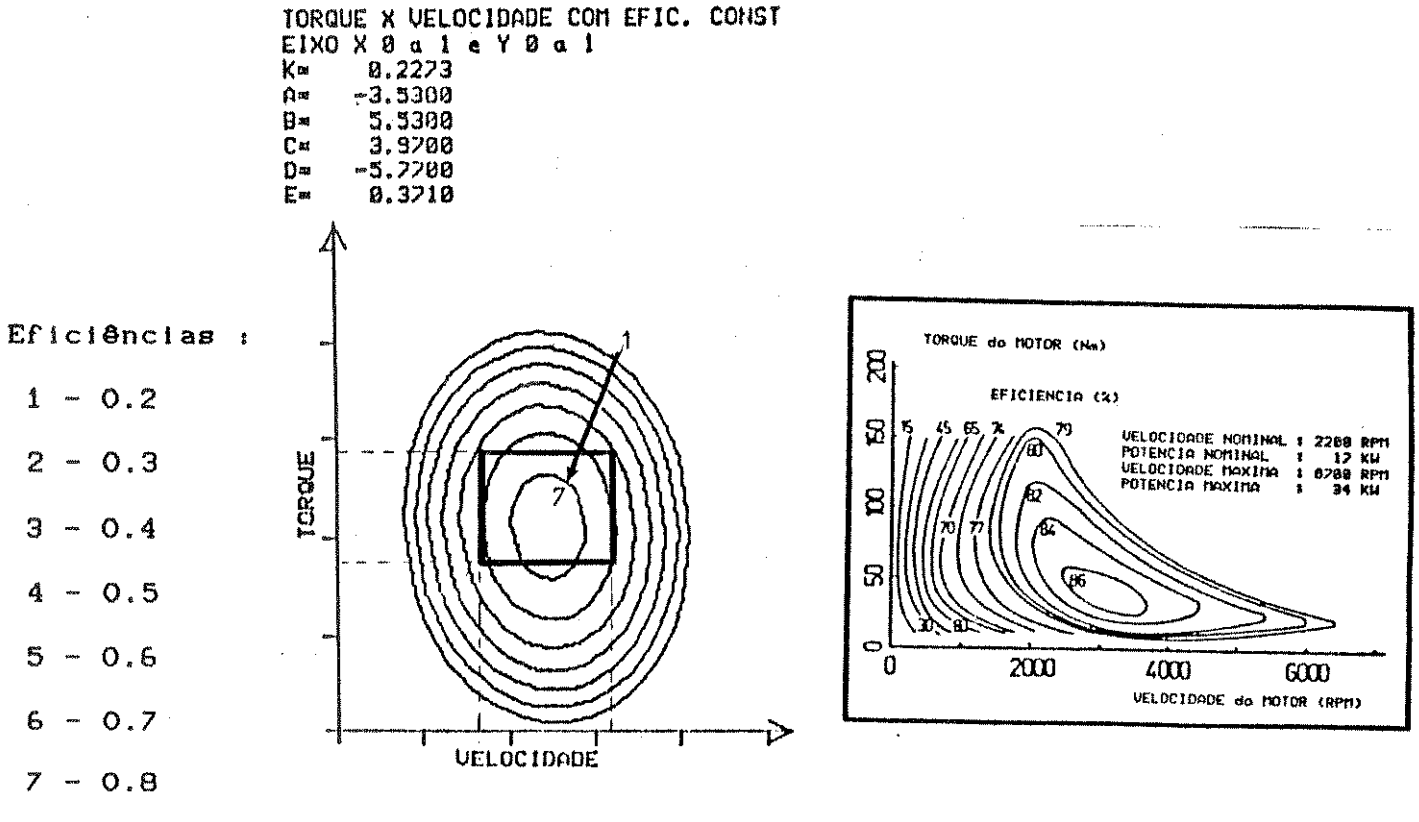
está equação é representativa (desvio < 10 %) das diagonais e da região central, 3 x3 , da TAB.V.2, não representando portanto a totalidade dos pontos da tabela.

Na FIG.V.19.a mostramos como é a representação gráfica da equação [V.2] para diferentes valores de eficiência. Os tipos de curvas, T x V, que deveriam ser obtidas são mostrados na FIG.V.19.b [Ref.7].

Uma alternativa para termos uma representação total da TAB.V.2 seria dividir a tabela em regiões e aplicar técnicas de regressão a

cada uma delas o que consideramos ser muito trabalhoso e a série de equações obtidas não representaria fielmente nem continuamente a região de operação da máquina.

O motivo que levou Unnewehr e Knoop em 1978 a optarem por uma representação matemática por excassez de memória computacional não ocorre aqui; e a aplicação a qual se destina a tabela requer uma precisão mais elevada, portanto a seguir apresentamos na FIG.V.19.c um programa computacional que armazena os dados da TAB.V.2 e interpola qualquer valor normalizado de torque e velocidade



- a - - b -

FIG.V.19.Curvas torque versus velocidade para valores constantes de eficiência da máquina de C.C..

a - representação da equação calculada

b - representação correta [Ref.7]

```
10:"A"CLEAR :INPUT "N.COL.=";N:O=N-
   1
20:INPUT "LINH=";M:L=M-1
30:DIM A(L,O)
40:FOR F=1TO M
50:FOR E=1TO N
55:PAUSE USING "#####";F;E:INPUT G
60:T=E-1:R=F-1
70:A(R,T)=G
80:NEXT E:NEXT F
85:"G"INPUT "N.LINHS";M
86:INPUT "N.COLNS";N
90:O=M*N:DIM C(O):L=0
91:M=M-1:N=N-1
94:FOR I=0TO M
95:FOR J=0TO N
96:C(L)=A(I,J):L=L+1:NEXT J
97:NEXT I
98:PRINT #"DADOS";C(*)
99:END
100:"B"INPUT "LINHA=";L:L=L-1
110:INPUT "COL=";N:N=N-1
120:PRINT A(L,N):GOTO 100
130:"S"INPUT "T=";T:R=INT (T*100)
140:INPUT "S=";S:V=INT (S*100)
145:D=INT (R/10):E=INT (V/10)
150:IF R<=15GOTO 500
160:IF R>=75GOTO 550
180:F=R-D*10:L1=D
190:IF F>=5THEN LET L2=L1+1
200:IF F<5THEN GOTO 5000
260:IF V<=15GOTO 600
270:IF V>=75GOTO 650
290:A=V-E*10:C1=E
300:IF A>=5THEN LET C2=C1+1
310:IF A<5GOTO 6000
320:GOTO 1000
500:L1=0:L2=1:GOTO 260
550:L1=7:L2=8:GOTO 260
600:C1=0:C2=1:GOTO 1000
650:C1=7:C2=8:GOTO 1000
 1000:T1=L1*10+5:T2=L2*10+5
 1010:S1=C1*10+5:S2=C2*10+5
 1100:Y1=((V-S1)/(S2-S1))*(A(L1,C2)-
      A(L1,C1))+A(L1,C1)
 1110:Y2=((V-S1)/(S2-S1))*(A(L2,C2)-
      A(L2,C1))+A(L2,C1)
 1120:Y3=((R-T1)/(T2-T1))*(Y2-Y1)+Y1
 1150:Y3=Y3/1000:USING "##.###"
 1160:PRINT "EF=";Y3:END
 5000:L2=L1:L1=L1-1:GOTO 260
 6000:C2=C1:C1=C1-1:GOTO 1000
 7000:"F"CLEAR :INPUT "N.LINHS";M
 7010:INPUT "N.COLNS";N
 7020:O=M*N:DIM C(O)
 7030:INPUT #"DADOS";C(*)
 7040:M=M-1:N=N-1
 7050:DIM A(M,N):L=0
 7060:FOR I=0TO M
 7070:FOR J=0TO N
 7080:A(I,J)=C(L):L=L+1
 7090:NEXT J
 7100:NEXT I:END
 9000:"U"CSIZE 1:LLIST
```

FIG.V.19.c Programa Computacional para Interpolação dos valores de eficiência apresentados na TAB.V.2.

O programa computacional apresentado na FIG.V.19.c está subdividido em 5 blocos :

DEF - "A" : Armazena os dados da Tab.V.2 ou similar.

- "B" : Lê valores da tabela.

- "S" : Entrada: valores normalizados de torque e velocidade.

  Saída : valor de eficiência.

- "G" : Grava os dados da tabela em fita cassete.

- "F" : Lê valores da tabela gravados em fita cassete.

A partir do programa computacional desenvolvido avaliamos a eficiência de uma máquina elétrica de C.C. tipo série (a partir dos dados da Tab.V.2) hipoteticamente acoplada a um veículo elétrico utilitário de 3200 Kg. A avaliação foi efetuada supondo o veículo operando no ciclo SAE J 277a - C; os resultados obtidos são apresentados na FIG. V.19.d.; o programa computacional utilizado para obter esta figura é mostrado na FIG.V.19.e.

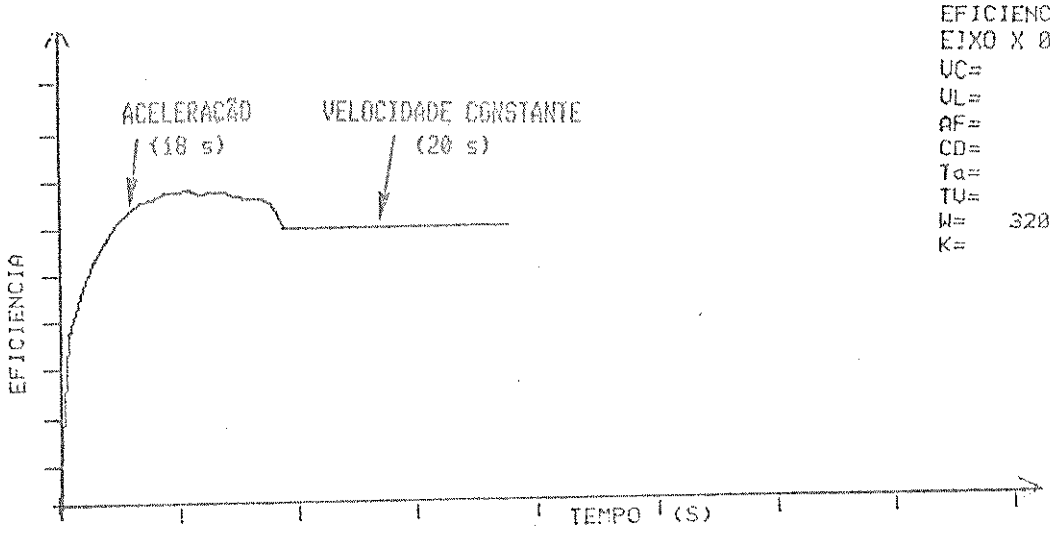


FIG.V.19.d Eficiência de uma máquina elétrica de C.C. em um ciclo padrão SAE J 277a - C.

Observa-se que a eficiência da máquina fica em torno de 0.6 a 0.7 na maior parte do ciclo (não realizamos o cálculo da eficiência da máquina operando como gerador - frenagem regenerativa - por não dispormos de dados experimentais). Para esta máquina elétrica poderíamos, como alternativa para aumentarmos a eficiência global do veículo, acoplar um sistema e embreagem e transmissão (eficiência global : 0.93) e fazer a máquina operar em uma região de maior rendimento.

```
700:"F":CLEAR :INPUT "N.LINHS";M
710:INPUT "N.COLNS";N
720:O=M*N:DIM C(O)
730:INPUT #"DADOS";C(*)
740:M=M-1:N=N-1
750:DIM A(M,N):L=0
760:FOR I=0TO M
770:FOR J=0TO N
780:A(I,J)=C(L):L=L+1
790:NEXT J
800:NEXT I:END
 2000:"K"CSIZE 1:COLOR 0:LPRINT "EFI
      CIENCIA X TEMPO - SAE J 227a"
 2001:USING "#######.####"
 2010:LPRINT "EIXO X 0 a 80, EIXO Y
      0 a .90"
 2039:INPUT "UC=";U:LPRINT "UC=";U
 2040:INPUT "UL=";L:LPRINT "UL=";L
 2041:INPUT "AF=";F:LPRINT "AF=";F
 2042:INPUT "CD=";C:LPRINT "CD=";C
 2043:INPUT "Ta=";TA:LPRINT "Ta=";TA
 2044:INPUT "TU=";TU:LPRINT "TU=";TU
 2045:INPUT "TC=";TC:LPRINT "TC=";TC
 2046:INPUT "TF=";TF:LPRINT "TF=";TF
 2047:INPUT "W=";W:LPRINT "W=";W
 2050:INPUT "K=";K:LPRINT "K=";K:LF
      +1
 2060:Z=K*W:B=.5*1.225*C*F:LF +2
 2070:A1=(L/TA)*LN (L/(L-U))
 2080:GRAPH
 2090:GLCURSOR (10,0)
 2100:SORGN :CSIZE 1
 2110:LINE (10,05)-(10,-410),0,0
 2120:LINE (10,-410)-(05,-400),0,0
 2130:LINE (10,-410)-(15,-400),0,0
 2140:LINE (05,0)-(210,0),0,0
 2150:LINE (210,0)-(200,5),0,0
 2160:LINE (210,0)-(200,-5),0,0
 2170:GLCURSOR (00,-213):ROTATE 1:
      LPRINT "TEMPO  (S) "
 2180:GLCURSOR (60,15):ROTATE 0
 2190:LPRINT "EFICIENCIA"
 2200:LINE (04,-50)-(10,-50),0,0
 2202:LINE (04,-100)-(10,-100),0,0
 2205:LINE (04,-150)-(10,-150),0,0
 2207:LINE (04,-200)-(10,-200),0,0
 2210:LINE (04,-250)-(10,-250),0,0
 2211:LINE (04,-300)-(10,-300),0,0
 2212:LINE (04,-350)-(10,-350),0,0
 2213:LINE (04,-400)-(10,-400),0,0
 2214:LINE (30,0)-(30,6),0,0
 2215:LINE (50,0)-(50,6),0,0
 2216:LINE (70,0)-(70,6),0,0
 2217:LINE (90,0)-(90,6),0,0
 2218:LINE (110,0)-(110,6),0,0
 2220:LINE (130,0)-(130,6),0,0
 2225:LINE (150,0)-(150,6),0,0
 2235:LINE (170,0)-(170,6),0,0
 2240:LINE (190,0)-(190,6),0,0
 2250:X(1)=10:Y(1)=00:T=0
 2280:T=T+1
 2282:IF T>TAGOTO 3000
 2290:E=EXP (-A1*T/L)
 2291:UI=L*(1-EXP (-A1*T/L))
 2292:OI=(Z+W*A1*E)*(1-E)*L+B*(L^3)*
      ((1-E)^3)
 2293:TI=OI/UI:GOSUB 5000
 2294:GOSUB 4000
 2296:GOTO 2280
 3000:TS=TA+TU
 3020:IF T>TSGOTO 3080
 3060:OI=2*U+B*U*U*U:UI=U
 3065:TI=OI/UI:GOSUB 5000
 3070:GOSUB 4000
 3075:GOTO 2280
 3080:TS=TA+TU+TC:END
 3085:IF T>TSGOTO 3170
 3090:EC=.5*W*UI*UI
 3095:DD=UI:ED=(Z+B*UI*UI)*DD
 3098:EC=EC-ED
 3100:UI=√(2*EC/W):ED=-ED*.93
 3110:OI=ED:TI=OI/UI:GOSUB 5000
 3120:GOSUB 4000
 3130:GOTO 2280
 3170:OJ=.5*W*UI*UI:ED=(Z+B*UI*UI)*U
      I
 3171:EC=OJ-ED:UI=√(2*EC/W):EC=EC*.9
      3
 3175:ED=(Z+B*UI*UI)*UI
 3180:OI=EC-ED:OI=OI-OJ:TI=OI/UI:
      GOSUB 5000
 3190:GOSUB 4000
 3200:TI=0:T=TS+TF
 3210:GOSUB 4000
 3300:TEXT
 3310:END
 4000:X(2)=200*EI+10
 4020:Y(2)=-5*T
 4030:LINE (X(1),Y(1))-(X(2),Y(2)),0
      ,0
 4050:X(1)=X(2):Y(1)=Y(2)
 4100:RETURN
 5000:TI=TI/(24000/01):RE=INT (TI*10
      0)
 5010:UI=UI/L:UI=INT (UI*100)
 5045:DE=INT (RE/10):EE=INT (UI/10)
 5050.IF RE<=15GOTO 5500
 5160:IF RE>=75GOTO 5500
 5180:FE=RE-DE*10:L1=DE
 5190:IF FE>=5THEN LET L2=L1+1
 5200:IF FE<5THEN GOTO 7000
 5260:IF UI<=15GOTO 5600
 5270:IF UI>=75GOTO 5650
 5290:AE=UI-EE*10:C1=EE
 5300:IF AE>=5THEN LET C2=C1+1
 5310:IF AE<5GOTO 8000
 5320:GOTO 6000
 5500:L1=0:L2=1:GOTO 5260
 5550:L1=7:L2=8:GOTO 5260
 5600:C1=0:C2=1:GOTO 6000
 5650:C1=7:C2=8:GOTO 6000
 6000:T1=L1*10+5:T2=L2*10+5
 6010:S1=C1*10+5:S2=C2*10+5
 6100:YE=((UI-S1)/(S2-S1))*(A(L1,C2)
      -A(L1,C1))+A(L1,C1)
 6110:YI=((UI-S1)/(S2-S1))*(A(L2,C2)
      -A(L2,C1))+A(L2,C1)
 6120:YO=((RE-T1)/(T2-T1))*(YI-YE)+Y
      E
 6150:EI=YO/1000:RETURN
 7000:L2=L1:L1=L1-1:GOTO 5200
 8000:C2=C1:C1=C1-1:GOTO 6000
 9000:"M":CSIZE 1:LLIST 700,
```

FIG.V.19.e Programa Computacional para o cálculo da eficiência de uma máquina elétrica em um ciclo de percurso.

V.4 Análise Econômica : Considerações

Uma outra classe de modelos no desenvolvimento de VEs é a dos modelos econômicos. A importância da análise econômica estaria sem dúvida vinculada ao desenvolvimento e comercialização de VEs.

Um primeiro aspecto é a comparação do custo de um VE com um veículo convencional. Dados obtidos na Ref.[1] nos mostram que se os componentes dos VEs fossem produzidos em larga escala o custo final deste veículo estaria 15% acima de seu concorrente similar de um veículo convencional, mas tal levantamento foi realizado em 1973. Além disso devemos lembrar que o desenvolvimento e popularização de VEs estaria contra um sistema totalmente montado de extração, refino e distribuição de petróleo e seus derivados além de toda indústria automobilística que precisaria passar por uma reformulação radical.

Apesar da indústria da eletrônica de potência estar em franco desenvolvimento com a criação de transistores de potência, novos motores de imã permanente terem sido desenvolvidos, além dos compactos motores de C.A. com refrigeração forçada, baterias de alta-temperaturas (por exemplo Li-Cl2) estarem sendo comercializadas e indicadores eficientes para a determinação do estado de carga de baterias serem desenvolvidos, a popularização destes itens ainda é mínima devido ao alto custo dos componentes que na maioria das vezes é feita de maneira artesanal sem objetivar uma produção industrial em larga escala.

Os itens a serem computados na estimativa de custo de um VE seriam:

1 - Custo inicial dos componentes do sistema de acionamento (ba-

terias, controle, conversor de potência e motor)

2 - Custo da carcaça.

3 - Custo da Energia Elétrica.

4 - Custo de um segundo conjunto de baterias.

5 - Custo de manutenção do sistema de acionamento e das baterias.

De modo geral já comentamos cada um dos itens acima, mas devemos frisar que:

1 - COMPONENTES DO ACIONAMENTO

O alto custo inicial de um VE deve-se ao custo do motor e semicondutores de potência. A princípio a razão deste alto custo é a pequena escala de produção destes componentes. Outro motivo é que os materiais utilizados na confecção de um motor elétrico são mais caros que os utilizados em um motor à combustão.

2 - BATERIAS

O conjunto sobressalente de baterias é outro fator para o alto custo do VE. A nível internacional, grandes avanços foram efetuados na fabricação e redução dos custos da bateria chumbo-ácido. A característica de uma bateria chumbo-ácido de elevada qualidade, a nível nacional, teria uma vida útil de 300 ciclos completos de carga - descarga; encontramos na literatura baterias chumbo-ácido especiais, com alta tecnologia de fabricação, com vida útil de 1200 ciclos (9), que contu-

do não é a realidade atual da fabricação nacional de acumuladores.

Um conjunto de baterias chumbo-ácido com vida útil de 300 ciclos com carga completa nos possibilita uma autonomia de 103 Km (ver item V.6); portanto durante a vida útil destas baterias poderíamos percorrer aproximadamente 31000 Km. Um veículo convencional tem uma vida útil em torno de 100000 Km, logo seriam necessários 3 conjuntos de baterias para cada VE produzido.

3 - MANUTENÇXO

Avaliar o custo e o período em que deve haver manutenção em um VE irá depender de vários fatores tais como: condições ambientais, periocidade de uso, tipo de serviço utilizado.

Podemos afirmar que:

Controle Eletrônico de C.A. ou C.C.: pouca manutenção.

Motores C.C.: manutenção periódica.

Motores C.A.: sem manutenção.

Baterias : manutenção periódica.

Para a continuidade no desenvolvimento e projetos de veículos elétricos análises ecônomicas sobre sua viabilização precisam ser realizadas periodicamente. Em duas áreas em particular não encontramos referências sobre trabalhos desenvolvidos :

- estudo de projeto para reduzir o alto custo dos motores e sistemas de controle e acionamento.

- estudo de confiabilidade e segurança dos VEs, e seus respectivos custos.

V.5 Análise Dinâmica : Considerações

Modelos dinâmicos são muito comuns em análise de sistemas físicos, e são apropriados para o estudo de uma resposta dinâmica de um VE ou de um subsistema do VE.

A preocupação da simulação dinâmica seria por exemplo, determinar as oscilações na velocidade do motor, do veículo e da corrente do motor durante a partida de um VE.

O modelo dinâmico pode ser caracterizado por equações diferenciais. A resposta de um sistema dinâmico à uma dada entrada (ou função de excitação) pode ser obtida com a solução destas equações diferenciais. Para um veículo estas equações não são facilmente obtidas devido à relativa dificuldade na obtenção dos parâmetros do sistema físico .

V.6 Predição de Desempenho Através da Simulação

V.6.1 Introdução

Uma das maneiras de apresentar um modelo para um VE é quantificar um veículo e realizar os cálculos necessários para avaliarmos seu desempenho e autonomia.

O veículo proposto será um carro utilitário com as seguintes características:

- Carga útil máxima incluindo passageiros : 800 Kg.

- Relação carga útil / massa bruta total :> 0.25

- Relação massa baterias / massa bruta total :< 0.32

- Velocidade máxima no plano, a plena carga : > 20 m/s (72 Km/h)

- Aceleração : (13.3 + 0.4) m/s (48 + 1.5 Km/h) em (18 + 2) s.

- Máximo aclive superável : > 18º

- Autonomia no ciclo padrão : > 50 Km

- Autonomia em percurso urbano típico : > 80 Km

- Coeficiente aerodinâmico Ca : < 0.45

- Ciclo padrão de percurso : SAE - J227a - C

Os índices anteriormente citados são conclusões do 1º Seminário sobre Veículos Utilitários a Bateria realizado na Universidade de São Paulo em agosto de 1984.

Os parâmetros apresentados são tecnológica e conceitualmente viáveis a curto prazo para produção por indústrias nacionais.

No exemplo proposto usaremos valores limites, portanto:

- massa bruta : 3200 Kg
- massa baterias : 1024 Kg
- coeficiente aerodinâmico : 0.45
- velocidade máxima : 72 Km/h

A energia disponível no conjunto de baterias de 1024 Kg é da ordem de 20.480 Wh. Este dado foi obtido a partir do valor da densidade energética de uma bateria chumbo-ácido comercial que é de 20 Wh/Kg, obtido no Laboratório de Eletroquímica da FEE-UNICAMP com baterias de fabricação nacional.

A especificação dos valores de tensão e capacidade nominal do conjunto de baterias irá depender das características do motor a ser usado no veículo.

A especificação da potência do motor será feita utilizando o modelo apresentado no ítem V.3.2, a qual terá o valor de pico da potência necessária para acelerar o veículo dentro das especificações da norma SAE-J227a. Determinamos que para nosso exemplo a potência necessária será de 25.0 KW (33.56 HP).

A partir deste ponto o procedimento de cálculo do desempenho do VE se torna padrão, pois temos etapas definidas de procedimentos ou seja: acelerar, manter o veículo em velocidade de cruzeiro, desacelerar e parar. A seguir apresentamos um roteiro para implementação computacional com descrições independentes para cada uma destas etapas. Estas etapas estarão interligadas com memórias únicas de distâncias percorridas, energia consumida e restante.

V.6.2 Descrição do Programa

A - Dados Iniciais

Na etapa inicial do programa são inseridos os dados gerais do veículo:

- massa bruta (Kg)
- massa das baterias (Kg)
- área frontal do veículo (m^2)
- densidade energética das baterias (Wh/Kg)
- coeficiente aerodinâmico
- constantes devido a resistência ao rolamento (K1 e K2)
- potência do motor (W)
- velocidade máxima no plano (m/s)

B - Aceleração

São inseridos os seguintes parâmetros:

- velocidade inicial (m/s)
- velocidade de cruzeiro (m/s)

- tempo até atingir a velocidade de cruzeiro (s)

Cálculos efetuados:

- aceleração inicial (m/s^2)
- potência necessária (watts)
- energia necessária (Wh)
- percurso percorrido (m)

C - Velocidade de Cruzeiro

São inseridos os seguintes parâmetros:

- velocidade de cruzeiro (m/s)
- tempo de velocidade de cruzeiro (s)

Cálculos Efetuados:

- potência necessária (watts)
- energia necessária (Wh)
- percurso percorrido (m)

D - Costeamento

São inseridos os seguintes parâmetros :

- velocidade de cruzeiro (m/s)
- tempo de costeamento (s)

Cálculos Efetuados :

- energia restante (Wh)
- distância percorrida (m)
- velocidade após costeamento (m/s)

E - Frenagem Regenerativa

São inseridos os seguintes parâmetros:

- velocidade no início da frenagem (m/s)
- tempo de frenagem (s)
- velocidade após a frenagem (m/s)
- energia recuperada na frenagem (Wh)

F - Memórias Centrais

- distância percorrida (m)
- energia consumida (Wh)
- energia disponível (Wh)

G - Sistemas de Interligação

- perguntas sobre o trajeto desejado.

Com referência ao tempo de costeamento ressaltamos :

1º - Em um tráfego intenso acreditamos ser a frenagem regenerativa mais utilizada que a alternativa costeamento (as paradas são mais

freqüentes e o tempo disponível para efetuá-las é pequeno, < 9 s).

2º - Em tráfego livre a alternativa costeamento é mais eficiente que a frenagem regenerativa, pois durante o período de costeamento sómente temos as perdas devido as forças de rolamento e aerodinâmica, contrariamente a frenagem regenerativa em que devemos levar em consideração as perdas na armazenagem e na transformação da energia cinética em elétrica e vice-versa (comprovado no item V.3.2 - Exemplo Aplicativo a ser visto a seguir). Este fato foi desprezado nas Refs.14, 15 e 16.

Na FIG.V.20 apresentamos um fluxograma com o detalhamento dos itens propostos anteriormente.

A listagem do programa proposto no fluxograma da FIG.V.20 é mostrada na FIG.V.21.

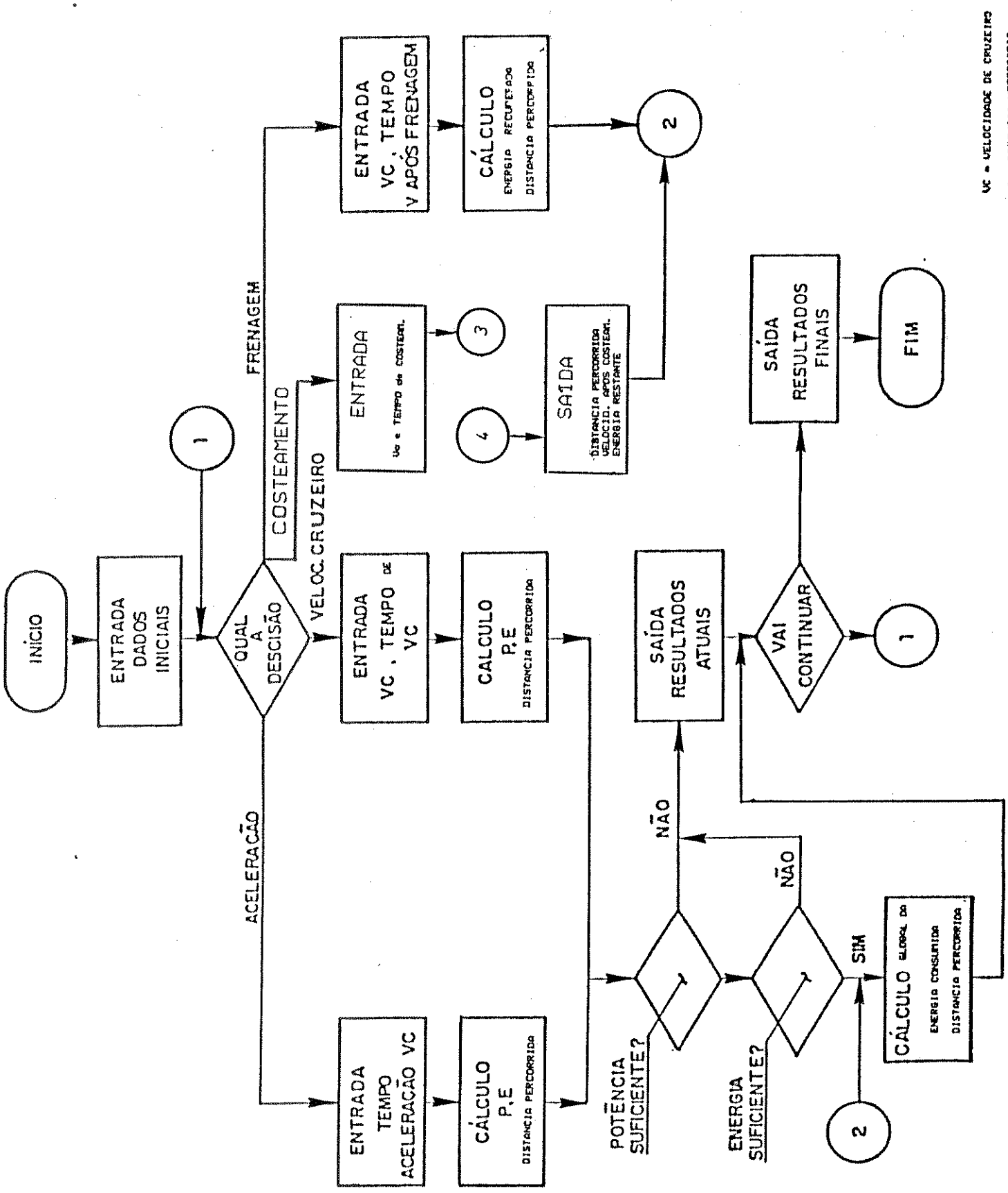


FIG.V.20 Fluxograma para Avallação do Desempenho de um Veículo Elétrico. 1ª Parte.

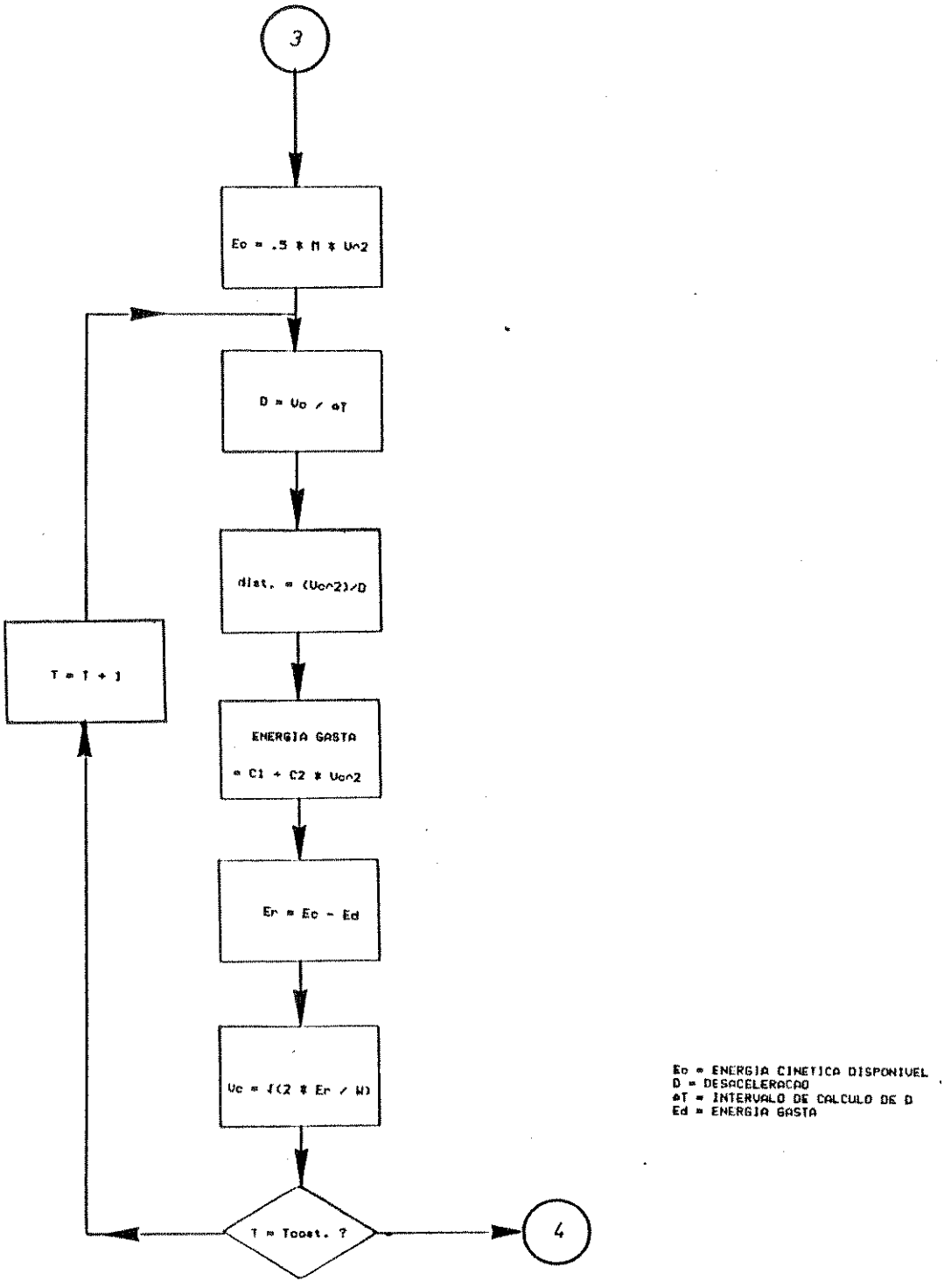


FIG.V.20 Fluxograma para Avallação do Desempenho de um Veículo Elétrico. IIª Parte.

```
 4:"A":CLEAR :USING "#####.##^^":
   CSIZE 1:LPRINT "DADOS DO VEICULO
   :"
 5:INPUT "POTENCIA MOTOR (W)=";H:LF
   +1:LPRINT "POT.MOTOR (W)=";H
10:INPUT "MASSA VE (KG)=";W:LPRINT
   "MASSA VE.(Kg)=";W
11:INPUT "AREA FRONT.(M^2)=";F:
   LPRINT "AREA FR.(M^2)=";F
12:INPUT "MASSA BATER (KG)=";G:
   LPRINT "MASSA BAT.(Kg)=";G
13:INPUT "DENSID. ENERG(WH/Kg)=";D:
   LPRINT "DENS.ENERG.(WH)=";D
15:INPUT "VELOCD. MAXIM(M/S)=";L:
   LPRINT "VEL.MAX.(M/S)=";L
18:R=D*G
19:INPUT "COEF.AEROD.=";C:LPRINT "C
   OEF.AEROD.=";C
20:INPUT "COEF.ROLAMENTO=";K:LPRINT
   "COEF.ROL.=";K
21:Z=K*W:X=.5*1.225*C*F
22:INPUT "ACELERACAO?S=1;N=0";C
24:IF C=1GOTO 50
25:INPUT "VELOC.CONST?S=1;N=0";C
26:IF C=1GOTO 250
28:INPUT "COSTEAR ? S=1;N=0";C
29:IF C=1GOTO 400
37:INPUT "FRENAGEM ?S=1;N=0";C
38:IF C=1GOTO 310
39:INPUT "QUER PARAR?S=1;N=0";C
40:IF C=1GOTO 160
41:GOTO 22
50:PAUSE "ACELERACAO":LF +1:LPRINT
   "ACELERACAO"
60:INPUT "VELOC.CRUZ.(M/S)=";U:
   LPRINT "VEL.CRUZ.(M/S)=";U
70:INPUT "TEMPO.ACELER.(S)=";T:
   LPRINT "TEMPO ACEL.(S)=";T
80:I=-(L/T)*LN (1-U/L):JJ=6*X*L*L
82:TM=(L/I)*LN (JJ/(JJ-2*W*I+J(4*W*
   W*I*I-2*W*I*JJ-2*Z*JJ)))
85:E=EXP (-(I/L)*TM)
90:P=(Z+W*I*E)*(1-E)*L+X*(L^3)*((1-
   E)^3)
91:LF +1
95:LPRINT "POTENCIA (W)=";P
100:E=.5*W*U*U+L*((Z+X*L*L)*(L/I)*LN
   (L/(L-U)))
101:E=E-L*(Z+3*X*L*L)*(U/I)
102:E=E+L*1.5*X*L*L*U*(2-U/L)/I
103:E=E-L*X*U*U*U*(1-3*(L/U)*(1-L/U)
   )/(3*I)
105:E=E+L*(1.5*X*L*L*U*(2-U/L)/I)-L*
   X*U*U*U*(1-3*(L/U)*(1-L/U)/(3*I)
   )
109:E=E*.278E-3
110:LPRINT "ENERG.(WH)";E
120:M=L*(T-U/I)
130:LPRINT "DIST.PERC.(M)";M:LF +1
140:IF H>POR H=PGOTO 200
150:LPRINT "POTENCIA MOTOR NAO SUFIC
   ."
160:LPRINT "ENERG.REST.=(WH)";R
170:LPRINT "PERCURSO PERCOR.(M)=";S
180:INPUT "VAI CONTINUAR?S=1,N=0";C
190:IF C=1GOTO 22
195:END
200:IF R<=EGOTO 220
210:R=R-E:S=S+M:GOTO 160
220:LP"ENERG.BAT.NAO SUFICIENTE"
230:GOTO 160
240:O=X*L*L*6
250:PAUSE "VELOCIDADE CRUZEIRO":LF +
   1:LPRINT "VELOC.CRUZ."
260:INPUT "TEMPO VEL.CRUZ.(S)=";U:
   LPRINT "TEMPO VEL.CRUZ.(S)=";U
265:LPRINT "VEL.CRUZ.(M/S)=";U
270:M=U*U:LF +1
275:LPRINT "PERC.(M)";M
280:E=(Z+X*U*U)*M
284:E=E*.278E-3
285:LPRINT "ENERGIA(WH)=";E
290:P=Z*U+X*U*U*U
295:LPRINT "POT.(W)=";P:LF +1
300:GOTO 140
310:PAUSE "FRENAGEM":LF +1:LPRINT "F
   RENAGEM"
320:INPUT "TEMPO FRENAGEM(S)=";Q:
   LPRINT "TEMPO FRENAG.(S)=";Q
325:LPRINT "VEL.ANTES FREN. =";U
326:INPUT "VELOC.APOS FREN.=";F:
   LPRINT "VEL.APOS FREN. =";F
330:M=((U+F)/2)*Q:LF +1
335:LPRINT "DIST.PERC.FRENAG.(M)=";M
340:E=.5*W*U*U
360:E=E*.1*.278E-3
370:LPRINT "ENERG.REGENER(WH)=";E:LF
   +1
380:E=-E:GOTO 210
400:PAUSE "COSTEAMENTO":LF +1:LPRINT
   "COSTEAMENTO"
410:INPUT "TEMPO COSTEAM. (S)=";T:
   LPRINT "TEMPO COSTEAM. (S)=";T
420:LPRINT "VEL.CRUZ.(M/S)=";U:LF +1
430:EC=.5*W*U*U
440:DD=U:MM=DD+MM
445:ED=(Z+X*U*U)*DD
450:EC=EC-ED
460:U=J(2*EC/W)
470:IF HY>=TGOTO 500
480:HY=HY+1:GOTO 440
500:LPRINT "DIST. PERC.(M)";MM
505:EC=EC*.278E-3
510:LPRINT "ENER.CIN.REST.(WH)";EC
520:LPRINT "VELOC.POS COST.(M/S)";U
525:M=MM
530:GOTO 210
600:"M"CSIZE 1:LLIST
```

FIG.V.21 Listagem em BASIC para avallação do desempenho de um Veículo Elétrico.

V.6.3 Exemplo Aplicativo

No exemplo proposto utilizando os parâmetros do ciclo SAE - J277a - C para o veículo especificado abaixo obtemos:

Veículo: Potência do Motor : 28000 W

Massa Bruta : 3200 Kg

Área Frontal : 3 m^2

Massa das Baterias :1024 Kg

Densidade Energética : 20 Wh/Kg

Velocidade Máxima : 20 m/s

Coeficiente Aerodinâmico : 0.45

Coeficiente de Resistência ao Rolamento : 0.127

Aceleração : Tempo de Aceleração : 18 s

Velocidade de Cruzeiro : 13.33 m/s

Potência Necessária : 25 KW

Energia Consumida : 120 Wh

Distância Total Percorrida : 141.5 m

Velocidade de Cruzeiro : Velocidade de Cruzeiro : 13.33 m/s

Tempo de Velocidade de Cruzeiro : 20 s

Potência Necessária : 7.37 KW

Energia Consumida : 41 Wh

Distância Total Percorrida : 408.5 m

Costeamento : Velocidade no início do costeamento : 13.33 m/s

Tempo de costeamento : 8 s

Distância Percorrida : 113 m

Velocidade após costeamento : 11.8 m/s

Frenagem Regenerativa : Velocidade inicial : 11.8 m/s

Tempo de frenagem : 9 s

Velocidade após a frenagem : 0.0 m/s

Energia Regenerada : 6.19 Wh

Distância Percorrida : 53.1 m

Tempo Parado : 20 s

Distância Total Percorrida : 575 m

Energia Consumida : 154.81 Wh

Considerando que o intervalo de tempo de costeamento também seja utilizado para frenagem regenerativa (ciclo SAE - J277a modificado).

Frenagem Regenerativa : Tempo Frenagem : 17 s

Velocidade inicial : 13.33 m/s

Velocidade final : 0.0 m/s

Energia Regenerada : 7.9 Wh

Tempo Parado : 20 s

Distância Total Percorrida : 521 m

Energia Consmida : 153.1 Wh

Apesar da operação costeamento aumentar a autonomia do veículo em um tráfego intenso ela nem sempre pode ser utilizada, daí o fato de que em um grande número de trabalhos sobre veículos o tempo de costeamento é desprezado e acrescido ao tempo de frenagem regenerativa.

A distância percorrida por ciclo sem a operação costeamento é de

521 m, a energia consumida é de 153.7 Wh, a energia disponível é de 20.480 Wh, logo podemos realizar 133.7 ciclos completos (descarga total das baterias, com tensão final de 10.50 V), considerando ideal (ef = 1) o rendimento do veículo elétrico, o que não é verdadeiro; uma estimativa de eficiência pode ser realizada de maneira satisfatória considerando os seguintes valores de eficiência para os subsistemas :

- conjunto de baterias : 0.80
- máquina elétrica : 0.75
- sistema de acionamento e controle : 0.85
- sistema de transmissão : 0.93 (1)
- usuário : 0.90
- Total : o.46

Portanto a autonomia do veículo considerado é de 32.05 Km, sem a operação costeamento, ou de 34.93 Km considerando o costeamento.

Na FIG.V.22 apresentamos os resultados obtidos para o veículo proposto utilizando o programa computacional apresentado na FIG.V.21.

Na FIG.V.23 mostramos o comportamento da velocidade do veículo em relação ao torque para valores constantes de potência.

Na FIG.V.24 encontramos a energia consumida durante um tempo fixo de aceleração até atingir a velocidade de cruzeiro desejada considerando um veículo elétrico ideal (eficiência = 1).

Na FIG.V.25 encontramos a energia consumida por kilometro para vários valores de velocidade, considerando um veículo elétrico ideal (eficiência = 1).

dados de saída

```
ACELERACAO
VEL.CRUZ.(M/S)= 1.33E 01
TEMPO ACEL.(S)= 1.00E 01

POTENCIA (W)= 2.50E 04
ENERG.(WH) 1.20E 02
DIST.PERC.(M) 1.41E 02

ENERG.REST.=(WH) 2.02E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 1.41E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.31E 05

VELOC.CRUZ,
TEMPO VEL.CRUZ.(S)= 2.00E 01
VEL.CRUZ.(M/S)= 1.33E 01

PERC.(M) 2.66E 02
ENERGIA(WH)= 4.10E 01
POT.(W)= 7.37E 03

ENERG.REST.=(WH) 2.02E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 4.00E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.31E 05

COSTEAMENTO
TEMPO COSTEAM. (S)= 0.00E 00
VEL.CRUZ.(M/S)= 1.33E 01

DIST. PERC.(M) 1.13E 02
ENERG REST.(WH) 0.19E 01
VELOC.POS COST.(M/S) 1.18E 01
ENERG.REST.=(WH) 2.01E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 5.21E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.39E 05

FRENAGEM
TEMPO FRENAG.(S)= 9.00E 00
VEL.ANTES FREN. = 1.18E 01
VEL.APOS FREN. = 0.00E 00

DIST.PERC.FRENAG.(M)= 4.72E 01
ENERG.REGENER(WH)= 0.19E 00

ENERG.REST.=(WH) 2.02E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 5.68E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.39E 05
```

- com costeamento -

entrada de dados

```
DADOS DO VEICULO :

POT.MOTOR (W)= 2.00E 04
MASSA VE.(Kg)= 3.20E 03
AREA FR.(M^2)= 3.00E 00
MASSA BAT.(Kg)= 1.02E 03
DENS.ENERG.(WH)= 2.00E 01
VEL.MAX.(M/S)= 2.00E 01
COEF.AEROD.= 4.50E-01
COEF.ROL.= 1.22E-01
```

dados de saída

```
ACELERACAO
VEL.CRUZ.(M/S)= 1.33E 01
TEMPO ACEL.(S)= 1.00E 01

POTENCIA (W)= 2.50E 04
ENERG.(WH) 1.20E 02
DIST.PERC.(M) 1.41E 02

ENERG.REST.=(WH) 2.02E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 1.41E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.31E 05

VELOC.CRUZ,
TEMPO VEL.CRUZ.(S)= 2.00E 01
VEL.CRUZ.(M/S)= 1.33E 01

PERC.(M) 2.66E 02
ENERGIA(WH)= 4.10E 01
POT.(W)= 7.37E 03

ENERG.REST.=(WH) 2.02E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 4.00E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.31E 05

FRENAGEM
TEMPO FRENAG.(S)= 1.00E 01
VEL.ANTES FREN. = 1.33E 01
VEL.APOS FREN. = 0.00E 00

DIST.PERC.FRENAG.(M)= 1.19E 02
ENERG.REGENER(WH)= 7.90E 00

ENERG.REST.=(WH) 2.02E 04
PERCURSO PERCOR.(M)= 5.20E 02
ENERG.REST. VC PERCORRO(M)= 1.31E 05
```

- sem costeamento -

FIG.V.22 Desempenho do Veículo Proposto.

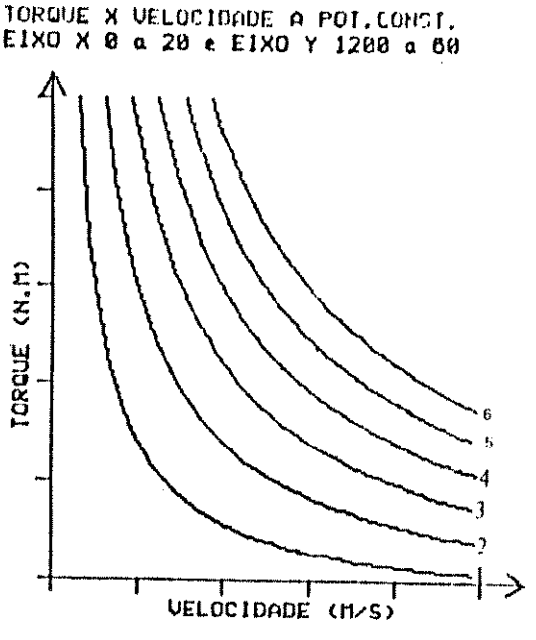


FIG.V.23 Velocidade versus Torque para valores constantes de potência : 1 - 5000 W, 2 - 10000 W, 3 - 15000 W, 4 - 20000 W, 5 - 25000 W, 6 - 30000 W

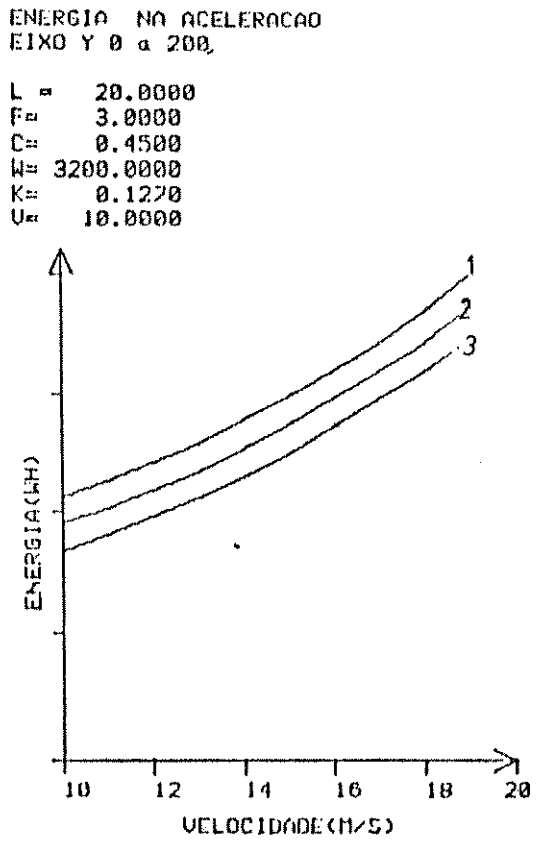


FIG.V.24 Energia consumida versus velocidade para um tempo fixo de aceleração : 1 - 15 s, 2 - 18 s, 3 - 21 s.

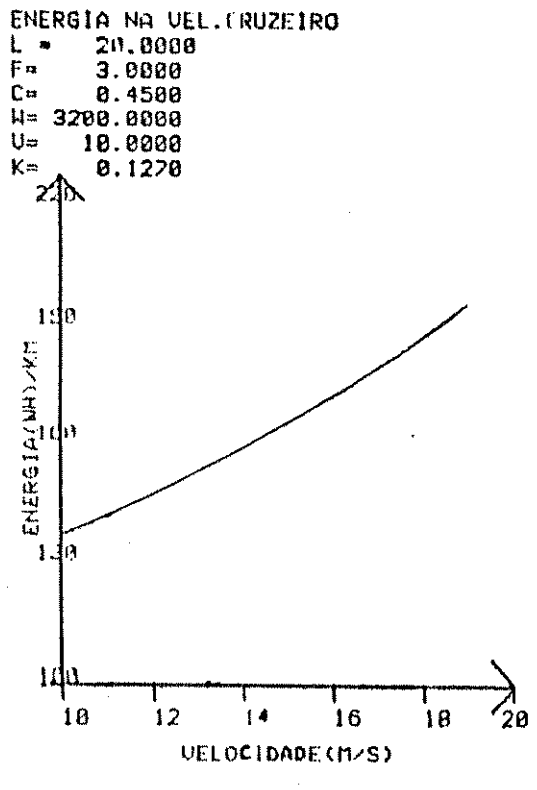


FIG.V.25 Energia consumida por kilometro por velocidade.

Na FIG.V.26 temos o comportamento do torque em função da potência no instante final de um dado tempo de aceleração.

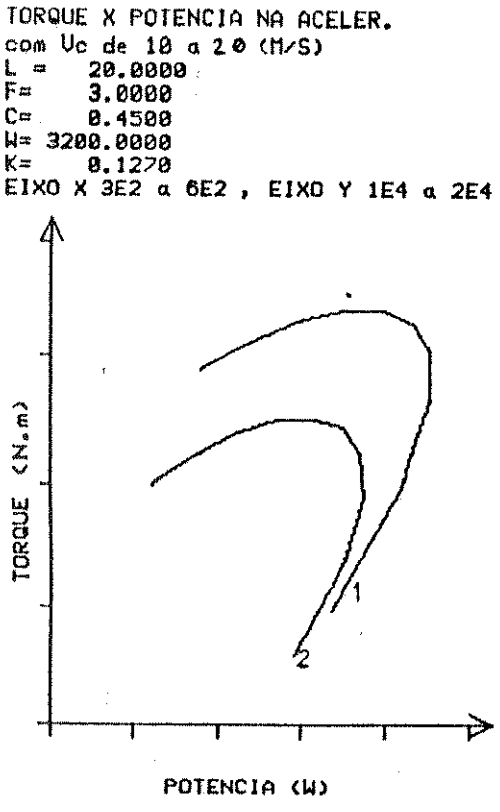


FIG.V.26 Torque versus potência no instante final de aceleração
Tempo de aceleração : 1 - 18 s, 2 - 22 s.

Na FIG.V.27 mostramos o comportamento do torque em função da velocidade no instante final de aceleração. Usualmente considera-se que na aceleração o veículo é operado com torque constante, portanto através da FIG.V.27 determinamos o valor do torque para atingir uma determinada velocidade de cruzeiro para um dado tempo de aceleração; observa-se contudo que para velocidades próximas da velocidade limite do veículo, o valor de torque determinado não é máximo, já que o mesmo não ocorre no instante final da aceleração.

TORQUE NA ACELERACAO
L = 20.0000
F= 3.0000
C= 0.4500
W= 3200.0000
K= 0.1270
EIXO X 10 a 20, EIXO Y 3E2 a 20E3

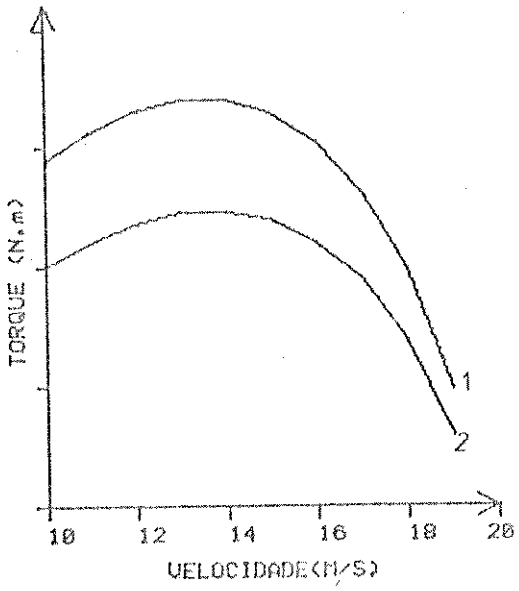


FIG.V.27 Torque versus velocidade na aceleração.

Tempo de aceleração : 1 - 18 s, 2 - 22 s.

Na FIG.V.28 apresentamos o comportamento do veículo, em estudo, dentro do ciclo padrão SAE J 277a - C.

VELOCIDADE X TEMPO - SAE J 277a
EIXO X 0 a 80, EIXO Y 0 a 60
VC= 13.3300
VL= 20.0000
AF= 3.0000
CD= 0.4500
Ta= 18.0000
TV= 20.0000
TC= 8.0000
TF= 9.0000
W= 3200.0000
K= 0.1270

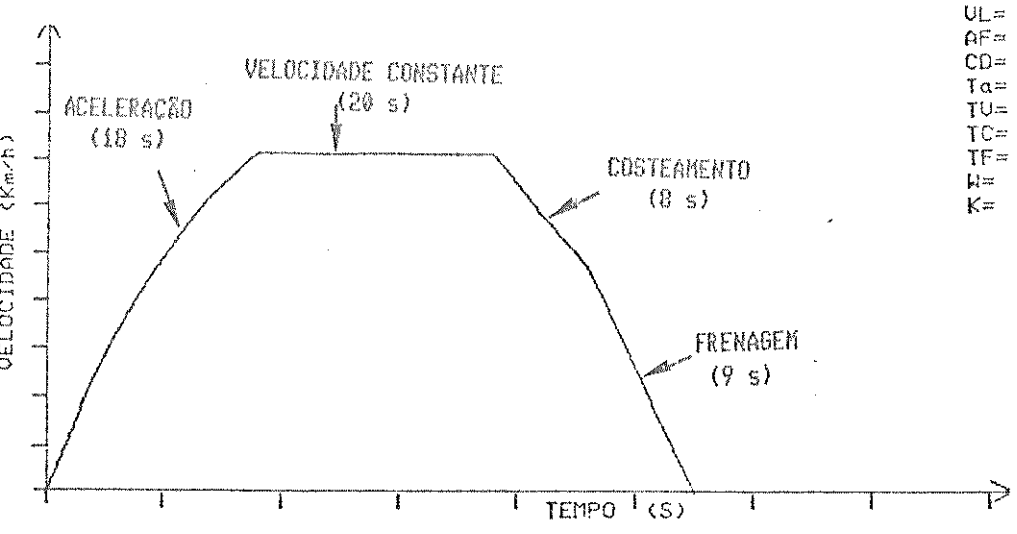


FIG.V.28.a Velocidade x Tempo no Ciclo SAE J 277a - C.

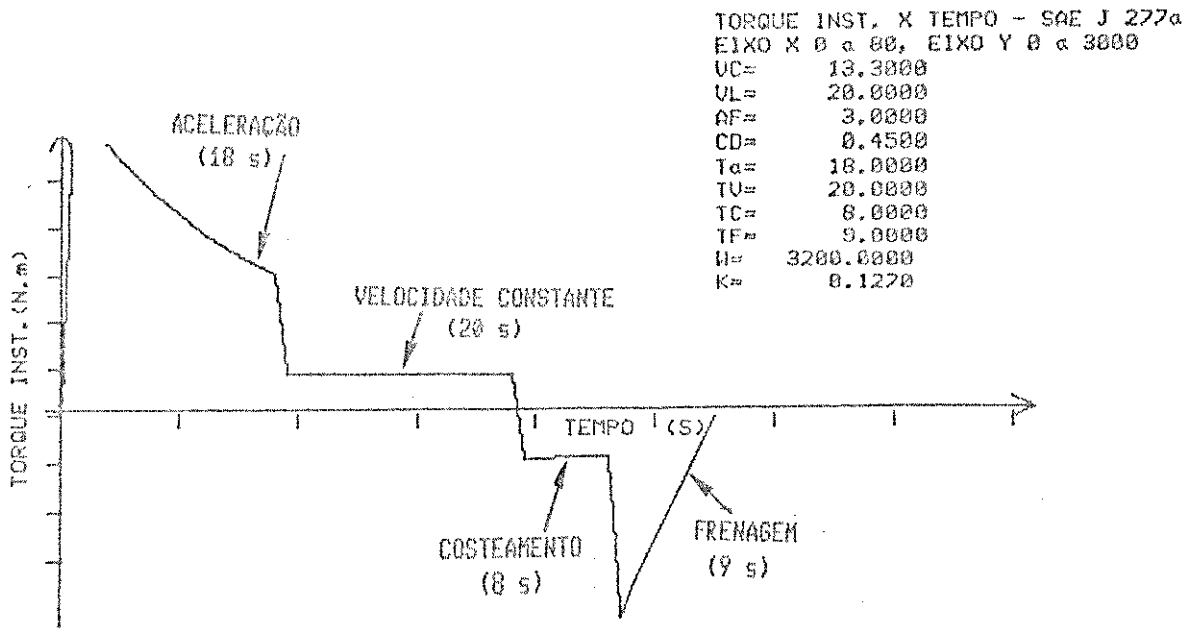


FIG.V.28.b Torque x Tempo no Ciclo SAE J 277a - C.

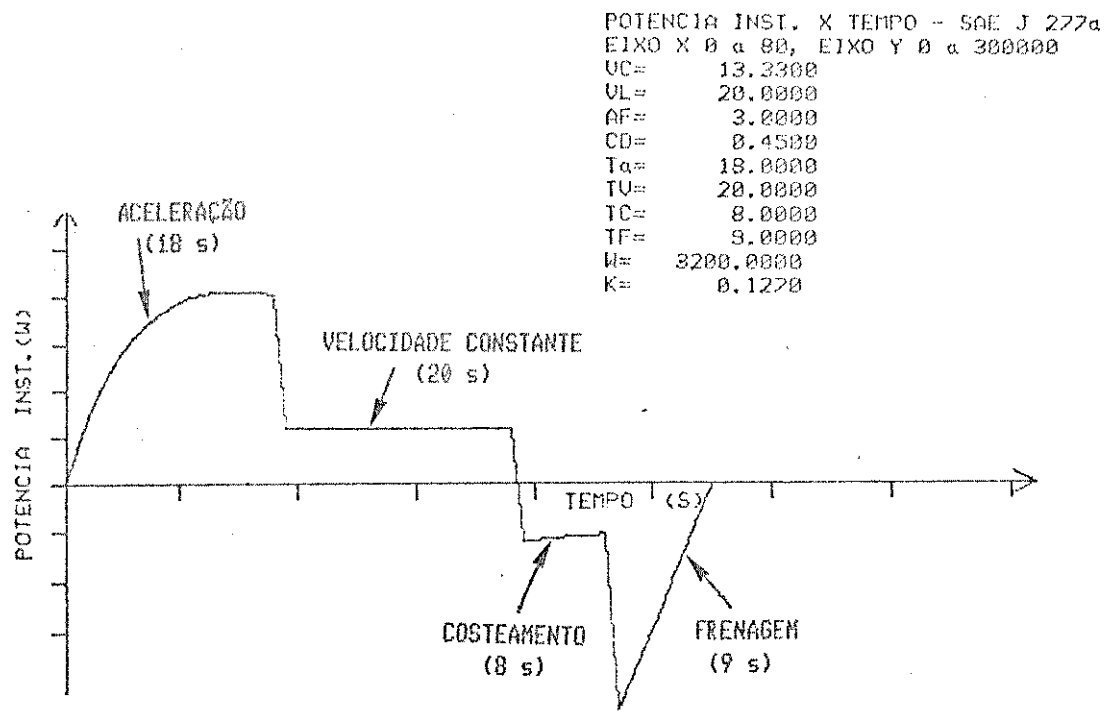


FIG.V.28.c Potência x Tempo no Ciclo SAE J 277a - C.

V.7 Otimização : Considerações

Os conceitos matemáticos de otimização tem sido aplicados com sucesso em muitos sistemas físicos nos últimos anos. Certos tipos de sistemas de controle, trajetórios de veículos espaciais e mísseis, e minimização do custo de geração em sistemas interligados de hidroelétricas são algumas das áreas em que as técnicas de otimização são utilizadas com sucesso nos dias atuais. Mais recentemente estas técnicas tem sido aplicadas em VCI visando a minimização do consumo de combustível através de computadores de bordo que controlam o motor do veículo visando sempre obter o máximo de rendimento. Tais sistemas são agora uma parte da engenharia de controle em alguns veículos convencionais.

Técnicas de otimização poderiam ser utilizadas com sucesso no projeto de VE. Por exemplo, na maioria das vezes os motores de tração utilizados nos VEs são baseados em projetos de motores industriais convencionais. Estes motores são pesados e caros (C.C.) e portanto uma das razões do alto custo inicial dos VEs. Logo poderíamos otimizar os projetos de VEs com a utilização de motores específicos para tração (8).

Outros exemplos seriam:

- localização das baterias no veículo,
- sistemas de transmissão apropriado para tração elétrica,
- sistemas de recarga, entre outros.

V.8 Sumário

Neste capítulo apresentamos uma classificação de modelos computacionais para serem utilizados em um projeto de VE.

Programas computacionais e exemplos explicativos obtidos a partí de dados experimentais nos possibitam avaliar a bateria chumbo-ácido, fonte energética do veículo.

Mostramos como podemos determinar a eficiência de uma máquina elétrica em um ciclo de percurso de um veículo .

A seguir apresentamos um programa que permite o cálculo da energia consumida, potência necessária e distância percorrida num dado percurso.

Fazer um programa de simulação completa abordando todas as possibilidades de trajeto, todas as causas de possíveis defeitos e eventual manutenção para VEs implementados, ou simular um VE hipotético com motor, controle e bateria projetados em computadores pode ser um trabalho extremamente vasto e diversificado e abranger várias equipes de pesquisas nas diversas áreas do conhecimento.

V.9 Bibliografia

1 - Unnewehr,L.E. e Nasar,N.A. "Electric Vehicle Technology"- John Wiley & Sons - 1982.

2 - Adams,J.M.; Templin,J.R.; Mayar,L.W. "Electric Vehicle System Simulation with Improved Battery Model" - IEEE-IAS, 972-980, 1979.

3 - Unnewehr,L.E.; Freedman,R. "A Comparative Evaluation of Battery Models for Eletric Vehicle Simulation" - IEEE-IAS , 981-994, 1979.

4 - Unnewehr,L.E.; Knoop,C.W. "Eletrical Component Modeling and Sizing for EV Simulation" - SAE paper 780215, 877-889, 1978.

5 - Dobner,D.J.; Woods,E.J. "An Electric Vehicle Dynamic Simulation" - SAE paper 82077, 2748-2760, 1982.

6 - White,K.E. "A Digital Computer Program for Simulating Electric Vehicle Performance" - SAE paper 780216 - Congress and Exposition Detroit, Michigan, 283-296, 02-1978.

7 - Dongen,L.A.M.; Graaf,R.; Visscher,W.H.M. "Theoretical Prediction of Eletric Vehicle Energy Consumption and Battery State of Charge During Arbitrary Driving Cycles" EVC Symposium VI Baltimore, Maryland, 1-13, paper EVC-8115,1981.

8 - Cornell,E.P.; Guess,R.; Turnbull,F.G. "Advanced Motor Developments for Electric Vehicles" - IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.VT-26, nº2, may, 128-134, 1977.

9 - Gutekunst,K.; Rusch,W. "Lead-Acid Energy Converter System" Septieme Symposium International du Véhicule Électrique Routier, 47-52, Versailles, France, 1984.

10 - Herbert,G.F.; Anderson,A.E. "Power Requirements of Eletric Vehicles "- SAE 710238, 927-958, 1971.

11 - Efroymson,M.A. "Multiple Regression Analysis"- Mathematical Methods for Digital Computers - V.1, 193-203, Edited by Ralston,A.; Wilf,H.S., John Wiley & Sons, 1960.

12 - Barreto,G.; Bottura,C.P. "Modelamento e Simulação Digital do Desempenho de Veículos Elétricos" 38ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC - Curitiba Paraná - julho de 1986.

13 - Silva,O.F.; Barreto,G. "Avaliação das Equações de Peukert e Shepherd para Baterias Chumbo-Ácido em Regime de Descarga" 38ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC - Curitiba Paraná - julho de 1986.

14 - Rosário,J.M. "Análise Dinâmica De Um Sistema Com Bifurcação De Potência E Controle De Velocidade " - Tese de Mestrado - DEM - FEC - UNICAMP - 1984.

15 - Azevedo,H.R. "Simulação Digital De Desempenho de Veículos Híbridos Bateria / Motor de Combustão Em Configuração Série" Tese de Mestrado - COPPE - UFRJ -1984.

16 - Stavropovlov,K. "Simulação Em Computador De Um Veículo Híbrido Com Armazenamento De Energia Em Volante " - Tese de Mestrado - DEM - FEC - UNICAMP - 1981.

CAPÍTULO VI

ANTEPROJETO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

ANTEPROJETO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

VI.1. Introdução

O projeto de um veículo elétrico ideal para uma determinada aplicação irá requerer uma série de especificações que algumas vezes precisarão ser adaptadas à realidade nacional. Por exemplo, as baterias nacionais chumbo-ácido apresentam uma densidade energética máxima de 20 Wh/Kg o que é uma grande diferença para os 30 Wh/Kg das baterias européias; ou 50 Wh/Kg das de níquel-ferro ainda não fabricadas no Brasil.

O objetivo deste capítulo é mostrar um procedimento inicial para projetar um veículo elétrico.

Nenhum projeto de veículo inédito será apresentado, pois não teríamos como avaliar a validade dos resultados calculados. Portanto nos exemplos apresentamos dados de veículos existentes para utilização utilitária a várias capacidades de carga e determinamos a potência do motor e a autonomia prevista bem como comparamos com dados reais obtidos pelos fabricantes.

VI.2 - Como Projetar

A seguir apresentamos uma série de procedimentos que devem ser adotados no início de um projeto de um veículo elétrico.

1 - Determinar a finalidade do veículo.

2 - Estimar a massa total do veículo, e sua forma (coeficientes aerodinâmicos e de rolamento).

3 - Determinar o ciclo de percurso onde se enquadra o veículo pretendido, por exemplo ciclos SAE - J277a (II.3.8).

4 - Utilizando o programa computacional do ítem V.3.2a determinar o valor máximo de potência exigida do motor para atender os requisitos do ítem 3.

5 - Determinar o tipo de acionamento, C.C. ou C.A. e o controlador a ser usado .

6 - Utilizando tabelas de máquinas elétricas escolher a que irá atender nossos requisitos, considerando o fator de serviço, e a eficiência da máquina.

7 - A partir da escolha do motor é possível determinar as características do banco de baterias, como tensão nominal requerida, e capacidade para atender a autonomia pretendida.

É evidente que o roteiro acima apresentado precisa de estimativas iniciais, tais como área frontal do veículo, coeficientes aerodinâmico e de rolamento, massa total do veículo, estimativas estas que precisam ser efetuadas no ítem 2.

VI.3 Exemplo para um Veículo Utilitário

Apresentamos a seguir anteprojetos para 3 veículos utilitários já existentes no exterior [Ref.3].

A - VW Electric Van

1 - Veículo Utilitário - tipo furgão

Dados de entrada para os programas computacionais do capítulo V.

2 - Massa Bruta - 3075 Kg.

- carga útil - 789 Kg
- massa líquida - 2286 Kg
- área frontal - 3 m^2
- velocidade máxima - 19.72 m/s (72 Km/h)
- massa das baterias - 738 Kg
- densidade energética - 30 Wh/Kg (valor estimado)
- coeficiente aerodinâmico - 0.55 (valor estimado)
- coeficiente de rolamento - 0.127 (valor estimado)
- eficiência do veículo - 0.44 (valor estimado)

3 - Percurso - Ciclo SAE - J277a - C.

Resultados de saída dos programas computacionais :

4 - Valor da Potência do Motor :

Obtido para aceleração de - 13.33 m/s em 18 s.

a) estimado pelo programa - 23000 W

b) utilizado pelo fabricante - 16000 W

Determinação da Autonomia :

Condição de Ensaio - Massa bruta 2681 Kg

- Aceleração :

tempo de aceleração - 18 s

velocidade atingida - 13.33 m/s

potência necessária - 21200 W

energia consumida - 109 Wh

distância percorrida - 142 m

- Velocidade de Cruzeiro :

tempo em velocidade de cruzeiro - 20 s

potência necessária - 6930 W

energia consumida - 38.5 Wh

distância percorrida - 266 m

- Costeamento :

tempo de costeamento - 8 s

distância percorrida - 113 m

- Frenagem :

tempo de frenagem - 9 s

energia recuperada - 5.04 Wh

distância percorrida - 52.3 m

Autonomia a Velocidade Constante:

a) estimada pelo programa - 66.7 Km

b) obtida na pratica - 74.4 Km

Autonomia no Ciclo Padrão:

a) estimada pelo programa - 39.2 Km

b) obtida na pratica - 39.9 Km

B - GRUMMAN OLSON

1 - Veículo utilitário - tipo furgão

Dados de entrada dos programas computacionais do capítulo V.

2 - Massa bruta - 1451 Kg

- Massa útil - 197 Kg
- Massa líquida - 1254 Kg
- área frontal - 3 mΛ2 (valor estimado)
- coeficiente aerodinâmico - 0.55 (valor estimado)
- coeficiente de rolamento - 0.127 (valor estimado)
- massa das baterias - 421 Kg
- densidade energética - 30 Wh/Kg
- velocidade máxima - 23.6 m/s (85 Km/h)

Resultados de saída dos programas computacionais :

3 - Valor da potência do motor

Obtido para aceleração de: 13.33 m/s em 18 s

a) estimada pelo programa - 13044 W

b) utilizado pelo fabricante - 13400 W

Determinação da Autonomia à Velocidade Constante:

a) estimada pelo programa - 53.95 Km

b) obtido na pratica - 52.80 Km

C - LUCAS BEDFORD

1 - Veículo utilitário - tipo furgão

Dados de entrada dos programas computacionais do capítulo V.

2 - Massa bruta - 3500 Kg

- massa líquida - 2500 Kg
- massa das baterias - 1085 Kg
- densidade energética - 30 Wh/Kg (valor estimado)
- área frontal - 3 m^2
- coeficiente aerodinâmico - 0.55 (valor estimado)
- coeficiente de rolamento - 0.127 (valor estimado)
- rendimento - 0.44 (valor estimado)
- velocidade máxima - 22.23 m/s (80 Km/h)

Resultados de saída dos programas :

3 - Valor da Potência do Motor:

Obtido para a aceleração de - 13.33 m/s em 18 s

a) estimada pelo programa - 32609 W

b) utilizada pelo fabricante - 40000 W

Determinação da Autonomia à Velocidade Constante:

a) estimado pelo programa - 81.84 Km

b) obtido na pratica - 80.00 Km

Os veículos A, B, C apresentam acionamento tipo recortador S.C.R.

A partir dos dados obtidos através dos programas propostos con-

cluímos que podemos avaliar um veículo elétrico sem cometer grandes desvios.

Devemos levar em conta a dificuldade para obter dados reais dos coeficientes aerodinâmicos e de rolamento, bem como os valores das eficiências, apesar dos valores que foram estimados estarem dentro dos limites aceitáveis e obtidos em inúmeros trabalhos publicados recentemente e já citados nos capítulos anteriores.

VI.4. Sumário

Neste capítulo apresentamos um procedimento para iniciar o projeto de um veículo elétrico. Através de comparações com veículos existentes pudemos prever a boa aplicabilidade do modelo proposto, apesar das dificuldades na obtenção de dados reais para os coeficientes aerodinâmico e de rolamento e para as eficiências destes veículos.

Na bibliografia apresentada devemos ressaltar no trabalho de Collie [Ref.2] uma tabela com avaliação de inúmeros veículos elétricos. A [Ref.3] é um anuário onde estão catalogados todos os veículos elétricos comercializados na Europa em 1983.

VI.5. Bibliografia

1 - "Esboço Preliminar do Perfil de um Veículo Elétrico Utilitário à Baterias para Concessionárias de Serviços Públicos" Protran - Engenharia - I Seminário Sobre Veículos Elétricos Utilitários a Baterias - São Paulo - agosto de 1984.

2 - "Eletric and Hybrid Vehicles" - Edited by Collie, M.J. - Noyes Data Corporation, 1979.

3 - "EV - EUROPE - 1983" AVERE - Association Européenne des Véhicules Électriques Routiers, 1983.

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

VII CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

VII.1 - Introdução

Uma das razões para a construção de um VE foi que através deste projeto poderíamos fazer convergir os resultados de pesquisas em controle, acionamento, eletrônica de potência e eletroquímica, bem como implantar laboratórios de pesquisa em eletrônica de potência e eletroquímica na área de Engenharia Elétrica da UNICAMP.

Além de Projetos de Financiamentos e Auxílios para Pesquisas obtidos junto ao CNPQ, FAPESP, FDTU e EBTU, conseguimos um veículo para instalar os sistemas de acionamento e controle em desenvolvimento possibilitando a montagem de um protótipo de veículo elétrico, com sistema tracionário CC-CA. Na segunda quinzena de dezembro de 1980, através de um ofício enviado à Reitoria da UNICAMP, obtivemos a doação por parte desta de uma perua Kombi- Volkswagem 1500, na qual iniciamos os serviços de adaptação necessários para a implementação do sistema CC-CA. Tais adaptações envolveram instalações mecânicas e elétricas, modificando-se dessa maneira grande parte da estrutura do veículo.

Uma pesquisa e uma metodologia que, apesar de não estarem voltadas para a construção de um novo veículo que opere em condições ótimas, foram evidentemente necessárias para a realização destas adaptações como um todo.

Queremos ressaltar, ainda, que a adaptação deste veículo nos forneceu uma experiência que facilitará o projeto e construção de novos veículos elétricos.

Em agosto de 1982 inicia-se junto a FINEP o projeto Controle de Acionamento e Eletrônica de Potência, sendo que um dos resultados esperados era a implementação do sistema de controle e acionamento CC-CA. Instalamos um motor de C.A. de 20 HP no veículo e iniciamos os testes com o veículo estacionado. O inversor trifásico não apresentava o desempenho esperado e o projeto com a FINEP começava a sofrer problemas financeiros. Como precisavamos testar o sistema de acoplamento e o conjunto de baterias optamos pela colocação de um motor de 5 HP de C.C. no veículo. O recortador instalado foi projetado e desenvolvido em nossos laboratórios, com bases em projetos anteriormente já desenvolvidos.

A partir deste momento realizamos alguns testes preliminares no veículo . Os resultados obtidos nos possibilitaram avaliar o programa computacional desenvolvido no Capítulo V, bem como o comportamento do veículo com as adaptações efetuadas.

Na próxima etapa desta atividade pretende-se a instalação de um sistema em C.A. de 20 HP, que irá possibilitar um desempenho compatível com o exigido no ciclo padrão SAE J277a - C.

VII.2 - Descrição do Projeto

Após obtermos o veículo, este precisou passar por uma série de adaptações para a utilização em tração elétrica.

A pesquisa e a metodologia utilizadas para este trabalho de adaptações e instalações envolveram as seguintes etapas de operações abaixo relacionadas :

- Desmontagem e remoção do motor a combustão da Kombi e demais partes dispensáveis, por exemplo tanque de combustível.

- Idealização e planejamento do sistema de transmissão da tração motora e do sistema de acoplamento do motor elétrico.

- Projeto e estudo de três tipos de acoplamento, levando em consideração todos os fatores que poderiam estar relacionados com a utilização no modo tração.

- Escolha do sistema de acoplamento mais adequado e início das operações para a construção e instalação do mesmo, que envolveram as seguintes subetapas :

1 - Aquisição de um novo eixo do girabrequim V.W. (com diâmetro original).

2 - Corte da ponta do eixo do girabrequim e adaptação do mesmo através de serviço de torno e solda.

3 - Corte da ponta do eixo do motor elétrico.

4 - Obtenção de um cilindro de aço de especificações apropriadas para ser soldado à ponta do girabrequim constituindo assim uma nova peça.

5 - Compra do acoplamento escolhido e de um rolamento com especificações para as respectivas finalidades.

6 - Perfuração e abertura de rasgo para a chaveta no acoplamento

adquirido.

7 - Obtenção de um novo bloco de motor V.W. para ser cortado.

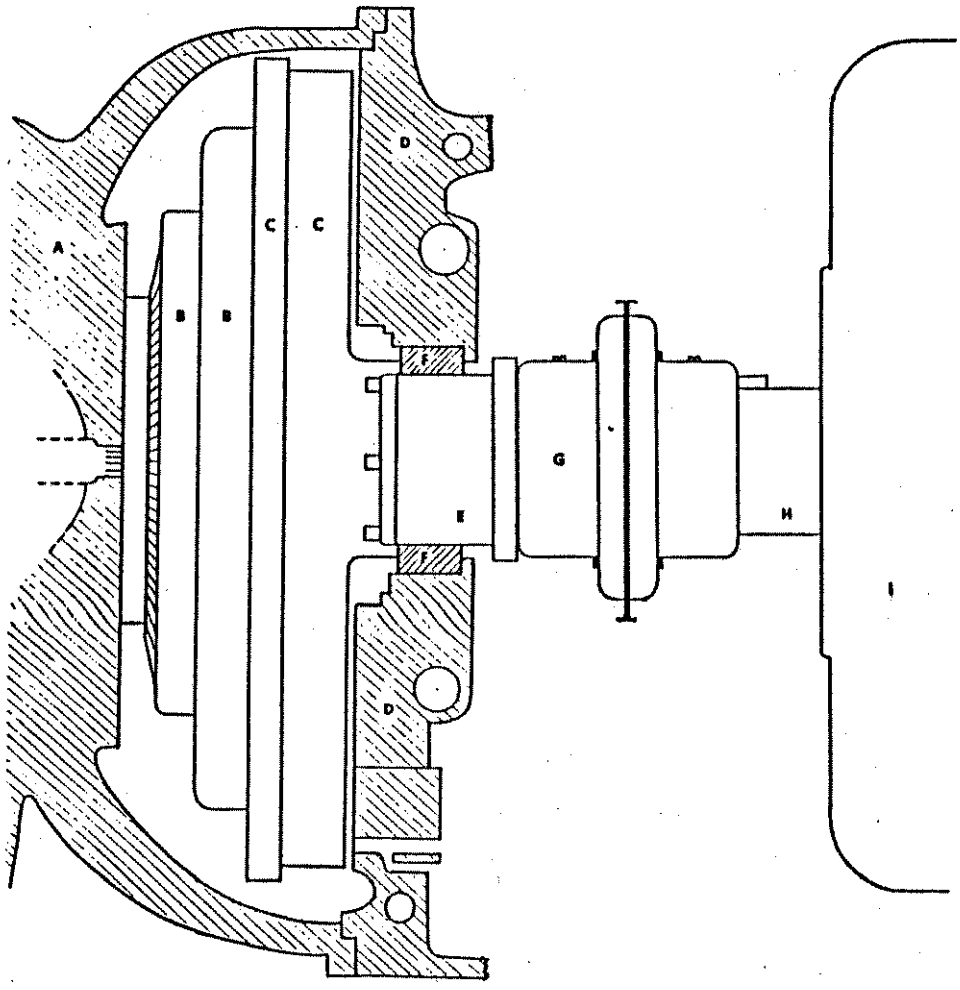
8 - Corte e usinagem do bloco do motor para adaptação de parte do sistema

Sistema de Acoplamento

O acoplamento do motor ao sistema tracionário do veículo utiliza a caixa de câmbio com o objetivo de aproveitar a relação de marchas do sistema mecânico original, embora o tipo de controle que desejamos empregar dispense o uso da mesma. A caixa de câmbio é utilizada como uma forma de compensação do sistema de controle quando não for possível eliminar instabilidades em baixas frequências.

O acoplamento escolhido para ser usado entre o motor elétrico e a caixa de câmbio é do tipo 6 F de fabricação FALK, pois é versátil quanto ao tipo de esforços a que será submetido o veículo,em especial no que se refere ao grau de desalinhamento permitido.

Na FIG.VII.1 mostramos a adaptação efetuada para a montagem do sistema de acoplamento entre o motor e a caixa de câmbio.



Legenda : A - Carcaça da caixa de câmbio

B - Conjunto da embreagem

C - Volante da embreagem

D - Parte anterior da carcaça do motor a explosão

E - Ponta do eixo girabrequim

F - Rolamento blindado

G - Acoplamento FALK 6F

H - Eixo do motor elétrico

I - Motor Elétrico

FIG.VII.1 Sistema de acoplamento entre o motor e a caixa de câmbio

Acondicionamento das baterias

Projetamos e construímos um recipiente em madeira com dimensões que permitem conter 21 baterias de 48 Ah S.L.I.. O recipiente foi fixado no assoalho do veículo por meio de parafusos, sendo que consideramos como provisório este tipo de fixação e pretendemos mais adiante instalar o recipiente sobre um sistema de trilhos e rolamentos, de tal forma que o mesmo possa ser removido, quando da descarga das baterias e ser substituído, por um conjunto igual que contenha baterias carregadas.

As baterias, 19, foram ligadas em série para alimentação do motor e 2 foram destinadas para o sistema de controle do acionamento. Para a ligação destas baterias utilizamos terminais e cabos apropriados.

Instalação da Máquina Elétrica

Foi projetado e construído um suporte de vigas U soldadas entre si para fixação do motor elétrico no veículo. Após a construção deste suporte instalamos o motor no veículo. Inicialmente instalamos um motor de indução de 20 HP pesando 115 Kgf. O suporte foi fixado na carroceria do veículo por meio de parafusos e é desta forma removível.

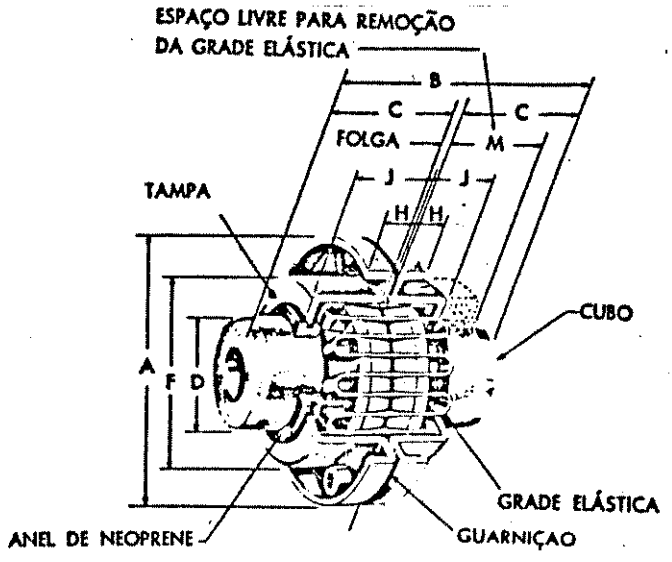
Em outro protótipo a ser construído posteriormente a máquina elétrica deverá ser instalada em um local mais apropriado.

Ajuste do alinhamento da máquina elétrica do veículo.

A dificuldade do alinhamento do motor do VE está associada a presença da borracha de amortecimento colocada nos 4 pés do motor; com o passar do tempo a borracha vai cedendo tirando o motor do alinhamento, daí a necessidade de uma manutenção periódica para recolocár o motor no alinhamento correto que é feito com a colocação de arruelas.

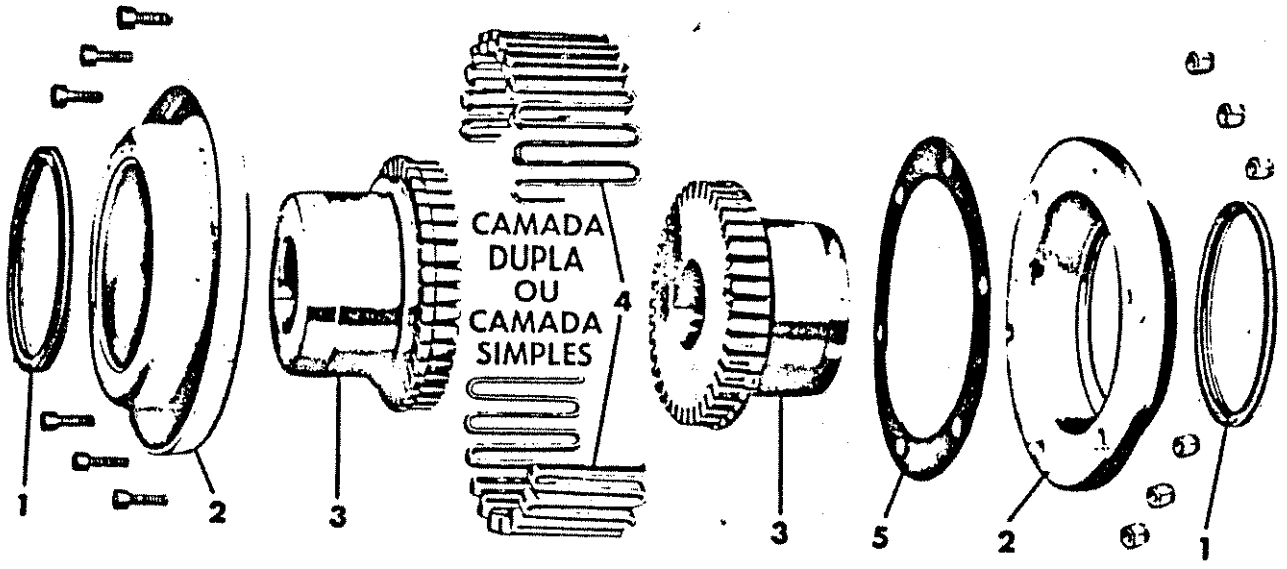
O tipo de acoplamento utilizado permite desalinhamentos axial e angular máximos; a partir destes pontos um realinhamento é necessário.

Na FIG.VII.2 mostramos um acoplamento FALK tipo 6 F.



Tamanho do Acoplamento	Velocidade máxima r.p.m.		Diâmetro máximo do furo	Diâmetro mínimo do furo	DIMENSÕES EM POLEGADAS								FOLGA em Polegadas			Peso aprox., furo mín. lbs.	Graxa necess. lbs.	Tamanho do Acoplamento
					A*	B†	C	D	F	H	J	M*	Mín.	Norma	Máx.			
6F	6000		1 13/16	3/16	5	4 1/8	2 1/8	2 11/32	3 1/8	1/8	1 1/8	2 1/4	1/16	1/8	3/16	10	1/8	6F

Dimensões do Acoplamento



Peças do Acoplamento Falk tipo 6 F :

1 - anéis de neoprene

2 - tampas de vedação

3 - cubos simétricos, podendo divergir no diâmetro dos furos e os rasgos da chaveta.

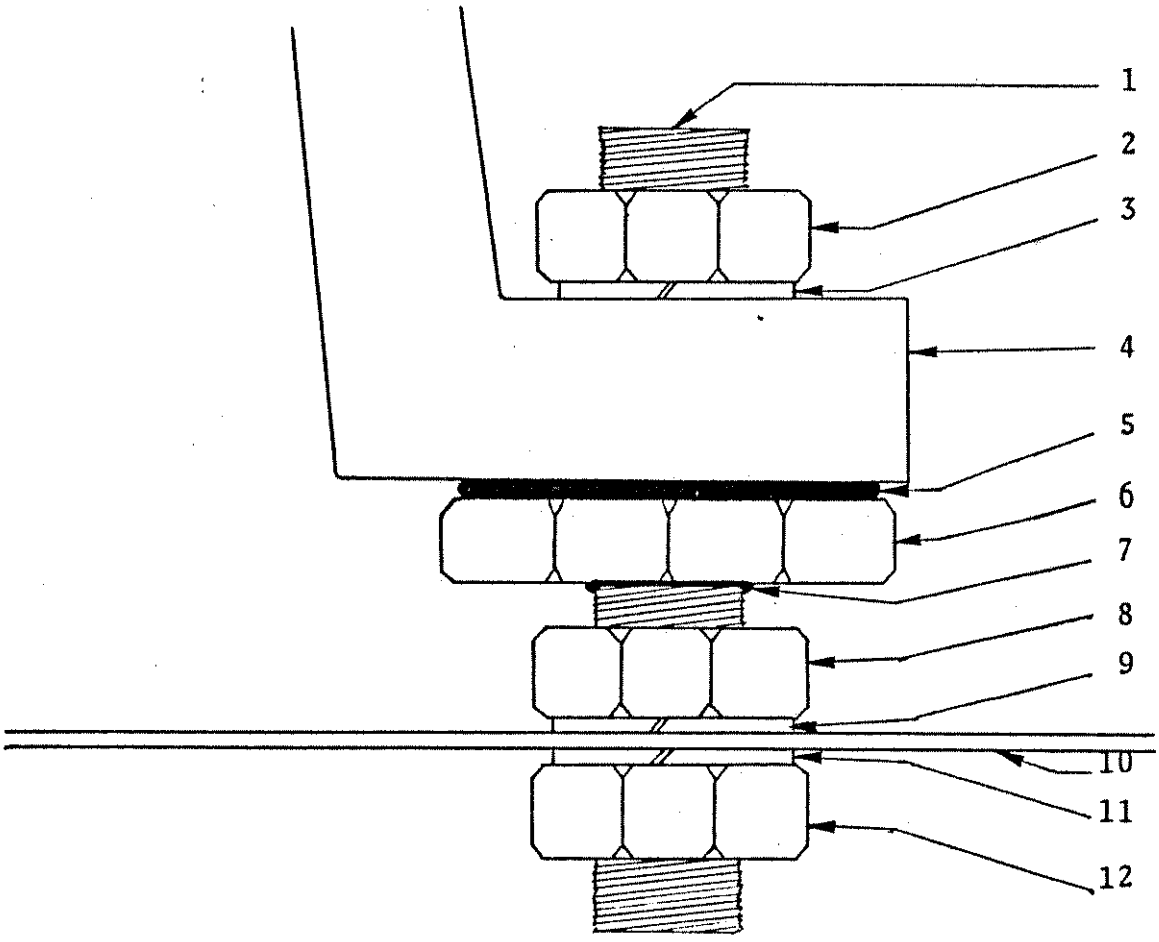
4 - grade elástica

5 - guarnição : colocada entre as tampas para impedir o vasamento de graxa

FIG.VII.2 Acoplamento Falk tipo 6 F.

Na FIG.VII.3 mostramos o sistema de ajuste mecânico do alinhamento do motor.

O sistema de acoplamento instalado entre a máquina elétrica e o veículo permite substituir a máquina de modo bastante simples, e assim o fizemos para a colocação do motor de corrente contínua de 5 HP.



1 - Parafuso

2 - Porca de fixação do superior

3, 9 e 11 - Arruelas de Pressão

4 - Base do motor elétrico

5 - Arruela de borracha

6 - Porca de ajuste soldada ao parafuso

7 - Solda

8, 12 - Porcas de fixação inferiores

10 - Suporte do Motor

FIG.VII.3 Sistema de Ajuste Mecânico do Alinhamento do Motor

VII.3 - Desempenho Apresentado

O veículo adaptado não foi originalmente projetado para ser utilizado como VE. O motor e o conjunto de baterias utilizados foram os disponíveis no momento e não os pretendidos, portanto o desempenho apresentado esta dentro das expectativas decorrentes desta escolha.

Dados do Veículo:

- Massa bruta : 1600 Kg
- Massa baterias : 350 Kg
- Densidade Energética : 15.65 Wh/Kg
- Área Frontal : 3 m^2
- Velocidade Limite : 9.7 m/s (35 Km/h)
- Potência do Motor : 3730 W
- Coeficiente Aerodinâmico : 0.55
- Coeficiente de Rolamento : 0.13

Dados Obtidos :

Aceleração :

Tempo de Aceleração : 26 s

Velocidade de Cruzeiro : 8.3 m/s (30 Km/h).

Potência Necessária : 3680 W

Energia Consumida : 28.20 Wh

Distância Percorrida : 140 m

Velocidade de Cruzeiro :

Velocidade de Cruzeiro : 8.3 m/s

Tempo de Velocidade de Cruzeiro : 27 s

Energia Consumida : 17.2 Wh

Distância Total Percorrida : 364 m

Frenagem :

Tempo de Frenagem : 18 s

Distância Total Percorrida : 402 m

Energia Total Requerida por ciclo (eficiência = 1) : 45.40 Wh

A eficiência do VE pode ser calculada a partir dos seguintes dados :

	Eficiência
- Conjunto de baterias :	0.80
- Motor de Corrente Contínua :	0.80
- Sistema de Controle e Acionamento :	0.85
- Sistema de Transmissão :	0.85
- Usuário :	0.90
- TOTAL :	0.41

Portanto a energia gasta por ciclo é de 109 Wh, o que nos propicia uma autonomia de 21 Km.

Na pratica a autonomia obtida foi de 15 Km. O valor determinado na pratica tem alguns parâmetros que devemos considerar :

- energia gasta para transportar o VE até o local de testes
- energia gasta em percurso de trafego normal, por exemplo paradas e acelerações em esquinas.

Avallamos o programa computacional com o veículo elétrico citado na Ref.[1] :

Dados do Veículo :

- Massa do Veículo : 2670 Kg
- Massa das Baterias : 860 Kg
- Densidade Energética : 25 Wh/Kg
- Área Frontal : 3 m^2
- Potência do Motor : 16000 W
- Coeficiente Aerodinâmico : 0.55
- Coeficiente de Rolamento : 0.127
- Velocidade Limite : 17.84 m/s (64.2 Km/h)

Aceleração :

Tempo de aceleração : 34 s

Velocidade de Cruzeiro : 13.9 m/s (50 Km/h)

Potência necessária : 13900 W

Energia Consumida : 140 Wh

Distância percorrida : 293 m

Velocidade de Cruzeiro :

Velocidade de cruzeiro : 13.9 m/s

Tempo de velocidade de cruzeiro : 4 s

Potência Necessária : 7420 W

Energia Consumida : 8.25 Wh

Distância Total Percorrida : 349 m

Frenagem :

Tempo de Frenagem : 17 s

Energia Recuperada : 14.0 Wh

Distância Total Percorrida : 467 m

Energia Total Requerida por ciclo (eficiência = 1) :

1 - com frenagem regenerativa : 134.25 Wh

2 - sem frenagem regenerativa : 148.25 Wh

Eficiência do Veículo :

	Eficiência
- Conjunto de baterias :	0.80
- Sistema de Controle :	0.85
- Motor de Corrente Contínua :	0.80
- Sistema de Transmissão :	0.90
- Usuário :	0.90
- TOTAL :	0.44

Energia por ciclo : com frenagem regenerativa : 305.11 Wh

: sem frenagem regenerativa : 336.93 Wh

Autonomia do Veículo : com frenagem regenerativa : 32904 m

sem frenagem regenerativa : 29799 m

VII.4 - Comparações e Conclusões com o Modelo Proposto

Resumindo os dados anteriormente obtidos temos :

A - Veículo Elétrico UNICAMP :

- Autonomia Prevista : 21.0 Km
- Autonomia Obtida Experimentalmente : 15.0 Km

B - Veículo Elétrico Voskswagen,para transporte de cargas e citado como exemplo na REF.[1] :

- Autonomia Prevista : com frenagem regenerativa : 32.9 Km

sem frenagem regenerativa : 29.7 Km

- Autonomia Prevista na REF.[1] :

  com frenagem regenerativa : 29.8 Km

  sem frenagem regenerativa : 27.4 Km

- Autonomia obtida na pratica pelo fabricante : 37 Km.

O modelo proposto para simulação de veículos elétricos é aceitável e poderá ser otimizado com a obtenção de parâmetros reais de eficiência e não com os estimados ou determinados por outros pesquisadores em condições normalmente não divulgadas. Para o veículo adaptado por nós o desempenho previsto de 21 Km provavelmente deve-se a alta eficiência estimada para o sistema de transmissão (ef. = 0.85). Os outros valores de eficiências estimadas estão dentro do previsto e determinados em vários trabalhos [3], [4]. O valor da eficiência do operador do veículo leva em consideração fatores tais como :

- troca de marcha errada
- tempo de aceleração excessivo
- uso indevido de freios

fatores estes difíceis de serem estimados e minimizados, principalmente devido ao teste do veículo ter sido realizado junto ao trafego normal.

VII.5 Sumário

Neste capítulo mostramos como o nosso veículo foi adaptado e utilizado. Com o programa computacional desenvolvido avaliamos a autonomia prevista deste veículo, a seguir comparamos este resultado com o

obtido experimentalmente. Dados de um outro veículo foram analisados e comparados. Na bibliografia apresentada devemos ressaltar o trabalho de Hackleman [Ref.2] que através de um bom humor na redação do seu livro apresenta de maneira simples e didática como construir um pequeno veículo elétrico destinado a transporte de pequenas cargas. Este projeto vem sendo implementado em várias partes do mundo.

VII.6 Bibliografia

1 - Azevedo, H.R.T. "Simulação Digital de Desempenho de Veículos Híbridos Bateria/Motor de Combustão em Configuração Série" Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ - 01-1984.

2 - Hackleman "Eletric Vehicles - Design and Build Your Own", Peace Press, 1977.

3 - Unnewhr,L.E. e Nasar,N.A. "Eletric Vehicle Technology", John Wiley & Sons - 1982.

4 - Plunkett,A.B. e Kliman,G.B. "Electric AC Drive Development" paper SAE 800061, 424 - 436, 1981.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES e COMENTÁRIOS

VIII CONCLUSÕES e COMENTÁRIOS

Neste trabalho projetamos, construímos, bem como analisamos o desempenho de um VEÍCULO ELÉTRICO e o seu sistema energético; também modelamos a bateria chumbo-ácido a partir de testes experimentais realizados no Laboratório de Eletroquímica da Engenharia Elétrica da UNICAMP implementado durante a execução desta atividade.

A apresentação deste trabalho foi dividida em 2 etapas distintas:

I - Capítulos I a IV : veículo elétrico: configurações, parâmetros e seus subsistemas principais (bateria, motor, acionamento e controle).

II - Capítulos V a VII : experimentação, modelamento, simulação e avaliação de desempenho de veículo elétrico, de sua fonte energética e sua máquina, com exemplos aplicativos, utilizando os programas computacionais desenvolvidos.

As conclusões, comentários e sugestões para trabalhos futuros a seguir apresentadas foram obtidas por capítulo :

CAPÍTULO I : Quando da abordagem das vantagens e desvantagens de VEs pudemos constatar que o Brasil é um dos poucos fabricantes de veículos a combustão onde ainda não é exigido por lei qualquer dispositivo antipoluente. É evidente que VEs irão proporcionar uma redução na poluição sonora e do ar nas grandes cidades melhorando a qualidade de vida da população. Além deste benefício imediato da utilização de veí-

culos elétricos, devemos ressaltar que todo robô autônomo é um veículo elétrico e os transportes utilizados em futuras bases espaciais e submarinas serão elétricos, pois um veículo elétrico funciona em qualquer tipo de atmosfera (sem oxigênio não há combustão), portanto a autonomia tecnológica do futuro estará parcialmente associada a projetos de desenvolvimento de veículos elétricos, particularmente os veículos elétricos inteligentes.

CAPÍTULO II : Após a apresentação e estudo das várias topologias de VEs existentes concluímos que a realização de um projeto específico para a utilização em VEs e não a adaptação dos projetos existentes em VCI se faz necessária.

As equações apresentadas que descrevem o comportamento do VE foram essenciais quando da elaboração do programa computacional para a previsão do desempenho do veículo apresentado no Capítulo V.

CAPÍTULO III : Fazemos uma abordagem sobre sistemas de energia utilizados em VEs. A bateria de chumbo-ácido é o sistema que deverá ser ainda utilizado por um longo período, apesar de ter um valor de densidade energética baixo (20 - 40 Wh/Kg). As baterias nacionais estão na faixa de 20 - 30 Wh/Kg. Sobre o aspecto econômico as baterias chumbo-ácido nacionais utilizadas em tração tiveram um aumento de custo da ordem de 130000 % nos últimos 6 anos (2-1980 a 2-1986), sendo a inflação neste período da ordem de 80000 %.

Realizamos inúmeros experimentos, com baterias chumbo-ácido, que nos possibilitaram comprovar a validade das equações de Peukert e

Shepherd. Propomos um modelo para a auto-descarga cuja validade ainda esta sendo comprovada em baterias de fabricação nacional onde a perda diária de capacidade está na faixa de 0.5 a 1%, acreditamos da utilidadedo modelo principalmente quando do projeto de sistemas "no-break".

Como sugestões para trabalhos futuros ressaltamos a necessidade do estudo e modelamento da influência :

- da vida útil (ciclos de carga e descarga completos) na capacidade da bateria.
- temperatura nos processos de descarga e carga das baterias.
- recarga da bateria com corrente pulsante.

Devemos ressaltar que nas baterias nacionais :

- o controle de matéria-prima é deficiente.
- o produto tem aceitação no mercado e não tem controle de qualidade adequado por parte dos orgãos responsáveis.
- a qualidade das baterias nacionais pode e deve ser aumentada.
- a criação de um orgão homologador de baterias se faz necessária.
- a manutenção perfodica (reposição de água) pode ser evitada com baterias de tecnologia avançada.

CAPíTULO IV : Os motores sem escovas,tanto síncronos como de indução, eliminaram a maior fonte de defeitos e problemas de manutenção dos motores de C.C.: as escovas e os coletores. Além disto, eles reduzem o volume e o peso do sistema de propulsão de um veículo elétrico.

Independentemente do tipo de motor adotado para VE seria conveniente que o mesmo possuisse um projeto específico que procurasse fazer com que na operação com torque e velocidade variáveis a eficiência da máquina não fosse alterada significativamente.

Ressaltamos a necessidade da elaboração de métodos para determinações das eficiências de sistemas de acionamento e controle em faixas de utilização da máquina.

O tipo de acionamento e controle está associado com o motor disponível . A utilização de um sistema de C.A. é mais indicada pois a máquina elétrica de indução necessita menos manutenção, além do valor da densidade de potência destas máquinas ser maior (Tabelas IV.1, IV.2 e IV.4).

Apesar das vantagens da máquina de C.A. os sistemas de controle dessas máquinas apresentam algumas dificuldades para sua implementação : escasso desenvolvimento, produção e comercialização de componentes semicondutores de potência sem os quais não se viabilizará adequadamente a indústria nacional de automação no país. O controle por chaveamento de máquinas de indução só recentemente foi tecnologicamente dominado a nível de países desenvolvidos pelo desenvolvimento da eletrônica de potência, particularmente após 1960. A pesquisa em Controle de Máquinas de Indução é fundamental e deve ser apoiada corretamente.

CAPíTULO V: Desenvolvemos os programas computacionais utilizados para :

- especificação e avaliação do desempenho do conjunto de baterias

- especificação da potência e da eficiência, em diversas condições de operação, de uma máquina elétrica.
- simulação e avallação do desempenho de um veículo em qualquer ciclo de utilização

Ressaltamos que a determinação de valores de potência instantaneamente transferida de uma bateria com um dado estado de descarga, pode ser a base para a criação de técnicas de medida do estado de carga de um conjunto de baterias utilizado em um veículo elétrico.

Todos programas computacionais apresentados são conversacionais, o que facilita sua utilização após implementados.

Como sugestão para uma maior abrangência do programa computacional utilizado para o cálculo do desempenho do VE, pode-se adicionar condições de subida e descida, situações estas não previstas nos ciclos SAE - J 277a.

CAPíTULO VI : Pudemos constatar a boa aplicabilidade dos programas apresentados no Capítulo V, onde através dos exemplos apresentados constatamos que os desvios que ocorreram se devem as estimativas dos valores das eficiências utilizadas.

CAPíTULO VII : Apresentamos os dados relativos ao veículo adaptado em nossos laboratórios. O resultado obtido, 15 Km, estava dentro das previsões efetuadas pelos nossos cálculos.

Para nosso veículo atender as especificações do ciclo SAE - J 227

C com autonomia de 50 Km necessitaríamos instalar uma máquina de 16500 W (21 HP), e um conjunto de 800 Kg de baterias com densidade energética de 30 Wh/Kg.

Para o nosso veículo constatamos a necessidade do projeto e instalação de um sistema de reposição de água, que facilite a manutenção periódica das baterias.

Ficou evidente que o tema veículo elétrico é extremamente diversificado e trabalhos em inúmeras áreas do conhecimento foram e devem ser iniciados abordando este assunto; a seguir listaremos algumas sugestões para uma continuidade deste trabalho.

- Estudo e pesquisa de novos acumuladores eletroquímicos de energia.

- Estudo e pesquisa de processos de cargas em baterias chumbo-ácido e projetos de carregadores.

- Implementação de sistemas de controle e acionamento em diversas topologias levantando como parâmetros as eficiências obtidas em diversas condições de operação.

- Projeto e desenvolvimento tecnológicos de baterias chumbo-ácido ressaltando um eficiente controle de qualidade em todas as etapas do processo.

- Implementação do veículo sugerido no ítem V.6.3 pela adaptação do nosso veículo atual.

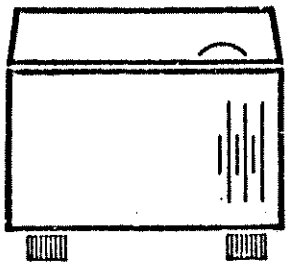
- Criar um centro de homologação de qualidade para baterias e veículos, conforme o existente na indústria aeronáutica nacional.

- Criar uma organização de mercado a nível nacional para os projetos de veículos elétricos a serem fabricados no país.

APÊNDICE I

CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM VEÍCULO ELÉTRICO UTILITÁRIO

finep FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS



I Seminário Sobre Veículos Elétricos Utilitários a Baterias

SÃO PAULO, AGOSTO DE 1984

PROGRAMA DE ACOMPANHAMENTO DE PROJETOS - VEÍCULOS ELÉTRICOS

PROTRAN ENGENHARIA

6. ESBOÇO PRELIMINAR DE UM VEÍCULO ELÉTRICO UTILITÁRIO A BATERIAS PARA CONCESSIONÁRIAS DE SERVIÇOS PÚBLICOS

O esboço preliminar do VE utilitário aqui apresentado baseia-se nas análises apresentadas nos capítulos precedentes, e na aplicação de procedimentos da Engenharia Veicular à interação existente entre os sistemas do VE.

Os parâmetros apresentados, embora possam estar aquém das expectativas de parte dos usuários potenciais, são tecnológica e conceitualmente viáveis a curto prazo para produção por industrias nacionais.

A médio prazo, outras configurações ou parâmetros para os sistemas do VE podem ser viabilizadas pela indústria nacional, notadamente para as baterias de tração (placas tubulares, invólucro selado) e para os acionamentos e motores em CA, de aplicação hoje restrita a acionamentos industriais.

Nas características do VE a seguir apresentadas delimitou-se aspectos externos do veículo e seus sistemas, com base em tecnologia disponível e dominada no país. Os aspectos de custos de industrialização deverão ser objeto de análise em fases seguintes e dependerão do tamanho do mercado a ser definido.

- Características Gerais do Veículo Elétrico Utilitário

. Carga útil incluindo passageiros: 500 a 800 kg

. Número de passageiros: 2 a 5, conforme a versão

. Volume de carga: até 2,5 m^3, conforme a versão

. Relação $\frac{\text{carga útil}}{\text{massa bruta total}} \geqslant 0,25$

. Relação $\frac{\text{massa de baterias}}{\text{massa bruta total}} \leqslant 0,32$

. Velocidade máxima no plano, a plena carga $\geqslant$ 20 m/s (72 km/h)

. Aceleração: compatível com ciclo SAE J227a - padrão C

13,3 ± 0,4 m/s (48 ± 1,5 km/h) em 18 ± 2 s

. Máximo aclive superável $\geqslant$ 18%

. Autonomia no ciclo SAE J 227a - Padrão C $\geqslant$ 50 km

. Autonomia correspondente em percurso urbano típico - até 80 km

- Sistema Portante

. Projeto básico para três versões:

. camioneta ("pick-up")

. furgão de carga

. perua de passageiros

. Uso intensivo de materiais e ligas metálicas leves e incorrosíveis

. Coeficiente de resistência aerodinâmica $C_a \leqslant 0,45$

- Acionamento

. Tipo recortador ("chopper")

. Frenagem Regenerativa (operação em 4 quadrantes)

. Circuito de Comando do recortador com limitação de aceleração, solavanco ("jerk") e corrente.

. Supervisão contínua do estado de carga das baterias com intertravamento para o circuito de comando.

- Motor Elêtrico de Tração

. Tipo - corrente contínua de excitação composta (campo série e campo independente), ou excitação independente, com interpolos.

. Fator de serviço - 1,15.

. Carcaça - laminada

- Baterias de Tração

. Tipo - chumbo - ácido

. Construção - placas planas empastadas, com material permeável comprimido nas placas positivas

. Tensão - 6 V por módulo

. Energia Específica $\geqslant$ 30 Wh/kg, para descarga em 3 horas (C 3), atingindo-se o potencial de corte.

. Vida em ciclos $\geqslant$ 300

- Sistemas Mecânicos

. Transmissão

. máximo de duas velocidades à vante

. reversão de sentido de marcha no motor de tração

. eficiência global de transmissão $\geq$ 0,85

. Direção

. mecânica, dimensionada para a carga sobre o eixo dianteiro

. Suspensão e Pneus

. coeficiente de resistência ao rolamento $\leq$ 0,015

. Freios

. servo-assistidos

. freios a disco nas rodas dianteiras