

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

*Visto
Papaluzi
24/12/05*

**PROJETO DE UM
VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO DE PASSEIO**

SAMUEL TROVATI BASTOS

São Paulo
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO DE UM
VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO DE PASSEIO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia.

Samuel Trovati Bastos

Orientador: Ronaldo de Breyne Salvagni

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2005

TE-05
B 297p

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011151

FICHA CATALOGRÁFICA

Bastos, Samuel Trovati

Projeto de um veículo elétrico híbrido de passeio / S.T. Bastos. -- São Paulo, 2005.

66 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Veículos elétricos híbridos 2.Propulsão híbrida 3.Emissão de poluentes (Redução) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

*A Ester, pelo amor,
carinho e incentivo.*

*À minha família,
pelo amor dedicado e
investimento creditado a
mim em todos esses anos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, o autor e doador da vida, pelo amor demonstrado a nós e pelas oportunidades concedidas a cada dia.

À minha família, por ter acreditado que eu poderia chegar onde cheguei e nunca desistir deste sonho em meio às dificuldades.

A Ester, minha noiva, cuja companhia e incentivo foram fundamentais para prosseguir perseguindo meus objetivos.

Ao Professor Dr. Ronaldo de Breyne Salvagni, pela orientação ao longo deste trabalho e por sempre se mostrar acessível a sanar as dúvidas que apareceram.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma alternativa viável para os automóveis utilizados atualmente. Os veículos de uso comum utilizam energia de combustíveis fósseis, aumentando os níveis de poluição atmosférica locais em grandes cidades e contribuindo para a intensificação do efeito estufa. Tal situação só poderá ser revertida se o meio de propulsão for alterado para uma fonte de energia limpa e abundante em todo o planeta: são os veículos movidos a célula de combustível, que utilizam hidrogênio para gerar energia e produzem água como resultado do processo de combustão. Enquanto esta tecnologia não tiver seus custos reduzidos, uma alternativa viável é a utilização de veículos movidos a combustíveis fósseis e eletricidade ao mesmo tempo, os chamados veículos elétricos híbridos, objeto deste trabalho. São veículos que funcionam como uma ponte entre os veículos convencionais atuais e os movidos a célula de combustível no futuro. Simulações de usos comuns evidenciam ser possível haver veículos de porte médio a grande, operando com motores elétricos em trechos urbanos (significando redução da concentração de poluentes) simultaneamente com motores de combustão interna menores que os atuais, sem perda de desempenho.

ABSTRACT

This report presents a viable alternative to today's automobiles. Common use vehicles use energy provided by fossil fuels, increasing local pollution levels in big cities and intensifying the greenhouse effect. This situation can only be reverted in the case the vehicles' power train is replaced to use a clean and abundant energy source in the planet: they are the fuel-cell vehicles that use hydrogen to produce energy and therefore water, as the result of the combustion process. While the costs involved with this technology are too high a good alternative is to use vehicles that combine fossil fuel and electricity in one power train system, the so-called hybrid electric vehicles. These vehicles are a bridge between the common vehicles from today and the fuel cell vehicles of the future. Simulations involving common cycles of usage show that mid-size cars can run with electric motors in city cycles (thus reducing pollutant concentration) simultaneously with internal combustion engines smaller than the original ones, without loss of performance.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO	1
1.2	HISTÓRICO	2
1.3	NECESSIDADE SUPRIDA PELO PROJETO	2
1.4	OBJETIVOS DESTE TRABALHO	3
1.5	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	3
2	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	5
3	VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DO TRABALHO	6
3.1	ECONÔMICA	6
3.2	TÉCNICA	6
3.2.1	<i>Veículo convencional</i>	6
3.2.2	<i>Veículo elétrico</i>	7
3.2.3	<i>Veículos elétricos híbridos</i>	7
3.2.3.1	Veículo elétrico híbrido – Série	8
3.2.3.2	Veículo elétrico híbrido – Paralelo	9
3.2.4	<i>Conjunto armazenador</i>	10
3.2.5	<i>Motor de combustão interna</i>	11
3.2.6	<i>Recuperação da energia</i>	11
4	DESEMPENHO DO VEÍCULO	13
4.1	PERFIS DE USO	13
4.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS INEFICIÊNCIAS DO VEÍCULO CONVENCIONAL	16
5	ESCOLHA DO SEGMENTO DO VEH.....	19
5.1	METODOLOGIA	19
5.2	GRÁFICOS COMPARATIVOS ENTRE SEGMENTO PEQUENO E MÉDIO	19
5.2.1	<i>Ciclo NYCC (urbano)</i>	21
5.2.2	<i>Ciclo Japão (urbano)</i>	22

5.2.3	<i>Ciclo LA4 (urbano veloz)</i>	23
5.2.4	<i>Ciclo LA92 (urbano mais veloz)</i>	24
5.2.5	<i>Ciclo US06 (misto)</i>	25
5.2.6	<i>Ciclo HWY (cruzeiro)</i>	26
5.2.7	<i>Consumo</i>	27
5.3	SEGMENTO ESCOLHIDO	28
6	DIMENSIONAMENTO DO MOTOR ELÉTRICO	29
6.1	VELOCIDADE MÁXIMA NO MODO ELÉTRICO	29
6.2	RESISTÊNCIAS	32
6.2.1	<i>Rolamento</i>	32
6.2.2	<i>Rampa</i>	33
6.3	FORÇA DE TRAÇÃO MÁXIMA	33
6.4	POTÊNCIA MÁXIMA	34
6.5	TORQUE MÁXIMO	34
6.6	ROTAÇÃO MÁXIMA	35
6.7	ALIMENTAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO	36
6.7.1	<i>Requisitos das baterias</i>	36
6.7.2	<i>Energia das baterias e tempo de uso</i>	37
6.7.3	<i>Considerações sobre a recarga das baterias</i>	37
7	DIMENSIONAMENTO DO MOTOR A COMBUSTÃO	40
7.1	POTÊNCIA	40
8	SIMULAÇÕES, RESULTADOS E CONCLUSÕES	42
8.1	PONTOS ABORDADOS NOS TESTES	42
8.2	RESULTADOS E CONCLUSÕES	43
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – ESTRUTURA DE UM VEÍCULO CONVENCIONAL.....	7
FIGURA 3.2 – ESTRUTURA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	7
FIGURA 3.3 – ESTRUTURA DE UM VEH SÉRIE.....	9
FIGURA 3.4 – ESTRUTURA DE UM VEH PARALELO	10
FIGURA 3.5 – FLUXO DE ENERGIA NO SISTEMA DE FREIOS REGENERATIVOS	12
FIGURA 4.1 – CIDADE DE NOVA YORK.....	13
FIGURA 4.2 – JAPÃO	14
FIGURA 4.3 – LOS ANGELES (LA4)	14
FIGURA 4.4 – LOS ANGELES (LA92)	14
FIGURA 4.5 – US06	15
FIGURA 4.6 – VIA EXPRESSA	15
FIGURA 4.7 – CURVAS DE NÍVEL DE UM MCI TÍPICO	17
FIGURA 5.1 – CURVAS DE TORQUE DOS VEÍCULOS-BASE: CELTA 1.4 (ACIMA) E ASTRA 2.0 (ABAIXO)	20
FIGURA 5.2 – NYCC – CELTA EM 2ª MARCHA, ASTRA EM 1ª MARCHA.....	21
FIGURA 5.3 – NYCC – TEMPO GASTO NAS ROTAÇÕES DE ÓTIMO RENDIMENTO	21
FIGURA 5.4 – JAPÃO – CELTA EM 2ª MARCHA, ASTRA EM 1ª MARCHA	22
FIGURA 5.5 – JAPÃO – TEMPO GASTO NAS ROTAÇÕES DE ÓTIMO RENDIMENTO	22
FIGURA 5.6 – LA4 – CELTA EM 3ª MARCHA, ASTRA EM 2ª MARCHA	23
FIGURA 5.7 – LA4 – TEMPO GASTO NAS ROTAÇÕES DE ÓTIMO RENDIMENTO	23
FIGURA 5.8 – LA92 – CELTA EM 4ª MARCHA, ASTRA EM 3ª MARCHA.....	24
FIGURA 5.9 – LA92 – TEMPO GASTO NAS ROTAÇÕES DE ÓTIMO RENDIMENTO	24
FIGURA 5.10 – US06 – CELTA EM 5ª MARCHA, ASTRA EM 4ª MARCHA.....	25
FIGURA 5.11 – US06 – TEMPO GASTO NAS ROTAÇÕES DE ÓTIMO RENDIMENTO	25
FIGURA 5.12 – HWY – CELTA EM 5ª MARCHA, ASTRA EM 4ª MARCHA	26
FIGURA 5.13 – HWY – TEMPO GASTO NAS ROTAÇÕES DE ÓTIMO RENDIMENTO	26
FIGURA 5.14 – CONSUMO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL	27
FIGURA 5.15 – CONSUMO MÁXIMO DE COMBUSTÍVEL	27
FIGURA 6.1 – NYCC – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES.....	29
FIGURA 6.2 – JAPÃO – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES	30

FIGURA 6.3 – LA4 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES	30
FIGURA 6.4 – LA92 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES	31
FIGURA 6.5 – US06 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES.....	31
FIGURA 6.6 – HWY – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES	32
FIGURA 6.7 – PLANETÁRIO DE LIGAÇÃO ENTRE MCI E ME	35
FIGURA 8.1 - CICLO NYCC COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA E MCI LIGADO	43
FIGURA 8.2 - CICLO JAPÃO COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA	44
FIGURA 8.3 - CICLO JAPÃO COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA E MCI LIGADO	44
FIGURA 8.4 - CICLO LA4 COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA	45
FIGURA 8.5 – CICLO LA4 COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA E MCI LIGADO	45
FIGURA 8.6 - CICLO LA92 COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA	46
FIGURA 8.7 - CICLO LA92 COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA E MCI LIGADO.....	46
FIGURA 8.8 - CICLO US06 COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA	47
FIGURA 8.9 - CICLO US06 COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA E MCI LIGADO	47
FIGURA 8.10 - CICLO HWY COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA.....	48
FIGURA 8.11 - CICLO HWY COM CONFIGURAÇÃO HÍBRIDA E MCI LIGADO.....	48
FIGURA 8.12 – COMPARATIVO DE CONSUMO DO ASTRA 2.0 ATUAL COM O "ASTRA HÍBRIDO 1.4" (MCI DESLIGADO ABAIXO DE 60 KM/H).....	50
FIGURA 8.13 – COMPARATIVO DE CONSUMO DO ASTRA 2.0 ATUAL COM O "ASTRA HÍBRIDO 1.4" (MCI LIGADO ABAIXO DE 60 KM/H PARA RECARREGAR BATERIAS)50	

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS DOS CICLOS	15
TABELA 4.2 – TEMPO EM MARCHA-LENTA E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO VEÍCULO TESTADO.....	16
TABELA 4.3 – PORCENTAGEM DE ENERGIA QUE PODE SER REGENERADA NOS CICLOS .	17
TABELA 6.1 – VELOCIDADES ÓTIMAS NOS CICLOS.....	29
TABELA 6.2 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO.....	33
TABELA 6.3 – POTÊNCIA MÉDIA NOS CICLOS	37
TABELA 8.1 – POTÊNCIA DO MCI HÍBRIDO UTILIZADA PARA PROPULSÃO NOS CICLOS (MCI DESLIGADO ABAIXO DE 60 KM/H).....	49
TABELA 8.2 – POTÊNCIA DO MCI HÍBRIDO UTILIZADA PARA PROPULSÃO NOS CICLOS (MCI LIGADO ABAIXO DE 60 KM/H PARA RECARREGAR BATERIAS).....	49
TABELA 8.3 – TEMPOS DE USO DAS BATERIAS ESCOLHIDAS NOS CICLOS.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Área frontal projetada do veículo
C_D	Coefficiente de arrasto aerodinâmico
C_R	Coefficiente de resistência ao rolamento
Δt	Intervalo de tempo de uso do motor elétrico
E	Força trativa
E_b	Energia das baterias
E_m	Energia média
$E_{V_{máx}}$	Esforço trativo em velocidade máxima
FENABRAVE	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
$G_{diferencial}$	Relação de transmissão do diferencial
$G_{planetário}$	Relação de transmissão do planetário
m_b	Massa das baterias
MCI	Motor de combustão interna
ME	Motor elétrico
P_m	Potência média dos ciclos
P_{MCI}	Potência do motor de combustão interna
P_{mNYCC}	Potência média no ciclo NYCC
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
Pot_e	Potência elétrica
ρ	Densidade do ar
R_A	Resistência aerodinâmica
ρ_{ee}	Densidade de energia das baterias
R_G	Resistência ao rolamento
R_R	Resistência à rampa
r_{rodas}	Raio das rodas
SAE	Society of Automotive Engineers
$\text{sen}(\theta)$	Inclinação da rampa
SUV	Sport Utility Vehicle
T_e	Torque do motor elétrico
V	Velocidade do veículo

VC	Veículo Convencional
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
$V_{\text{máx}}$	Velocidade máxima do veículo
W	Peso do veículo
ω_{motor}	Rotação do motor

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Nos últimos tempos, a discussão sobre veículos elétricos híbridos – VEH – tem ganhado espaço além do âmbito acadêmico. Cada vez mais, este conceito de veículo tem saído do mundo das idéias para a vida cotidiana, principalmente devido a três fatores:

1. As reservas de combustível fóssil estão se esgotando e não conseguirão se sustentar por muitas décadas;
2. Os preços do petróleo têm aumentado em grandes proporções e não há como impedir esse aumento. Os preços estão atualmente em torno de US\$ 60,00 o barril;
3. Metade do petróleo consumido no Brasil se destina ao transporte terrestre, em que menos de 20% da energia é efetivamente usada e o restante perdido para o meio ambiente.

Esta é a maior causa de poluição urbana do país (90%) e contribui também para o aquecimento do planeta. Os índices de eficiência e emissão estão muito aquém dos teoricamente possíveis e uma das soluções promissoras para melhorá-los será através do uso dos veículos elétricos híbridos, que permitem um salto qualitativo neste sentido.

Em alguns países da Europa, no Japão e nos Estados Unidos, montadoras como Toyota, Honda, GM e Ford já têm projetos de VEH em comercialização no segmento de veículos de passeio e caminhonetes. No Brasil, há protótipos de ônibus híbridos urbanos em testes na cidade de São Paulo para entrarem em operação regular em breve, por ser este tipo de veículo o mais indicado atualmente, segundo Winnischofer (2004).

Mesmo com o advento dos automóveis a etanol, os VEH devem ser objetos de estudo no Brasil devido a questões ambientais enquanto não for viável economicamente comercializar um veículo que não emita poluentes, como os movidos a célula de hidrogênio.

1.2 Histórico

Há alguns anos, os veículos elétricos despontavam como alternativa aos veículos movidos a combustível fóssil. Por possuírem alta eficiência energética, baixa emissão de poluentes e operarem de modo extremamente silencioso, os VE seriam uma excelente solução, não fossem três fatores muito importantes:

1. Baixa autonomia: em torno de 160 km entre um ciclo de carga e recarga das baterias;
2. Elevado tempo de recarga das baterias: eram necessárias, aproximadamente, 6 horas para recarregar as baterias em casa;
3. Elevado preço de venda, muito superior a veículos convencionais com mesmo porte e itens de conforto.

Os VEH equacionam este problema de forma eficaz. Trata-se de um sistema especial de acionamento de veículos, que combina o melhor dos motores de combustão interna e motor elétrico.

Os benefícios práticos dos VEH incluem comprovada economia de combustível e níveis de emissões muito reduzidos quando comparados com veículos convencionais. Dados recentes do Ford Escape, um *SUV* comercializado nos Estados Unidos, mostram que o modelo híbrido produz 97% menos hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio que os veículos certificados pelos mais rígidos padrões atuais e 50% menos de dióxido de carbono. O Ford Escape também é limpo o bastante para certificar-se no rigoroso padrão de Veículo com Tecnologia Avançada de Índice Baixíssimo de Emissões (AT-PZEV), por combinar um sistema de tração eficiente com um conjunto de escapamento catalisador que é muito eficaz em reduzir a poluição e o índice de emissões (Portal VE, 2005).

Os VEH podem ser usados em qualquer meio de transporte pessoal, coletivo e de cargas. Vale lembrar que os VEH podem operar com qualquer combustível ou com os motores da tecnologia multicomcombustível.

1.3 Necessidade suprida pelo projeto

Uma ampla disseminação dos VEH ajudará a reduzir ainda mais a dependência brasileira de petróleo (menos importações em curto prazo, possibilidade de exportar

mais no futuro) assim como reduzir, pelo menos, entre um e dois terços a emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

Mesmo com todos esses pontos a favor, ainda é muito caro produzir um veículo híbrido, pois seus componentes são mais caros que os convencionais por não ter grande escala de produção e não seria praticável colocar no mercado um veículo que não valesse o quanto custa. Assim, desenvolver um VEH de passeio com peças ou componentes de custo reduzido é de suma importância para viabilizar a comercialização deste tipo de veículo no Brasil.

Conforme mencionado por Winnischofer (2004), por se tratar de um veículo com componentes muito caros para os padrões atuais na indústria automobilística, seria necessário intensificar a política de redução de emissões de poluentes pelo governo federal ou mesmo estaduais, assim como acontece na Califórnia, EUA. São medidas de alto impacto, mas fundamentais para metrópoles como São Paulo e Rio de Janeiro, que sofrem graves conseqüências pelo aumento contínuo de poluentes na atmosfera. Mesmo com os atuais padrões exigidos pelo PROCONVE, que já são rígidos, a quantidade de veículos nessas cidades é muito grande e a poluição do ar ambiente se intensifica a cada dia, principalmente em dias secos de inverno, quando ocorre a chamada inversão térmica. Os gastos com saúde pública nessas cidades já seriam motivos suficientes para se implantar uma lei de emissões mais rígida.

1.4 Objetivos deste trabalho

Os objetivos deste trabalho são:

1. Demonstrar a viabilidade técnica dos VEH, aproveitando o que já tem sido desenvolvido e publicado, mostrando suas vantagens em relação aos veículos de passeio convencionais;
2. Estabelecer critérios de dimensionamento de seus sistemas e apontar possíveis pesquisas avançadas de melhorias a eles;
3. Propor um modelo híbrido nacional quanto à sua configuração.

1.5 Descrição das atividades

Visando atingir os objetivos propostos, as seguintes etapas serão realizadas:

1. Discutir e identificar as vantagens obtidas com a configuração híbrida frente a alternativas;
2. Verificar as vantagens deste veículo sobre seus concorrentes diretos;
3. Identificar a melhor configuração para a aplicação em veículos de passeio (será visto mais adiante que existem duas configurações de propulsão híbrida: em série e paralela);
4. Modelar o sistema;
5. Testar o modelo via simulação nos limites deste trabalho;
6. Analisar o resultado e efetuar conclusões.

As atividades listadas acima deverão seguir o conceito de espiral do projeto, visto que elas são interdependentes e os resultados obtidos podem sugerir alterações na concepção inicial do veículo.

2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A pesquisa técnica sobre o assunto foi desenvolvida consultando-se *papers* da SAE, *sites* especializados na *internet* e literatura escrita, principalmente.

A pesquisa sobre a viabilidade econômica para se fabricar o veículo no Brasil foi feita mediante consulta a engenheiros na Toyota do Brasil¹ e General Motors do Brasil². Até hoje, as montadoras citadas não têm planos de produção, tampouco de importação do veículo ao país, principalmente devido a impostos. Como exemplo disso, temos o Toyota Prius, um veículo de porte médio, como Chevrolet Astra, Honda Civic e Toyota Corolla, que nos Estados Unidos custa a partir de US\$ 20.975,00 (R\$ 54.535,00). Se viesse ao Brasil, seu preço passaria dos R\$ 150.000,00, (informação verbal)¹ o equivalente a um Citroën C5 ou um Chevrolet Omega, carros grandes de luxo.

Conforme foi mencionado em 1.3, a falta de estímulos a essa tecnologia e o alto custo dos componentes do VEH inviabilizam o projeto ou importação destes veículos ao Brasil atualmente.

Uma vez que este trabalho delimita-se ao âmbito da pesquisa sem construção de protótipos, passa-se à etapa de projeto dos sistemas de propulsão do veículo, atendendo aos requisitos encontrados nos veículos convencionais. Como já existem modelos em escala de produção (Toyota Prius, Honda Insight, Honda Civic e Honda Accord) vê-se que é viável tecnicamente construir um VEH, se determinadas circunstâncias econômicas forem atendidas.

¹ GUIOTOKU, A. (Toyota do Brasil) – Via telefone em Abril de 2005.

² MANUCHACKIAN, P. (General Motors do Brasil) – Palestra em setembro de 2005, na sede da própria empresa em São Caetano do Sul.

3 VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DO TRABALHO

Neste item serão avaliadas as diferentes configurações dos VEH em produção atualmente e de alguns de seus componentes mais importantes.

3.1 Econômica

Como este trabalho não requererá construção de protótipos, não se faz necessário apresentar um estudo de viabilidade econômica para sua realização.

3.2 Técnica

Antes de tudo, é interessante rever o princípio de funcionamento tanto de um veículo convencional quanto de um veículo elétrico.

3.2.1 Veículo convencional

Um veículo equipado com um motor de combustão interna – MCI – tem a energia de um combustível (gasolina, diesel, álcool, gás natural, etc.) transformada na energia mecânica necessária para seu acionamento. O MCI só funciona a partir de uma velocidade de rotação mínima e pode operar em diversas condições. Entretanto, há uma rotação e torque específicos em que apresenta a maior eficiência e emite menos poluentes, chamada de ponto ótimo. Fora deste ponto, o consumo de combustível é maior assim como o nível de emissões.

Em condições normais de operação os veículos precisam de diversas combinações de velocidade e de torque. Deste modo, o veículo é equipado, também, com um sistema de embreagem para poder fazer uma arrancada suave e com uma caixa de câmbio, que através de engrenagens, adapta a rotação e o torque do motor às solicitações da roda, dando ao veículo a estrutura geral apresentada na Figura 3.1.

Vale notar que, como a operação de ligar o MCI é relativamente complexa, este fica ligado mesmo quando o veículo está parado no trânsito, gastando combustível e emitindo poluentes.

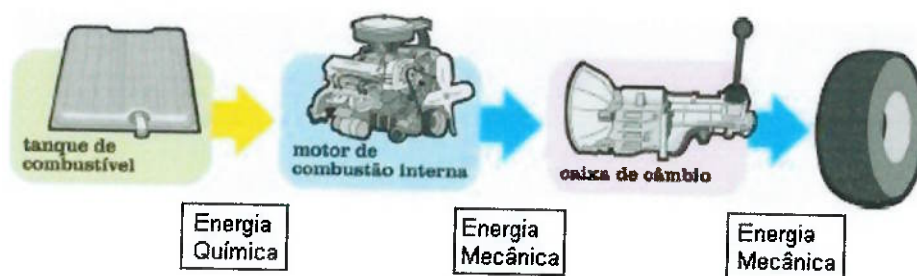


Figura 3.1 – Estrutura de um veículo convencional

3.2.2 Veículo elétrico

No veículo elétrico, o acionamento é feito por um motor elétrico – ME – que pode acionar diretamente as rodas, usando a energia armazenada em um conjunto de baterias. O conceito é bem mais simples que nos veículos convencionais e os ME são eficientes em todas as velocidades, inclusive na arrancada, dispensando embreagens e caixa de câmbio. Os veículos elétricos são silenciosos, têm uma arrancada suave, poucas vibrações e não emitem poluentes. Além disso, quando parados no trânsito, não gastam energia e os modelos mais modernos têm freios regenerativos, cujo conceito será visto mais adiante.

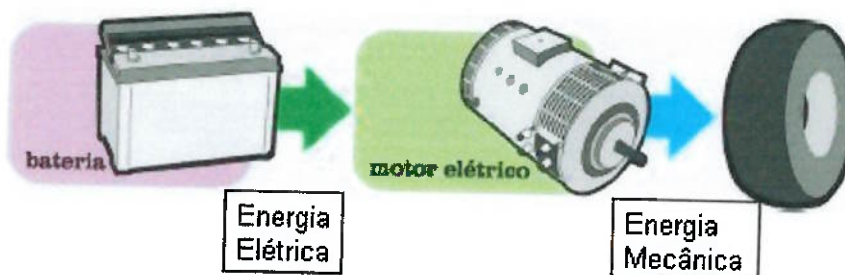


Figura 3.2 – Estrutura de um veículo elétrico

3.2.3 Veículos elétricos híbridos

O veículo é acionado eletricamente e a energia que demanda é continuamente suprida por um gerador instalado a bordo, dispensando as recargas descontínuas de baterias (*"overnight"*).

Esta combinação permite ao VEH grande autonomia e a possibilidade de rápido reabastecimento que os usuários esperam do veículo convencional aliados ao baixo ruído, aceleração suave e benefícios ambientais característicos do veículo elétrico, sem necessidade de conectar o veículo à rede elétrica para recarga de bateria.

Existem duas possíveis combinações das fontes de potência que serão estudadas neste trabalho: série e paralela.

3.2.3.1 Veículo elétrico híbrido – Série

O MCI aciona um gerador elétrico, cuja energia tanto pode carregar as baterias quanto alimentar o motor elétrico que, por sua vez, aciona as rodas (Figura 3.3).

Quatro importantes características do VEH merecem destaque nesta configuração:

1. Ele é muito automatizado, o que o torna dependente de controles sofisticados;
2. Quando freia, os controles convertem o motor acionador em gerador e a energia da inércia do carro – que seria normalmente dissipada como calor nos freios – é transformada em corrente elétrica, que recarrega as baterias;
3. A potência do MCI atende à média das necessidades e pode ser bem menor que a usada em um veículo convencional equivalente. Por exemplo, em um ônibus híbrido brasileiro, um motor de 80 HP proporciona um desempenho igual ao de um ônibus convencional com 240 HP (informação verbal)³;
4. A transmissão direta, sem embreagem e câmbio, é mais simples e redundante em menos perdas, bem como acelerações mais suaves e mais conforto aos usuários.

³ SILVA, A. V. S. (Eletra) – VII Seminário sobre a Eletro-eletrônica Aplicada à Mobilidade "A Eletro-eletrônica voltada aos Combustíveis Alternativos", Junho de 2005.

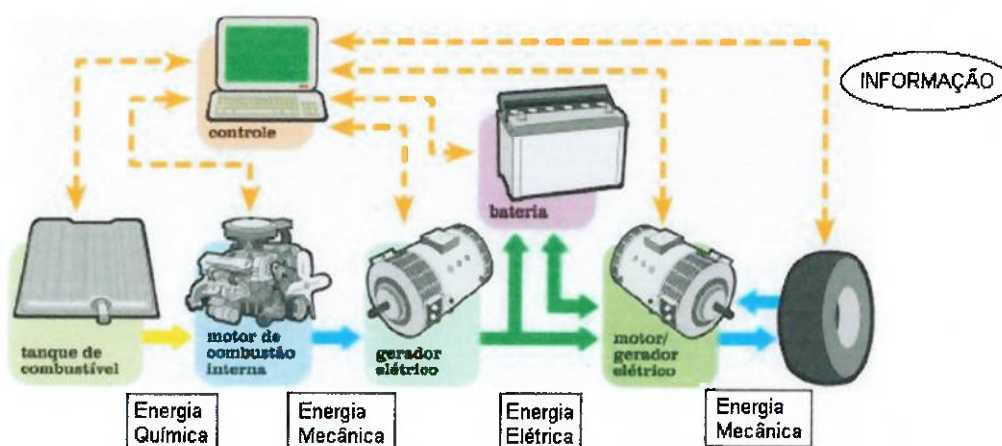


Figura 3.3 – Estrutura de um VEH série

Não é uma configuração que prima pela velocidade final do veículo, mas sim pela aceleração.

Deste modo, o VEH em série é bem adaptado para operar no tráfego urbano em que as arrancadas e paradas são muito freqüentes, sendo esta aplicação mais adequada a ônibus e caminhões urbanos de coleta de lixo (WINNISCHOFER, 2004).

3.2.3.2 Veículo elétrico híbrido – Paralelo

Para atender o mercado acostumado com o comportamento dos veículos convencionais, tanto para trânsito urbano quanto para estradas, foi criado o VEH Paralelo. Isto significa que o MCI pode acionar tanto as rodas, através de uma transmissão, quanto acionar o conjunto do motor elétrico. A escolha entre um modo ou outro é feito através de um controlador, que analisa a cada instante a situação do veículo (Figura 3.4). Por exemplo, se o VEH estiver andando em alta velocidade e o controlador do carro verificar que esta é a condição ótima para o MCI – maior torque, menor consumo –, este só acionará as rodas, reduzindo as perdas no gerador e motor elétrico e na bateria, aumentando a eficiência do VEH.

As combinações entre MCI, motor elétrico e câmbio em um VEH Paralelo são muitas. Por exemplo:

1. Uma caixa de câmbio apropriada pode acoplar os dois motores às rodas quando conveniente (situação mostrada na figura) ou;
2. Uma caixa de câmbio acopla apenas o MCI às rodas enquanto o motor elétrico mantém o acionamento direto ou;
3. O motor elétrico aciona as rodas da frente e o MCI as de trás (ou vice-versa).

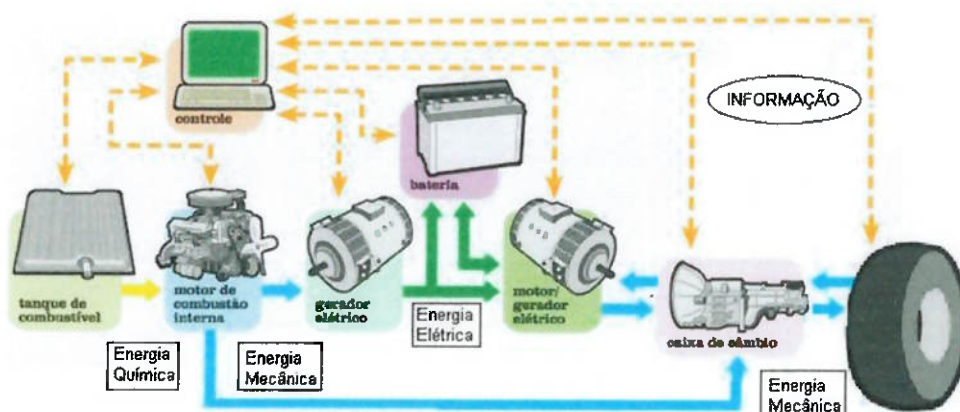


Figura 3.4 – Estrutura de um VEH paralelo

Na solução paralela, a importância relativa e o papel desempenhado por cada um dos motores podem ser muito diferentes. Isto explica porque os modelos que estão sendo lançados no mercado têm concepções distintas.

3.2.4 Conjunto armazenador

A energia gerada pelo gerador elétrico pode ser armazenada em baterias ou ultracapacitores. A escolha entre um ou outro tipo dependerá do desempenho desejado do veículo. Baterias tendem a fornecer mais energia instantânea, mas descarregam mais rapidamente, ou seja, a aceleração é boa, em sacrifício da autonomia. Os ultracapacitores, no entanto, trabalham de forma antagônica às baterias, descarregando mais vagarosamente. Assim, o veículo terá menos aceleração e maior autonomia.

Em artigo sobre o uso de ultracapacitores para o armazenamento de energia em lugar de baterias é citado que “as baterias de chumbo não aceitam cargas e descargas com correntes muito elevadas e têm vida limitada, enquanto que os ultracapacitores

suportam picos muito rápidos e intensos, sendo particularmente interessantes para as aplicações em sistemas híbridos de tração, oferecendo melhor resposta para a aceleração (aumenta o pico de potência disponível) e eficiência muito maior na captura de energia recuperada do freio. Isto se prende ao fato de as transformações químicas da bateria liberarem muito mais calor do que as físicas do capacitor quando a corrente é elevada, o que chega a reduzir a energia capturada na frenagem a apenas 20% da regeneração, enquanto que os capacitores atingem 95%”. Diz o artigo ainda que “os ultracapacitores liberam dez vezes mais potência (aceitam até 500 Ampères) e duram dez vezes mais que as baterias (10 anos ou 500.000 ciclos), são mais confiáveis em faixas mais amplas de temperatura e causam menor impacto ambiental no sucateamento. Mesmo as baterias de níquel e hidreto metálico não competem com os capacitores” (SAE – Automotive Engineering International, 2004 apud Branco, 2005).

3.2.5 Motor de combustão interna

Como mencionado anteriormente, os modelos híbridos podem ter motores de combustão interna com capacidades reduzidas, porque sempre trabalharão na sua faixa ótima de operação, graças a um sistema de transmissão de relações contínuas, controlado por um sistema central. Este motor emite menos poluentes devido ao modo de sua utilização e pode ter sua vida útil aumentada por não ter de superar regimes transitórios severos. No entanto, como essa é a faixa de maiores emissões de NOx, os catalisadores devem ser calibrados para atuar nessa situação.

3.2.6 Recuperação da energia

Para auxiliar o sistema gerador, uma outra fonte de energia elétrica é uma alternativa interessante, principalmente se essa energia puder ser proveniente de um reaproveitamento de algum lugar onde esteja sendo desperdiçada, como nos freios.

Parte da energia cinética dissipada nas frenagens pode ser recuperada em forma de energia elétrica para os acumuladores, através de um sistema de freios regenerativos. Durante as frenagens pelo motor ou pressionando o pedal de freio, o sistema de freios regenerativos fazem com que o motor elétrico se transforme em um gerador no momento da frenagem, gerando

energia elétrica, pois a energia demandada nessa situação é menor que zero (carro freando ou descendo uma ladeira), conforme mostrado na

Tabela 4.3.

Tal sistema pode ser visualizado na Figura 3.5, onde pode-se ver o fluxo de energia durante as frenagens com este sistema saindo das rodas em direção ao motor elétrico.

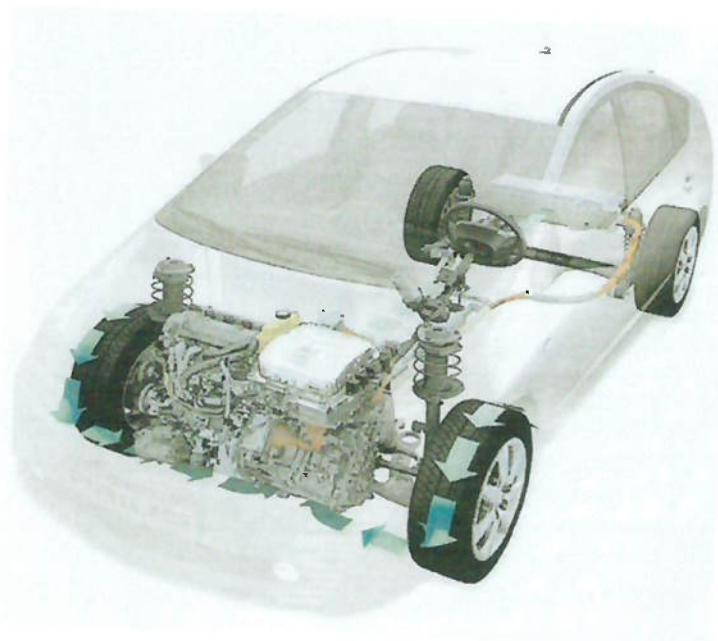


Figura 3.5 – Fluxo de energia no sistema de freios regenerativos

Assim, nota-se que um veículo elétrico híbrido é viável tecnicamente. Os veículos em produção atualmente (Toyota Prius, Honda Insight, etc.) utilizam o estado-da-arte destas tecnologias e dos seus componentes.

4 DESEMPENHO DO VEÍCULO

Os fatores que influenciam o consumo de combustível de um veículo são ligados às forças contrárias ao movimento que surgem devidas ao peso do veículo, resistências aerodinâmicas e de rolamentos. Mas há também um fator relacionado à eficiência do uso do MCI nas condições de operação, pois nem sempre este estará nas condições ótimas de funcionamento.

Portanto, e para mostrar a vantagem dos híbridos frente aos semelhantes convencionais, não será feita uma análise quanto à redução das resistências, pois isso beneficiaria tanto um VEH quanto um VC. A análise se inicia, então, pela compreensão do uso de veículos de passeio em diversas situações. Serão analisados perfis de uso em cidade e estrada nos Estados Unidos e Japão, os mesmos utilizados por um estudo recente (AN et. al, 1999). Esses dados também são válidos para o Brasil, pois a condição de tráfego não difere muito nesses países.

4.1 *Perfis de uso*

Os vários tipos de ciclos de uso de um veículo de passeio comum estão representados nas figuras 4.1 a 4.6 e cujas características são descritas na Tabela 4.1. Em todos eles, a velocidade do veículo é dada em mph (1 mph = 1,609 km/h) e o tempo em segundos.

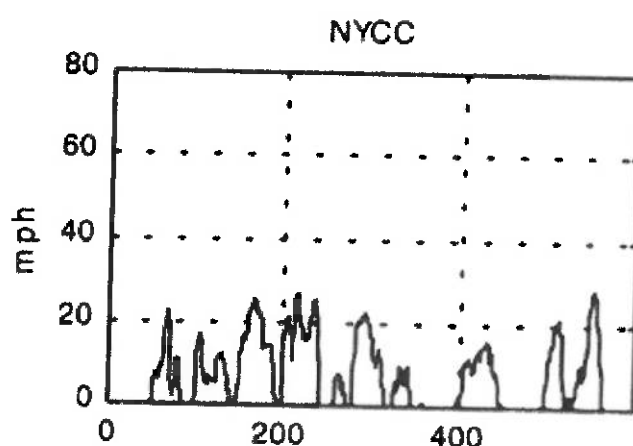


Figura 4.1 – Cidade de Nova York

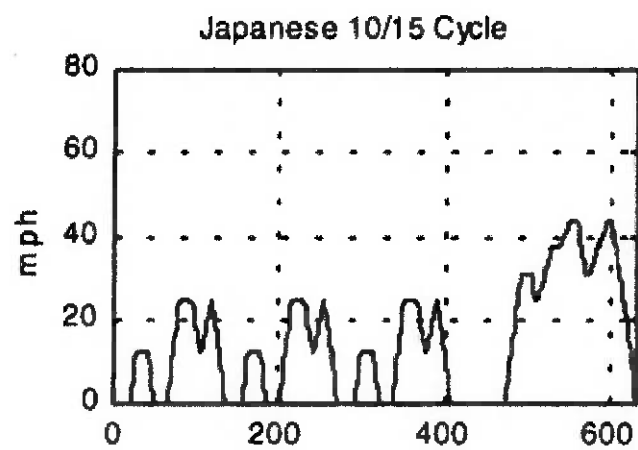


Figura 4.2 – Japão

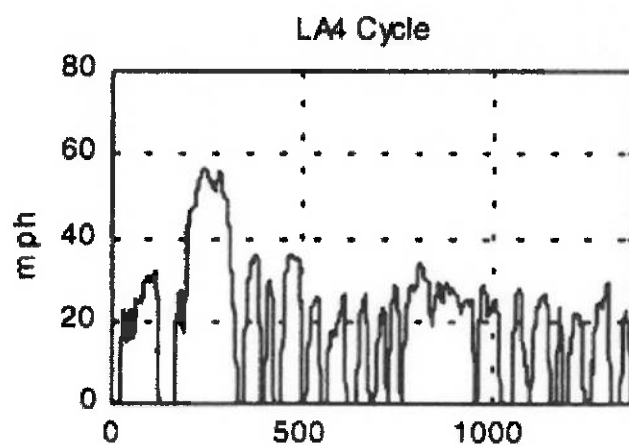


Figura 4.3 – Los Angeles (LA4)

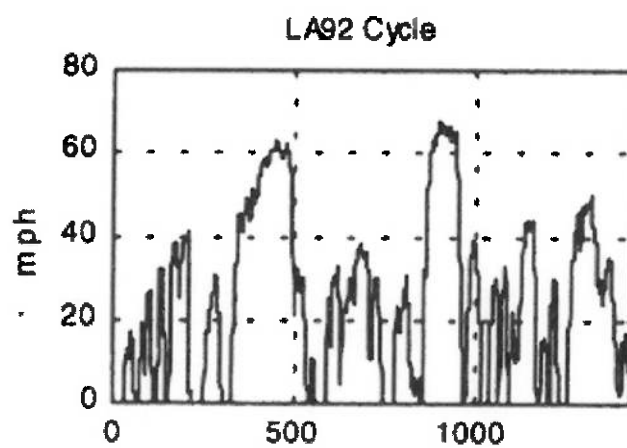


Figura 4.4 – Los Angeles (LA92)

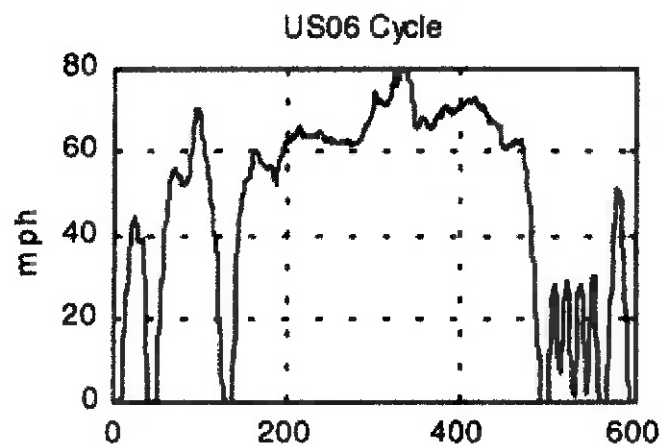


Figura 4.5 – US06

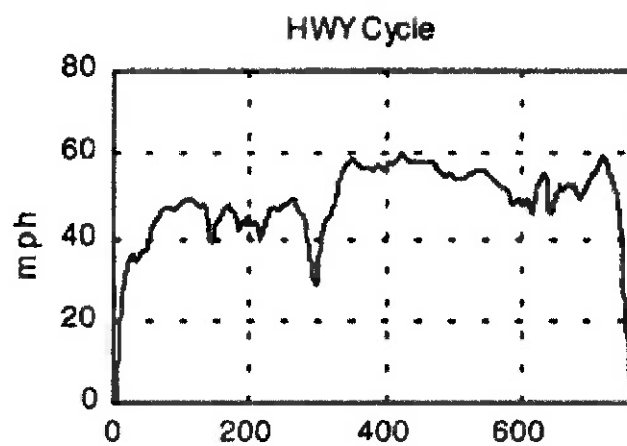


Figura 4.6 – Via expressa

Tabela 4.1 – Características dos ciclos

	Tempo (s)	Distância (km)	$V_{\text{média}}$ (km/h)	$V_{\text{máx}}$ (km/h)	$a_{\text{máx}}$ (m/s ²)
NYCC	599	1,9	11,4	44,6	2,7
JAPÃO	631	4,2	23,8	70,0	0,8
LA4	1372	12,0	31,4	91,2	1,5
LA92	1435	15,8	39,7	109,4	4,0
COMB	ND	ND	52,2	96,4	1,5
US06	600	12,9	77,2	129,2	3,8
HWY	765	16,5	77,6	96,4	1,5

O ciclo COMB representa um ciclo combinado ponderado entre estrada e urbano, na proporção 45% (ciclo HWY) e 55% (ciclo LA4).

4.2 Considerações sobre as ineficiências do veículo convencional

As ineficiências do veículo convencional são ligadas a três fatores (AN et. al, 1999), que serão explicados brevemente em seguida. Os valores são válidos para um veículo convencional comum.

1. Perda de energia (combustível) enquanto o motor está ligado em marcha lenta (demanda de energia ≤ 0):

Enquanto o veículo está parado em marcha lenta, o motor continua ligado e gastando combustível. A Tabela 4.2 mostra a porcentagem de tempo parado e o quanto isso representa no consumo de combustível do ciclo.

Tabela 4.2 – Tempo em marcha-lenta e consumo de combustível do veículo testado

	Tempo (%)	Consumo (%)
NYCC	63,8	38,8
JAPÃO	52,3	27,6
LA4	43,2	21,6
LA92	45,1	15,1
COMB	27,9	13,0
US06	28,5	5,0
HWY	9,3	2,5

2. Energia dissipada nos freios (demanda de energia < 0);

Como demonstração da quantidade de energia dissipada na forma de calor nos freios, tem-se a

Tabela 4.3, que mostra a quantidade de energia positiva (propulsora) demandada no ciclo e a quantidade de energia perdida na frenagem. A razão entre a energia dissipada e a total fornecida pelo motor é uma medida do que poderia ser reaproveitado por regeneração.

Tabela 4.3 – Porcentagem de energia que pode ser regenerada nos ciclos

	Energia > 0 (kWh)	Energia < 0 (kWh)	Razão (%)
NYCC	1,7	-0,55	24%
JAPÃO	0,4	-0,19	32%
LA4	1,7	-0,15	8%
LA92	2,2	-0,13	6%
COMB	1,9	-0,40	17%
US06	2,9	-1,09	27%
HWY	2,2	-0,13	6%

3. Ineficiência relacionada ao motor trabalhando em carga parcial

Enquanto o motor trabalha em ponto-morto, ou se não for acelerado até atingir a rotação de máxima eficiência, ele trabalha em regiões de alto consumo específico de combustível e elevado nível de emissões como pode se ver na Figura 4.7.

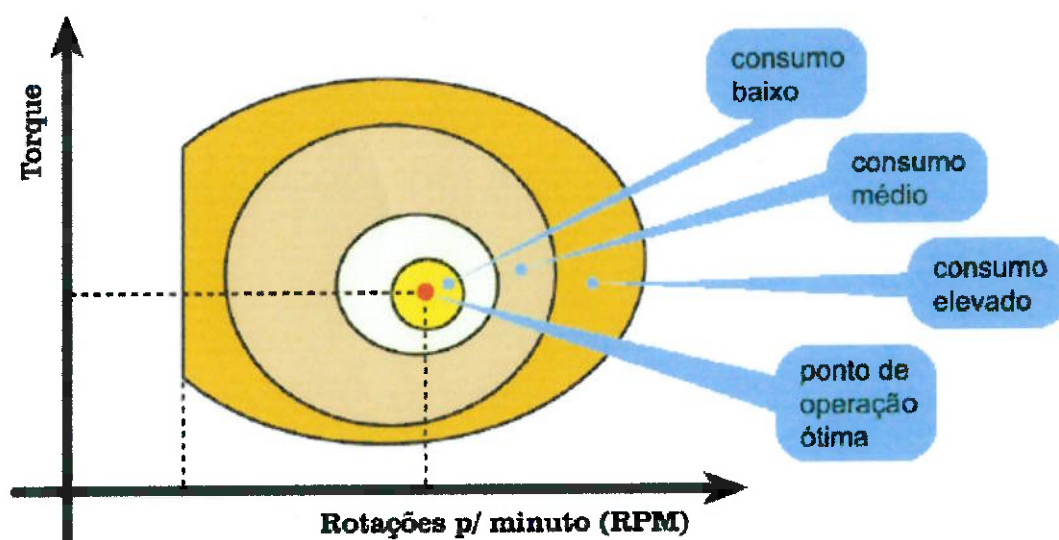


Figura 4.7 – Curvas de nível de um MCI típico

A proposta de operação do MCI em um VEH é poder contornar as ineficiências encontradas no VC. Isso é possível graças à atuação do ME nas condições em que o MCI desperdiça mais energia. Então, o ganho potencial em consumo de combustível e redução do nível de emissões está baseado em três aspectos:

1. O MCI do veículo híbrido pode ficar desligado enquanto as condições ótimas de uso não são atingidas. Neste ínterim, quem fornece energia ao veículo é o motor elétrico.
2. É possível recuperar parte da energia dissipada nas frenagens por meio de sistemas de freios regenerativos. Parte dessa energia é convertida em energia elétrica, carregando o banco de baterias.
3. Quando em funcionamento, o MCI trabalha sempre em plena carga, devido às condições impostas pelo sistema de controle. Neste projeto, o MCI entra em funcionamento como se já estivesse na sobre-marcha.

Colocadas estas disposições gerais, inicia-se o desenvolvimento do VEH objeto deste trabalho considerando o que foi exposto até este ponto.

5 ESCOLHA DO SEGMENTO DO VEH

O primeiro passo no projeto do VEH será escolher o porte do veículo. A escolha do segmento em que o VEH será inserido será baseada nas informações sobre perfil de uso descritas no item anterior. Para orientar a decisão, serão avaliados os comportamentos de um veículo pequeno (um Celta 1.4) e de um médio (um Astra 2.0 automático) nas condições dos perfis de uso apresentados.

5.1 Metodologia

1. Primeiramente foi feito o levantamento das curvas dos ciclos de uso em uma planilha eletrônica;
2. Em seguida, com dados técnicos da transmissão dos dois veículos-base, foi feita uma simulação preliminar do funcionamento do motor em cada ciclo, comparando as rotações com as de maior torque na marcha escolhida, observando que a marcha em que o veículo fará o percurso foi escolhida baseada na velocidade média e máxima de cada ciclo;
3. A partir dos resultados dessa simulação, foi possível determinar a que valores de torque o motor funciona na maior parte do tempo.
4. Com esses dados, pode-se escolher a configuração da construção do VEH (série ou paralela) e os limites de uso do ME;
5. Com o ME escolhido e sabendo seus limites, dimensionamos o MCI para começar a impulsionar o veículo próximo ao ponto de máximo rendimento após o ME desligar.

5.2 Gráficos comparativos entre segmento pequeno e médio

De acordo com o procedimento descrito no item anterior, foram levantadas as curvas das figuras 5.2 a 5.13, que demonstram o comportamento de cada veículo nos ciclos de consumo apresentados. Os valores de “abaixo”, “ótimo” e “acima” mostrados nos gráficos são referentes à porcentagem de tempo que os veículos trafegam na rotação ótima do motor (maior torque). Para a elaboração dos gráficos que representam os ciclos, foi considerado que o MCI dos veículos funcionam a partir de 1000 rpm, mantendo essa rotação em ponto-morto, conforma ocorre com os veículos-base reais.

As curvas de torque de ambos veículos são encontradas facilmente na *internet* e estão mostradas na Figura 5.1.

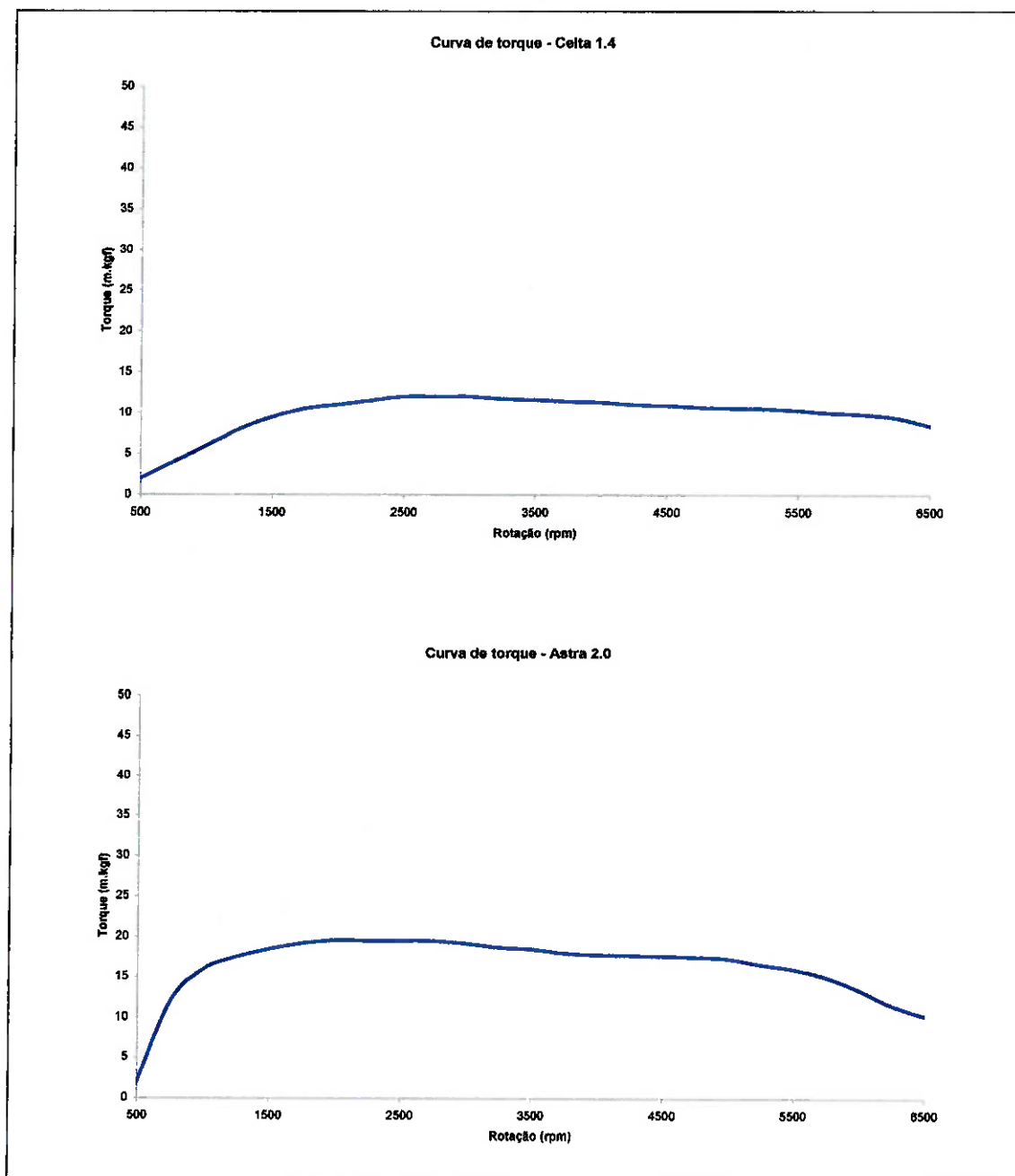


Figura 5.1 – Curvas de torque dos veículos-base: Celta 1.4 (acima) e Astra 2.0 (abaixo)

5.2.1 Ciclo NYCC (urbano)

Trânsito urbano intenso, com velocidade máxima de 44,6 km/h e média 11,4 km/h.

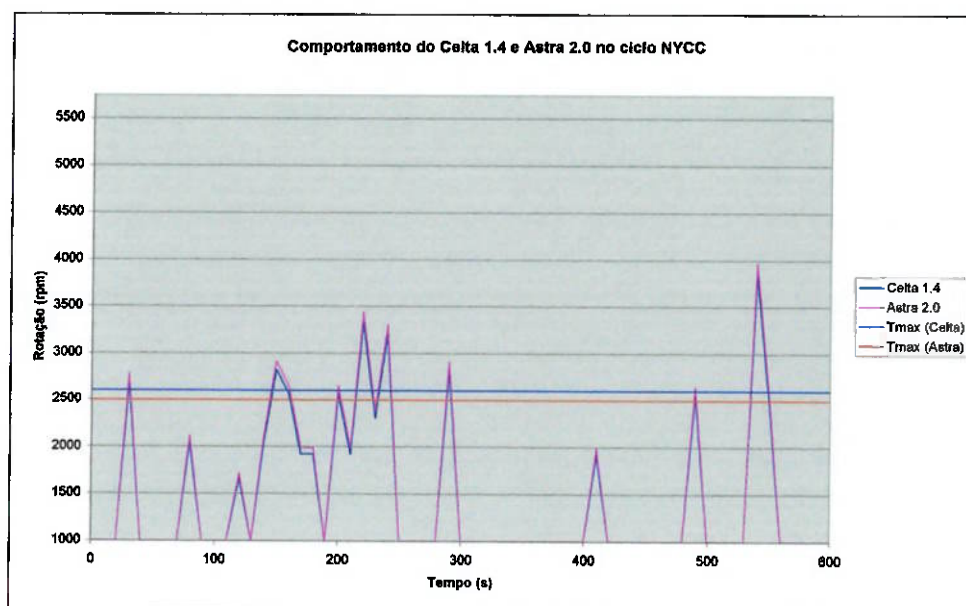


Figura 5.2 – NYCC – Celta em 2ª marcha, Astra em 1ª marcha

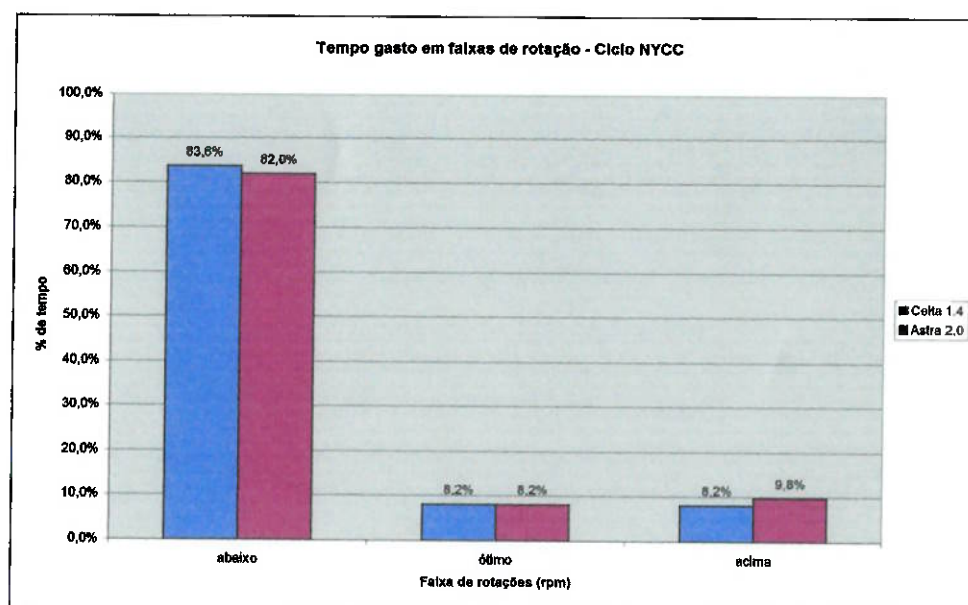


Figura 5.3 – NYCC – Tempo gasto nas rotações de ótimo rendimento

5.2.2 Ciclo Japão (urbano)

Trânsito urbano, com velocidade máxima de 70 km/h e média de 23,8 km/h.

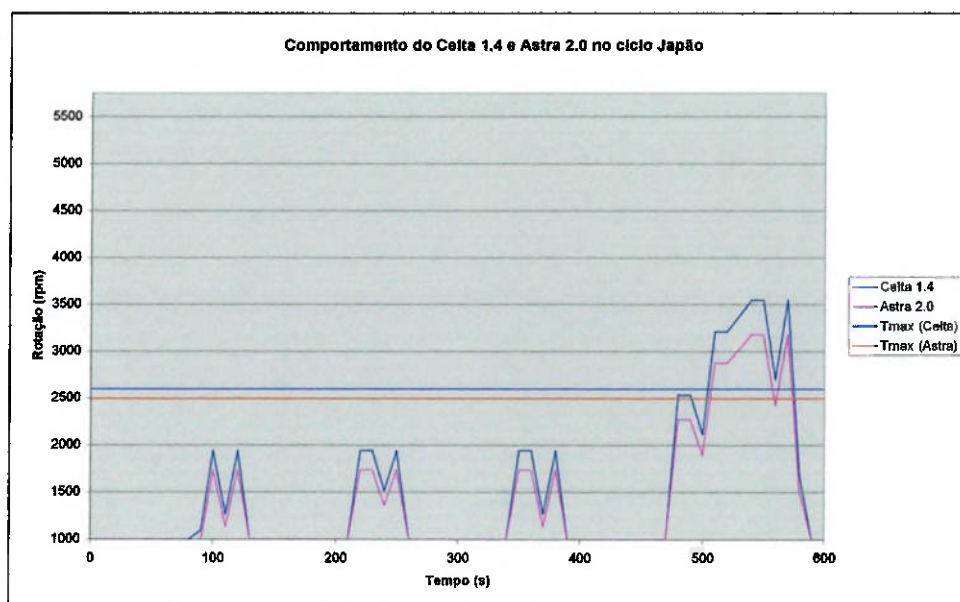


Figura 5.4 – Japão – Celta em 2ª marcha, Astra em 1ª marcha

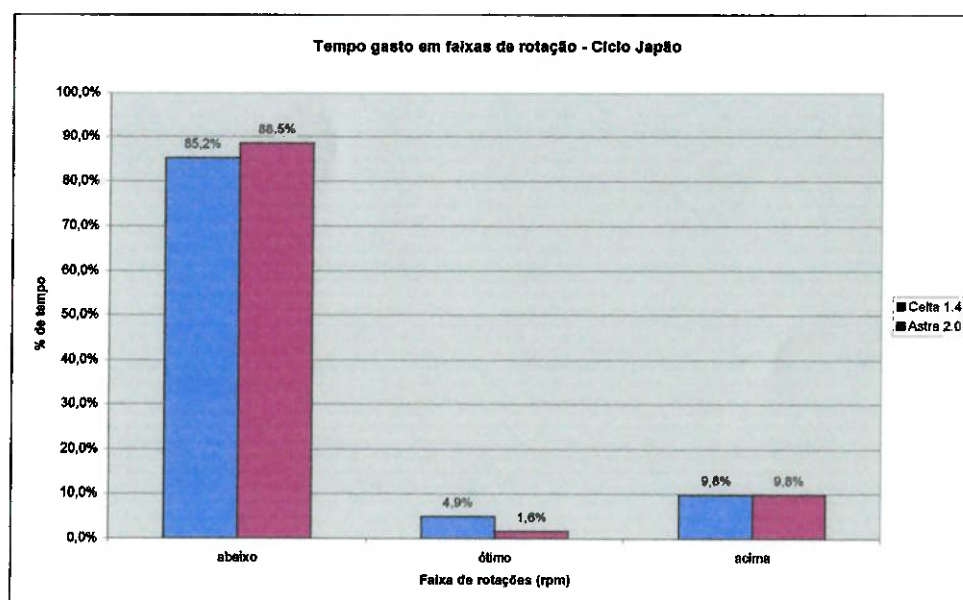


Figura 5.5 – Japão – Tempo gasto nas rotações de ótimo rendimento

5.2.3 Ciclo LA4 (urbano veloz)

Trânsito urbano veloz, com velocidade máxima de 91,2 km/h e média de 31,4 km/h.

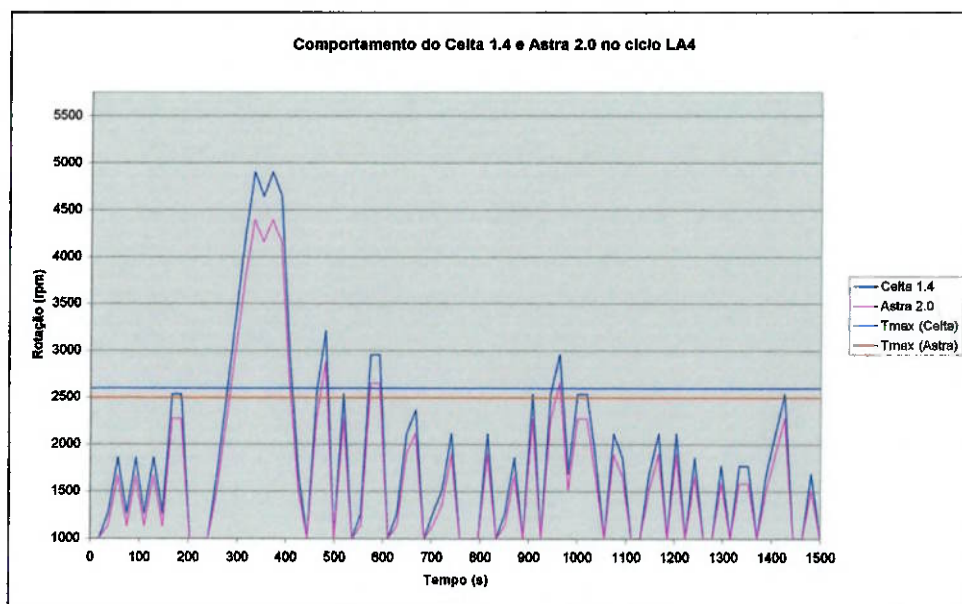


Figura 5.6 – LA4 – Celta em 3ª marcha, Astra em 2ª marcha

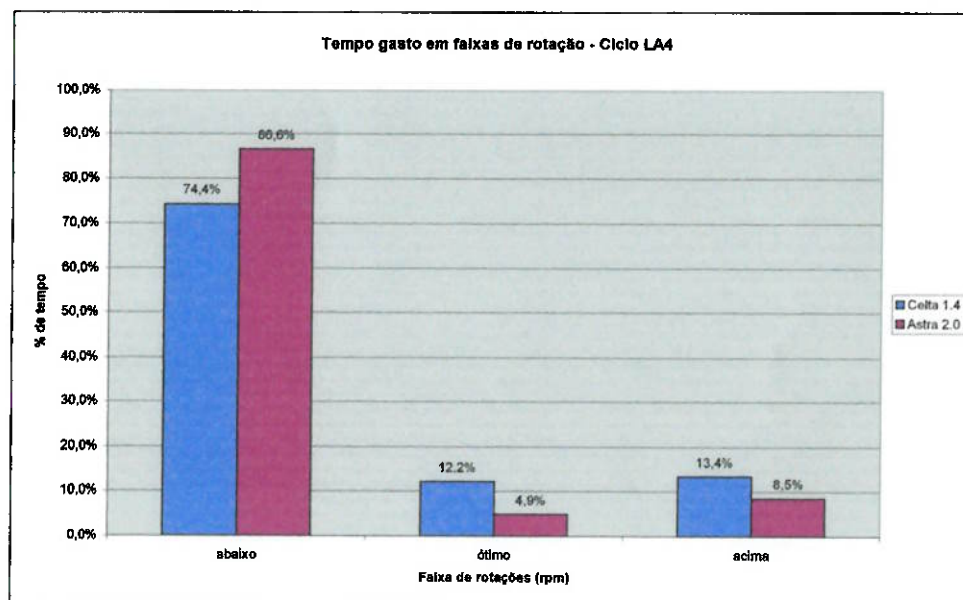


Figura 5.7 – LA4 – Tempo gasto nas rotações de ótimo rendimento

5.2.4 Ciclo LA92 (urbano mais veloz)

Trânsito mais veloz, com velocidade máxima de 109,4 km/h e média de 39,7 km/h.

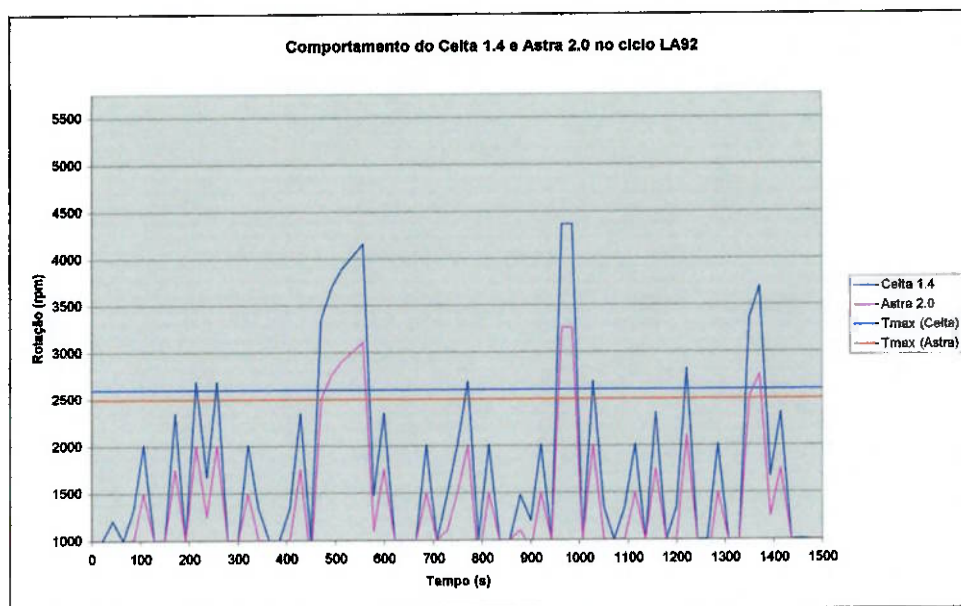


Figura 5.8 – LA92 – Celta em 4ª marcha, Astra em 3ª marcha

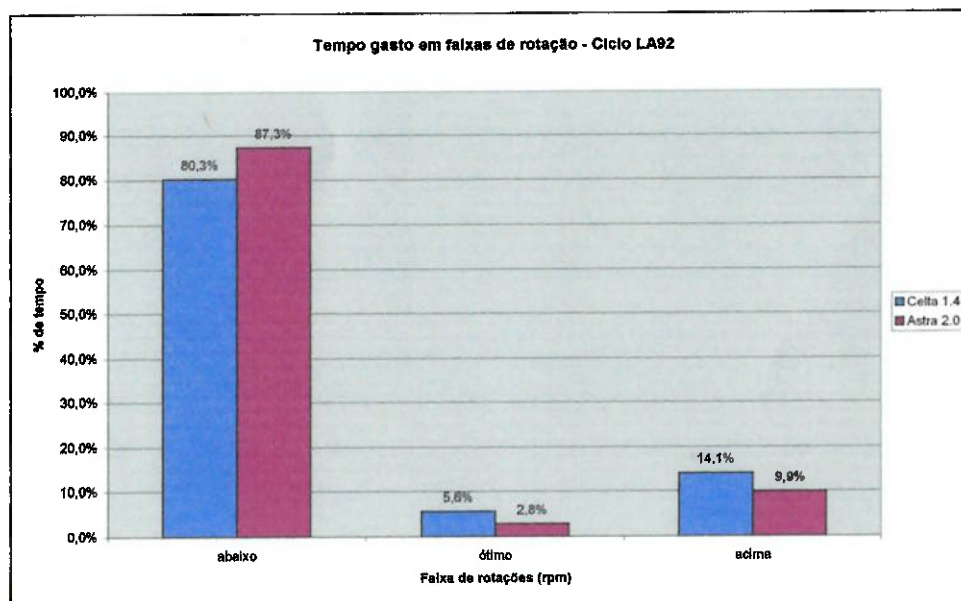


Figura 5.9 – LA92 – Tempo gasto nas rotações de ótimo rendimento

5.2.5 Ciclo US06 (misto)

Trânsito misto, com velocidade máxima de 129,2 km/h e média de 77,2 km/h. Ambos os veículos em última marcha, mas muito acima da rotação de máximo torque, para o caso do Celta.

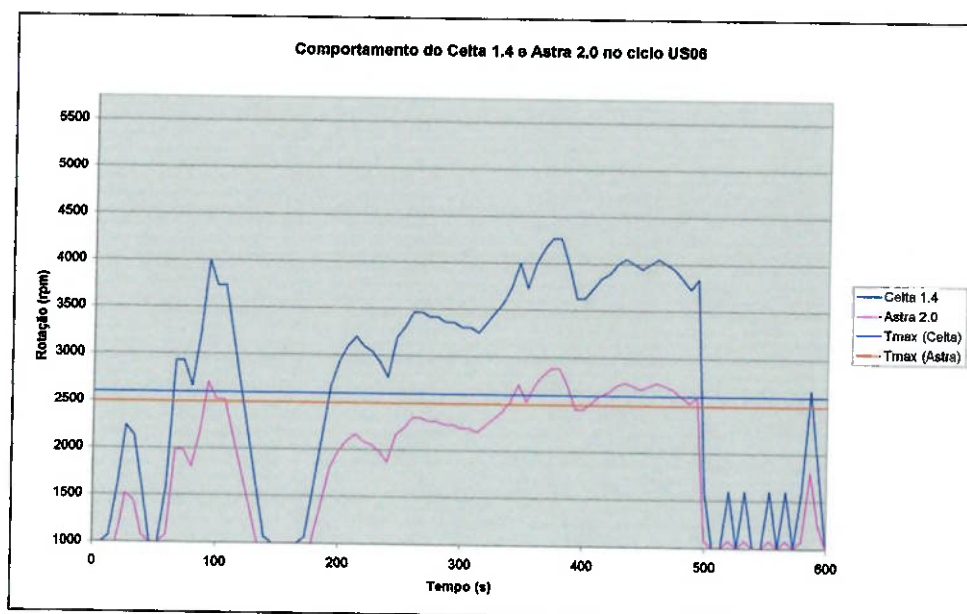


Figura 5.10 – US06 – Celta em 5ª marcha, Astra em 4ª marcha

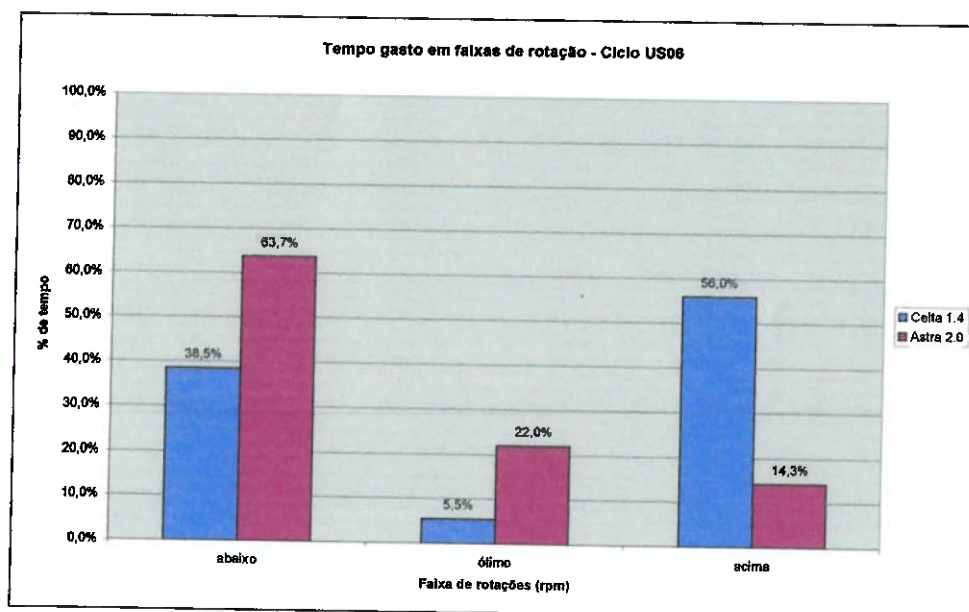


Figura 5.11 – US06 – Tempo gasto nas rotações de ótimo rendimento

5.2.6 Ciclo HWY (cruzeiro)

Trânsito em estrada, regime de cruzeiro, com velocidade máxima de 96,4 km/h e média de 77,6 km/h.

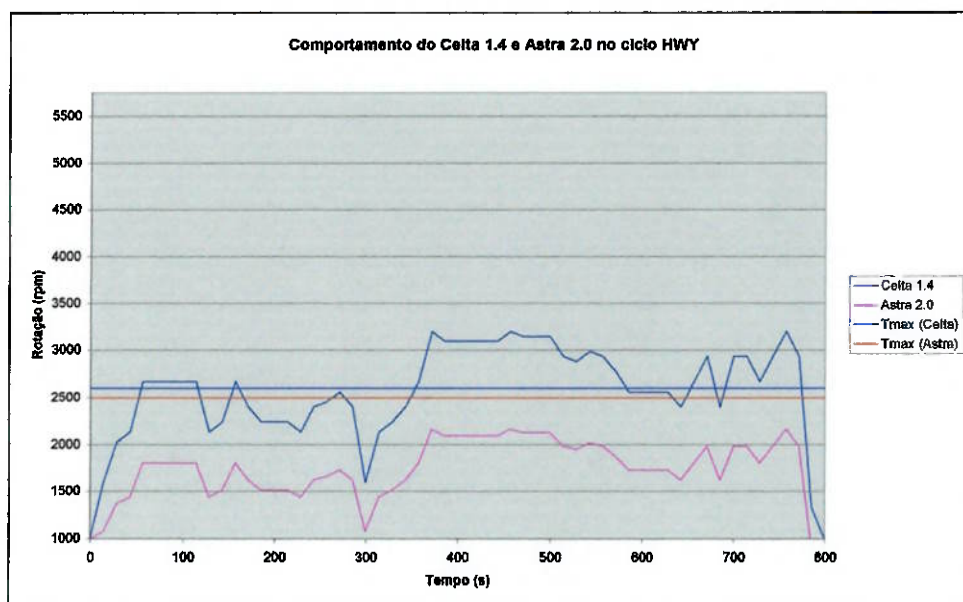


Figura 5.12 – HWY – Celta em 5ª marcha, Astra em 4ª marcha

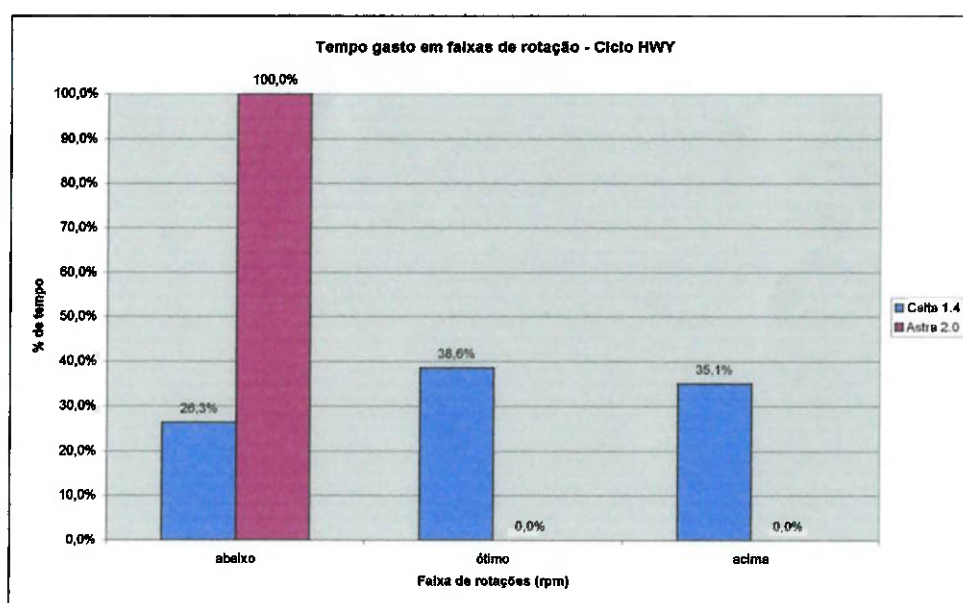


Figura 5.13 – HWY – Tempo gasto nas rotações de ótimo rendimento

5.2.7 Consumo

Conhecendo-se os valores para o consumo específico mínimo de combustível de cada veículo e as forças contrárias ao movimento (considerado piso plano em todos os ciclos), pode-se traçar uma previsão de consumo médio (Figura 5.14) e máximo (se o veículo trafegasse o tempo todo na velocidade máxima do ciclo em questão, à marcha indicada – Figura 5.15).

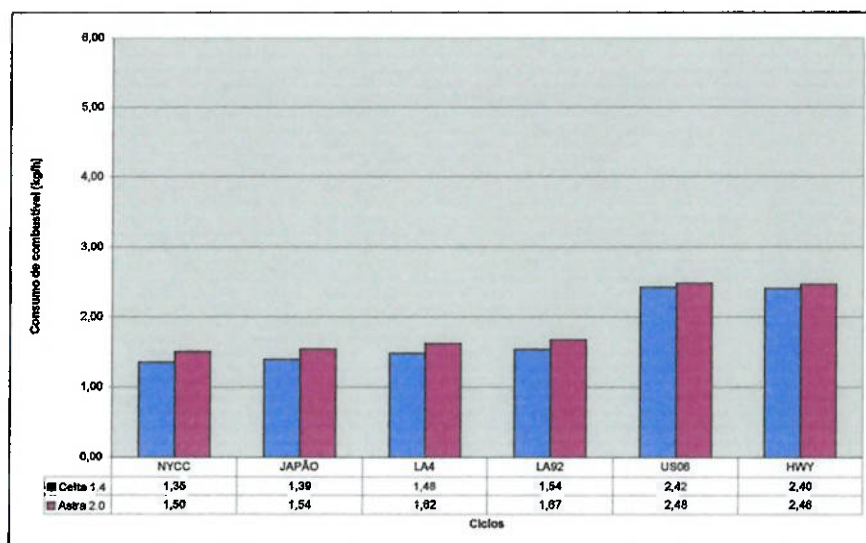


Figura 5.14 – Consumo médio de combustível

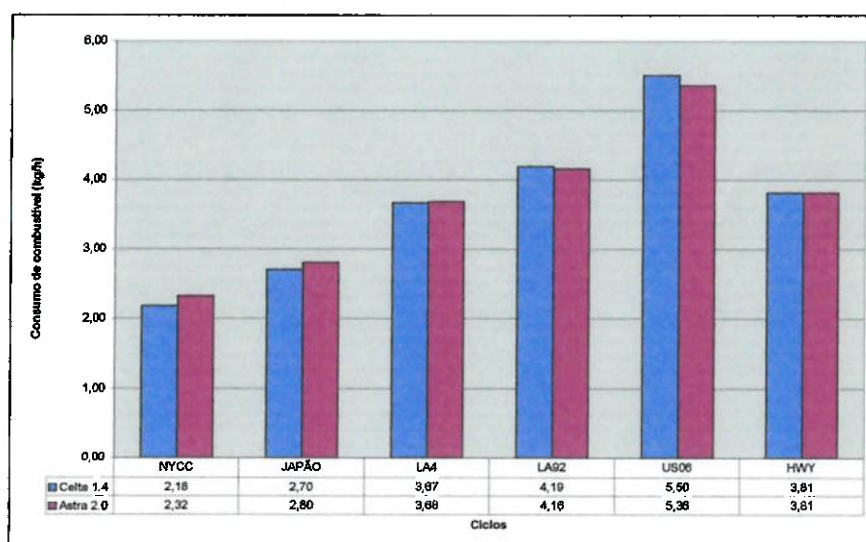


Figura 5.15 – Consumo máximo de combustível

5.3 Segmento escolhido

A partir dos gráficos pode-se concluir que:

1. Em trechos de cruzeiro, o motor menor tem de girar muito mais para conseguir a mesma velocidade, enquanto que o do Astra trafega mais próximo da rotação ideal.
2. Da Figura 5.14, nota-se como o motor maior do Astra provoca maior consumo de combustível que o motor 1.4 do Celta
3. Nos ciclos Japão, LA4 e LA92 o motor 2.0 do Astra permanece menos tempo nas faixas ideais de utilização. Os trechos urbanos têm muitos e longos períodos de tráfego parado.

Assim, conclui-se ser interessante se o VEH estiver encaixado no segmento de veículos médios equipados com motores entre 1.8 e 2.2 litros. De preferência, pelo apresentado aqui, será interessante se o tamanho do MCI for reduzido, pois o ME suprirá as necessidades de aceleração que um MCI maior supriria.

6 DIMENSIONAMENTO DO MOTOR ELÉTRICO

6.1 Velocidade máxima no modo elétrico

Os gráficos mostrados nas figuras 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 e 5.13 indicam a porcentagem de tempo em que os veículos estão abaixo, acima ou na rotação de torque ótimo. Conhecendo-se as relações de transmissão para os veículos, é fácil fazer uma correspondência entre o torque e a velocidade ótima para cada ciclo, a qual pode ser encontrada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Velocidades ótimas nos ciclos

	Velocidade ótima (km/h)	
	Celta 1.4	Astra 2.0
NYCC	33	22
JAPÃO	50	38
LA4	50	38
LA92	62	58
US06	78	80
HWY	78	80

Deste modo, pode-se obter as distribuições de velocidades encontradas nas figuras 6.1 a 6.6.

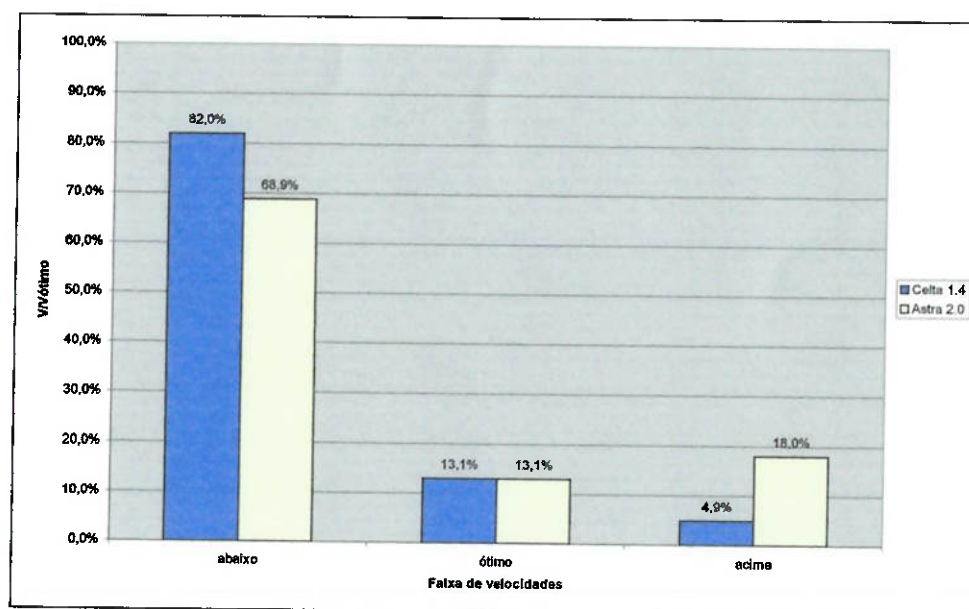


Figura 6.1 – NYCC – Distribuição de velocidades

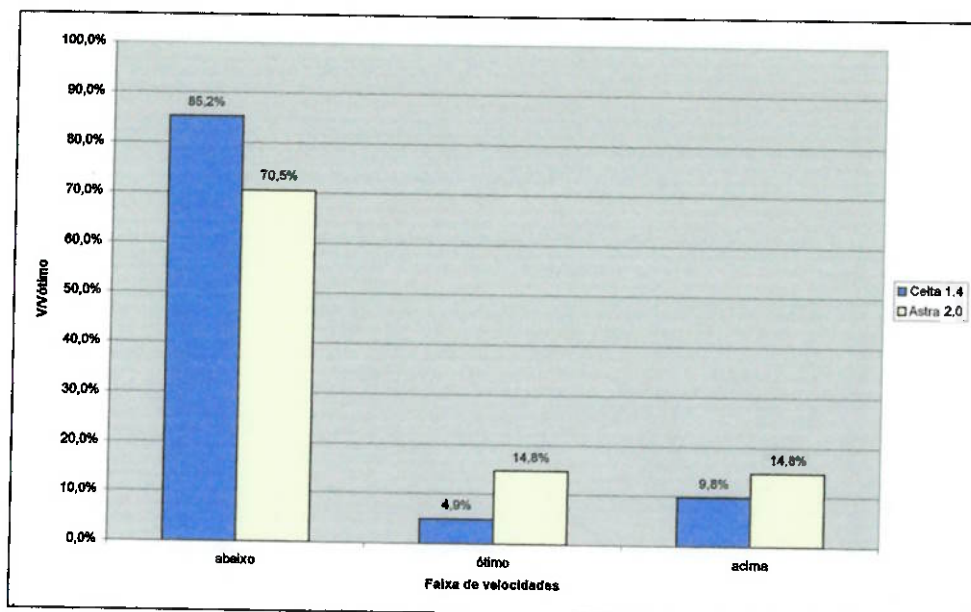


Figura 6.2 – JAPÃO – Distribuição de velocidades

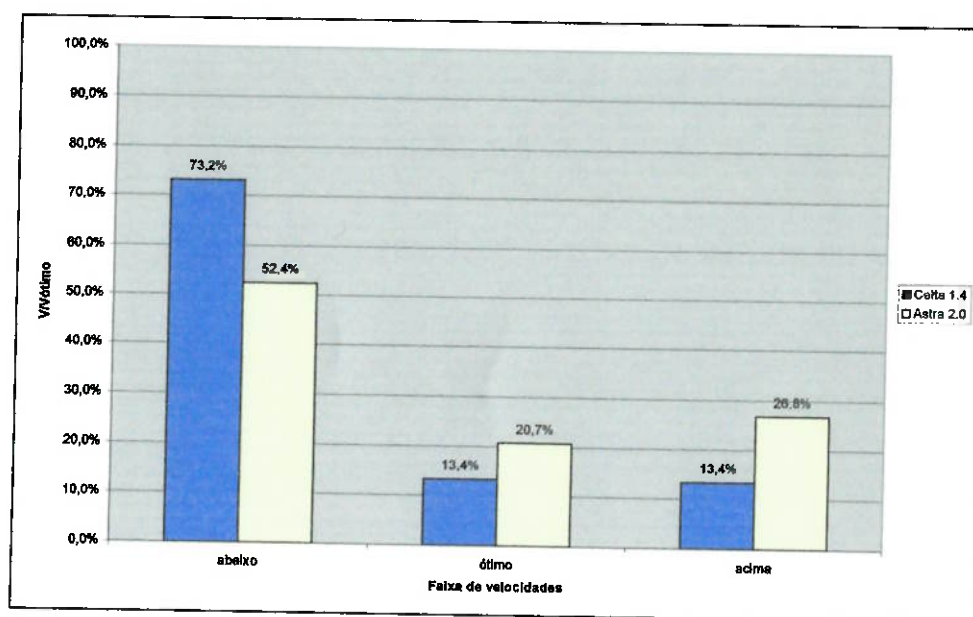


Figura 6.3 – LA4 – Distribuição de velocidades

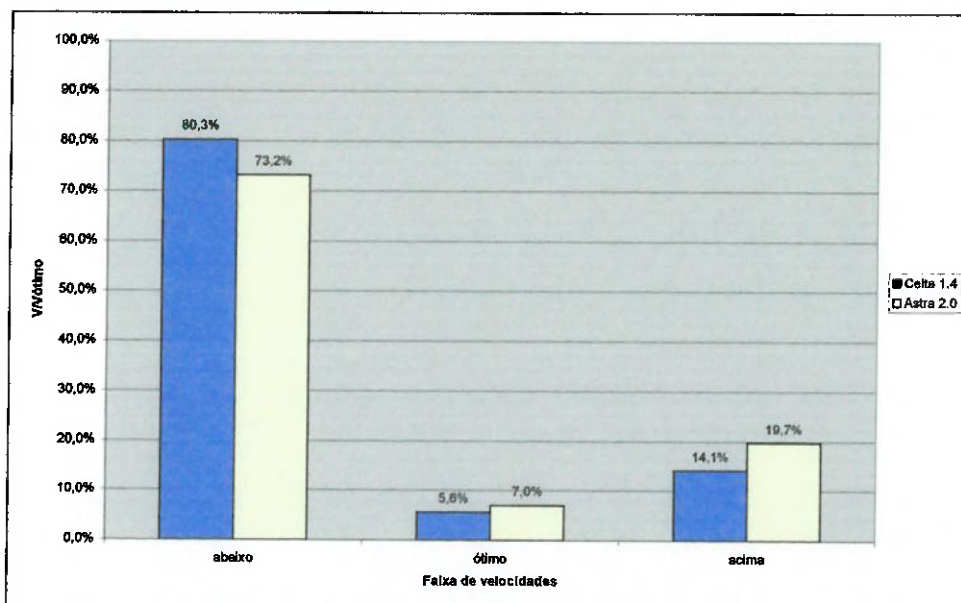


Figura 6.4 – LA92 – Distribuição de velocidades

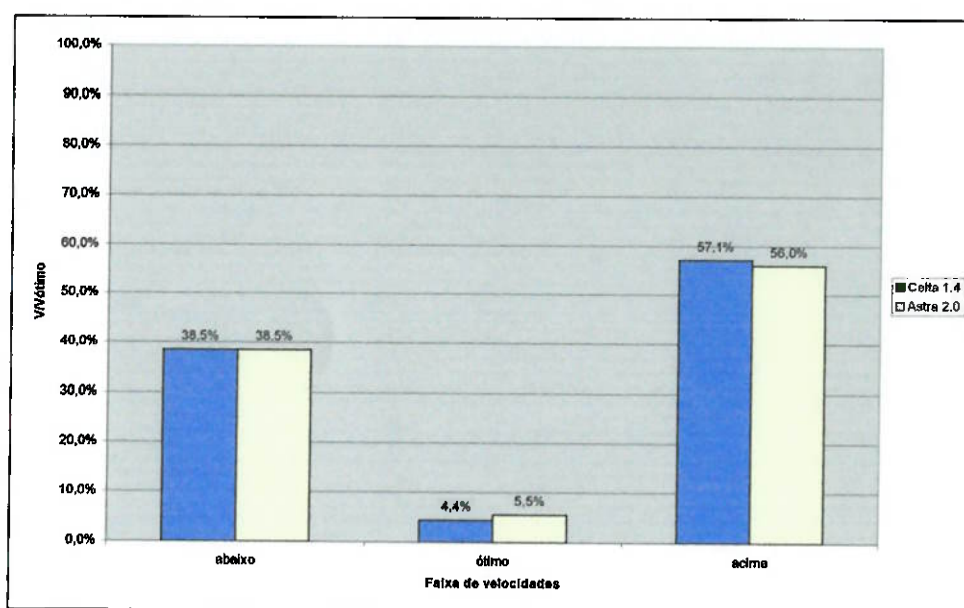


Figura 6.5 – US06 – Distribuição de velocidades

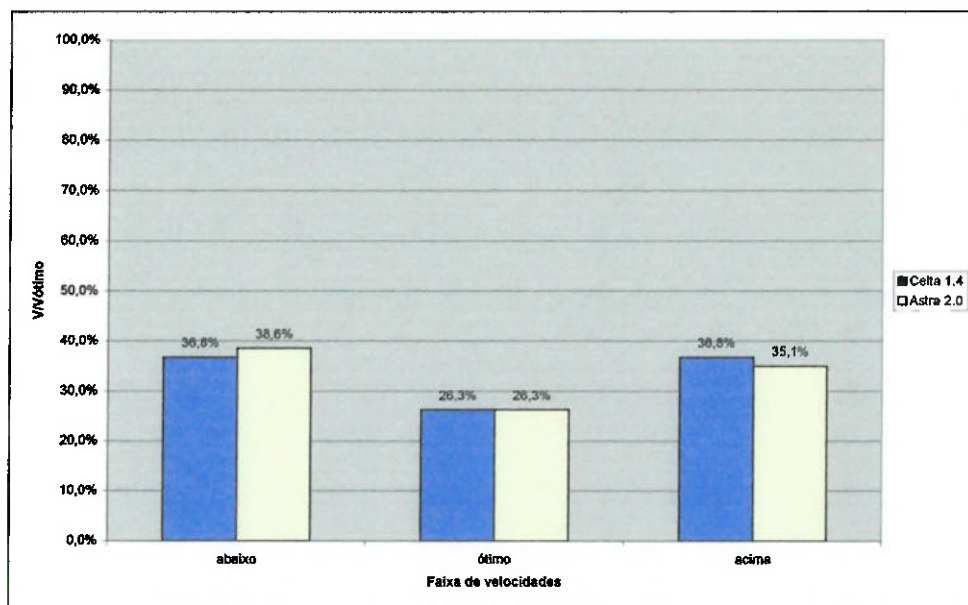


Figura 6.6 – HWY – Distribuição de velocidades

Dos ciclos NYCC até LA92 (Figuras 6.1 a 6.4), nota-se um grande desequilíbrio entre o tempo em que o veículo trafega abaixo e acima da velocidade ótima, sendo que a parcela de tempo abaixo é sempre maior. Assim, e lembrando que o intuito do VEH é diminuir emissões e consumo em trechos urbanos, pode-se determinar que o veículo deverá trafegar utilizando apenas energia elétrica até 60 km/h, aproximadamente.

6.2 Resistências

Para determinar potência e torque necessários ao motor elétrico, é preciso avaliar as resistências ao avanço do veículo que são as resistências ao rolamento e à rampa. A resistência aerodinâmica só é significativa após 60 km/h, sendo um fator desprezível às condições de uso elétrico.

6.2.1 Rolamento

A resistência ao rolamento é função do tipo de piso e do peso do veículo e é dada pela equação 6.1:

$$R_R = C_R \cdot W$$

Equação 6.1

Para os diversos tipos de piso, foi estudado o valor de C_R , que também depende do tipo de veículo (GILLESPIE, 1992). Os valores são encontrados na Tabela 6.2

Tabela 6.2 – Coeficiente de resistência ao rolamento

C_R	Passeio	Caminhão	Trator
Asfalto/Concreto	0,015	0,012	0,020
Terra	0,080	0,060	0,040
Areia	0,300	0,250	0,200

Para a estimativa de massa máxima do veículo, será utilizado o veículo-base com carga máxima (1710kg). Assim, a resistência ao rolamento será.

$$R_R = 0,015 \cdot 1710 \cdot 9,81 = 252N$$

6.2.2 Rampa

De acordo com os requisitos de projeto, o veículo deverá ser capaz de subir uma ladeira com inclinação máxima de 50%, equipado com pneus novos em pista de asfalto seca.

A resistência à rampa máxima é dada por:

$$R_G = W \cdot \sin(\theta) \quad \text{Equação 6.2}$$

Por inclinação da rampa, entende-se a altura que o veículo sobe dividida pela distância percorrida, ou seja, é igual a $\sin(\theta)$. Assim,

$$R_G = 1710 \cdot 9,81 \cdot 0,50 = 8388N$$

6.3 Força de tração máxima

Para as condições impostas ao VEH, a força de tração máxima disponível deverá ser igual à soma das forças de resistência ao rolamento e à rampa, vistas em 6.2.1 e 6.2.2.

É notável que o efeito de resistência à rampa máxima é preponderante no dimensionamento do motor elétrico. Como requisito de projeto, será estipulado que o veículo deverá subir a rampa máxima de 50%, totalmente carregado a uma

velocidade de 20 km/h. Esta velocidade foi escolhida por não ser alta demais, o que acarretaria a necessidade de um ME muito maior e não é menor para não proporcionar aos ocupantes a sensação de que o veículo não foi feito para andar carregado em ladeiras, por exemplo, em viagens.

Assim, o efeito de resistência aerodinâmica pode ser desprezado. Portanto, tem-se a equação de força trativa máxima que o motor elétrico deverá fornecer:

$$E = R_R + R_G \quad \text{Equação 6.3}$$

No VEH projetado:

$$E = 252 + 8388 = 8640\text{N}$$

6.4 Potência máxima

A fórmula de potência é dada na equação 6.4.

$$\text{Pot}_e = E \cdot V \quad \text{Equação 6.4}$$

$$\text{Pot}_e = 8640 \cdot \left(\frac{20}{3,6} \right) = 48 \text{ kW}$$

No mercado, existe hoje motor com 50 kW de potência, já utilizado no Toyota Prius (FISITA, 2005). Portanto, a velocidade máxima de rampa escolhida para as condições impostas fornece uma aproximação bem é razoável.

6.5 Torque máximo

Em veículos com transmissão manual ou automática, o valor de torque pode ser calculado por:

$$T_e = \frac{E \cdot r_{\text{roda}}}{G \cdot \eta_{\text{transmissão}}} \quad \text{Equação 6.5}$$

No veículo híbrido, o sistema de acoplamento entre o ME, o MCI e o gerador é feito por meio de uma engrenagem planetária e funciona como uma transmissão continuamente variável, conforme se vê na Figura 6.7.

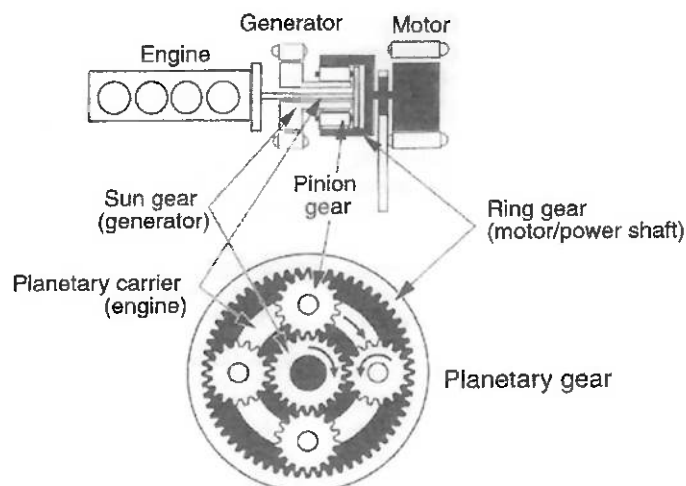


Figura 6.7 – Planetário de ligação entre MCI e ME

Para determinar ω_{motor} , será usado o mesmo diferencial do veículo-base Astra ($G_{\text{diferencial}} = 3,69$). Inicialmente será considerado $G_{\text{planetário}} = 3,00$. Assim,

$$T_e = \frac{8640 \cdot 0,315}{11,07 \cdot 0,85} = 290,1 \text{ Nm} = 29,6 \text{ kgf.m}$$

6.6 Rotação máxima

Sabe-se que a relação entre potência, torque e rotação de um motor pode ser expressa por:

$$Pot_e = T_e \cdot \omega_{\text{motor}} \Leftrightarrow \omega_{\text{motor}} = \frac{Pot_e}{T_e} \quad \text{Equação 6.6}$$

$$\omega_{\text{motor}} = \frac{48,00 \times 10^3}{290,1} \cdot \frac{60}{2\pi} = 1580 \text{ rpm}$$

Desta forma o motor elétrico é completamente definido, conforme resumido abaixo:

- Potência: 48,00 kW
- Torque: 290,1 Nm
- Rotação: 1580 rpm

6.7 *Alimentação do motor elétrico*

Dentre as alternativas disponíveis atualmente para alimentação do motor elétrico, pode-se destacar duas de maior importância: o uso de um banco de baterias e o uso de células de combustível aliadas às baterias. No atual estado-da-arte, as células de combustível são alternativas muito interessantes do ponto de vista ecológico, pois não emitem gases poluentes na atmosfera. Por outro lado, seu custo muito elevado ainda faz com que sejam vistas como a alternativa propulsora de um futuro mais distante.

As baterias, por sua vez, são alternativas mais apropriadas por apresentarem baixo custo e por serem uma tecnologia amplamente estudada e desenvolvida. Por este motivo, o conjunto armazenador para alimentação do motor elétrico será composto de um banco de baterias.

6.7.1 Requisitos das baterias

Para se determinar a energia necessária ao banco de baterias, foram impostos os seguintes requisitos:

1. O peso das baterias não deve ultrapassar 2,5 % do PBT do veículo, ou seja, devem pesar 42,75 kg no máximo;
2. Por serem os trechos urbanos intensos os mais críticos no que diz respeito à poluição atmosférica, as baterias devem ser capazes de fornecer energia para o percurso NYCC durante o tempo necessário para se percorrer 25 km neste ciclo. Isto equivale a 2,2 horas (2 horas e 12 minutos), operando no modo elétrico e em piso plano, por hipótese.

Dados encontrados no periódico especializado da SAE Brasil (2005) mostram que a densidade de energia de baterias comercialmente disponíveis para esta aplicação está em torno de 46 Wh/kg e que estas são encontradas em módulos com massa de 1,040 kg cada. Assim, pode-se concluir serem necessários 41 módulos, totalizando uma massa de 42,64.

6.7.2 Energia das baterias e tempo de uso

Para determinar a energia disponível nas baterias, basta multiplicarmos a densidade de energia pela massa do banco de baterias:

$$E_b = \rho_{ee} \cdot m_b = 46 \cdot 10^{-3} \times 42,64 = 1,96 \text{ kWh} \quad \text{Equação 6.7}$$

O tempo de uso é determinado conforme a eq. 6.8 a seguir

$$\Delta t = \frac{E_b}{P_{mNYCC}} \quad \text{Equação 6.8}$$

Utilizando o valor da potência média no ciclo NYCC para P_{mNYCC} conforme a Tabela 6.3, tem-se

$$\Delta t = \frac{1,96}{0,76} = 2,58 \text{ horas } (= 154 \text{ min}) > 2,2 \text{ horas}$$

Tabela 6.3 – Potência média nos ciclos

	Pm (kW)
NYCC	0,76
JAP	1,63
LA4	2,26
LA92	2,95

6.7.3 Considerações sobre a recarga das baterias

Este valor encontrado em 6.7.2 expressa o tempo máximo de utilização se considerarmos que as baterias iniciam o trecho urbano com carga total e sem recargas até o uso completo da energia elétrica disponível. Considerando a situação caso o veículo somente trafegue em velocidades abaixo de 60 km/h, pelos critérios adotados para utilização dos sistemas de propulsão (ver 6.1), o sistema do MCI não impulsiona o veículo em nenhum momento. Neste caso, após a utilização do modo elétrico pelo período de tempo encontrado pela equação 6.8, as baterias se descarregariam e o MCI iniciaria seu funcionamento para impulsionar o veículo. Para evitar este tipo de problema, enquanto não é atingida a velocidade de fronteira entre o modo elétrico e o modo a combustão, é interessante haver um sistema para recarga contínua das baterias.

Uma alternativa viável é ligar o MCI para recarregar as baterias assim que o nível de energia nelas transpuser para baixo o limite ótimo de utilização. Este limite está

ligado à vida útil do conjunto de baterias. Veículos em produção atualmente têm um banco de baterias com vida útil em torno de 300.000 km (FISITA, 2005), o que equivale a, aproximadamente, 15 anos de utilização do veículo. Este limite é bem aceitável, embora atingi-lo possa incorrer em elevados custos de projeto e produção. Seriam necessários mais dados para se estabelecer este limite, como o preço desse conjunto para reposição e funcionamento detalhado das baterias, que foge à abrangência deste trabalho.

O MCI funciona no ponto de ótimo rendimento, fornecendo energia do combustível para que o gerador a converta em energia elétrica para as baterias. Embora a proposta obrigue a um consumo de combustível na condição de uso urbano, mesmo que mínimo, ela é necessária para que não ocorra a hipótese de se esgotar a energia das baterias, caso o veículo não atinja 60 km/h durante um longo período de utilização do veículo. Em conjunto com este sistema, funciona o sistema de freios regenerativos citado em 3.2.6.

Semelhantemente, o ME pode se manter ligado em operações de cruzeiro, acionando um dos eixos de tração ou fazendo o papel de um propulsor em uma eventual tração integral.

Pela forma construtiva assumida no VEH aqui projetado (configuração paralela), o acionamento individual pelos sistemas propulsores de um eixo pode trazer dificuldades na operação do veículo, pois em uma situação o veículo teria tração dianteira e em outra, tração traseira. É sabido da literatura (GILLESPIE, 1992) que as condições de dirigibilidade nessas duas condições são muito diferentes e podem comprometer a segurança dos passageiros, caso o motorista não saiba dominar bem essas técnicas.

Assim, tanto o ME quanto o MCI serão fontes propulsoras de um mesmo eixo. Para as condições brasileiras, a tração será dianteira por duas razões:

1. A grande maioria dos veículos produzidos e comercializados no Brasil, a exceção de picapes, é dotada de tração dianteira (FENABRAVE, 2005);
2. Com a tração dianteira, o veículo assume características sobesterçantes, ou seja, o veículo tende a “sair de frente” caso a curva seja contornada a uma velocidade acima da máxima segura. Para corrigir a trajetória, basta deixar de acelerar e girar o volante para a direção da curva, o que é a reação instintiva do ser humano em casos de emergência.

Posto isto, a decisão de manter o ME desligado em condições de cruzeiro baseia-se no consumo de energia causado pela sua utilização em uma situação que o ME não é requerido. Vale lembrar que nos veículos híbridos de ciclo Otto, a principal função do ME é iniciar o movimento a partir do repouso e mantê-lo em baixas velocidades (configuração paralela). Essas são características de tráfegos urbanos (ver figuras 4.1 a 4.4) e, nesses locais, o ME é importante para reduzir o nível de emissões de poluentes na atmosfera.

No capítulo 7 será feito o dimensionamento do MCI. Caso alguma condição não seja atendida, será proposta uma alternativa para utilização do ME em conjunto com o MCI.

7 DIMENSIONAMENTO DO MOTOR A COMBUSTÃO

O motor a combustão será dimensionado para servir de propulsão ao veículo a partir de 60 km/h até a velocidade máxima. Antes disso, o MCI fica ligado em regime de ótimo rendimento, conforme descrito em 6.7.3.

Na velocidade máxima e supondo que o veículo atinja em um piso plano de boa aderência, as forças de resistência preponderantes serão as de rolamento e a aerodinâmica. A resistência ao rolamento já foi vista no item 6.2.1 e a resistência aerodinâmica será analisada a seguir.

7.1 Potência

A potência que o MCI deverá fornecer em velocidade máxima pode ser expressa como o produto da força de resistência pela velocidade, conforme 7.1.

$$P_{MCI} = E_{v_{max}} \cdot V_{max} \quad \text{Equação 7.1}$$

A fórmula de resistência aerodinâmica é dada por:

$$R_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 \quad \text{Equação 7.2}$$

A área frontal será estimada também em 2m² e o raio das rodas em 0,315m, valores encontrados no veículo-base Astra e a relação entre velocidade do veículo e velocidade do motor é dada pela equação 7.3.

$$V = \frac{\omega \cdot r_{rodas}}{G} = \frac{\omega_{motor} \cdot r_{rodas}}{G_{diferencial} \cdot i_5} \quad \text{Equação 7.3}$$

Será estipulada a rotação máxima do motor em 5750 rpm, que é a atualmente encontrada nos MCI comuns para efeitos de estimativas iniciais e $i_5 = 1,00$ (câmbio automático do Astra). Assim,

$$V = \frac{5750 \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right) \cdot 0,315}{3,69} \times 3,6 = 185 \text{ km/h}$$

Para a velocidade máxima, com $C_D = 0,29$ (sedan moderno) e utilizando-se 7.2 tem-se:

$$R_A = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,29 \cdot 2 \cdot \left(\frac{185}{3,6} \right)^2 = 938,6 \text{ N}$$

Utilizando-se o resultado das equações 6.1, 7.1, 7.2 e 7.3, pode-se determinar a potência máxima do motor de combustão.

$$P_{MCI} = (252 + 938,6) \cdot \left(\frac{185}{3,6} \right) = 61182 \text{ W} \cong 61,2 \text{ kW (83,2 cv)}$$

o que é um valor próximo a um motor 1,4 litros atual, exatamente o encontrado no outro veículo-base utilizado na escolha do segmento do VEH. Assim, se o projeto de um veículo híbrido no Brasil for adiante no futuro, poderemos ver carros médios trafegando com motores reduzidos em 30% em relação aos atuais.

Este valor de potência permite ao VEH projetado subir uma rampa de 20% de inclinação em PBT a 60 km/h sem o auxílio do ME.

8 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados da substituição virtual do MCI de 2,0 litros do veículo-base Astra pela combinação de um motor reduzido de 1,4 litros com um motor elétrico serão apresentados neste capítulo, via planilhas e gráficos, fornecendo conclusões teóricas.

8.1 *Pontos abordados nos testes*

O ponto mais importante é a redução no consumo de combustível, qualquer que seja ele. Recentemente, matérias publicadas na imprensa especializada (CARSALE, 2005) mostram que a intenção dos dirigentes da indústria automotiva nacional atualmente é a de não produzir um veículo híbrido no Brasil, pois seria perda de tempo devido à abundância de etanol como substituto à gasolina. Porém, por mais que esse combustível seja considerado limpo e abundante, a poluição nos grandes centros no futuro será tão intensa quanto nos dias atuais, nos quais a maioria dos veículos trafega utilizando combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que uma maior demanda por ele tenda a aumentar nos próximos 10 a 20 anos. Como dito anteriormente, os VEH atuais são considerados como “pontes” entre os veículos convencionais atuais e os veículos movidos a célula de hidrogênio. “Quando os veículos híbridos estiverem comercialmente competitivos e com todos os sistemas desenvolvidos e seus conceitos consolidados, a substituição do seu motor de combustão interna por uma bateria de células a hidrogênio finalmente tornará os veículos energeticamente eficientes, limpos e, portanto, utilizáveis de maneira sustentável. Esta é a transformação que perpetuará a indústria automobilística, cuja importância e necessidade para os meios de transporte é inquestionável” (BRANCO, 2005).

Os resultados obtidos pela projeção em planilhas mostram a redução considerável no consumo de combustível e no nível de emissões de poluentes de um VEH comparado a um veículo convencional de igual porte.

Primeiramente, com os mesmos ciclos utilizados para escolher o segmento em que o VEH seria inserido, foi feita a simulação de desempenho, considerando que o MCI só começa a impulsionar o veículo após a velocidade de 60 km/h. Como dito anteriormente também, o MCI é mantido em condições de ótimo rendimento antes de

o veículo atingir esta velocidade para recarregar as baterias. Sabe-se que a rotação de ótimo desempenho de um motor ciclo Otto é próxima à de maior torque. Pelo desenvolvimento da tecnologia dos motores de combustão, o torque disponível para propulsão é bem planejado, sem picos em determinadas rotações, como se vê na Figura 5.1. O motor 1,4 litros escolhido para equipar o modelo híbrido proposto neste trabalho, já entrega de 90% do torque a partir de 2000 rpm. Esta será, portanto, a rotação que o MCI funcionará, para suprir as necessidades expostas no item 6.7.3. Serão feitas duas simulações: a primeira, considerando a situação de baterias plenamente carregadas; a segunda, a situação mais crítica, de que o veículo trafega em circunstâncias tais que o MCI funcione 100% do tempo, tanto para recarregar as baterias quanto para impulsionar o veículo.

8.2 Resultados e conclusões

Desta maneira, as curvas obtidas para os ciclos representados nas figuras 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 5.10 e 5.12 são transformadas no que se pode ver nas figuras 8.1 a 8.11. Vale ressaltar que no ciclo NYCC, o VEH em nenhum momento ultrapassa os 60 km/h, comportando-se o tempo todo como elétrico (salvo ressalvas propostas em 6.7.3).

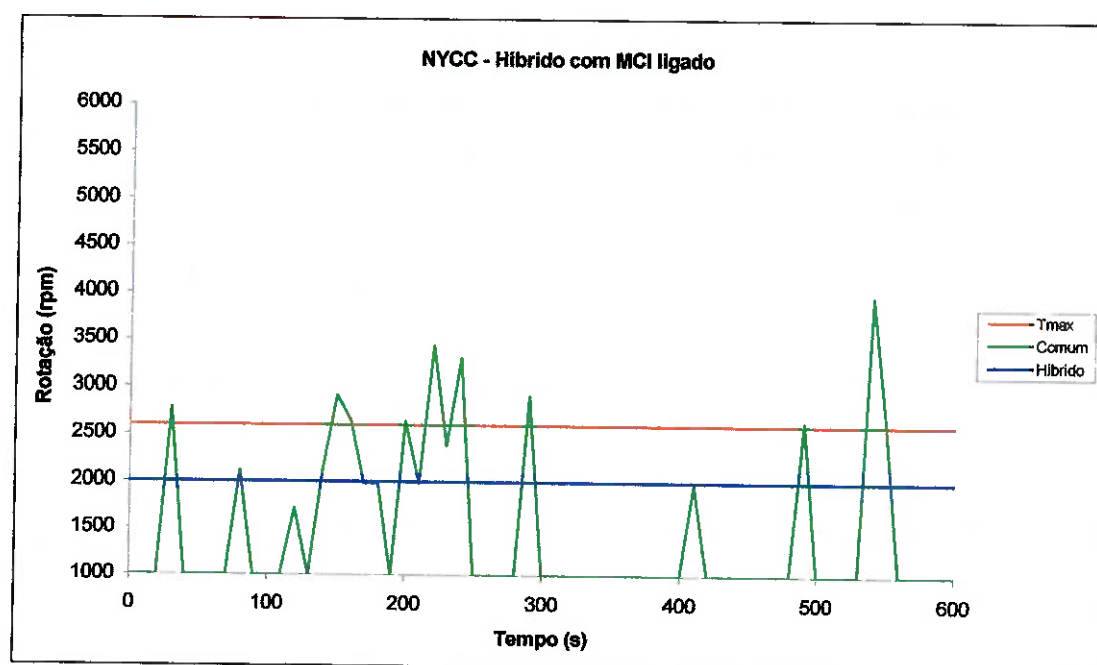


Figura 8.1 - Ciclo NYCC com configuração híbrida e MCI ligado

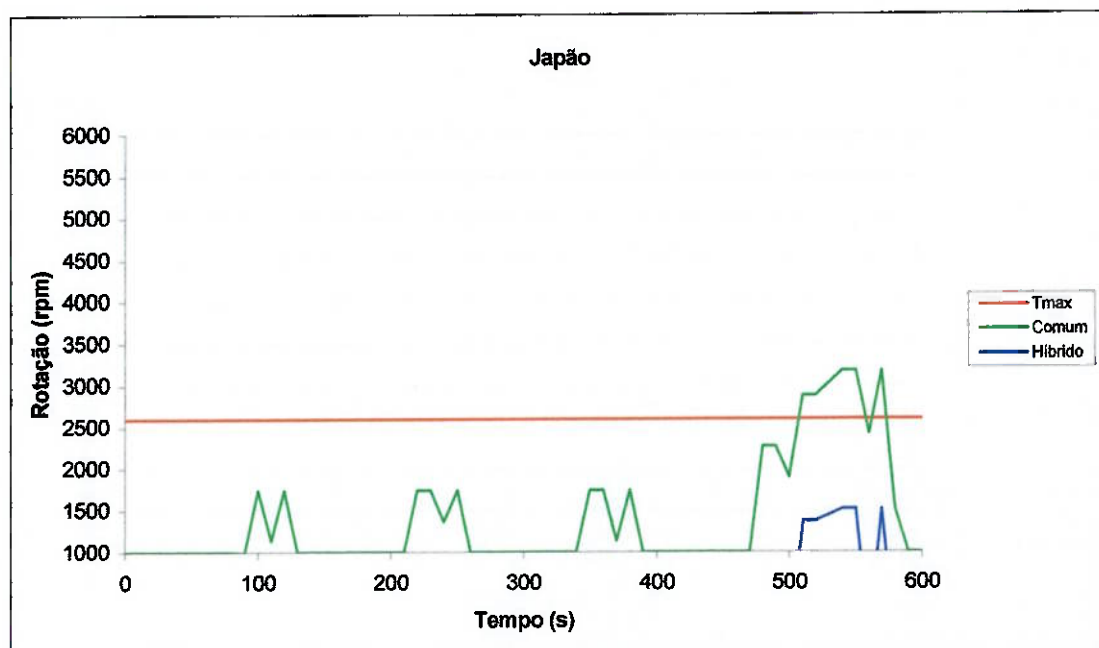


Figura 8.2 - Ciclo Japão com configuração híbrida

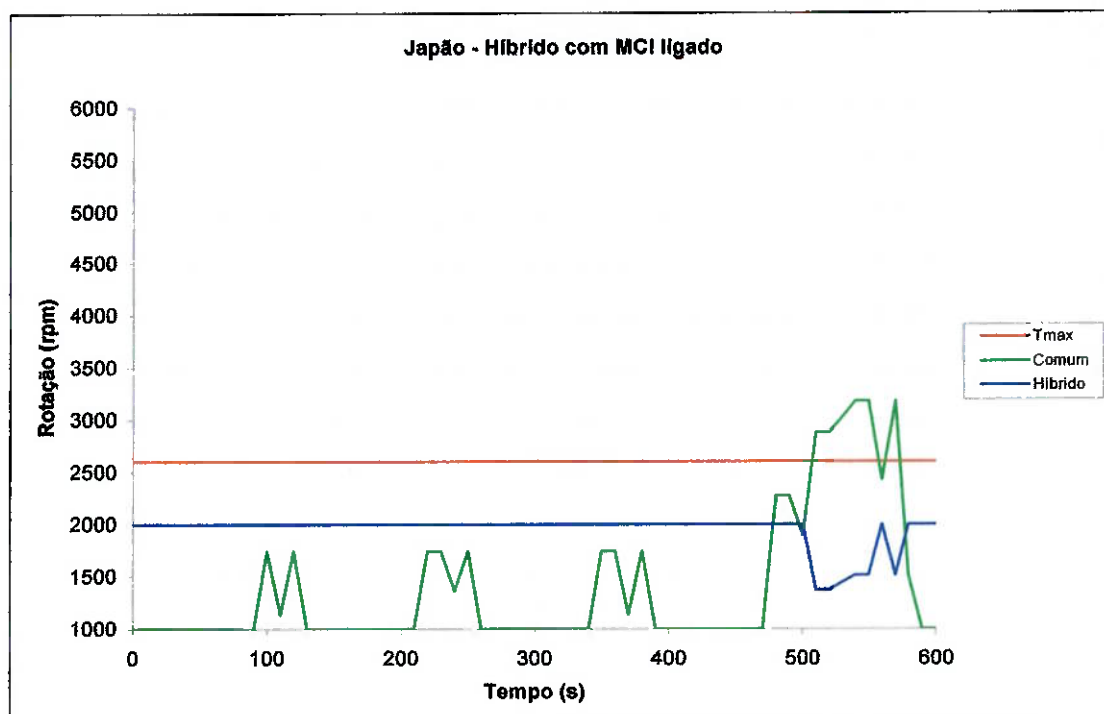


Figura 8.3 - Ciclo Japão com configuração híbrida e MCI ligado

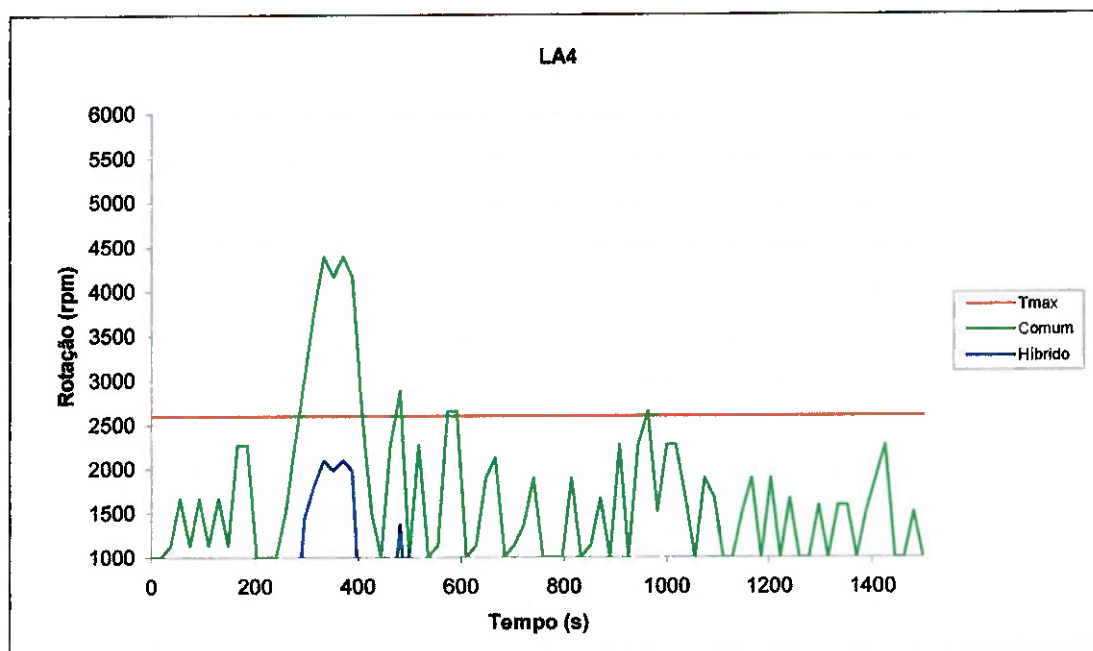


Figura 8.4 - Ciclo LA4 com configuração híbrida

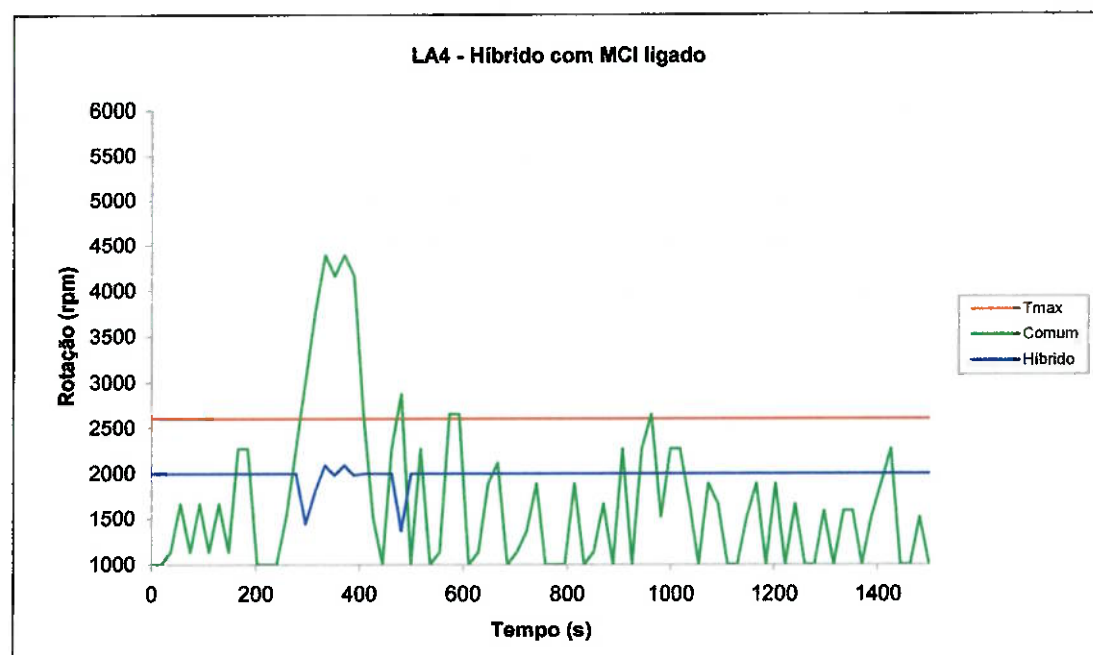


Figura 8.5 – Ciclo LA4 com configuração híbrida e MCI ligado

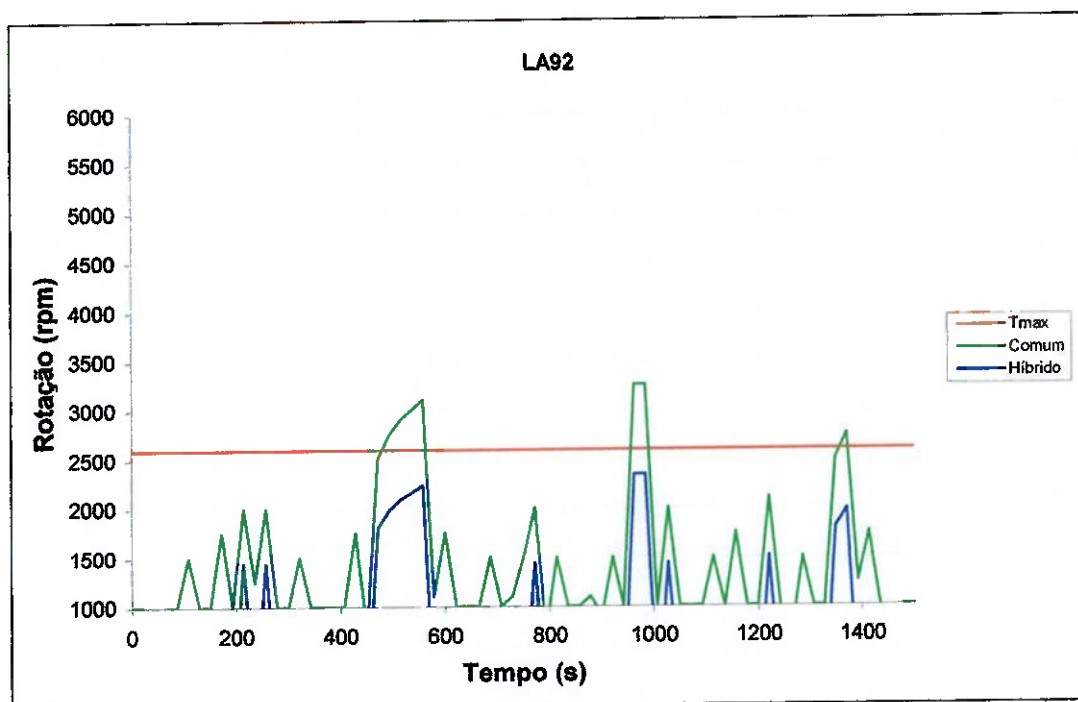


Figura 8.6 - Ciclo LA92 com configuração híbrida

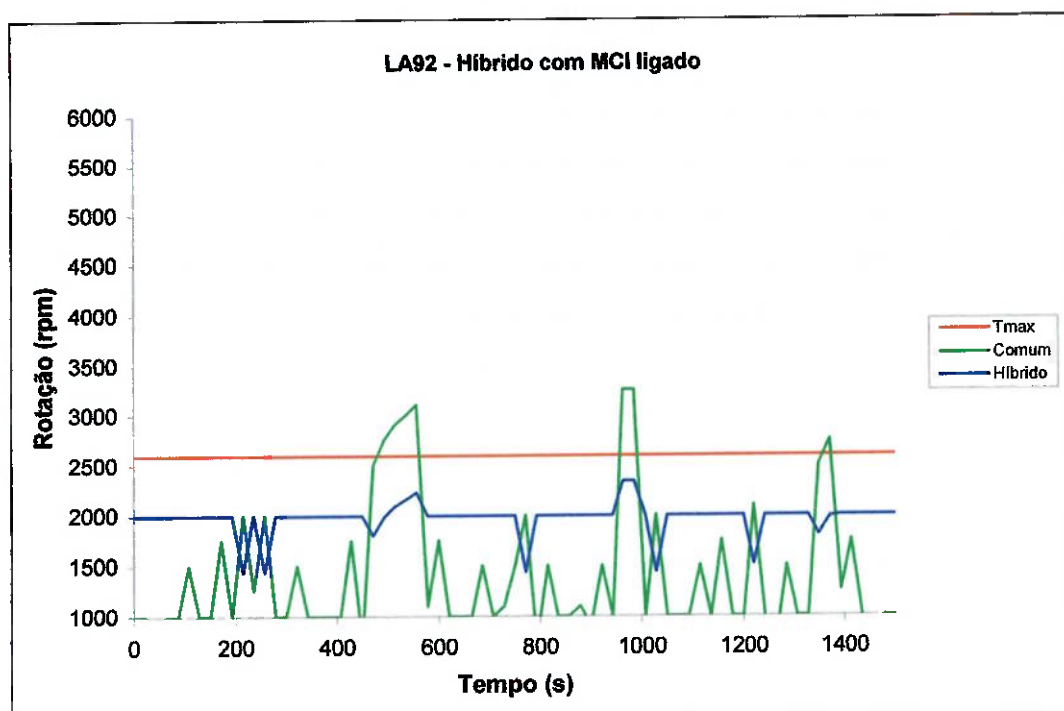


Figura 8.7 - Ciclo LA92 com configuração híbrida e MCI ligado

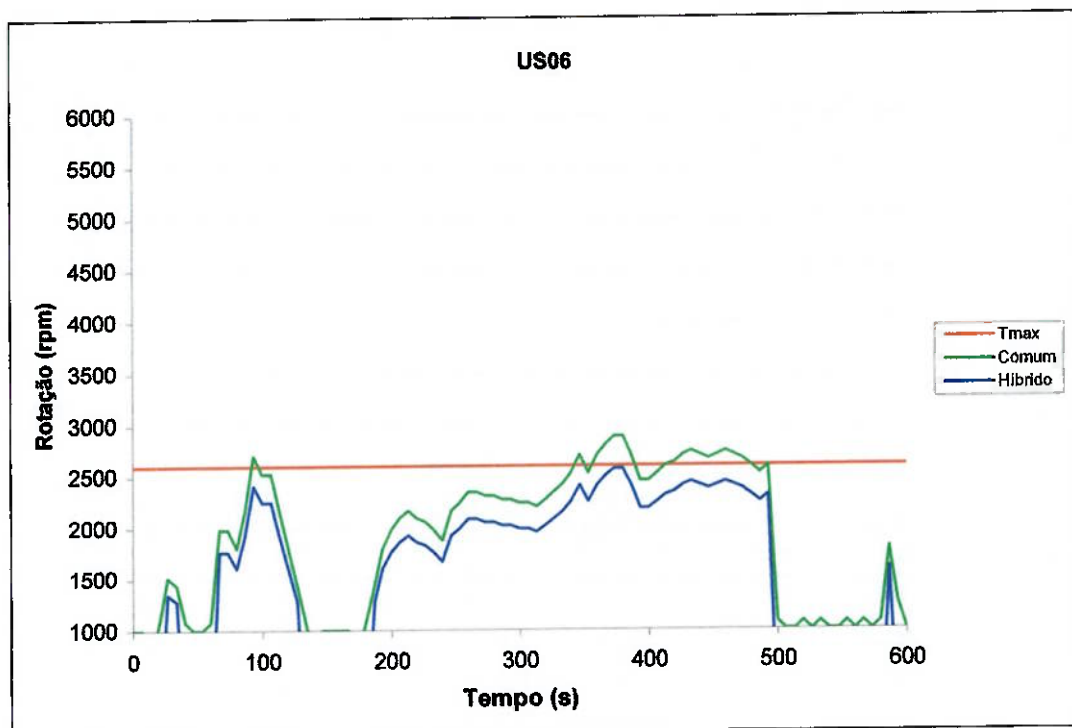


Figura 8.8 - Ciclo US06 com configuração híbrida

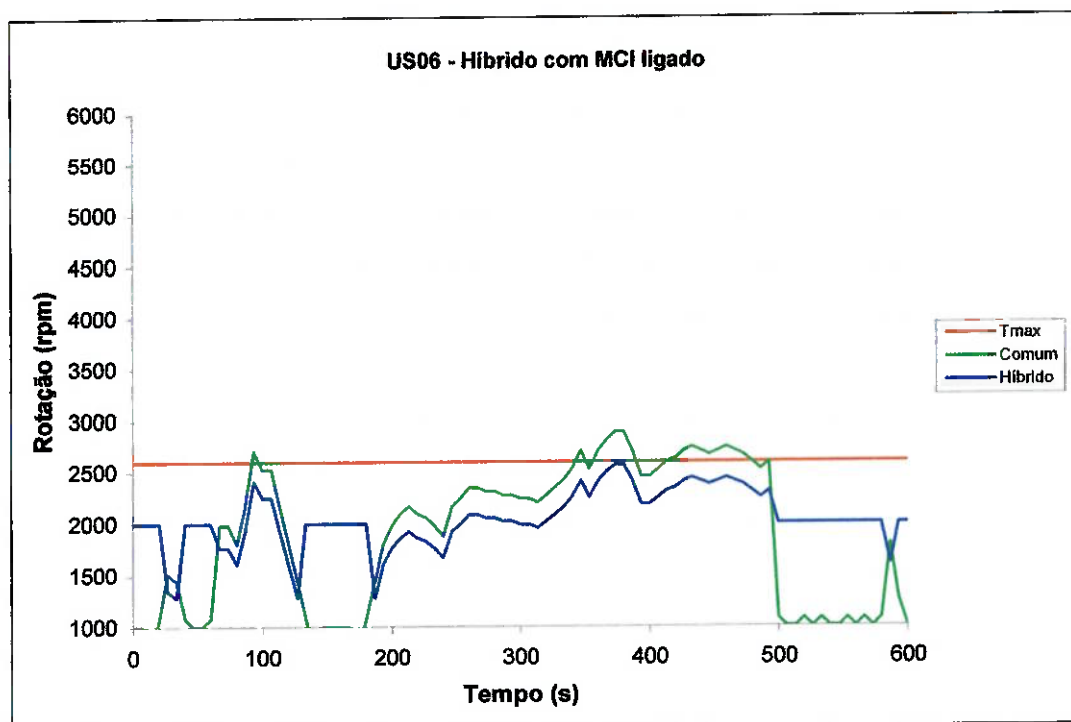


Figura 8.9 - Ciclo US06 com configuração híbrida e MCI ligado

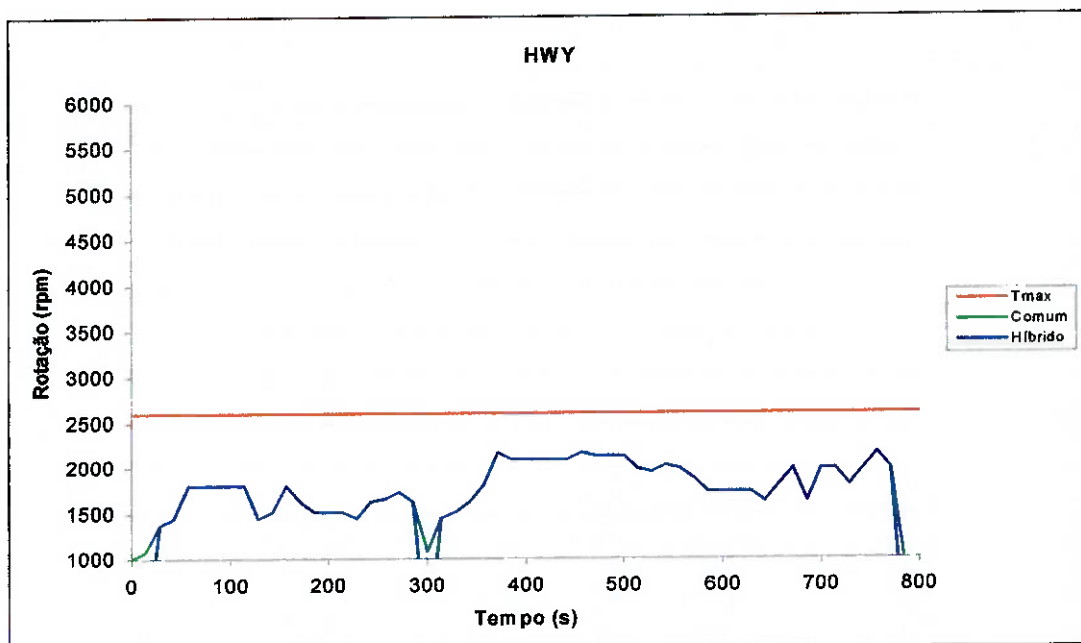


Figura 8.10 - Ciclo HWY com configuração híbrida

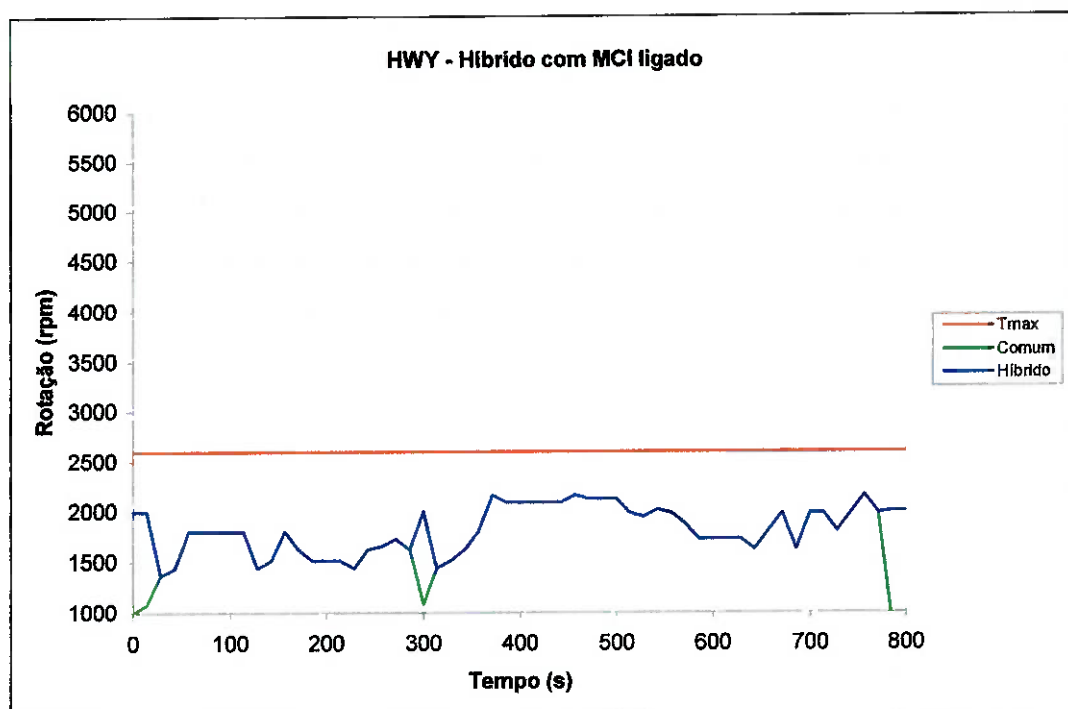


Figura 8.11 - Ciclo HWY com configuração híbrida e MCI ligado

Dos gráficos acima, nota-se a clara diminuição do tempo em que o veículo permanece com o motor ligado para propulsão, principalmente nos trechos urbanos de tráfego intenso. Isso é muito importante, pois reduz o nível de emissões nos grandes centros e o respectivo consumo de combustível.

Para se determinar o consumo médio de combustível, foi seguido o mesmo procedimento adotado na situação convencional, à exceção de que a potência média teve de ser levantada após avaliar cada ponto da curva, tanto na situação ideal para os híbridos (MCI desligado abaixo de 60 km/h) quanto na situação hipotética em que o MCI deve ficar ligado sempre para recarregar as baterias. Os valores de potência média do MCI híbrido utilizada para propulsão nos ciclos podem ser vistos nas tabelas 8.1 e 8.2 e o comparativo de consumo entre o veículo convencional e o híbrido nas figuras 8.12 e 8.13.

Tabela 8.1 – Potência do MCI híbrido utilizada para propulsão nos ciclos (MCI desligado abaixo de 60 km/h)

	Rolamento (N)	Aerodinâmica (N)	Velocidade média (km/h)	Pot prop. (kW)	Consumo (kg/h)
NYCC	235,4	4,8	11,4	0,0	0,00
JAPÃO	235,4	10,7	23,8	0,7	0,65
LA4	235,4	23,2	31,4	0,1	0,07
LA92	235,4	31,6	39,7	2,0	1,33
US06	235,4	160,7	77,2	9,3	2,77
HWY	235,4	158,4	77,6	8,6	2,57

Tabela 8.2 – Potência do MCI híbrido utilizada para propulsão nos ciclos (MCI ligado abaixo de 60 km/h para recarregar baterias)

	Rolamento (N)	Aerodinâmica (N)	Velocidade média (km/h)	Pot prop. (kW)	Consumo (kg/h)
NYCC	235,4	4,8	11,4	1,96	0,59
JAPÃO	235,4	10,7	23,8	2,39	0,71
LA4	235,4	23,2	31,4	2,62	0,78
LA92	235,4	31,6	39,7	3,61	1,08
US06	235,4	160,7	77,2	9,94	2,97
HWY	235,4	158,4	77,6	8,82	2,64

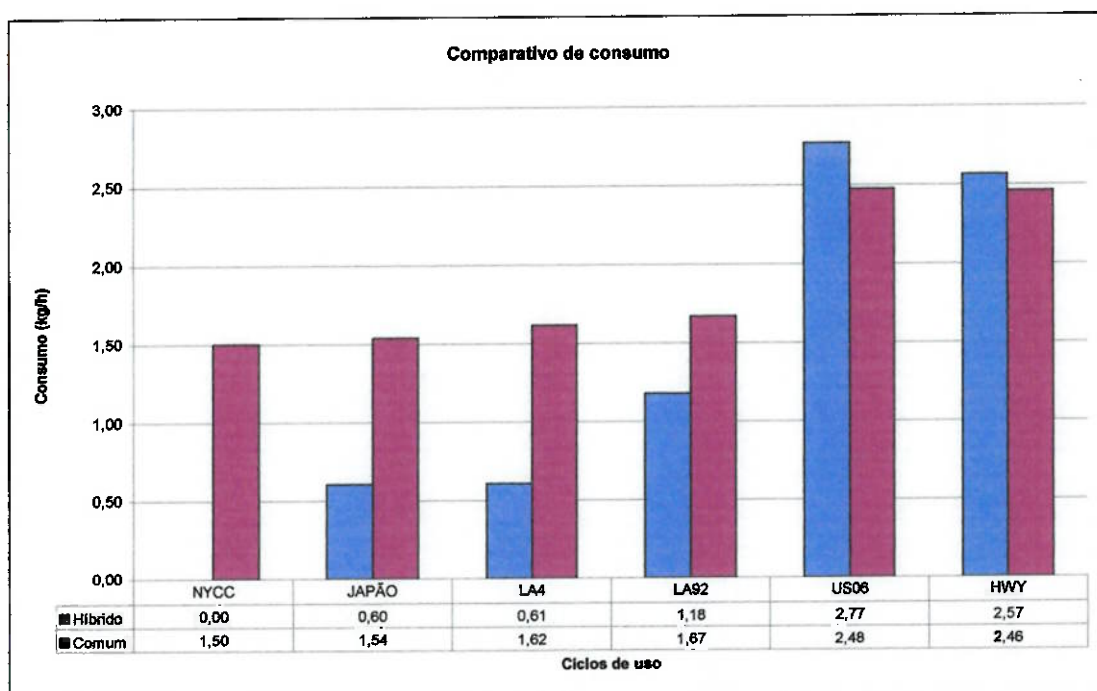


Figura 8.12 – Comparativo de consumo do Astra 2.0 atual com o "Astra Híbrido 1.4" (MCI desligado abaixo de 60 km/h)

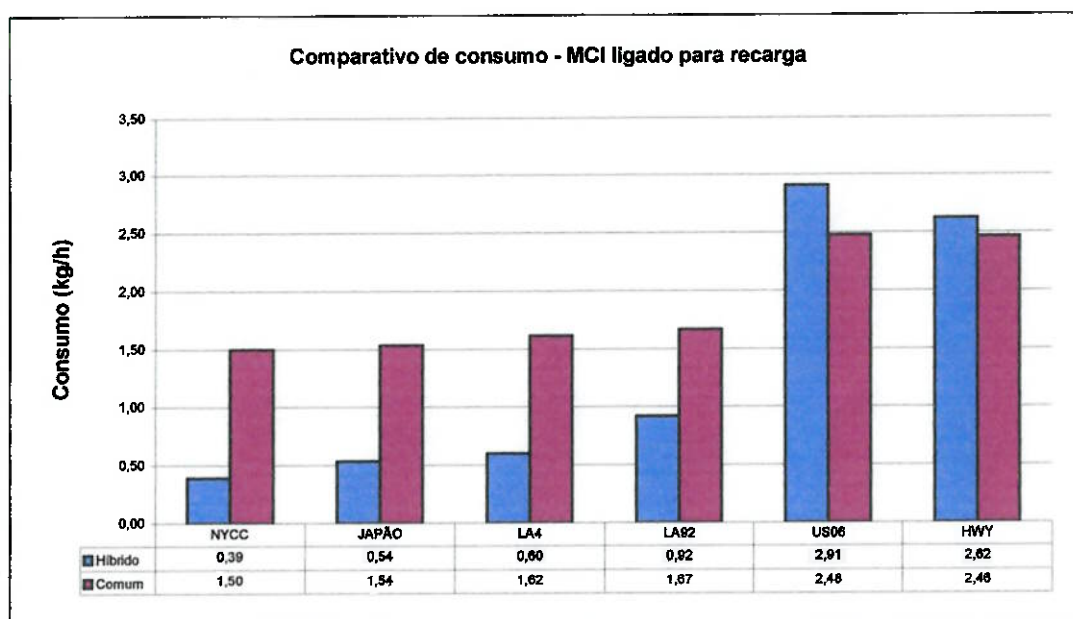


Figura 8.13 – Comparativo de consumo do Astra 2.0 atual com o "Astra Híbrido 1.4" (MCI ligado abaixo de 60 km/h para recarregar baterias)

Conforme esperado, nota-se que o consumo de combustível nos ciclos urbanos (NYCC, Japão, LA4 e LA92) é reduzido drasticamente, devido ao funcionamento ótimo do MCI nessas circunstâncias.

Em resumo, de tudo o que foi exposto, pode-se concluir que:

- Um motor de maior cilindrada consome mais combustível que um de menor cilindrada, como evidenciado na prática. Portanto, os veículos maiores são mais apropriados para se tornarem híbridos;
- Com um banco de baterias de aproximadamente 42,7 kg, é possível conduzir o VEH projetado pelos ciclos aqui utilizados pelos tempos indicados na Tabela 8.3

Tabela 8.3 – Tempos de uso das baterias escolhidas nos ciclos

	Pm (kW)	Em (kWh)	ΔT (min)
NYCC	0,76	1,67	154,7
JAP	1,63	3,57	72,3
LA4	2,26	4,95	52,2
LA92	2,95	6,46	40,0

- É possível conduzir o VEH com um MCI bem menor do que os atualmente utilizados em veículos deste porte (aproximadamente 30% menores), principalmente porque a tarefa de impulsionar o veículo a partir do repouso é feita pelo ME. Desta forma, o veículo trafega de forma mais limpa em quaisquer condições, o que é a proposta de utilização do VEH;
- Nota-se uma clara redução no consumo de combustível e, conseqüentemente, no nível de emissões do VEH frente ao convencional, devido à baixa utilização do MCI durante os ciclos.

Conforme mencionado anteriormente, o projeto de um veículo elétrico híbrido de passeio no Brasil será alavancado se houver mais incentivos do governo com relação à diminuição de emissões de poluentes na atmosfera pelos automóveis. Como motivo concomitante, é necessário ao Brasil despertar para as tecnologias em amplo desenvolvimento do exterior, pois o crescimento da frota de automóveis é inevitável e, em um futuro de médio prazo, poderá não ser possível abastecer os veículos com o que se tem hoje em termos dos combustíveis conhecidos e gerando menos poluentes.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AN F.; STODOLSKY, F.; SANTINI, D; 1999-01-2929 **Hybrid Options for Light-Duty Vehicles**, SAE Technical Papers Series; Estados Unidos, 1999.
- BEST CARS WEB SITE. **Comparativo completo**. Disponível em <<http://www2.uol.com.br/bestcars/comp2/celta-fiesta-7.htm>> e <<http://www2.uol.com.br/bestcars/comp2/astra-307-5.htm>>
- BRANCO, A.M., BRANCO, F.C, BRANCO, G.M.; **Perspectivas Futuras das Tecnologias e Combustíveis Alternativos para Propulsão de Veículos**, VII Seminário de E/E-AEA- Realizado em 10 de junho de 2005.
- CARSALE **Híbridos são um terrível negócio, diz Ghosn**. Disponível em <<http://carsale.uol.com.br/noticias/ed101not4726.shtml>>. Acesso em 27 de setembro de 2005.
- FENABRAVE – **Modelos mais vendidos em 2005**. Disponível em < http://www.tela.com.br/dados_mercado/maisvendidos/index_cubo.asp?coditem=13 >. Acesso em 18 de novembro de 2005.
- FISITA **Special Auto Technology – Toyota Prius**, Periódico publicado em 2005.
- GENERAL MOTORS DO BRASIL **Manual do proprietário Astra 2.0 Flexpower® 2005**
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, 1992, Ed. SAE
- PORTAL VE. Site de veículos elétricos. **Ford Escape Híbrido a 'Caminhonete Norte-americana do Ano'**. Disponível em <<http://www.portalve.com.br>>. Acesso em 27 de abril de 2005.

- **SAE BRASIL Engenharia Automotiva e Aeroespacial Ano 5 nº 21**
‘Eficiência dá prêmio a Toyota Prius’ Periódico publicado em 2005.
- **WINNISCHOFER, G. Modelamento de veículo elétrico-híbrido para transporte coletivo, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.**