

CLAYTON VINICIUS FERRAZ

Sistemas Controlados de Propulsão de

Veículos Automotores

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2004

CONSULTA
FD-3733

CLAYTON VINICIUS FERRAZ

Sistemas Controlados de Propulsão de

Veículos Automotores

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:

Professor Doutor
Decio Crisol Donha

São Paulo
2004

Dedico este trabalho e todas as horas necessárias à sua
conclusão à minha amada filha, *Gabriela Accioly Ferraz*,
e à minha dedicada e não menos amada esposa,
Lucia Helena Rodrigues Accioly Ferraz, cuja paciência
e incentivo me permitiram concluir este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de envolver-me neste projeto, que exigiu muitas horas de renúncia e esforço pessoal, onde apenas vontade, muitas vezes, não bastava.

Ao meu incentivador e paciente orientador, Prof. Dr. Decio Donha, pela confiança depositada neste trabalho e na crença em sua conclusão, mesmo depois de longo tempo. Agradeço-o ainda pelo desafio proposto de abranger a grande diversidade deste tema, e por todas as oportunidades de argumentação, as quais, significativamente, direcionaram e serviram de base a este trabalho.

As minhas amadas esposa e filha, Lucia e Gabriela, pelo conforto nas muitas horas em que estive envolvido neste trabalho. Sua companhia e apoio foram fundamentais na conclusão deste.

A meus pais, Benedito e Nicéia, cujo apoio e educação, permitiram-me traçar um plano de crescimento e aprendizado.

A toda minha família pelo incentivo, paciência e, algumas vezes, interesse por tema tão técnico e fora da nossa realidade diária. A Alexandre, Sílvia, Roberto, Leslie, Cauê, Leni e Marcio meu agradecimento pela compreensão nos momentos mais difíceis.

Agradecimentos especiais a todos os amigos e colegas, em casa e no trabalho, cujas informações e observações foram essenciais no desenvolvimento e compreensão de alguns tópicos abordados neste trabalho.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em nome de todos os funcionários, professores e alunos, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Finalmente, à General Motors do Brasil, através de seus funcionários e diretores, que me disponibilizou tempo e informações preciosas para a execução deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho versa sobre os sistemas controlados de propulsão veicular, classificando-os em propulsão convencional, híbrida ou alternativa. Isto facilita o agrupamento em características técnicas e construtivas. O texto descreve os sistemas mais atuais, suas aplicações e estágios de desenvolvimento. Para tanto, o texto relaciona as tecnologias de motores de combustão interna, transmissões, sistemas elétricos e combustíveis empregados. O trabalho prossegue discutindo e analisando um plano para o futuro dos sistemas de propulsão veicular, cuja conclusão é a solução final para os sistemas de propulsão veicular. Esta solução é a células de combustível, que ainda não tem prazo definido para predominar no mercado. Como solução alternativa e intermediária, o texto apresenta os veículos híbridos, definindo o restante do escopo deste trabalho. A seção de desenvolvimento da proposta, analisa os veículos híbridos em detalhes, quanto à classificação, sub-sistemas e funcionalidades. O texto contempla, ainda, um estudo de caso, com a definição da solução ótima para um veículo híbrido, sob aspectos econômicos, ambientais e técnicos. Neste estudo de caso, os resultados da simulação do modelo matemático no software ADVISOR 2002 corroboram a viabilidade física do modelo proposto. O texto finaliza com a revisão dos resultados obtidos, que atendem os requisitos apresentados em muitos aspectos, e propõe alternativas de continuidade para o trabalho.

ABSTRACT

This dissertation presents automotive powertrain controlled systems, classifying those as traditional, hybrid or alternative propulsion systems. This facilitates their grouping in technical and construction characteristics. The text describes all current systems, their applications and development stage. For that, the text lists applied internal combustion engines, transmissions, electrical systems and fuel technologies. The document continues discussing and analyzing a plan for the future of automotive propulsion systems, whose conclusion is the final solution for vehicles propulsion. This solution is the fuel cell, which has no timeframe for market prevalence defined yet. As intermediate and alternative solution, it presents hybrid vehicles, which defines the remaining scope of this work. The assessment section for the proposal, analyzes hybrid vehicles in details as to classification, sub-systems and functionality. Furthermore, the text contains a study case with definition of optimal solution for a hybrid vehicle under economical, environmental and technical aspects. On that study case, results validate the physical viability of the proposed model, using software ADVISOR 2002 to simulate the mathematical model. The text finishes with the revision of the accomplished results, which attain the requisites in many aspects, and proposes alternatives to continue the work.

ERRATA

ABSTRACT

This document intends to cover all existing controlled powertrain systems. In order to facilitate the comprehension, a classification of those systems is proposed, dividing all systems in traditional, alternative or hybrid propulsion systems. It was done based on their technical and constructive characteristics. Based on that, the document describes all existing systems, their applications and current development stage, focusing on internal combustion engines, transmissions, electrical systems and fuel technology. Following, it discusses and analyze strategies and future directions for automotive propulsion systems. It concludes that fuel cell is the future direction for vehicle propulsion, however, no timeframe is defined yet for when it will prevail in the market. As intermediate and alternative solution, hybrid vehicles are presented and studied to evaluate their potential. The assessment section of this document proposes and analyzes a hybrid vehicle model, concluding with a study case of that model to validate it against real vehicle data. Physical viability of the model is validated using ADVISOR 2002, used to mathematically simulate the model. The conclusion presents the accomplished results, which attain the requisites imposed in many aspects, proposing alternatives ways to continue this work.

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
Resumo	8	solução é a células de	solução é a célula de
Resumo	11	proposta, analisa	proposta analisa
3	22	também mais alta	também é mais alta
4	15	distinto é caracterizado	distinto, é caracterizado
5	1	inovação tecnologia	inovação tecnológica
9	25	de320	de 320
11	13	até aos cilindros	até os cilindros
14	16	(329hp [61].	(329hp) [61].
15	23	abastecer o veículo	abastecer-se o veículo
17	9	permanência aberta	permanência da válvula aberta
21	15	hidráulico anterior	hidráulico de geração anterior
23	1 (tabela)	NOX	NOx
25	5 (tabela)	e 657N.m	e torque de saída de 657N.m
25	6 (tabela)	a um menor	a um maior
27	1	modelo japonês	modelo híbrido japonês
30	22	injeções separadas	injeções distintas
38	6 (tabela)	MP	material particulado
41	14	marchas e, o sistema	marchas. O sistema
44	4	curtos	menores
45	11	Utilizando	Utiliza
47	1 (tabela)	epicíclicas variador	epicíclicas, variador
47	8 (tabela)	CVT com de	CVT de
47	9 (tabela)	CVT com de	CVT de
47	11 (tabela)	pneumática de mudança de	pneumática de

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LE	LEIA-SE
48	10	utilizado	utilizados
50	15	híbridos.	híbridos.
51	18	que requerem sistemas	que requer sistemas
52	7	requerem maior	requer maior
58	23	durante a qual	durante o qual
58	30	alimenta a bateria	carrega a bateria
59	29	tecnologias alternativas	tecnologia alternativa
60	16	motorista para o	motorista para o
61	2 (tabela)	a cara do motor	a carga do motor
61	5 (tabela)	quádruplo e motor	quádruplo, e motor
61	5 (tabela)	cada uma das rodas	as rodas
61	7 (tabela)	avançado tração 4x4. MCI de 4 cilindro	avançado de tração 4x4. MCI de 4 cilindros
67	8	apenas em localidades	em localidades
67	20	processo de endotérmico	processo endotérmico
68	5	AC	CA
68	figura	ÁREA TRASEIRA DE IMPACTO	ÁREA DIANTEIRA DE IMPACTO
68	figura	ÁREA TRASEIRA DE IMPACTO	ÁREA DIANTEIRA DE IMPACTO
69	8	é montado	e é montado
70	1, 15	AC	CA
71	3, 5, 7 (tabela)	AC	CA
73	13	seja apenas suspeito	seria apenas suspeito
79	19	há perdas de eficiências nos	há perdas nos
81	16	torque antes de transmiti-los	torques antes de transmitir o resultante
84	22	baterias de com maior	baterias com maior
87	18	Conseqüentemente,	Contudo,
89	11	quanto na forma de calor nas	ou mesmos nas
93	27	possuem pelo menos	possuam, pelo menos,
93	28	há falta	havia falta
95	28	critérios.O	critérios. O
98	19	conectado ao mesmo eixo	montado no eixo
100	10 (tabela)	de no mínimo dois	de, no mínimo, dois
100	13	motor de a gasolina	motor a gasolina
102	2	velocidades, e em	velocidades e em
103	16	2002, que permite	2002, um software gratuito até esta versão, a ser utilizado em conjunto com o software MathLab 6 Release 13, que permite

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LE	LEIA-SE
107	8	Modelo matemático	Diagrama de blocos
108	3	Modelo matemático	Diagrama de blocos
111	1	Lógica do modelo	Diagrama de blocos do modelo
111	7	Modelo proposto	Diagrama de blocos proposto
112	1	vez que variação	vez que a variação
113	5	Módulo original	Diagrama de blocos do módulo original
113	12	Módulo original	Diagrama de blocos do módulo original

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1.	Classificação dos Sistemas de Propulsão	3
2.1.1.	Propulsão Convencional	3
2.1.2.	Propulsão Híbrida	6
2.1.3.	Propulsão Alternativa	7
2.2.	Novas Tecnologias para Sistemas de Propulsão Convencional	8
2.2.1.	Combustíveis	8
2.2.2.	Sistemas de Comandos de Válvulas e Fluxo de Ar	17
2.2.3.	Sistemas de Injeção e Queima de Combustível	30
2.2.4.	Transmissões	38
2.3.	Veículos com Propulsão Híbrida	48
2.3.1.	Alternadores, Geradores e Motores de Partida	48
2.3.2.	Motor Elétrico Integrado à Roda	50
2.3.3.	Tecnologia de Armazenamento de Energia	50
2.3.4.	Veículos de Passeio Híbridos	54
2.3.5.	Veículos Comerciais Híbridos	62
2.4.	Veículos com Propulsão Puramente Elétrica	65
2.4.1.	Veículos Elétricos	65

2.4.2. Veículos com Célula de Combustível	66
3. DISCUSSÃO	72
4. DESENVOLVIMENTO	79
4.1. Tipos de Hibridização	79
4.1.1. Classificação Tradicional	79
4.1.2. Classificação por Missão	81
4.2. Sistemas e Funcionalidades	85
4.2.1. Motores Elétricos	85
4.2.2. Inversores e Controle de Potência	86
4.2.3. Sistemas de Armazenamento de Energia	88
4.2.4. Freagem Regenerativa	89
4.2.5. Sistema de Transmissão	90
4.2.6. Motor de Combustão Interna	90
5. ESTUDO DE CASO	92
5.1. Projeto do Sistema de Propulsão	92
5.1.1. Aspectos Econômicos e Ambientais	92
5.1.2. Modelo Proposto	97
5.1.3. Simulações e Resultados	103
6. CONCLUSÃO	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor W12 da Audi.....	5
Figura 2 – Sistema de Comando de Válvulas VLC da Siemens Automotive.....	18
Figura 3 – Sistema Valvetronic da BMW.....	19
Figura 4 – Sistema i-VTEC da Honda no Acura RSX.....	20
Figura 5 – Sistema de Acionamento de Válvulas VarioCam Plus da Porsche.....	21
Figura 6 – Sistema de Admissão Rotativo da BMW.....	24
Figura 7 – Sistemas de VVA (Atuação Variável de Válvula) da Eaton.....	26
Figura 8 – Turbocompressor de Geometria Variável da Garret Engine Boosting System.....	28
Figura 9 – Bico Injetor e Sistema de Segunda Geração de Conduto Comum da Bosch.....	35
Figura 10 – Transmissão automática de 6 velocidades ZF 6HP26.....	39
Figura 11 – Transmissão automática 7 velocidades 7G-Tronic da Mercedes-Benz.....	40
Figura 12 – CVT tipo Correia e Polia.....	44
Figura 13 – Elementos de Transmissão de CVT Toroidal Semi-estérca.....	46
Figura 14 – Esquema da IVT da Torotrak.....	46
Figura 15 – Sistema IMA de Propulsão Híbrida da Honda.....	55
Figura 16 – Sistema Híbrido da Toyota – Hybrid Synergy Drive.....	57
Figura 17 – Prancha do AUTOnomy da GM.....	68
Figura 18 – Focus FCV da Ford com tecnologia Think.....	70
Figura 19 – Esquema de Configuração de Sistema de Propulsão Híbrida em Série.....	79
Figura 20 – Esquema de Configuração de Sistema de Propulsão Híbrida Paralela.....	80
Figura 21 – Técnicas de propulsão híbridas paralelas.....	81
Figura 22 – Sistema de Propulsão Híbrida Moderada.....	83
Figura 23 – Configuração de Híbridização Proposta.....	99
Figura 24 – Diagrama Conceitual do Sistema de Controle do Veículo Híbrido Proposto.....	102
Figura 25 – Tela de Seleção de Modelos de Veículo e Dados no ADVISOR 2002.....	103

104	Figura 26 – Modelo matemático do Veículo Toyota Prius 2000 no ADVISOR 2002.
105	Figura 27 – Indicação de divergência de resultados obtidos na simulação do ADVISOR 3.1.
106	Figura 28 – Resultados da simulação do modelo matemático após revisões iniciais.
107	Figura 29 – Modelo matemático do módulo de controle de partida do MCI.
108	Figura 30 – Modelo matemático do módulo de controle de injeção do motor de combustão.
109	Figura 31 – Modelo de ciclo de tráfego NEDC.
110	Figura 32 – Resultados de simulação, alterados limite de velocidade e frenagem regenerativa.
111	Figura 33 – Lógica do modelo original para controle dos pontos de operação do motor.
111	Figura 34 – Modelo proposto para controle dos pontos de operação do motor.
112	Figura 35 – Resultados de Simulação com alteração do modelo de carga máxima.
113	Figura 36 – Módulo original de controle da velocidade de operação do motor de combustão.
113	Figura 37 – Módulo proposto de controle da velocidade de operação do motor de combustão.
114	Figura 38 – Resultados de simulação com alteração do modelo de carga máxima.
115	Figura 39 – Tela de dados do Vectra com configuração Toyota Hybrid System.
116	Figura 40 – Seleção do Procedimento de teste FTP para simulação do modelo.
116	Figura 41 – Resultados das simulação do Vectra híbrido com MCI 1.500cm ³ .
117	Figura 42 – Gráfico dos resultados da variação da relação da diferencial.
119	Figura 43 – Resultado de simulação do modelo Vectra híbrido final.

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Propriedades Físico-Químicas de Combustíveis Automotores [158].....	12
Tabela II – Resumo dos Tipos de Combustíveis apresentados.....	16
Tabela III – Resumo dos Sistemas de Controle e Acionamento de Válvulas.....	23
Tabela IV – Resumo dos Sistemas de Coletor de Admissão Variável.....	25
Tabela V – Resumo dos Sistemas de Desativação de Cilindros de Motores a Combustão Interna.....	27
Tabela VI – Resumo dos Sistemas de Compressão do Ar Admitido em Motores de Combustão.....	29
Tabela VII – Resumo dos Sistemas de Ignição por Centelhas Múltiplas em Motores Ciclo Otto.....	30
Tabela VIII – Resumo dos Sistemas de Injeção Direta de Combustível em Motores Ciclo Otto.....	34
Tabela IX – Resumo dos Sistemas de Injeção de Diesel.....	38
Tabela X – Resumo dos Sistemas de Transmissão.....	47
Tabela XI – Resumo dos Sistemas de Veículos Híbridos.....	54
Tabela XII – Resumo dos Veículos Híbridos de Passageiros.....	61
Tabela XIII – Resumo Veículos Híbridos Comerciais.....	64
Tabela XIV – Resumo de Veículos Elétricos.....	66
Tabela XV – Resumo de Veículos com Célula de Combustível.....	71
Tabela XVI – Custos Adicionais dos diferentes sistemas de propulsão híbridos [128].....	82
Tabela XVII – Limites máximos de emissão para veículos leves novos, segundo o Proconve [157].....	96
Tabela XVIII – Comparação de Funcionalidades e Efeitos dos Sistemas Híbridos [151] e [153].....	98
Tabela XIX – Comparação entre as configurações Proposta e do Toyota Prius.....	100
Tabela XX – Resultados de simulações dos modelos matemáticos.....	108
Tabela XXI – Resultados de simulações do modelo para várias relações de diferenciais.....	117
Tabela XXII – Resultados de simulações de diferentes motores no modelo do Vectra.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C	- Ar/Combustível.
AMT	- <i>Automated Manual Transmission</i> – transmissão manual automatizada.
AFPM	- <i>Axial-Field Permanent Magnet</i> – (máquinas de) ímãs permanentes de campo axial.
APU	- <i>Auxiliary Power Unit</i> – unidade de potência auxiliar.
AVT	- <i>Active Valve Train</i> – Trem de Válvulas Ativo.
BMW	- <i>Bayrische Motoren Werke</i> – Fábrica de Motores da Baviera (montadora alemã).
CA	- corrente alternada.
CAR	- <i>Cooperative Automotive Research</i> – Pesquisa Automotiva Cooperativa.
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo.
CHF	- <i>Clean Hydrocarbon Fuel</i> – combustível de hidrocarbonetos limpo.
CNG	- <i>Compressed Natural Gas</i> – gás natural comprimido.
CO	- Monóxido de Carbono.
CO ₂	- Dióxido de Carbono.
COH	- Aldeídos.
CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente.
CO _x	- Óxidos de Carbono.
CVT	- <i>Continuous Variable Transmission</i> – transmissão continuamente variável.
DCT	- <i>Dual-Clutch Transmission</i> – transmissão de embreagens duplas.
DI	- injeção direta (de combustível).

DISI	- <i>Direct-Injection, Spark-Ignition</i> – injeção direta, ignição por centelha.
DOHC	- <i>Double Over Head Camshaft</i> – comando duplo de válvulas no cabeçote.
DPF	- <i>Diesel Particulate Filter</i> – filtro de material particulado de motores Diesel.
ECM	- módulo central eletrônico do motor.
ECU	- <i>Electronic Control Unit</i> – unidade de controle eletrônico.
EGR	- <i>Exhaust Gas Recirculation</i> – efeito de recirculação interna de gases de exaustão.
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i> – Agência de Proteção Ambiental Americana
EST	- <i>Electronic Shift Transmission</i> – transmissão de mudanças eletrônicas.
EUA	- Estados Unidos da América.
EVCU	- <i>Electronic Valve Control Unit</i> – unidade de controle eletrônico de válvula.
e-VTC	- <i>Electric Valve Timing Control</i> – Controle Elétrico de Sincronização de Válvulas.
EMS	- <i>Engine Management System</i> – Sistema de Gerenciamento do Motor.
FCHV	- <i>Fuel Cell Hybrid Vehicle</i> – veículo híbrido de célula de combustível.
FCV	- <i>Fuel Cell Vehicle</i> – veículo de célula de combustível.
GDI	- <i>Gasoline Direct Injection</i> – injeção direta de gasolina.
GM	- <i>General Motors Corporation</i> (montadora americana).
GNV	- gás natural veicular (mesmo que CNG).
H ₂	- Gás Hidrogênio.
HC	- Hidrocarbonetos.

HCCI	- <i>Homogeneous-Charge Compression-Ignition</i> – compressão-ignição de carga homogênea.
!DSI	- <i>intelligent Dual Spark Ignition</i> – ignição inteligente de centelha dupla.
IMA	- <i>Integrated Motor Assist</i> – Assistência de Motor Elétrico Integrado.
!-MoGen	- <i>Intelligent Motor Generator</i> – Moto-Gerador Inteligente.
IMV	- <i>Intake Measurement Valve</i> – válvulas de medição de admissão.
ISG	- <i>Integrated Starter Generator</i> – gerador/motor-de-partida integrado.
!VT	- <i>Infinite Variable Transmission</i> – transmissão infinitamente variável.
!-VTEC	- <i>intelligent Valve Timing Electronic Control</i> – controle eletrônico inteligente de sincronização de válvulas.
LEV	- <i>Low Emission Vehicle</i> – Veículo de Baixas Emissões.
MCI	- motor a combustão interna.
NaBH_4	- Hidreto Bórico de Sódio.
!NiMH	- <i>Nickel Metal Hydride</i> – Hidretos Metálicos de Níquel.
NO_x	- Óxidos de Nitrogênio.
!OCP	- <i>Orbital Combustion Process</i> – Processo de Combustão da Orbital.
!OHC	- <i>Over Head Camshaft</i> – Comando de Válvulas no Cabecote.
!PEM	- <i>Proton Exchange Membrane</i> – membrana de troca de prótons.
!PM	- <i>Permanent Magnets</i> – ímãs permanentes.
!PNGV	- <i>Partnership for New Generation Vehicle</i> – Parceria para Nova Geração de Veículos.
!PROCONEV	- Programa de Controle de Poluição por Veículos Automotores.
!PZEV	- <i>Partial Zero Emission Vehicle</i> – Veículo de Emissão Parcialmente Nula.
!SOHC	- <i>Single Overhead Camshaft</i> – Comando Simples de Válvulas no Cabecote.

SO _x	- Óxidos de Enxofre.
SULEV	- <i>Super Ultra Low Emissions Vehicle</i> - Veículo de Emissões Super-Ultra Baixas.
SUV	- <i>Sport Utility Vehicle</i> – veículo utilitário-esportivo.
SUP	- <i>Sports Utility Pack</i> – Pacote Utilitário Esportivo.
THEMIS	- <i>Thermal Management Intelligent System</i> – Sistema Inteligente de Gerenciamento Térmico.
THS	- <i>Toyota Hybrid System</i> – Sistema Híbrido Toyota.
THS-C	- <i>Toyota Hybrid System - CVT</i> – Sistema Híbrido Toyota - CVT.
THS-M	- <i>Toyota Hybrid System - Mild</i> – Sistema Híbrido Toyota - Moderado.
UI	- <i>Unit Injectors</i> – injetores unitários.
VANOS	- <i>Variable Nockenwellen Steuerung</i> – Sincronização Variável de Válvula.
VarioCam	- <i>Variable Camshaft</i> – Eixo de Comando Variável de Válvulas.
VE	- veículo elétrico.
VEH	- veículo elétrico-híbrido.
VIM	- <i>Variable Intake Manifold</i> – Coletor de Admissão Variável.
VLC	- <i>Variable Valve Lift Control</i> – Controle de Abertura Variável de Válvula.
VNT	- <i>Variable Nozzle Turbine</i> – Turbina de Bocal Variável.
VTFC	- <i>Valve Timing Electronic Control</i> – Controle Eletrônico de Sincronização de Válvulas.
VTES	- <i>Visteon Torque Enhancement System</i> – Sistema de Melhoria de Torque Visteon.
VTC	- <i>Variable Timing Control</i> – Controle de Sincronização de Válvulas.
VTG	- <i>Variable Turbine Geometry</i> – Turbina de Geometria Variável.
VVA	- <i>Variable-Valve-Actuation</i> – Atuação Variável na Válvula.
VW	- Volkswagen (montadora alemã).

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo apresentar e descrever os sistemas vigentes de propulsão de veículos automotores. Eventualmente, detalham-se os controles associados a estes sistemas.

Inicialmente, pretende-se apresentar os sistemas de propulsão mais usuais para veículos automotores, compreendendo o motor e a transmissão. Na sequência, seleciona-se o sistema mais adequado para atender as exigências de adaptabilidade e aceitação comercial, baseado na necessidade percebida de médio prazo (10-30 anos) do mercado. Finalmente, as soluções construídas do sistema e os resultados de simulações são discutidos sob aspectos técnicos e teóricos. Em casos específicos, tratar-se-ão dos sistemas de armazenamento de energia.

A abrangência será restrita a veículos automotores de passeio ou comerciais leves (até 10 passageiros), conhecidos como carros e camionetes, evitando os veículos comerciais como ônibus ou caminhões, já que as tecnologias empregadas, os volumes de produção, o mercado e outras particularidades são muito diversos entre eles.

Serão incluídas tecnologias em uso cujos principais desenvolvimentos tecnológicos ocorreram no passado, tecnologia em uso com desenvolvimentos tecnológicos recentes e, finalmente, tecnologias ainda em desenvolvimento que serão empregadas futuramente.

No capítulo 2, é realizada uma revisão da literatura, listando e descrevendo os sistemas de propulsão veiculares. A princípio, abordam-se novas tecnologias de sistemas de propulsão convencional e seus benefícios, analisando-se combustíveis alternativos, sistemas de comando de válvulas, sistemas de controle de fluxo de ar, sistemas de injeção e queima de combustíveis e transmissões aplicáveis aos sistemas convencionais. A seguir, discutem-se e analisam-se as soluções híbridas, analisando-se os componentes eletro-eletrônicos, os sistemas de armazenamento de energia, as arquiteturas e as soluções de implementação de veículos híbridos. O capítulo é encerrado com os vários tipos de veículos elétricos, incluindo aqueles movidos a células de combustíveis, com suas configurações e arquiteturas.

No capítulo 3, discutem-se planos e estratégias globais para a solução dos problemas de consumo de combustíveis e emissões de poluentes dos veículos de passageiros. O texto conclui que a solução final dos sistemas de propulsão veiculares será a célula de combustível a hidrogênio, ainda sem prazo definido para prevalecer no mercado. Como solução alternativa e intermediária, o texto apresenta os veículos híbridos, definido o restante do escopo deste trabalho.

No capítulo 4, os veículos híbridos são analisados e detalhados quanto à sua classificação e arquitetura, seus sistemas e suas funcionalidades.

No capítulo 5, é realizado um estudo de caso, definindo a melhor solução para um veículo híbrido sob aspectos econômicos, ambientais e técnicos. Neste estudo de caso, os resultados da simulação do modelo matemático no software ADVISOR 2002 validam a viabilidade física do modelo proposto. O capítulo é finalizado com a revisão dos resultados obtidos, que atendem os requisitos apresentados em muitos aspectos.

No capítulo 6, são revisados os resultados obtidos, descritas as contribuições originais e também propostas alternativas de continuidade do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Classificação dos Sistemas de Propulsão

Para facilidade de discussão, optou-se por dividir os sistemas de propulsão em três categorias: Convencional, Alternativo e Híbrido. Esta classificação não pretende ser definitiva ou absoluta, mas apenas facilitar o agrupamento dos sistemas para permitir uma compreensão lógica dos mesmos.

2.1.1. Propulsão Convencional

A propulsão convencional é composta por um motor de combustão interna (MCI) e um sistema de transmissão para maior eficiência do motor nas velocidades de trabalho.

Os motores de combustão interna são compostos por um ou mais cilindros, denominados câmara de combustão, onde o ar, misturado ao combustível, é comprimido por um pistão. Ao ocorrer a combustão da mistura ar-combustível, esta se expande, realizando trabalho mecânico sobre o pistão. Este pistão, por sua vez, é conectado a um eixo rotativo através da biela e o movimento resultante de rotação do eixo pode ser utilizado para acionar as rodas de um veículo.

O tipo de combustível utilizado define o tipo de ciclo do motor, e consequentemente, se há centelha no processo de combustão. Para motores do ciclo Otto, o combustível utilizado requer queima por centelha, e quando comparados a motores de ciclo Diesel, estes motores caracterizam-se por produzir torque máximo em rotações do motor mais elevadas, o que resulta em potência mais elevada a rotações mais altas. A temperatura de trabalho também mais alta e os gases resultantes das reações do ar com o combustível na câmara de combustão, são exauridos em concentrações maiores (HC, CO_x). Para evitar combustão espontânea do combustível, utilizam-se menores taxas de compressão, resultando, em geral, num processo mais silencioso, com vibrações reduzidas. Outro ponto positivo dos motores a ciclo Otto é a baixa emissão de material particulado, e os combustíveis utilizados são, em geral, gasolina, álcool etílico hidratado (etanol), gás natural, gás natural veicular (GNV) – também conhecido como CNG).

Os motores com ciclo Diesel não utilizam centelha para a queima do combustível. O combustível atinge o ponto de combustão espontânea em altas taxas de compressão, maiores que as dos motores de ciclo Otto, e conseqüentemente, são motores mais ruidosos e com maior vibração. Contudo, isto vem sendo mudado nos últimos anos com as novas tecnologias adotadas para estes tipos de motores, sobretudo na Europa, onde cerca de 33% do mercado de veículos de passeio utiliza o combustível diesel [24]. Em comparação aos motores de ciclo Otto, caracterizam-se por menor emissão de gases como monóxidos e dióxidos de carbono, mas com emissão de material particulado e óxidos de nitrogênio consideravelmente maior. Além disso, apresentam alto torque em rotações mais baixas e menor consumo de combustível. O principal combustível utilizado é o óleo diesel.

Outra característica dos MCI é o número de eventos por ciclo de acionamento do pistão, que determina o número de tempos (*strokes*) do motor. Um motor cuja admissão, expansão e exaustão ocorrem em um mesmo instante, com a compressão ocorrendo em um instante distinto é caracterizado como motor de dois tempos. Por outro lado, um motor em que a admissão, a compressão, a expansão e a exaustão ocorrem em instantes distintos, ou com pequena superposição destes eventos, é definido como um motor quatro tempos. Estas características independem do tipo de combustível e determinam resultados diferentes em emissões e desempenho. O motor de quatro tempos apresenta desempenho inferior em produção de potência, pois a porcentagem de trabalho útil realizada por ciclo é menor que no motor de dois tempos. Em oposição, o motor de quatro tempos apresenta emissões mais reduzidas do que um motor dois tempos, já que o óleo lubrificante não é misturado ao combustível.

Nos sistemas de propulsão convencional, o volume de ar deslocado pelos motores pode variar de 300cm³ a 6.000cm³, dependendo do número e das dimensões de cada cilindro. Em geral, as configurações vão de 1 a 16 cilindros, dispostos em linha, em “V” ou opostos. Os ângulos de alinhamento dos cilindros e sua disposição determinam sua classificação e podem variar de 0° (em linha) a 180° (transversalmente opostos), passando por uma vasta gama de ângulos de alinhamento dos eixos dos cilindros no plano vertical.

Outra característica dos motores de quatro tempos é o uso de válvulas para controle de admissão e exaustão da mistura ar-combustível na câmara de combustão. O número de válvulas por cilindro, pode variar de apenas duas por cilindro (uma de admissão, outra de exaustão) para, em modelos mais avançados, 3 (duas de admissão, uma exaustão), 4 (duas de admissão, duas de exaustão) ou até 5 (duas de admissão, três de exaustão) válvulas. O controle e o acionamento das válvulas pode ser realizado por comandos no bloco do motor ou no cabeçote – parte do motor onde se localizam as válvulas – que podem ter comando único de válvulas no cabeçote (SOHC – *single overhead camshaft*) ou duplo (DOHC – *double overhead camshaft*). Tradicionalmente, as válvulas são acionadas mecanicamente por um eixo de comando com camos, que abrem as válvulas conforme o eixo gira, e são posteriormente fechadas por ação de molas. Este acionamento pode ser direto, com os ressaltos pressionando a base da válvula, ou por meio de braços que, por sua vez, acionam as válvulas. Os eixos são acionados pelo motor através de correntes, correias ou engrenagens, mas, pesquisas recentes trabalham com motores de

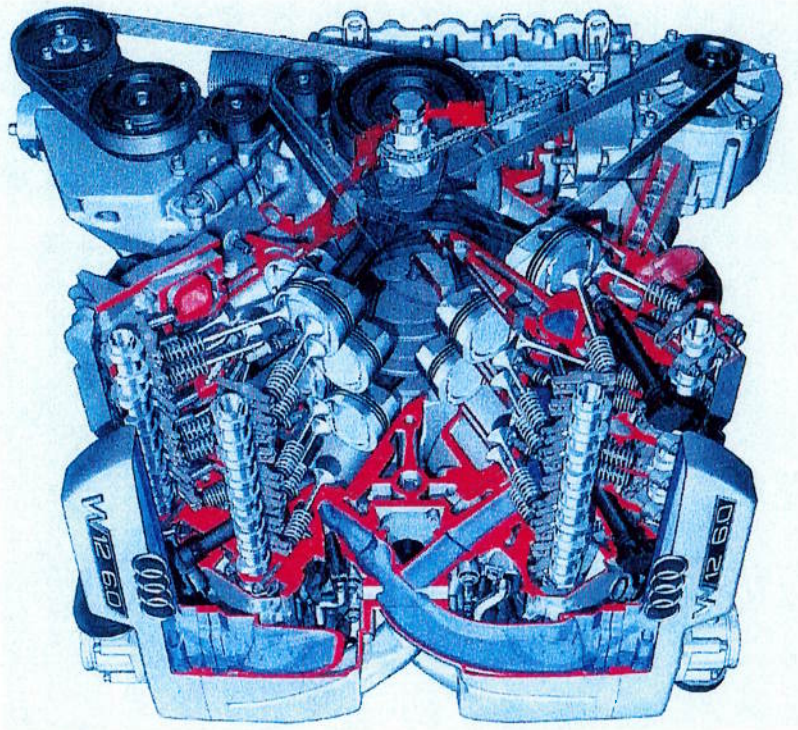


Figura 1 – Motor W12 da Audi.

Como inovação tecnológica, recentemente, apresentou-se a solução de “V” duplo (W), com quatro bancos de cilindros, dois a dois em “V” [20], conforme ilustra a Figura 1.

comando individual das válvulas, que podem ser acionadas eletrônica, pneumática ou hidráulicamente [1].

Quanto à tomada de ar, os motores podem ser naturalmente aspirados (com o êmbolo do pistão sucionando o ar pelo filtro e tomada de ar através da válvula de admissão), turbocomprimidos (com os gases de escape acionando uma turbina, que por sua vez aciona um compressor de ar, aumentando a pressão do ar coletado na admissão do motor) ou mais recentemente, supercomprimidos (com compressores comprimindo o ar coletado na admissão, independentemente da rotação do motor). O resultado, nos últimos dois casos, é o aumento da massa de ar-combustível admitida em cada cilindro e, conseqüentemente, maior pressão da expansão dos gases na câmara de combustão, gerando maior potência líquida no motor.

Tecnologias atuais permitem, ainda, a variação do instante e da abertura das válvulas, o desligamento de cilindros do motor, a variação da taxa de compressão do motor, a injeção de combustível diretamente na câmara de combustão (motores à gasolina), entre outros que serão discutidos em seções posteriores.

Em relação às transmissões dos sistemas de propulsão convencionais, estas podem ser divididas inicialmente em manuais (mecânicas), automatizadas ou semi-automáticas (eletro-mecânicas ou pneumáticas), automáticas (hidráulicas ou eletro-hidráulicas), ou CVTs (*continuous variable transmission* – transmissão variável contínua). O principal atributo da transmissão é fazer com que o motor trabalhe sempre próximo ao ponto de maior eficiência. O sistema pode dispor, ainda, de um sistema de acoplamento/desacoplamento do motor para permitir a troca de marchas da transmissão. Este sistema pode consistir em embreagem, acoplamento hidráulico (conversor de torque), ou acionamento direto (sem sistema de acoplamento) e permite a partida do motor com o veículo parado.

2.1.2. Propulsão Híbrida

Os sistemas de propulsão híbrida são caracterizados pela diversidade de configurações existentes, todavia, sempre apresentam um sistema de conversão de energia, onde o combustível é transformado em energia mecânica ou elétrica, e uma ou mais máquinas elétricas, que auxiliam na tração do veículo. Além disso, dispõem de sistemas de armazenamento de energia elétrica (baterias ou capacitores),

oferecendo vantagens sobre os veículos puramente elétricos ou convencionais. Tais veículos avançados, ou Veículos Elétricos Híbridos (VEH), podem apresentar muitas combinações de armazenamento e conversão de energia, cujo objetivo principal é aumentar a eficiência total do veículo [141].

Inicialmente, os sistemas de propulsão híbrida foram desenvolvidos para atenderem a níveis de exigência de emissões de poluentes cada vez mais rígidos ou de redução de consumo de combustível. Atualmente, disputam a atenção de projetistas e pesquisadores, em pesquisas de motores convencionais, que tendem a ser agregados como componentes de sistemas híbridos, especialmente o motor de combustão interna. A principal desvantagem dos sistemas híbridos é a redução de espaço e da carga útil, quando comparados com sistemas convencionais, devido aos sistemas adicionais necessários.

2.1.3. Propulsão Alternativa

Os sistemas de propulsão alternativa são formados basicamente por motores elétricos, onde a fonte de energia pode variar entre rede convencional de energia elétrica, irradiação solar ou células de combustível.

Os veículos solares nunca ultrapassaram a fase de protótipos para atingir a produção em série. Até hoje, as aplicações de maior relevância são competições internacionais. Na Austrália, há o “*World Solar Challenge*”, competição de veículos solares com percurso total de 3.000km, e nos EUA, há o “*American Solar Challenge*”, com percurso total de 3.680km [108].

Diferentemente do caso anterior, o veículo elétrico de suprimento de energia pela rede convencional chegou à produção com diversos fabricantes. Inventado em 1834, várias companhias produziram veículos elétricos nos EUA, Inglaterra e França durante a última década do século 19. Contudo, devido a limitações associadas às baterias e ao rápido avanço dos veículos com motores de combustão interna, os veículos elétricos quase desapareceram de circulação desde 1930. No início dos anos de 1970, alguns países, compelidos pela crise energética, iniciaram a revitalização do interesse pelos veículos elétricos. Em 1976, os EUA lançaram a Lei Pública 94-413, com o Ato de Demonstração, Desenvolvimento e Pesquisa de Veículos Híbridos e Elétricos. Naquele tempo, a principal questão era se os veículos elétricos poderiam

servir à sociedade moderna, embora o tenham feito muito bem no final do século 19. O desenvolvimento de veículos elétricos nos últimos anos respondeu afirmativamente àquela questão [12].

Após muitos anos de desenvolvimento, as tecnologias de veículos elétricos amadureceram e muitas tecnologias avançadas são empregadas para estender a autonomia e reduzir custos, tais como motores de Indução Magnética, baterias de NiMH e ions de lítio e materiais leves aplicados à carroceria.

Quanto aos veículos com célula de combustível, observou-se um desenvolvimento acelerado nos últimos 10 anos. No geral, estes veículos são protótipos, com diferentes tecnologias de células de combustível e soluções ainda não testadas em larga escala de produção, o que gera muito mais incertezas e variações e impede uma previsão mais consistente de seu futuro. Atualmente, já estão disponíveis alguns modelos de certos fabricantes japoneses para mercados restritos nos EUA e Japão [60], [73].

2.2. Novas Tecnologias para Sistemas de Propulsão Convencional

2.2.1. Combustíveis

As novas tecnologias envolvendo combustíveis enfocam a possibilidade de uso de combustíveis não derivados do petróleo, ou derivados em estado gasoso, utilizados em sistemas mono ou multi-combustível, os denominados sistemas flexíveis.

No Brasil, os motores de ciclo Otto apresentam, comercialmente, duas opções de combustível: os líquidos, representada pela gasolina misturada com o álcool etílico anidro (conhecida como gasool), a gasolina sem álcool (não oficial) e álcool etílico hidratado; e os gasosos, com gás liquefeito de petróleo (GLP) e Gas Natural Veicular (GNV, conhecido internacionalmente como CNG) [112].

O consumo de combustível é inversamente proporcional ao custo por quilômetro rodado, mas ainda assim, sob aspectos econômicos e ambientais, o álcool e o GNV são mais vantajosos que a gasolina. O álcool apresenta redução de custo de cerca de 19% e o GNV cerca de 55% em relação ao quilômetro rodado com gasolina. Recentemente, tem ganhado espaço no mercado o chamado veículo de abastecimento flexível (FFV – *flexible fueled vehicle*), que possui tanque de combustível, sistema de

abastecimento e motor únicos. A tecnologia foi criada nos EUA pela *Ford Motor Company* na metade da década de 1980 que, basicamente, projetou um veículo que pode consumir gasolina sem chumbo e álcool combustível (usualmente etanol) em qualquer mistura. O motor e o sistema de abastecimento do veículo de abastecimento flexível deve ser minimamente adaptado para consumir álcool combustível, pois este é corrosivo. Também, deve haver um sensor especial na linha de combustível para analisar a mistura do combustível e controlar sua injeção e sincronização para se ajustar a diferentes composições de combustível [159].

A tendência tecnológica para a próxima geração de motores é a de multi-combustível com sistemas gasosos e líquidos. Já existem pesquisas para o uso de alimentações múltiplos para gás/álcool distintas do sistema de GNV, com a unidade de controle do sistema de injeção unificada. Há ainda a proposta “*Motronic Tri Fuel*” que permite o uso dos três combustíveis (gás/álcool/GNV) com uma única unidade de gerenciamento, possuindo funções específicas para cada combustível. Trabalha-se ainda em um processo mais amplo, denominado “*Tetra Fuel*” que permitiria ao motor trabalhar com gás, álcool, GNV ou gasolina, através do uso de uma única central de comando eletrônico [112].

2.2.1.1. *Gás Natural Veicular (GNV)*

GNV é a sigla de Gás Natural Veicular, ou seja, o gás natural utilizado em veículos automotores [156], [158]. Também são conhecidos como veículos movidos a gás natural comprimido (CNG) nos países de língua inglesa e têm recebido muita atenção das indústrias, devido às emissões reduzida [128].

O GNV está há muito estabelecido na Europa, nos EUA, na Nova Zelândia e na Austrália. Em 2000, existiam cerca de 1,2 milhões de veículos a gás natural a circular no mundo, dos quais a Itália possuía cerca de 320 mil veículos em circulação, onde se utiliza o GNV como combustível veicular desde a década de 1940. No EUA, cerca de 87.500 veículos a GNV operavam com uma rede de 1.100 postos de abastecimento. A Argentina contava com 450 mil veículos GNV e a Rússia com 205 mil. No Brasil já circulavam cerca de 60 mil [158].

Como se vê, não se trata de uma nova ideia. No Brasil, na década de 70 já se faziam experiências com motores movidos a gás natural, porém não havia disponibilidade de

gasodutos e de fontes de suprimentos. A princípio o uso era restrito a táxis, ônibus e veículos governamentais, porém, desde 1996, foi autorizado o uso do GNV em veículos de toda espécie, inclusive particulares. Em novembro de 2003, na área de concessão da Comgas, existiam cerca de 200 postos de abastecimento (número em crescimento acentuado), que permitiam o abastecimento em diversos locais, principalmente na região metropolitana de São Paulo e nas regiões de Campinas e do Vale do Paraíba [156].

O gás natural veicular é uma mistura de elementos, cujo principal componente (cerca de 93%) é o metano. Esse gás é extraído de reservas naturais e utilizado largamente como combustível em todo o mundo. É o mesmo gás utilizado em residências, no comércio e na indústria. A utilização do GNV em veículos automotores se dá pela conversão de veículos a gasolina ou a álcool para que eles possam utilizar o GNV como combustível alternativo, tornando-os bi-combustíveis. A conversão típica oscila entre R\$ 2.500,00 e R\$ 3.500,00, podendo variar de acordo com a configuração e a capacidade de armazenamento desejada pelo usuário. As conversões mecânicas são compatíveis com o atogador e com motores de injeção multiponto, podendo ser utilizado como combustível alternativo em qualquer veículo movido a gasolina ou álcool, com carburador ou sistema de injeção eletrônica. O maior poder calorífico do gás natural, que possui um elevado índice de octano (cerca de 120), permite ao motor funcionar com maiores taxas de compressão que os motores a gasolina (índice de octano entre 95 e 98), assim, os veículos a gasolina convertidos para GNV estão sujeitos a pequenas perdas de potência. No entanto, veículos concebidos especificamente para funcionarem a GNV, que possuem taxas de compressão maiores, não têm perda de potência e podem mesmo, ter potência e eficiência maiores [156].

O GNV (gás natural veicular) não é o mesmo que o GLP (gás liquefeito de petróleo). O GNV é composto basicamente por metano, enquanto o GLP é composto por propano e butano. O GNV é normalmente armazenado sob alta pressão na forma gasosa; já o GLP – também conhecido como gás de botijão – é armazenado na forma líquida e sob pressões muito inferiores e é proibido para fins automotivos. Isso tem grande impacto na maior segurança proporcionada pelo uso do GNV [158].

Mundialmente, existem 40 fabricantes de veículos com produtos para GNV. Todos os grandes fabricantes de carros, caminhões e automóveis construíram protótipos de veículos GNV dedicados. Alguns modelos de veículos a GNV estão disponíveis diretamente dos fabricantes do equipamento original. Avanços recentes na tecnologia GNV manterão a indústria no caminho certo, com a adoção da maior parte das tecnologias de vanguarda que vêm dos principais fabricantes automobilísticos. A indústria está intensamente voltada para novas investigações e desenvolvimentos nas áreas de infra-estrutura, tecnologia do veículo e do motor, e reduções nas emissões de veículos GNV [158].

A única grande diferença entre um veículo a gasolina e um veículo GNV é o sistema de combustível. O sistema funciona da seguinte forma:

1. o gás natural comprimido (cerca de 250bar) entra no veículo através de um receptor que o conduz até aos cilindros de armazenagem;
2. nestes cilindros, o gás é armazenado, inicialmente, a cerca de 200bar. À medida que o gás é consumido, a pressão vai diminuindo e, abaixo dos 15bar torna-se necessário o reabastecimento;
3. se o veículo for bi-combustível, no painel deve estar instalado um computador que permite ao condutor a seleção entre gás natural e gasolina ou álcool;
4. quando o condutor seleciona o gás natural, este deixa os cilindros e flui através de tubos rígidos para alta pressão, até o compartimento do motor;
5. o gás acede ao regulador de pressão, dispositivo que reduz a pressão para valores que permitam vencer as perdas de carga até à admissão do motor;
6. a saída do gás do regulador de pressão para o sistema de injeção (ou carburador) é controlada por uma eletroválvula. Esta eletroválvula também suspende o fluxo de gás, quando o condutor faz a comutação para gasolina ou álcool;
7. o gás natural mistura-se com o ar no carburador ou no sistema de injeção e entra nas câmaras de combustão onde é queimado.

Em termos de custo direto, o GNV custa aproximadamente 60% menos que a gasolina e 20% menos que o álcool. Todavia, o usuário economiza muito mais pois a autonomia de um N.m³ de GNV é superior à de um litro de combustível líquido.

Além disso, o gás natural é seco, não provocando resíduos de carbono nas partes internas do motor o que, de um lado, aumenta a vida útil do motor e o intervalo de troca de óleo e, do outro, reduz significativamente os custos de manutenção [156].

Em relação à disponibilidade, no início de 1996, as reservas provadas mundiais de GNV chegavam a 147,5 bilhões de m³. No mesmo ano, estas reservas equivaliam a 96% das de petróleo, entretanto, o número de anos de consumo das reservas de GNV é superior ao do petróleo (67,2 contra 42,4, respectivamente). Numa área de fácil acessibilidade para a Europa, através de gasodutos ou de navios de transporte de gás, concentram-se 76% das reservas mundiais de GNV: no território da ex-URSS (39% das reservas mundiais); na África (cerca de 6% das reservas mundiais) e no Médio Oriente (cerca de 31%) [158]. O Brasil possui reservas próprias de gás natural, além de ter gasodutos que permitem transportar gás natural de países como Bolívia e Argentina, que contam com reservas de duração estimada em mais de 50 anos, assegurando o fornecimento deste combustível [156].

Os cilindros de armazenagem de combustível usados nos veículos GNV são muito mais resistentes do que os reservatórios de gasolina. A concepção dos cilindros GNV é sujeita a um certo número de testes obrigatórios severos, tais como calor e pressão extremos, tiros, colisões e incêndios. Os sistemas de combustível a GNV são "selados", o que impede quaisquer fugas ou perdas evaporativas, e mesmo que ocorra uma fuga num sistema GNV, o gás natural dissipa-se na atmosfera porque é mais leve do que o ar (densidade relativa de cerca de 0,5) [156], [158].

O GNV tem uma temperatura de ignição bastante superior à gasolina, álcool ou ao diesel, conforme apresentado na Tabela I. Além disso, os limites de inflamabilidade são superiores, i.e., são necessárias maiores concentrações de gás no ar para que ocorra a combustão [158].

Tabela I – Propriedades Físico-Químicas de Combustíveis Automotores [158].

Propriedades	Gas Natural	Gasolina	Diesel
Limites de inflamabilidade (% por volume no ar):	5 a 15	1,4 - 7,6	0,6 - 5,5
Temperatura de auto-ignição (°C):	450	300	230
Energia de ignição mínima (10 ⁵ kJ):	0,26	0,22	0,22
Temperatura-pico de chama (°C):	1884	1977	2054

O GNV não é tóxico nem corrosivo, não contamina os solos e é o mais limpo dos combustíveis alternativos, já que não produz aldeídos significativos ou outras toxinas

no ar, as quais constituem uma preocupação em relação à gasolina e a outros combustíveis alternativos. As emissões de escape dos veículos a GNV são muito inferiores às dos veículos movidos à gasolina, assim, as emissões de monóxido de carbono do GNV são cerca de 70% inferiores, as emissões de hidrocarbonetos não metânicos (HC_m) são 88% inferiores, e as de óxidos de carbono são 80% inferiores. Além destas reduções de poluentes, o GNV também emite quantidades significativamente inferiores de gases de efeito estufa, relativamente aos veículos a gasolina. Os motores a gás natural distinguem-se pelo fato da emissão de partículas, além de incomparavelmente inferior à dos motores a gasolina, ser devida, principalmente, à queima de óleo lubrificante e do odorizante adicionado ao combustível, para torná-lo detectável quando em concentrações superiores a seu limite inferior de inflamabilidade. Em contraste com a gasolina e o diesel, o GNV é composto por hidrocarbonetos leves, com reduzida razão Carbono/Hidrogênio, e moléculas leves. Estes fatores contribuem para a reduzida tendência dos motores a GNV produzirem fuligem e partículas. O fato de alguns tipos de gás natural não contem enxofre (ou apenas diminutas quantidades desta substância) permite que as emissões de veículos a gás natural sejam isentas de sulfatos. O GNV contém menos carbono por unidade de energia do que qualquer outro combustível fóssil e, consequentemente, produz menores emissões de CO_2 por quilometro percorrido. Apesar dos veículos a GNV emitirem metano, um dos gases de efeito estufa, qualquer aumento nas emissões de metano é largamente compensado pela redução substancial nas emissões de CO_2 , relativamente aos outros combustíveis [158].

2.2.1.2. Hidrogênio (H_2)

O hidrogênio pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna, com ótimos resultados quanto à redução de emissões e consumo de combustível. Os principais sistemas a serem modificados e/ou adicionados aos veículos regulares são os sistemas de armazenamento de combustível, distribuição e segurança para o hidrogênio, além de ajustes no motor de combustão interna [36], [61]. Certos protótipos obtiveram resultados promissores em emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, abaixo do exigido pela legislação mais exigente nos EUA, emissões de dióxido de carbono de apenas 0,4% do equivalente em motores a

gasolina e economia de combustível de até 17,9% em tráfego urbano. A desvantagem observada foi o baixo desempenho em acelerações, considerada inaceitável sob o ponto de vista do consumidor. Melhorias poderiam ser realizadas de modo a aumentar a potência a níveis adequados, reduzindo para 1% a economia de consumo de combustível [61]. Outro protótipo com um motor a hidrogênio, utilizado em veículo conceito, foi apresentado em 2003. A unidade é um motor de 2.300cm³, com quatro cilindros em linha, supercomprimido com "intercooler", integrado com um sistema híbrido de transmissão modular avançada. De acordo com o fabricante, o sistema de potência consome 19,2km/l e possui autonomia de 480km [36].

Outro fabricante deverá oferecer, dentro de 2 anos, um novo modelo com hidrogênio como fonte alternativa de combustível, para motores de combustão interna com fonte dupla de combustível (gasolina e hidrogênio) [41]. Este modelo disporá de um tanque criogênico de 140l, localizado no porta-malas, cuja temperatura de armazenamento é de -253°C. Apenas com hidrogênio, a autonomia pode chegar à 300km e a potência a 135kW (181hp), com gasolina a potência chega a 245kW (329hp) [61]. Para outro modelo, com motor V12, a autonomia é de 400km e a energia reservada no tanque de 4,3kg, equivale a 171kWh, considerando a velocidade máxima de 180km/h [118].

2.2.1.3. *Etanol e Gasolina*

A partir da década de 1970, com a crise mundial do petróleo, o governo militar brasileiro decidiu investir no aperfeiçoamento do uso do álcool etílico hidratado (etanol) como forma de combustível para veículos de passeio. O sucesso da empreitada só foi obscurecido pela crise instalada no final na década de 1990, quando o preço do açúcar influiu na produção do álcool.

Por meio de diversos programas governamentais com redução de impostos em veículos e do preço do combustível, tentou-se retomar o programa do álcool, mas o número de veículos produzidos com motores a álcool, representava menos de 5% da produção de veículos novos. Muitos consumidores chegaram a converter veículos a gasolina para álcool, contudo os resultados econômicos nunca foram positivos. Apesar de utilizarem ciclos de combustão equivalentes (Ciclo Otto), estes combustíveis nunca puderam ser abastecidos num mesmo motor, devido a diferentes

taxas de compressão requeridas pelo álcool, combustível de maior octanagem que a gasolina. No Brasil, o álcool é utilizado como antidetonante, misturado à gasolina, mas sua porcentagem equivale a apenas 24% do volume total da gasolina.

Entretanto, a partir de 2003, as montadoras brasileiras passaram a oferecer uma nova categoria de motores, que pode ser abastecida com álcool, gasolina ou uma mistura dos dois combustíveis em qualquer proporção [2]. Um sensor eletrônico que identifica a mistura existente no tanque de combustível e ajusta eletronicamente a injeção de combustível no motor. Além disso, adaptou-se o motor às condições mais adversas para o uso do álcool, que é mais corrosivo que a gasolina, em área e peças como sede de válvulas e bomba de combustível [112]. Estima-se que nos EUA, rodem perto de 2,3 milhões de veículos com esta tecnologia.

Certo modelo de veículo brasileiro, ao ser abastecido apenas com álcool, atinge potência de 82kW (109hp) a 5.400rpm, torque de 180N.m e velocidade máxima de 184km/h, com consumo urbano de 7,6km/l e 11km/l na estrada. Abastecido com gasolina, atinge potência de 79kW (105hp) a 5.400rpm, torque de 170N.m e velocidade máxima de 182km/h, com consumo urbano de 11km/l e 16,3km/l na estrada. O ganho de potência adicional, de cerca de 3,7%, é muito menor que o aumento do consumo médio de combustível (cerca de 32% maior), contudo, considerando-se que o álcool possui preço, pelo menos, 50% menor, o custo por quilômetro rodado é, no mínimo, cerca de 36% menor [125].

Este veículo emprega dois sensores: o de oxigênio e o de detonação, cujos dados são processados simultaneamente pelo módulo central eletrônico do motor (ECM). Ao abastecer o veículo, a bôia do reservatório de combustível notifica o ECM para iniciar o processo de reconhecimento da mistura. Durante a partida do motor e queima inicial do combustível, o sensor de oxigênio (sonda lambda instalada no sistema de exaustão) envia dados ao ECM. Através de algoritmos próprios, o programa do ECM determina a mistura, definindo a quantidade de combustível e o instante de injeção do combustível. O atraso na centelha de combustão é otimizado através das leituras do sensor de detonação, instalado no bloco do motor. A taxa de compressão para o motor é de 10,5:1, considerada intermediária entre a taxas utilizadas em motores de combustíveis únicos [125].

Para outra solução, foi desenvolvido um sistema com um software complexo denominado “*Software Flexfuel Sensor*” (SFS) que, além dos sensores mencionados anteriormente, utiliza outros dados como rotação e temperatura do motor e velocidade do veículo. O motor desenvolvido, foi baseado num original a gasolina, mantendo a taxa de compressão em 10:1, com resultados em potência de até 74kW (99hp) para álcool exclusivamente e 73kW (97hp) para uso de gasolina [110].

A taxa ideal de compressão para motores, de acordo com outro fabricante nacional, é de cerca de 9,5:1 para gasolina e 12,2:1 para álcool [110]. Para especialistas, no entanto, a tendência geral para os veículos bi-combustíveis é uma taxa de compressão mais elevada, visando melhorar o desempenho e economia de combustível para o uso com álcool.

A Tabela II, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos combustíveis analisados.

Combustível	Vantagens	Desvantagens	Informações Técnicas
CNG (Gás Natural Comprimido) - Melhor qualidade do combustível, gerando menores custos de manutenção. - Emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono abaixo do exigido pela legislação mais recente nos EUA; Emissões CO ₂ de 0,4% do equivalente em motores a gasolina; Redução do consumo de combustível de 17,9%, em tráfego urbano.	- Consumo de combustível menor que o equivalente à gasolina; Redução da potência líquida de 10-20%, quando comparado ao uso de gasolina no mesmo motor.	- Baixo desempenho em acelerações, considerada inaceitável para o consumidor; Redução de espaço e carga útil devido ao tanque de armazenamento.	- Utiliza Ciclo Otto no motor.
H ₂ (Hidrogênio) - Emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono abaixo do exigido pela legislação mais recente nos EUA; Emissões CO ₂ de 0,4% do equivalente em motores a gasolina; Redução do consumo de combustível de 17,9%, em tráfego urbano.	- A potência em maiores proporções de gasolina ou o consumo em maiores proporções de álcool são inferiores àquelas obtidas quando utilizadas as proporções inversas.	- Os veículos de abastecimento flexível (também chamados de veículos de combustível variável) têm sido produzidos nos EUA pela GM (Chevy S-10 e GMC Sonoma), Ford (modelos Ranger, Crown Victoria e Taurus), e DaimlerChrysler (Plymouth Voyager e Dodge Caravan); Chevrolet Corsa 1.8 FlexPower [125]. Com álcool, potência de 82kW (109hp) a 5.400rpm, torque de 180N.m, com consumo urbano de 7,6km/l e na estrada de 11km/l. Com gasolina, potência de 79kW (105hp) a 5.400rpm, torque de 170N.m, e consumo urbano de 11km/l e 16,3km/l na estrada. Volkswagen Gol 1.6 Totalflex com taxa de compressão em 10:1, potência de até 74kW (99hp) para álcool e 73kW (97hp) para gasolina [110].	- Utiliza Ciclo Otto no motor; - O abastecimento e armazenamento do combustível podem ser feitos na forma líquida ou gasosa.
Etanol e/ou Gasolina. - Uso de mistura de gasolina e etanol em qualquer proporção; Oportunidade de utilizar o combustível economicamente mais vantajoso.	- Uso de combustíveis líquidos e gasosos.	- Necessidade de tanques de armazenamento separados.	- Multi-Fuel da Delphi com Sistema de Central unificada para gasolina/álcool e GNV, com sistemas múltiplos independentes [10]; - Motronic T-Fuel da Bosch para os combustíveis acima com unidade de gerenciamento unificada [10].
Multi-Combustível. - Uso de combustíveis líquidos e gasosos.	- Necessidade de tanques de armazenamento separados.	- Multi-Fuel da Delphi com Sistema de Central unificada para gasolina/álcool e GNV, com sistemas múltiplos independentes [10]; - Motronic T-Fuel da Bosch para os combustíveis acima com unidade de gerenciamento unificada [10].	- Multi-Fuel da Delphi com Sistema de Central unificada para gasolina/álcool e GNV, com sistemas múltiplos independentes [10]; - Motronic T-Fuel da Bosch para os combustíveis acima com unidade de gerenciamento unificada [10].

Tabela II – Resumo dos Tipos de Combustíveis apresentados.

2.2.2. Sistemas de Comandos de Válvulas e Fluxo de Ar

Os sistemas de comandos de válvulas e fluxo de ar compreendem todos os sistemas utilizados nos motores de combustão interna para controlar o fluxo de ar ou a mistura ar-combustível dentro da câmara de combustão. Estes sistemas incluem as válvulas, seu controle ou comando, e os coletores de admissão.

2.2.2.1. *Acionamento das Válvulas*

Os sistemas de comando de válvulas sempre apresentaram restrições em relação à flexibilidade do motor de combustão interna. Muitas medidas como atraso de abertura, fechamento ou alteração do tempo de permanência aberta, foram tentados, sem muito sucesso. Em alguns casos, o motor melhorava o desempenho, em outros reduzia o consumo e as emissões, mas nunca na mesma configuração. Os sistemas de acionamento variável de válvulas resolvem este problema ao permitir que os projetistas definam os melhores pontos de desempenho, consumo e emissões para dado motor, com os sistemas adaptando seu comportamento, de acordo com a necessidade do motor. Os benefícios do uso de comando variável de válvulas são extensos e incluem:

- permitir ao motor atingir seu torque máximo em rotações menores, e o sustentar por uma faixa de rotações mais ampla;
- viabilizar uma curva mais linear de geração de potência, e maior potência em altas rotações;
- melhorar a estabilidade da combustão em marcha lenta, e pode ser utilizado para acelerar o aquecimento do catalisador, reduzindo emissões;
- reduzir o consumo de combustível, ao reduzir as perdas de bombeamento do motor, relacionadas com a compressão do ar na câmara de combustão sem realização de trabalho útil;
- melhorar a eficiência de um motor a gasolina, ao gerar recirculação interna dos gases, o que reduz o trabalho necessário de troca gasosa.
- em alguns casos, permitir a eliminação da válvula borboleta.

Foi desenvolvido um sistema experimental eletro-mecânico que aciona cada válvula individualmente por meio de solenóides [1], [43]. Este sistema é controlado pelo módulo eletrônico do motor (ECU – *Electronic Control Unit*), gerenciando a unidade

de controle das válvulas (EVCU – *Electronic Valve Control Unit*). Esta tecnologia permite ajustes infinitos de sincronização das válvulas de acordo com a variação da massa de ar admitido e de gases residuais, evita perdas de aceleração em carga parcial do motor e reduz a formação de óxidos de nitrogênio (NO_x), além de garantir a independência no gerenciamento de cada cilindro. Testes de protótipos indicam uma economia de cerca de 15% de combustível. O sistema de Controle de Abertura Variável de Válvula (VLC – *Variable Valve Lift Control*), como apresentado na Figura 2, elimina a borboleta em motores a gasolina, com uma redução de 10% no consumo de combustível [20].

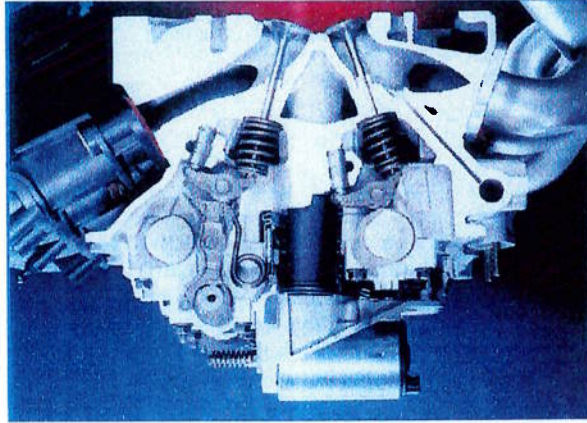


Figura 2 – Sistema de Comando de Válvulas VLC da Siemens Automotive.

Em algumas aplicações, o uso de variador dos eixos de comando, permite separar as funções de sincronização das válvulas de admissão e exaustão via dois eixos de comando, montados no bloco do motor. O eixo de comando de válvulas de admissão é utilizado para modificar e ampliar as características de torque em carga plena. Em modo de operação de combustão estratificada, pode ser usado para aumentar a diluição da carga de ar, reduzindo fricção e consumo de combustível, particularmente em marcha lenta e carga parcial do motor. No geral, esta tecnologia garante torque 24% maior, disponível em toda a faixa de rotações, além do motor desenvolver torque máximo 20% maior e potência máxima 13% maior [20].

O conceito *Valvetronic*, ilustrado na Figura 3, permite a eliminação da válvula borboleta em certos motores ao ajustar a elevação efetiva do camo e o perfil da seção de abertura das válvulas, através de uma alavanca intermediária entre o eixo do comando de válvulas e as duas válvulas de admissão de cada cilindro. A distância entre este eixo intermediário e o eixo do comando pode ser variado através de um

eixo adicional excêntrico, operado eletrônica e continuamente. O *Valvetronic* ainda utiliza o subsistema *Bi-VANOS* (*Variable Nockenwellen Steuerung* – controle de comando variável de válvulas) que ajusta o instante do início e do fim do processo de abertura dos eixos dos comandos de válvulas de admissão e exaustão, de avançado a atrasado e vice-versa, oferecendo um ajuste automático com incrementos contínuos, em todas as rotações do motor [6], [20], [32].

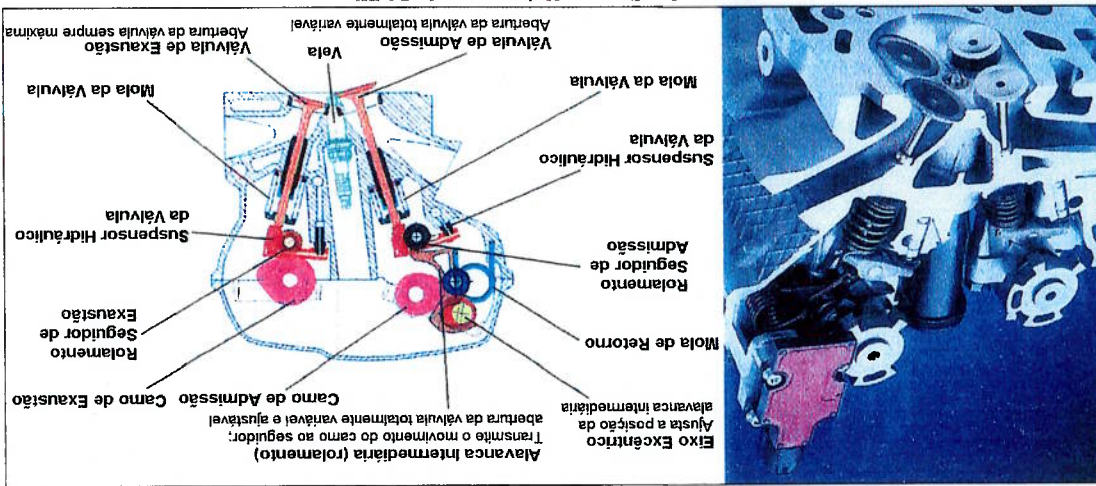


Figura 3 – Sistema Valvetronic da BMW.

Os benefícios do sistema *Valvetronic* incluem, segundo seu fabricante, o aumento de potência de saída em 14%, redução do consumo de combustível entre 10% e 14%, vida útil mais longa do motor e bom comportamento em partida a frio, quando comparado com motores anteriores de mesma capacidade. A melhor resposta do motor se deve ao fato de o controle ser realizado na câmara de combustão, para a carga aplicada, assim, o tempo de atraso entre o comando do motorista e a aceleração efetiva do motor é menor, pois é eliminado o tempo de preenchimento do coletor de admissão entre a válvula borboleta e a câmara de combustão. Esta tecnologia poderá ser complementada no futuro por um sistema de injeção direta de gasolina, o que reduzirá ainda mais seu consumo de combustível, adotando tecnologia de queima de mistura pobre e um conversor catalítico desnitrificante, que aceita gasolina com quaisquer níveis de enxofre sem afetar o consumo de combustível [6], [20], [32].

Outro fabricante desenvolveu um conceito para controle eletrônico de abertura e sincronização variável da válvula, oferecendo em adição, um sistema de controle de fase do eixo do comando de válvulas, denominado Controle de Sincronização Variável (VTC). Em baixas rotações, o sistema ajusta a abertura e duração da

abertura da válvula para a velocidade ótima de enchimento do cilindro, com instantes e abertura assimétrica das válvulas de admissão, criando um efeito de redemoinho na câmara de combustão. Conforme a velocidade do motor aumenta, o sistema muda para um perfil de camo de grande abertura e longa duração para melhor potência do motor em altas rotações. Em velocidades moderadas do motor, o controle eletrônico altera os instantes de abertura para maior sincronização, aumentando a sobreposição das aberturas das válvulas, criando um efeito de recirculação interna de gases de exaustão (EGR). Além disso, a abertura de uma das válvulas de admissão é reduzida para gerar um forte efeito de turbulência na câmara de combustão [7], [12], [20], [37]. O sistema é apresentado na Figura 4.

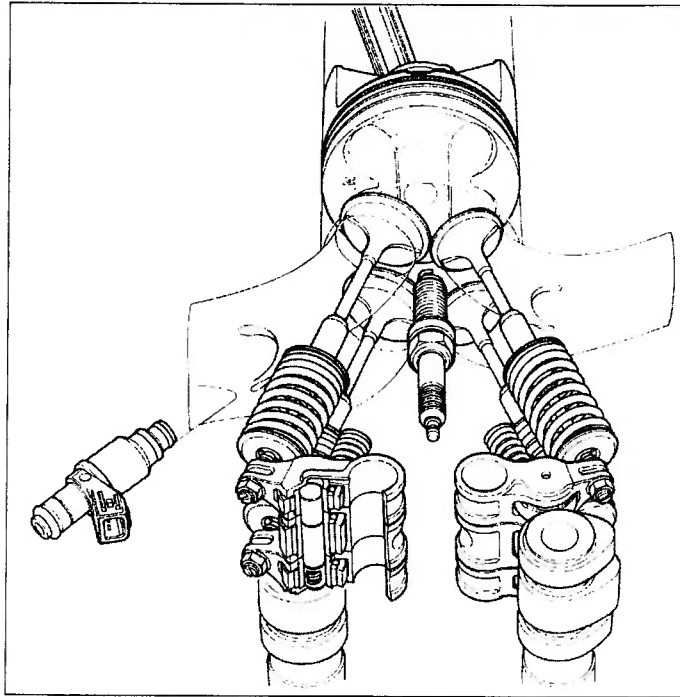


Figura 4 – Sistema i-VTEC da Honda no Acura RSX.

A adição do VTC ao sistema de controle de válvula permite a variação contínua da fase do eixo do comando de válvulas, através de toda a faixa de potências do motor. Conforme a velocidade do motor aumenta, um atuador VTC – controlado por uma unidade de controle do motor, monitorando a posição do camo, sincronização de ignição, exaustão de O₂ e posição do acelerador – avança ou retarda o camo de admissão numa faixa de 50°. Durante operações típicas, a sincronização do eixo de comando de válvulas de admissão, é quase totalmente atrasada em marcha lenta, permitindo maior estabilidade e reduzindo emissões de NO_x. Conforme a velocidade

do motor aumenta, o eixo de comando de válvulas de admissão é adiantado, abrindo antes as válvulas de admissão e permitindo sobreposição adicional de abertura de válvulas. Na versão básica, o controle de válvulas utiliza dois braços roletados por par de válvulas de admissão. Durante operação em baixa rotação, o ar é admitido quase exclusivamente através da válvula de admissão primária, criando um forte efeito de vórtice para melhorar a combustão. A 2.200rpm, o braço secundário liga-se ao primário, causando o acionamento de ambas as válvulas de admissão pelo mesmo tempo e abertura e melhorando, substancialmente, o fluxo de ar no cilindro. Numa configuração alternativa, há um sistema de três braços roletados, atuando nas válvulas de admissão e exaustão. Em baixas rotações do motor, as válvulas seguem perfis de comando de válvula de pouca abertura e curta-duração. Acima de 5.800rpm, as válvulas são operadas por perfis de camos de grande abertura e longa duração. Outro fabricante também oferece um sistema de variação contínua da sincronização das válvulas. Este sistema emprega um mecanismo atuado magneticamente, que provê uma maior amplitude de abertura (35° contra o sistema hidráulico anterior de 27°) e resposta muito mais rápida, reduzindo em 60% o tempo necessário para uma alteração de 30° na sincronização da válvula de admissão [19], [65].

Um fabricante alemão criou o modelo ilustrado na Figura 5, denominado *VarioCam Plus*. O sistema provê sincronização de válvulas, além de dois perfis de eixo de comando de válvulas e dois conjuntos de tuchos para variar a elevação e duração de abertura das válvulas. Os ajustadores axiais de eixo de comando movem-se sobre rampas helicoidais para oferecer ajuste de sincronização da válvula e podem, ainda, ajustar a elevação da válvula e a duração de abertura de acordo com a carga e velocidade do motor, bem como a marcha selecionada [20], [59].

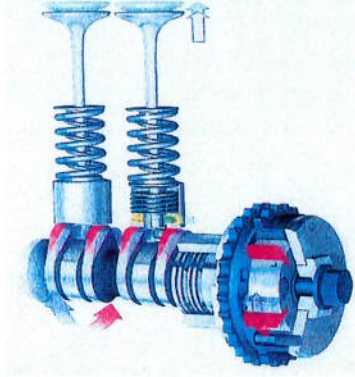


Figura 5 – Sistema de Acionamento de Válvulas VarioCam Plus da Porsche.

Cada eixo do comando de admissão inclui dois conjuntos de lóbulos para prover dois perfis: 3mm para pequena abertura e curta duração, e 10mm para grande abertura e longa duração. O perfil de pequena abertura e curta duração garante maiores velocidades na carga de admissão e minimiza a permanência dos gases de exaustão do ciclo da combustão anterior (pequena sobreposição), além de reduzir o consumo de combustível e emissões em baixas velocidades. Um módulo de controle do motor com controle de acelerador eletrônico permite medidas precisas dos requisitos chaves do sistema de acionamento como velocidade do motor, posição do acelerador, temperatura do óleo do motor e líquido de arrefecimento, além de informações da seleção de marchas. O módulo compara os requisitos do motorista para um certo nível de potência, através de uma configuração de acelerador eletrônico, e seu mapa de controle determina a operação do sistema de comando de válvulas. Este sistema aumenta a potência em 8kW e reduz o consumo de combustível em 2% [20], [59].

Outra alternativa é o Trem de Válvulas Ativo (*Active Valve Train* – AVT), que facilita o controle da mistura de combustível, o processo de combustão e a alteração das razões de compressão, reduzindo emissões, consumo de combustível e, de acordo com simulações, aumenta o torque disponível em até 10%. Esta tecnologia permite a introdução de mecanismos diferentes de combustão como ignição sem velas nos motores a gasolina e carga homogênea de compressão-ignição (*homogeneous-charge compression-ignition* – HCCI) em motores Diesel. Os motores resultantes, sem eixo de comando de válvulas poderiam convergir para um novo ciclo motor e permitir o uso de qualquer dos dois combustíveis (gasolina ou Diesel) [43], [98].

Outros avanços tecnológicos são os mecanismos hidráulicos que permitem o avanço da abertura das válvulas de até 47° em dado motor V6 e 48° em outro motor V8, e tempo de acionamento de até 30ms. Como resultado, obtve-se 9kW e 7N.m adicionais e aumento de autonomia de 0,4 a 0,8 km/l para o motor V6 de 3.000cm³ e para o motor V8 de 3.900cm³, obtve-se acréscimo de 21kW e 26N.m, com economia de combustível de 0,4km/l [70]. Similarmente, em outro motor com 5.400cm³, foram utilizados sistemas variantes do anterior, denominado VCT (*variable-cam timing* – sincronização variável dos camos). Atuando de maneira independente nos camos de acionamento de válvulas de admissão e exaustão, o

o sistema melhorou em 15% o pico de potência para 225kW, em relação ao motor anterior de 5.400cm³. Com torque máximo de 495N.m a 3.750rpm, o motor apresenta 7% mais torque em baixas rotações e 5% de melhoria no pico de torque [92].

A Tabela III, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de controle e acionamento das válvulas dos motores a combustão interna.

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
Eletro-Mecânico - [1], [43]	- Ajustes infinitos de sincronização das válvulas de acordo com a variação da massa de ar admitido e de gases residuais; - Evita perdas de aceleração em carga parcial; - Reduz a formação de Óxidos de Nitrogênio (NOx); - Garante a independência no gerenciamento de cada cilindro; - Economia de combustível de cerca de 15%.	- Utilizado em motores de Ciclo Otto; - Tensão de trabalho do sistema de 42V.
VLC - Controle de Abertura Variável de Válvula - Siemens Automotivo;	- Elimina a borboleta em motores a gasolina; - Redução de 10% no consumo de combustível; - Permite que certos motores atinjam 90% do torque máximo em maior faixa de rotações; - Garante 24% a mais de torque disponível em toda a faixa de rotações, 20% a mais de torque máximo e 13% a mais de potência máxima.	- Motor Xv8 - Opel Signum ² [20]; - Motor Northstar XV12, Cadillac Cien, atinge 90% de seu torque máximo a 1.500rpm [4]; - Motor Northstar V8, de 32 válvulas e 4.600cm ³ - Cadillac 2004 - gera 235kW (315hp) a 6500rpm e 420N.m a 4400rpm [68], [80]; - Motor V6 de 3600cm ³ , 4 válvulas por cilindro, com variação nas válvulas de admissão e exaustão e gera 194kW (260hp) a 6500rpm e 339N.m a 2.500rpm, 90% do pico de torque entre 1.600 a 5.800rpm [72].
Valetronic - BMW [6], [20], [32]	- Eliminação da válvula borboleta; - Aumento de potência de saída em 14%; - Redução do consumo de combustível entre 10% e 14%, quando comparado com motores anteriores de mesma capacidade; - Prolonga a vida útil do motor e permite bom comportamento em partida a frio; - Melhor resposta do motor, devido ao controle da carga realizado na câmara de combustão.	- Motor V8 de 3500cm ³ e 4400cm ³ - Série 7 de 2002; - Motor 1800cm ³ , 4 cilindros em linha - 316i Compact 2003.
VarioCam Plus - Porsche [20], [59]	- Aumento de potência de 8kW; - Redução de consumo de combustível de 2%.	- Porsche 911 GT2; - Porsche Boxster.
AVT - Trem de Válvulas Ativo - Group Lotus.	- Facilita o controle da mistura de combustível, o processo de combustão e a alteração das razões de compressão; - Possível uso de diferentes combustíveis; - Aumenta o torque em até 10%.	- Sistema em desenvolvimento, em acordo com a Eaton [43], [98].
Ford [70]	- Aumento de 9kW e 7N.m e autonomia adicional de 0,4 a 0,8 km/l para o motor V6; - Aumento de 21kW e 26N.m e autonomia adicional de 0,4km/l para o motor V8.	- Motor V6 DOHC (comando de válvulas duplo no cabeçote) de 3000cm ³ - Lincoln LS 2003 - avanço de até 47° tempo de acionamento de até 300ms; - Motor V8 DOHC de 3900cm ³ - Lincoln LS 2003 - permite o avanço de até 47° e tempo de acionamento em até 300ms.
Ford VCT - sincronização variável dos camos [92]	- Melhora em 15% o pico de potência, em relação ao motor de geração anterior de 5.400cm ³ ; - Apresenta 7% mais torque em baixas rotações e 5% de melhoria no pico de torque, também em relação ao motor de geração anterior de 5.400cm ³ ;	- Motor Triton V8 com VCT, de 5.400cm ³ , Produz 225kW e torque máximo de 495N.m a 3.750rpm - equipara as camiones F-150; - Atua de maneira independente nos camos de acionamento de válvulas de admissão e exaustão.
i-VTEC - Honda [71], [20]	- Permite maior estabilidade e menor emissões de NOx em marcha lenta,	- Motor básico de 2.000cm ³ , em alumínio, 4 cilindros em linha, 16 válvulas - VTEC do i-VTEC é aplicado no eixo de comando de admissão; - Acura RSX tipo S - versão de alto desempenho do i-VTEC ao motor.
e-VTEC - controle de válvulas eletrônico	- Informação não disponível.	- Sistema Magnético de resposta rápida; - Motores Nissan VQ - plataforma G35 (Skyline e Infiniti) [19], [65].

Tabela III - Resumo dos Sistemas de Controle e Acionamento de Válvulas.

2.2.2.2. Coletor Variável de Admissão de Ar

O coletor de admissão é o componente do motor responsável pela distribuição de ar dentro das câmaras de combustão. Seu comprimento, ou percurso a ser percorrido pelos gases de admissão, afeta diretamente a inércia dos gases, determinando a velocidade de enchimento dos cilindros.

Para baixas rotações, o ideal são coletores os mais longos possíveis, aumentando a inércia da massa de ar, enquanto que em altas rotações, o ideal é o uso de coletores curtos, diminuindo a inércia da massa de ar a ser admitida e garantindo um enchimento mais rápido dos cilindros.

A principal característica dos coletores variáveis é a variação dimensional (comprimento) dos coletores de admissão do motor, alterando as características inerciais do sistema de admissão, e permitindo, consequentemente, uma curva de torque mais plana em todas as rotações.

Em geral, os sistemas possuem câmaras adicionais rotativas [6], como ilustrado na Figura 6, integradas ao sistema de coletor de admissão, lineares [4], com sistemas telescópicos para variação do comprimento do coletor, ou de duplo estágio com câmaras separadas [72], que incorpora uma chave para alterar o volume disponível das câmaras para sintonização da ressonância do duto do fluxo de entrada, melhorando o enchimento do cilindro.

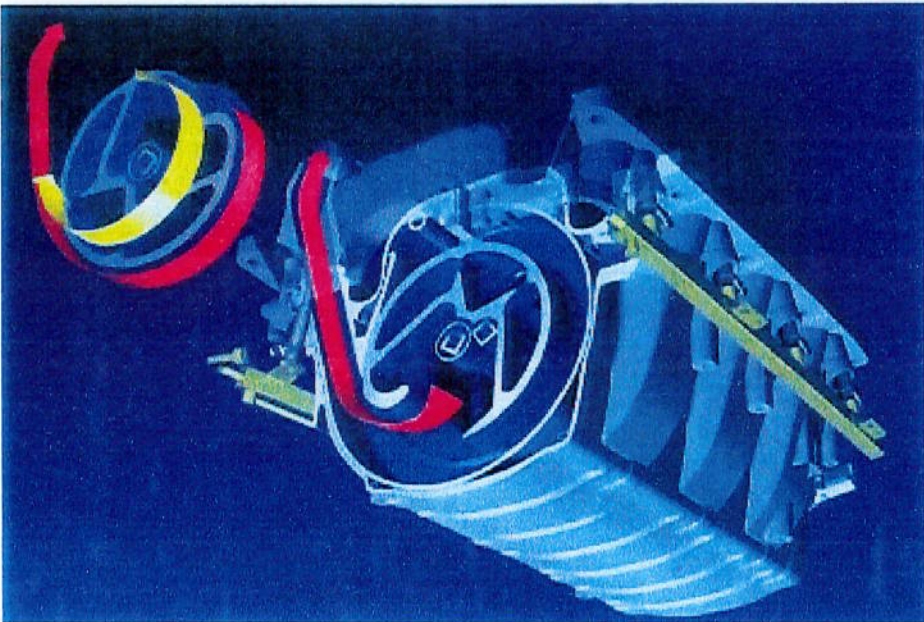


Figura 6 – Sistema de Admissão Rotativo da BMW.

A Tabela IV, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de controle e acionamento de coletores de admissão de motores

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
Indução Vanável – GM [4]	- Alterações mais rápidas da geometria do coletor.	- Motor Northstar XV12, Cadillac Cien, atinge 90% de seu torque máximo a 1.500rpm. - Sistema de indução vanável de 3 estágios, com o primeiro e segundo tubos ajustáveis acionados eletricamente, com alterações mais rápidas na geometria do coletor.
VIM – Coletor de Admissão Vanável – GM [2]	- Melhora o enchimento do cilindro.	- Motor global V6 de 3.600cm ³ , com 4 válvulas por cilindro que gera 194kW (260hp) a 6.500rpm e 339N.m a 2.500rpm, 90% do pico de torque está disponível de 1.600 a 5.800rpm; - Coletor de admissão vanável de duplo estágio, que incorpora uma chave que altera o volume disponível do "plenum" para sintonização da ressonância do duto do fluxo de entrada.
VTEC – Honda [7], [20]	- Permite maior estabilidade e menor emissões de NO _x em marcha lenta.	- Motor básico de 2.000cm ³ , carga em alumínio, quatro cilindros em linha, 16 válvulas, coletor de admissão de estágio duplo – Acura RSX; - Coletor de admissão de estágio duplo com dois tubos de admissão de comprimentos diferentes para cada cilindro; - Abaixo de 4.600rpm, apenas o tubo mais longo entrega ar ao cilindro, utilizando a vantagem do efeito inercial de dutos longos; - Acima de 4.600rpm, uma válvula rotacional no orifício do tubo mais curto se abre, permitindo a passagem de ar adicional ao cilindro.
Ford [70]	- Conjunto com sistema de controle de válvulas, aumento de 9kW e 7N.m e autonomia adicional de 0,4 a 0,8 km/l.	- Motor V6 DOHC (comando de válvulas duplo no cabeçote) de 3.000cm ³ – Lincoln LS 2003 – avanço de até 47° tempo de acionamento de até 300ms.
Ferrari [64]	- Maximização dos valores de potência e picos de torque.	- Motor F140 V12 de 6.000cm ³ , ultraleve (225kg), com sistema hidráulico de acionamento do coletor, potência de saída de 485kW (650hp) a 7.800rpm e 657N.m a 550rpm – Ferrari Enzo.
BMW [6]	- Informação não disponível.	- Motor V8 de 3.500cm ³ e 4.400cm ³ – Série 7 de 2002; - Sistema rotativo capaz de ajustar continuamente o comprimento do coletor de admissão (entre 231 e 673mm) à velocidade do motor, através de um mecanismo de ajuste separado; - Permite o ajuste, ao posicionar a abertura de um cilindro concêntrico a um menor, que conduz o ar às válvulas de admissão.

Tabela IV – Resumo dos Sistemas de Coletor de Admissão Variável.

2.2.2.3. Desativação de Cilindros

O aumento no número de cilindro de um motor de combustão interna está diretamente relacionado com o aumento de potência, e com o aumento no consumo de combustível, já que cada cilindro extra produz e consome o mesmo valor que os demais cilindros. O conceito encerrado na desativação de cilindros do motor consiste, simplesmente, em impedir que um ou mais cilindros de um motor recebam combustível e o queimem, sob certas condições de tráfego como marcha-lenta ou baixa velocidade de condução, reduzindo significativamente o consumo de combustível. Um destes sistemas “desliga” metade dos cilindros do motor, obtendo maior benefício em camionetes e utilitários, que em geral, são veículos de menor eficiência. Este sistema desabilita as válvulas de admissão e exaustão dos cilindros alvos, utilizando um sistema hidráulico ou solenóides, ao mesmo tempo em que a injeção de combustível é cortada para estes cilindros. Enquanto cada sistema de desativação

é único para a aplicação de cada fabricante, e outras variáveis podem interferir, como condições de tráfego, é esperada uma redução no consumo de combustível de 8-10% [20], [39].

Um conceito alternativo foi denominado como “*Displacement on Demand*” (Volume por Demanda) e desliga metade dos cilindros de um motor, desabilitando as válvulas de admissão. Este sistema desliga a metade direita do bloco do motor, permitindo ao motor V12 operar como um motor balanceado de seis cilindros em linha [4].

O mesmo conceito é utilizado em outro motor V8, com a diferença que este desliga até quatro cilindros numa metade do bloco do motor, levando-o a operar como um motor de quatro cilindros em linha, durante carga leve. Em outro motor conceito V16, a vantagem é a possibilidade de operar com 16, 8 ou apenas 4 cilindros [20].

A tecnologia de atuação variável na válvula (VVA), pode ainda ser agregada ao conceito anterior. A tecnologia conhecida por VVA é baseada em um sensor: um dispositivo de ajuste hidráulico rápido, montado sobre roletes. Os sensores, ilustrados na Figura 7, podem mover os acionadores, ou desconectar-se deles, impedindo o movimento dos acionadores e consequentemente das válvulas. Testes de pista demonstraram economia de 10-15% de combustível [21], [39], [71], [72].

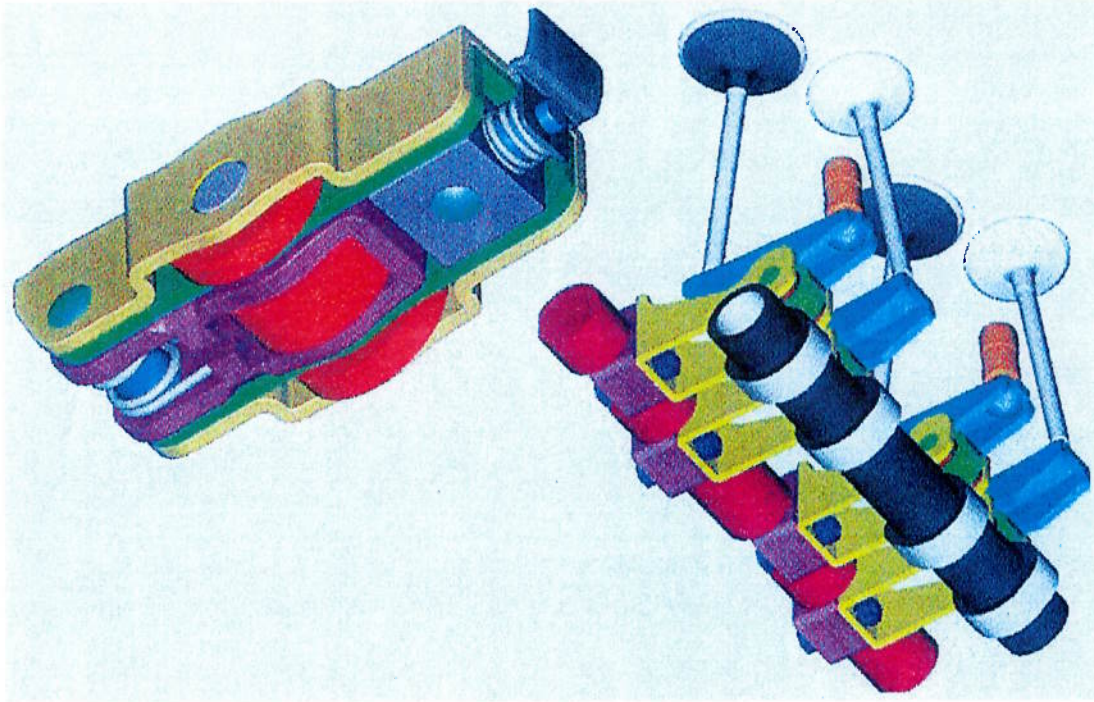


Figura 7 - Sistemas de VVA (Atuação Variável de Válvula) da Eaton.

Em um modelo japonês em produção é possível a desativação de três dos quatro cilindros do motor (válvulas totalmente fechadas), durante desacelerações, reduzindo a resistência interna do motor em até 50% e permitindo maior regeneração de energia no sistema de freios regenerativos [12], [19], [37], [147], [148]. O mesmo tipo de tecnologia, usada por um grupo inglês [43], permite o controle de ativação de válvulas e cilindros, alterando o volume deslocado pelo motor.

A Tabela V, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de desativação de cilindros de motores a combustão interna.

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
VVA - Atuação	- Redução de 10-15% no consumo de combustível.	- Motor V8, de 4ª geração utilizado em camionetes 2004; - Motor global V6 de 3600cm ³ , com 4 válvulas por cilindro e variação nas válvulas de admissão e exaustão - gera 194kW (260hp) a 6500rpm e 339N.m a 2500rpm, 90% do pico de torque está disponível de 1600 a 5800rpm.
Variação na Válvula - Eaton [71], [72].		- Desabilita válvulas de admissão e exaustão, com corte de combustível para os cilindros desativados.
Delphi Automotive Systems [20], [39].	- Economia de combustível de 8-10%.	- Desabilita válvulas de admissão e exaustão, com corte de combustível para os cilindros desativados.
VTTC - Honda [19].	- Reduz em até 50% as resistências internas do motor, permitindo regeneração de energia de frenagem mais eficiente em veículos híbridos.	- Motor L13A, 4 cilindros em linha - Honda Civic Hybrid; - Desativação de até 3 cilindros.
AVT - Trem de Válvulas Ativo - Group Lotus [43].	- Alteração do volume de ar deslocado pelo motor.	- Sistema AVT - permite controlar atuação de válvulas e cilindros.
Displacement on Demand - GM	- Informação não disponível.	- Motor Northstar XV12 - Cadillac Cien [4].

Tabela V - Resumo dos Sistemas de Desativação de Cilindros de Motores a Combustão Interna.

2.2.2.4. Indução Forçada de Ar

O principal conceito de indução forçada de ar em motores a combustão interna é a compressão dos gases de admissão acima dos níveis atmosféricos, aumentando, consequentemente, a quantidade de ar dentro da câmara de combustível, com queima melhor e mais completa do combustível.

Embora associado à melhoria de potência do veículo para acelerações, o sistema pode ser utilizados também para melhorar a eficiência geral do motor [57]. Os principais benefícios percebidos são o aumento substancial da potência disponível, em relação a um dado motor aspirado, a economia de combustível e a redução de emissões [24], [87]. Adicionalmente, de acordo com o Fórum de Tecnologia Diesel (*Diesel Technology Forum*), os turbocompressores, juntamente com outros avanços na tecnologia dos motores Diesel, foram responsáveis pela redução em 83% de material particulado (MP) e 63% de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) de 1990 a 1994 [24].

O método de indução forçada de ar abrange os turbocompressores, acionados pelos gases de exaustão, apresentado na Figura 8, os supercompressores, acionados pelo motor, e os supercompressores acionados eletricamente, denominados “e-boost” [87].



Figura 8 – Turbocompressor de Geometria Variável da Garret Engine Boosting System.

Uma tecnologia desenvolvida para turbocompressores, conhecida por turbina de bocal variável (VNT), permite variar a seção de admissão da turbina, otimizando a potência para a carga requerida, impedindo sobre-velocidades do turbocompressor e mantendo o nível de pressão adicional requerido pelo motor [39].

Outro desenvolvimento é a tecnologia de espiral-dupla, que utiliza duas saídas na carga da turbina do turbocompressor para otimizar a energia dos gases de exaustão, resultando em melhor desempenho do motor em baixas velocidades, pressão de retorno reduzida em altas velocidades e economia de combustível [39].

Outra tecnologia de variação da geometria do turbocompressor, denominada turbina de geometria variável (VTG) permite a variação infinita da velocidade do fluxo de gás para melhor controle de potência. É utilizada em motores Diesel há alguns anos, mas não é disponível para motores a gasolina, pois trabalha a altas temperaturas [39]. Outras tecnologias alternativas são o turbocompressor de dois estágios, que é menos complexo que o variável e trabalha em grande faixa de velocidades do motor, e o supercompressor eletrônico (*eBooster*). Este consiste num motor eletrônico que aciona o compressor, a ser utilizado em série com um turbocompressor de modo a cobrir todo o alcance de mapeamento do motor e prover ar em alta pressão, independentemente das condições dos gases de exaustão.

Um sistema de supercompressor denominado Sistema de Melhoria de Torque é descrito como um sistema de gerenciamento de ar completo, construído em torno de um supercompressor complexo, controlado eletronicamente e acionado eletricamente. Caracteriza-se como um compressor de ar de admissão por demanda com um sistema de indução de ar integrado. Esta tecnologia permite o gerenciamento do sistema elétrico do trem de potência e inclui um controlador eletrônico para o compressor. Pode ser aplicado em motores à gasolina aspirados, bem como unidades a diesel ou a gasolina turbocomprimidos. Testes realizados demonstram melhoria de 10% no torque e redução no tempo de resposta transitória para 330ms [78], [90].

A Tabela VI, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de compressão de ar em motores a combustão interna.

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
VNT – Turbina de Bocal Boosting System. Vantável – Garet Engine Boosting System.	- Otimiza a potência de acordo com a carga requerida; - Permite a redução do volume do motor em novos projetos.	- Uso nos motores Diesel 1,600cm ³ de 16 válvulas, da Ford e PSA Peugeot Citroën. Motor de 80kW de potência, 240N.m a 1750rpm, desempenho similar de um motor de 2,000cm ³ da PSA [89].
Espiral Dupla – Garet Engine Boosting System [39].	- Melhor desempenho do motor em baixas velocidades; - Redução na pressão de retorno; Economia de combustível.	- Uso de duas saídas na carga da turbina do turbocompressor.
VTG – turbina de geometria variável – BorgWarner Turbo Systems [39].	- Melhor controle de potência.	- Variação não-discreta das velocidades do fluxo de gás; - Possui maior complexidade, quando comparado a outros modelos.
Turbocompressor de Dois Estágios – BorgWarner Turbo Systems [39].	- Menos complexo que o anterior; - Trabalho em grande faixa de velocidades do motor.	- Dois estágios do turbocompressor; - O segundo estágio é acionado em velocidades acima das especificadas no primeiro.
Supercompressor eBooster – BorgWarner Turbo Systems	- Seu uso é independente dos gases de exaustão.	- Uso em série com turbocompressor para cobrir todo o alcance do mapeamento do motor utilizado [39].
Supercompressor – DaimlerChrysler [47], [72].	- Redução em 8,5% do consumo de combustível, comparando-se com modelo anterior.	- Mercedes-Benz CLK 200 Kompressor 2003; - Balançadores duplos e sincronização de válvula variável.
Turbocompressor GT 2560LS – Garet Engine Boosting System [66].	- Reduz picos de compressão durante desaceleração e atraso de ação após troca de marcha.	- Motor Duratec 2000cm ³ turbo-comprimido – Ford Focus RS; - Produz 158kW a 5500rpm e 310N.m a 3500rpm.
Supercompressor – Ford.	- Potência final de um motor 100cm ³ comparável a de um motor de 1,600cm ³ ; - Melhoria do torque de saída em 10% e tempo de resposta transitório de 330ms.	- Motor Zetec Rocam 1.0i Supercharger de quatro cilindros em linha e oito válvulas, com compressor mecânico acionado pelo Virabrequim por meio de correa. Atinge 71kW (95hp) a 6,000rpm [109]; - Motor V8 de 4600cm ³ , Ford Mustang GT – supercompressor acionado por correias, gera no motor, potência de saída de 300kW (400hp) a 6000rpm e torque de 530N.m a 3500rpm [74].
VTES – Sistema de Melhoria de Torque Visteon – Visteon [78], [90].	- Melhoria do torque de saída em 10% e tempo de resposta transitório de 330ms.	- Sistema de gerenciamento de ar completo, construído em torno de um supercompressor sofisticado, acionado eletricamente e controlado eletronicamente; - Motores Diesel ou gasolina turbocomprimidos.
Motor Fiat-GM Powertrain Diesel Turbocomprimido [72], [86].	- Resultado representa potência específica de 41MW/m ³ e torque específico de 144kN.m/m ³ ;	- Fiat-GM Powertrain (FGP) – motor Diesel de 1,300cm ³ , 16 válvulas, turbocomprimido e inter-refrigerado, com tecnologia de conduto comum, injeção direta; - Sistema de recirculação dos gases de exaustão controlado eletronicamente; - Potência de 51kW a 4,000rpm e torque de 180N.m a 1,750rpm.

Tabela VI – Resumo dos Sistemas de Compressão do Ar Admitido em Motores de Combustão.

2.2.3. Sistemas de Injeção e Queima de Combustível

2.2.3.1. Ignição de Combustível com Centelhas ou Injeções Múltiplas

Nos motores de combustão interna com ignição à vela, o instante da injeção e da queima por toda a mistura ar-combustível dentro do cilindro. Na maior parte dos casos, o enriquecimento da mistura ar-combustível para aumentar a potência disponível, gera uma queima incompleta, o que aumenta emissões de HCs e CO_x.

Em outros casos, o uso de misturas mais pobres, utilizado para reduzir aquelas emissões, também ocasiona queima incompleta. O uso de centelhas e injeções múltiplas, visa, justamente, permitir diversos instantes de centelha na vela, com queima mais completa de qualquer mistura ar-combustível. Um sistema denominado IDSI (*Intelligent Dual Spark Ignition* – ignição inteligente de dupla centelha) é utilizado no motor de combustão interna de um veículo híbrido japonês em produção. O sistema de ignição com duas velas por câmara emprega duas centelhas com sincronização variável – em sequência, ou simultâneas – garantindo a queima de misturas de menor concentração de combustível [12], [19].

Nos motores de combustão interna com combustão por compressão, o instante da injeção determina o comportamento da combustão da mistura ar-combustível dentro da câmara de combustão. Certo motor turbo-diesel opera com estratégia única de injeção piloto de pré-mistura, e 5 esquemas de injeção diferentes, visando melhorar a queima da mistura ar-combustível. Um mapa de injeção controla de uma até 5 injeções separadas de combustível, dependendo da velocidade e torque requerido pelo motor, permite uma operação suave e silenciosa do motor, reduzindo a emissão de NO_x e fuligem, sem a necessidade de um filtro de partículas [56], [69].

A Tabela VII, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de ignição por centelha em motores a combustão interna de ciclo Otto, e de sistemas de injeção múltiplas em motores de ciclo Diesel.

Sistema		Vantagens		Informações Técnicas	
IDSI – ignição de dupla centelha inteligente – Honda	- Garante a queima de misturas de combustível; menor concentração de	- Motor L13A, 4 cilindros em linha – Honda Civic Híbrido; Usa duas velas por câmara de combustão e ignição de sincronização variável.	- Motor MRZ-CD turbo-diesel com mapa de injeção de até 5 injeções de combustível distintas para cada ciclo de combustão.		
Mazda [56], [69].	- Redução de emissões de NO _x e fuligem.				

Tabela VII – Resumo dos Sistemas de Ignição por Centelhas Múltiplas em Motores Ciclo Otto.

2.2.3.2. *Injeção Direta de Gasolina*

Nos motores de combustão por centelha, com injeção convencional, os bicos injetores aspergem o combustível numa corrente de ar através de um canal de indução que alimenta as válvulas de admissão. O combustível borrifado ao ar durante o processo de admissão no cilindro, e a combustão é induzida pela vela de ignição. A válvula borboleta determina a quantidade de mistura ar/combustível (A/C) que entra em cada cilindro. Nesta tecnologia tradicional, a mistura A/C admitida no cilindro não pode se desviar muito da razão estequiométrica ótima (razão A/C 14,7:1), já que misturas muito pobres não queimam.

Apesar de um conceito antigo nos motores a Diesel, a injeção direta em motores de ciclo Otto é uma aplicação recente para veículos de série, com o desenvolvimento de novos sistemas de injeção de alta pressão e o progresso nos catalisadores desnitrificadores [20].

Os principais benefícios percebidos são o aumento de potência do motor e reduções de consumo de combustível (entre 10-15%) e emissões de hidrocarbonetos (HC) na partida a frio. Para maior economia de combustível, a operação do motor em carga parcial ocorre com razões A/C extremamente pobres. Para estabilizar o processo de combustão e evitar formação de fuligem a carga parcial, a formação da mistura deve ser assistida por um movimento controlado da carga de ar. Em carga plena, a mistura A/C torna-se mais homogênea, permitindo ao motor gerar a máxima potência de saída [20].

Nas configurações atuais, a mistura A/C é estabilizada em uma zona próxima à fonte de ignição, através de uma injeção avançada de ar, via um injetor de combustível tipo vórtice, dentro da câmara de combustão. A próxima geração de sistemas de injeção direta de gasolina empregará injetores com múltiplos orifícios. Os novos desenhos de injetores de múltiplos orifícios não operam guiados pela parede da câmara ou pela carga de ar como ocorre atualmente, mas ao contrário, proporcionarão um processo de combustão guiado pelo jato, semelhante àqueles de motores Diesel. Com este processo, uma mistura de A/C concentrada ou estratificada, é formada apenas num pequeno volume, diretamente na região em torno da vela de ignição. O resto da câmara de combustão contém ar ou gases de exaustão recirculados. Esta carga estratificada permite uma razão de mistura total de A/C muito mais pobre (até 60:1) e

o "colchão" de gás ao redor da mistura permite que menos calor seja evacuado, melhorando a eficiência térmica do motor. Já que o processo de carga estratificada opera com excesso de ar, um sistema catalisador desnitrificante e a subsequente disponibilidade de combustíveis sem enxofre são necessários para esta tecnologia [20].

Segundo certo fabricante, com o uso desta tecnologia, atinge-se 21% de economia de combustível na cidade e 10-15% em tráfego misto cidade-estrada. Além do discutido anteriormente, contribui para maior economia de combustível, o fato que o sistema utilizado também tem maior taxa de compressão dos cilindros (do convencional 10:1 para cerca de 11,7:1). Também não há necessidade de gasolinas especiais, já que o sistema reduz a tendência de explosão espontânea (batida) do motor. Somente este aumento da taxa, significou um aumento de 2% da eficiência do motor. Alterações do sistema de arrefecimento também contribuíram para a redução no consumo, já que o colchão de ar e a recirculação de gases de exaustão auxiliam no isolamento das paredes do cilindro e cabecote do motor no modo econômico [8].

Um sistema alemão de injeção direta equipa um motor de combustão por centelha, de 1.600cm³, com injeção direta. Este sistema gera pressões de até 12MPa (1.740psi) na galeria de combustível que fornece gasolina aos injetores controlados eletromagneticamente. Durante operação homogênea, a quantidade de combustível é controlada e ajustada à massa de ar admitida, utilizando informações de um sensor de oxigênio [20].

Outra tecnologia conhecida por Processo de Combustão, utiliza ar comprimido para atomizar o combustível na câmara de combustão. Nos ciclos de trânsito Europeu, o nível de emissões ficou abaixo do exigido pela norma Euro 4, com redução do consumo de combustível entre 13-17%. Graças ao processo de atomização, pode ser utilizado um processo otimizado de combustão, guiado por jato e com injeção direta, permitindo, deste modo, maior proximidade entre a vela e o injetor, e um posicionamento mais central da vela na câmara de combustão. Os baixos níveis de emissão oferecidos por um sistema guiado por jato, quando comparado a um guiado por parede, permitem que as dimensões e, conseqüentemente, o custo do sistema de pós-tratamento, possa ser minimizado. Tipicamente, os níveis de emissões de

hidrocarbonetos (HC) são similares àquelas de um motor de combustível de injeção convencional, enquanto os níveis de emissão de NO_x são reduzidos em cerca de 85%, com o uso concomitante de altos níveis de recirculação de gases de exaustão [17].

Em certo caso, o uso de injeção direta de gasolina significou 15% de aumento de potência (de 97kW para 112kW no caso de um motor de 2.000cm³) e uma redução de até 15% no consumo de combustível, em certos regimes. Os motores utilizam um sistema de conduto comum de alta pressão (11MPa), com processo de combustão guiado por ar. Desenvolvimentos adicionais do sistema de controle de emissões de exaustão, com conversor catalítico do tipo de armazenamento, sensoramento de NO_x e princípio de mistura estratificada em carga parcial do motor, permitirão reduções de emissão de até 70% de NO_x [34], [50].

Outro motor de injeção direta de gasolina, turbo-comprimido, de 1.800cm³ e 4 cilindros, obteve uma média de consumo de combustível 18% menor em relação ao mesmo motor sem esta tecnologia. Este motor possui duas tomadas de ar separadas, cada uma com uma aba ajustável, para garantir turbulência na mistura e, assim, garantir uma combustão mais rápida e mais completa. Uma bomba de combustível de alta pressão é acionada pelo eixo de entrada e um regulador de pressão controlado pelo computador do motor regula a pressão no conduto de combustível, que é conectado aos injetores. O motor possui sensor linear de oxigênio, que se ativa imediatamente em partida a frio, e um novo sensor de NO_x com controle digital. O resultado é um consumo médio de 12,7km/l, cerca de 16% inferior, quando comparado ao modelo anterior [44], [47], [72].

Ainda, um novo motor V8, de 5.900cm³, produz potência de 257kW (345hp) a 5.400rpm e torque de 510N.m a 4.200rpm. É usado um novo sistema de injeção direta com bobinas de alta potência para uma combustão consistente e completa. Além disso, o motor em questão caracteriza-se por uma câmara de combustão semi-estérica, em cabeçotes de alumínio de fluxo cruzado, que permitem o uso de válvulas maiores e melhoram o fluxo de ar na câmara de combustão. As válvulas são atuadas por braços de aço fundido, em número de duas por cilindro. O resultado é uma redução de consumo de combustível de cerca de 8% [63].

Uma tecnologia alternativa, também incorpora a injeção direta, em um motor V12, de 6.000cm³, duplo comando de válvulas no cabeçote (por banco de cilindros), que desenvolve, graças a esta tecnologia, 327kW (438hp) e 331N.m. Os bicos injetores são posicionados nas câmaras de combustão próximas às válvulas de admissão e o combustível é fornecido aos bicos através de um conduto comum, no qual a pressão do combustível é mantida entre 3 e 10MPa. Quanto mais alta a pressão de injeção, mais atomizado o combustível é injetado nos cilindros, o que resulta num melhor processo de combustão. A elevação da pressão é gerada por bombas mecânicas, uma em cada banco de cilindros. Uma taxa de compressão de 11,3:1 contribui para menor consumo de combustível e bom desempenho do motor [72].

A Tabela VIII, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos Sistemas de Injeção Direta de Combustível em Motores Ciclo Otto.

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
D/Sl – injeção direta, ignição com centelha – Ford [8].	- Redução de 21% no consumo de combustível em tráfego urbano e 10-15% em tráfego misto cidade-estrada.	- Motor Ford D/Sl – Ford Fiesta – 3 cilindros em linha, 1100cm ³ .
OCP – Processo de Combustão Orbital – Orbital Engine Corp.	- Redução do consumo de combustível entre 13-17%; - Baixos níveis de emissão; - Minimização de dimensões e custo do sistema de pós-tratamento; - Redução dos níveis de emissão de NO _x em cerca de 85%.	- Motor Northstar XV12 [4], Cadillac Cien - configuração básica de um injetor de alta pressão de combustível no centro do pistão; Opel Signum [™] – com 3 válvulas por cilindro. O injetor e a vela de ignição estão montados mais verticalmente e próximos do centro da câmara de combustão.
DaimlerChrysler – M271 [72], [44], [47].	- Redução de 16-18% no consumo de combustível.	- Motor M271 turbo-comprimido, de 1.800cm ³ e 4 cilindros – Mercedes-Benz Série C e CLK 200 CGI – injeção direta de gasolina e duas tomadas de ar com abas ajustáveis
FSI – Audi	- Aumento de 15% na potência de saída; - Redução de até 15% no consumo de combustível.	- Motor 1,6 FSI – Audi A2 [50]. Potência de 81kW a 5.800rpm e torque máximo de 155N.m a 4.500rpm. Consumo de 16,9km/l; Motor 2,0 FSI [34] – aumento de 97kW para 112kW para o motor 2,0FSI.
DaimlerChrysler – Hemi Magnum [63].	- Combustão consistente e completa; - Redução de consumo de combustível de cerca de 8%.	- Hemi Magnum V8 de 5900cm ³ – Dodge RAM 2500 e 3500; Produz 257kW (345hp) a 510N.m a 4200rpm; Sistema de injeção com bobinas de alta potência.
BMW – N73 [72].	- Melhor processo de combustão; - Alta eficiência de combustível e bom desempenho do motor.	- Motor N73 – BMW modelo 760Li da série 7 – motor V12 de 6000cm ³ de duplo comando de válvulas no cabeçote; Desenvolve 327kW (438hp) e 331N.m. Sistema com pressão de injeção entre 3 e 10MPa.
Daihatsu [12], [94].	- Cerca de 2% a mais de potência e torque em comparação ao mesmo motor convencional.	- Motor EF-VD a gasolina, 3 cilindros em linha, 659cm ³ e injeção direta de combustível; - Potência de 44kW a 7.600rpm e torque de 65N.m a 4.00rpm, com taxa de compressão de 11:1 – veículos conceito UFE híbrido e de produção Mira.

Tabela VIII – Resumo dos Sistemas de Injeção Direta de Combustível em Motores Ciclo Otto.

2.2.3.3. Injeção Diesel

Avanços recentes na tecnologia de injeção de motores Diesel compreendem os Sistemas de Injetor Unitário e Conduto Comum (Common Rail).

O Sistema de Conduto Comum é ideal para aplicações em carros de passeio devido ao seu volume relativamente compacto e seu excelente desempenho [9]. Neste sistema, uma bomba de alta-pressão comprime o combustível até a pressão de injeção em um acumulador (conduto) que alimenta as câmaras de combustão. Este processo é independente da pressão de compressão, permitindo uma larga faixa de pressões de injeção, de 25MPa, em marcha-lenta, até 135MPa em rotação nominal. A quantidade de combustível injetado é determinada pela duração da abertura da válvula solenóide e a pressão do sistema [24].

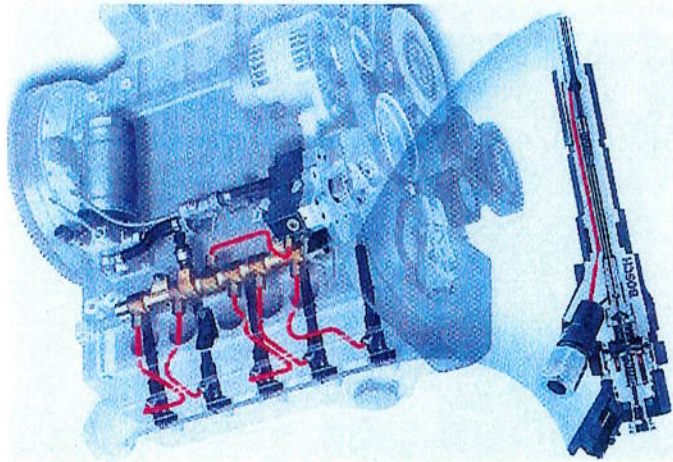


Figura 9 – Bico Injetor e Sistema de Segunda Geração de Conduto Comum da Bosch.

O sistema de Conduto Comum de certo fabricante é capaz de variar a pressão e os eventos de injeção em toda a extensão de carga e velocidades do motor e a segunda geração do sistema atinge até 160Mpa [9], [24]. Um fabricante europeu disponibilizou um motor turbo-diesel utilizando este sistema, garantindo um suprimento de pequenas partículas de combustível para melhorar a eficiência de combustão e aceleração e redução de emissões [81]. A terceira geração do sistema trabalha em pressões de 160MPa com injetores piezo-elétricos em-linha. Como resultado, pode-se reduzir até 20% das emissões, 3% do consumo de combustível e 3dB(A) do nível de ruído do motor, além de aumentar a potência disponível entre 5-7%. Novos desenvolvimentos deverão aumentar a pressão de injeção até 180MPa em 2005, buscando-se reduzir ainda mais emissões e ruídos, aumentando mais o torque em baixas rotações do motor e/ou velocidades do veículo. A empresa já trabalha no desenvolvimento de sua quarta geração do sistema de conduto comum, cuja característica principal é o uso de bocais de injetores variáveis [97], [99].

Uma companhia japonesa possui um sistema de condução comum integrado em seu sistema de gerenciamento de motores Diesel (EMS Diesel). Inclui um sistema de controle de razão de ar-combustível que utiliza recirculação dos gases de exaustão, um atuador para controlar o turbocompressor de geometria variável, um medidor de vazão, um sensor de ar-combustível e um sistema de pós-tratamento. Este sistema de condução comum atinge pressões de até 180MPa e utiliza 5 injeções em cada ciclo do motor para controlar a taxa de combustão. Antes da ignição, uma injeção-piloto e uma pré-injeção misturam o combustível com o ar para reduzir o atraso da ignição na injeção principal. As duas injeções anteriores contribuem para a redução de NO_x , ruído e vibração. Uma injeção secundária segue a principal para queimar o material particulado remanescente e, a seguir, uma injeção posterior permite que o processo no catalisador seja mais eficiente ao controlar a temperatura dos gases de exaustão. Além disso, produz hidrocarbonetos (HC) como agentes de redução de NO_x . O sistema de pós-tratamento do sistema inclui um filtro de particulado de Diesel (DPF) e sensores para detecção de NO_x , da pressão e da temperatura de exaustão [24].

Outras empresas trabalham com a tecnologia de condução comum para motores Diesel, uma companhia alemã utiliza injetores piezo-quartzo, controlados individualmente, que permitem sincronização acurada da injeção, para redução de emissões e melhor qualidade da marcha-lenta. Também utiliza múltiplas injeções, com duas pequenas pré-injeções, uma injeção principal e duas pequenas pós-injeções de combustível, reduzindo emissões e ruído [18], [24]. Este sistema é utilizado num motor de 2.000cm³, com pressão de injeção de 160Mpa. O motor produz 25% mais potência que o modelo antecessor, a 100kW, com o mesmo consumo de combustível, além de 35% mais torque, com 340N.m a 2.000rpm e 200N.m disponíveis a partir de 1.250rpm [89].

Outro sistema disponível de condução comum, denominado *Multec DCR 1400*, incorpora válvulas solenóides ao invés de piezo-elétricas, e válvulas de medição de admissão (IMV) no lugar de válvulas de controle de pressão, que permitem controle de pressão para dada quantidade de combustível, garantindo o menor gasto de energia. Além disso, foi eliminado o sistema de refrigeração do combustível em excesso, não utilizado no processo de injeção, já que este não é retornado aquecido

ou com alta pressão ao tanque de combustível. O sistema possui realimentação baseada em acelerômetros, que garantem que cada injetor distribua a quantidade correta de combustível na injeção-piloto, durante toda a vida do motor e, como consequência, mantêm baixos os níveis de ruídos. Por utilizar menor tensão de acionamento, os solenóides são mais compactos e inseridos nas carcaças dos injetores [24]. Algumas melhorias foram introduzidas nos sistemas de controle e no novo injetor, com solenóide de pressão-diferencial, que usa um novo desenho hidráulico combinado com refinamentos no bocal para prover um jato de combustível homogêneo e atomizado. Os resultados mostram que o novo sistema *Multec DCR 1600*, de pressão de injeção de 160MPa, é capaz de atender uma redução de até 35% na emissão de material particulado [103].

Em algumas soluções alternativas, adotou-se um sistema de conduito comum na injeção do combustível, com pressões de até 160MPa, providas por uma bomba acionada por engrenagem e controlada eletronicamente, que otimiza a pressão nos injetores individuais e que é menos dependente da velocidade do motor do que as bombas de linha. O sistema de injeção de combustível de conduito comum utiliza injeção piloto antes que a carga principal de combustível seja injetada, reduzindo o ruído em velocidades médias e baixas ao aliviar a pressão de combustão no cilindro. Além disso, permite partidas a frio como em motores a gasolina, em temperaturas externas de até -40°C [63], [72].

Diferentemente do sistema de conduito comum, uma outra solução utiliza Injetores Unitários (UI – *Unit Injectors*) com vantagens como maiores pressões e melhores características de torque em todo o espectro de rotações do motor. Em um destes sistemas, o combustível é distribuído na câmara de combustão em pressões maiores que 200MPa. Válvulas solenóides controlam a vazão da quantidade necessária de combustível, direcionando o combustível para uma linha de sobre-vazão, quando aberta, ou através dos orifícios de jatos do bocal do injetor, quando fechada. Essencialmente, o tempo de injeção é definido a partir do início da distribuição do combustível, enquanto o intervalo em que a válvula permanece fechada determina a quantidade de combustível [24].

A Tabela IX, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos Sistemas de Injeção em Motores com Ciclo Diesel.

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
UI - Injetores Unidades - Robert Bosch GmbH [24]	- Motores pressões e melhores características de torque; - Redução de NO _x , ruído e vibração;	- Combustível e distribuído na câmara de combustão em pressões maiores que 200MPa.
Sistema de Conduto Comum - Denso Corp. [24]	- Redução de NO _x , ruído e vibração; - Processo mais eficiente no catalisador.	- Sistema integrado ao gerenciamento de motores Diesel (EMS Diesel); - Pressão de injeção do sistema atinge até 180MPa e utiliza 5 injetores em cada ciclo do motor para controlar a taxa de combustão; - Motor MRZ-CD Mazda turbo-Diesel de 2.000cm ³ , 3ª geração da série RF de injeção direta, quatro cilindros em linha. Câmara de combustão de volume vertical expansivo, estratégia de injeção-piloto-múltipla. Potência de 100kW (134hp) a 3.500rpm e torque de 310N.m a 2.000rpm [56], [59]. - Pressão de injeção do sistema de segunda geração atinge até 160MPa - padrão em veículos da FIAT e DaimlerChrysler.
Sistema de Conduto Comum - Robert Bosch GmbH [9], [24], [97], [99].	- Melhor eficiência de combustão e aceleração. - Melhor qualidade da marcha-lenta e redução de emissões.	- Uso no veículo Volvo XC90 [81], e nos motores Diesel 1.600cm ³ de 16 válvulas, Duratorq TDCi da Ford e HDI da PSA Peugeot Citroën. Capaz de produzir até seis injetores por ciclo do motor, com duas injetores piloto para reduzir ruídos, duas injetores principais para reduzir emissões de NO _x e duas pós-injetores para melhorar a eficiência do filtro do sistema. - Injetores piezo-quartzo controlados individualmente, que permitem uma sincronização precisa da injeção; - Motor Duratorq de 1.400cm ³ (1.41TDCi turbo-Diesel, acordo cooperativo entre a Ford e a PSA Peugeot Citroën. Torque de 160N.m entre 1.750 e 2.500rpm e potência máxima de 50kW (67hp); - Motor de 2.000cm ³ da Ford e PSA Peugeot Citroën [89], com potência 25% maior que antecessor, a 100kW, e mesmo nível de consumo de combustível, 35% mais torque com 340N.m a 2.000rpm e 200N.m disponíveis a partir de 1.250rpm. Pressão de injeção de 160MPa.
Sistema de Conduto Comum VDO - Siemens [18], [24].	- Melhor qualidade da marcha-lenta e redução de emissões.	- Motores Diesel da Cummins, pressões de injeção de até 160MPa, providas por uma bomba acionada por engrenagem, controlada eletronicamente; torque de 752N.m a 1.400rpm e potência de 227kW (305hp) a 2.900rpm. O padrão atinge potência de 186kW (250hp) a 2.900rpm e torque de 624N.m a 1.400rpm - Dodge Ram 2500 e 3500 da DaimlerChrysler [63], [72].
Sistema de Conduto Comum - Cummins [63], [72].	- Redução do ruído em velocidades médias e baixas; - Permitem partidas a frio, em temperaturas externas mínimas de -40°C.	- Válvulas solenóides e de medição de admissão (IMV) para controle de pressão da quantidade de combustível; - Realimentação baseada em acelerômetros (APC), para que cada injetor distribua a quantidade correta de combustível na injeção-piloto; - DCR 1400 possui pressão de injeção de 1.400MPa; - DCR 1600 possui pressão de injeção de 1.600MPa e incorpora melhorias no sistema de controle e injetores.
Multec DCR- Delphi Automotive Systems [24], [103].	- Controle para o menor gasto de energia possível; - Baixos níveis de ruídos; - Não requer sistema de refrigeração do combustível; - Redução de até 35% de emissões de MP.	- Motor Diesel [72], [86] Diesel de 1.300cm ³ , 4 cilindros em linha, com injeção direta de Diesel, turbo-comprimido, Produz 51kW a 4.000rpm e 180N.m a 1.750rpm. Pressão de injeção a 140MPa.
Sistema de Conduto Comum - FIAT-GM Powertrain.	- Maior densidade de torque e potência por volume descolado: 41MW/m ³ e 144kN.m/m ³ . Uso em conjunto com turbocompressor.	

Tabela IX – Resumo dos Sistemas de Injeção de Diesel.

2.2.4. Transmissões

Como discutido no item 2.1.1, existem diversos tipos de transmissões, classificadas principalmente por sua automatização ou variação da relação de entrada e saída (CVTs). O custo é proporcional ao grau de automatização, bem como a capacidade de variar as razões de velocidades de entrada e saída. Os custos médios são da ordem de US\$900,00 para as transmissões manuais automatizadas, US\$1.100,00 para uma CVT e US\$1.600,00 para uma transmissão automática de 6 velocidades [85]. Estes valores guiam a aplicação de cada tipo para cada segmento de mercado, já que pode

representar um valor considerável no valor total do veículo, principalmente em veículos pequenos.

2.2.4.1. Transmissões Automáticas

A maioria das transmissões automáticas atualmente no mercado mundial, é de 4 velocidades, suficiente para a maioria das aplicações. Ultimamente, o uso de transmissões de 5 velocidades tem crescido, e o projeto e aplicação de transmissões de 6 e 7 velocidades estão em andamento. Segundo especialistas da indústria, devido a seu projeto compacto, as transmissões de 6 velocidades se tornaram a solução preferida para motores de instalação longitudinal [39].

Atualmente está em produção uma transmissão automática de 6 velocidades, a 6HP26, cujas principais vantagens são a redução de 13% em massa, o aumento de 2% a 5% na aceleração e uma economia de 5% a 7% de combustível. Quando comparada com seu modelo anterior de 5 velocidades, o novo modelo ainda é menor, devido ao conceito utilizado (Lepelletier). O modelo de 5 velocidades utiliza 3 trens de engrenagens e 6 elementos de embreagem, enquanto o modelo de 6 velocidades utiliza apenas um trem de engrenagens simples e um do tipo Ravigneaux, combinados com 5 elementos de embreagem. A transmissão foi projetada para veículos de alto desempenho com motores de 8 a 12 cilindros e torque de entrada máximo de 600N.m a 4.200rpm [32], [39], [42].

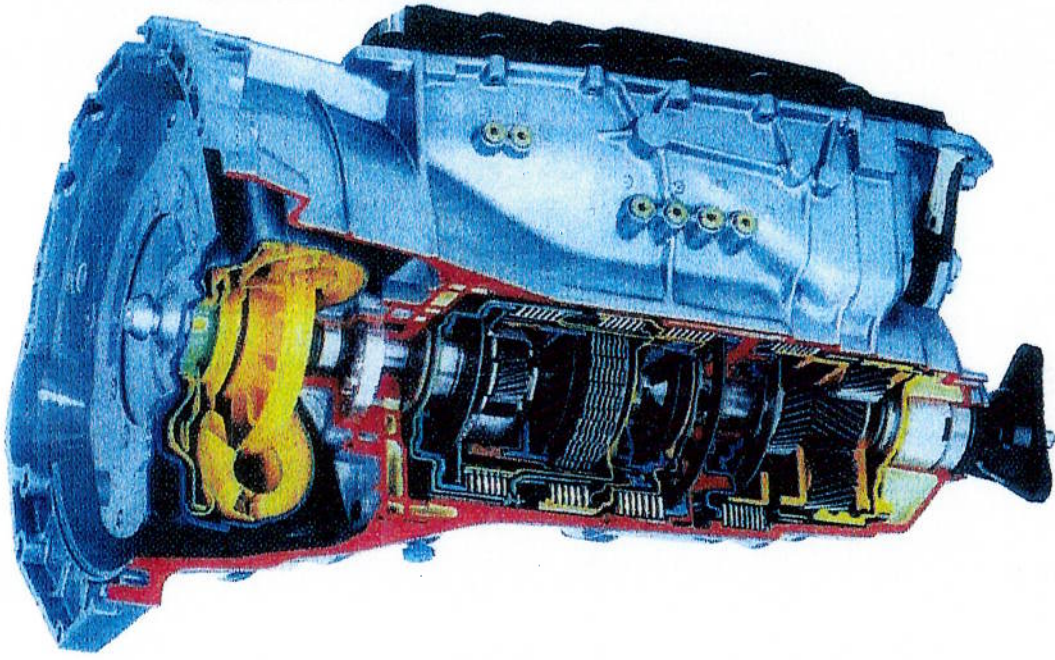


Figura 10 - Transmissão automática de 6 velocidades ZF 6HP26.

Uma montadora alemã desenvolveu um modelo de transmissão automática de 7 velocidades, ilustrado na Figura 11. Como diferença, esta transmissão apresenta embreagem de travamento do conversor de torque (“lockup”) operando em todas as velocidades, o que garante menor consumo de combustível ao eliminar o deslizamento do conversor de torque de acoplamento hidráulico, em todas as condições em que seja possível fixá-lo. Os resultados gerais da transmissão incluem redução de consumo de combustível em 0,6l/100km e redução no tempo de aceleração de 0 a 100km/h em 0,3s. Outros benefícios incluem maior rapidez na redução de marchas não sequenciais, passando 2 velocidades por vez (por exemplo, da 7ª para 5ª marcha, em um único comando) e dimensões e massa semelhantes aos modelos de 5 velocidades [96].

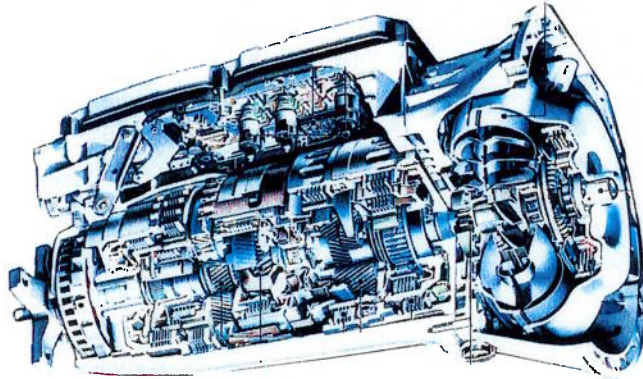


Figura 11 – Transmissão automática 7 velocidades 7G-Tronic da Mercedes-Benz.

2.2.4.2. Embreagem Eletrônica com acionamento automático

Nos veículos com transmissão manual, faz-se necessário o uso de embreagens para o desacoplamento do motor à entrada da caixa de transmissão, permitindo a troca das marchas e partida do motor com o veículo parado.

Nos últimos anos, alguns veículos incorporaram acionamento automático da embreagem, eliminando o pedal de acionamento. Com o veículo parado, a embreagem fica sempre desacoplada, ou seja, livre. Ao acionar-se o pedal do acelerador, aumentando a rotação do motor, a embreagem é progressivamente acoplada, permitindo o movimento do veículo. Ao acionar-se a alavanca de mudanças, a embreagem é imediatamente desacoplada, permitindo a troca de marchas e ao final da troca de marchas, a embreagem é reacoplada. No Brasil, as aplicações deste sistema foram descontinuadas, demonstrando sua pouca aceitação.

2.2.4.3. Transmissão Manual Automatizada

As transmissões manuais automatizadas (AMT) são transmissões manuais (mecânicas) que permitem trocas automáticas de marcha – além do modo manual – com desempenho, consumo de combustível e emissões comparáveis às transmissões manuais convencionais, mas com benefícios significativos em dimensões e custos, quando comparadas a um sistema de engrenagens planetárias conectadas a um conversor de torque – o conceito básico de uma transmissão automática. Foram desenvolvidas, pensando-se, em particular, no uso em veículos pequenos, contudo as opções disponíveis não garantem a qualidade de troca de marchas das transmissões automáticas convencionais. Novos sistemas utilizando tecnologia de dupla embreagem foram desenvolvidos para resolver este problema, mas representam desafios em custo, massa e dimensões, inviáveis para veículos pequenos [85].

Uma solução utiliza a caixa de mudanças manual automatizada, onde o motorista usa botões para controlar a mudança de marchas e, o sistema opera suavemente, reduzindo o consumo de combustível entre 4-8%, quando comparado a transmissões automáticas. Seu mapa de mudanças eletrônicas foi projetado para prevenir, tanto mudanças súbitas de marcha, como o aumento ou a redução indesejados de marchas. O sistema monitora continuamente o nível de potência necessário para aceleração, rolagem à velocidade constante ou desaceleração, selecionando automaticamente a estratégia de mudança adequada à situação, trabalhando suavemente e com mínima interrupção de potência [8].

A geração de AMTs atual, montados em sistemas convencionais, limita-se a adicionar sistemas eletro-hidráulicos que meramente reproduzem a ação do motorista. Existem pesquisas para desenvolver um sistema de atuação integrado à caixa de mudanças, além de projetar os componentes da transmissão especificamente para serem automatizados. O objetivo é desenvolver um sistema de transmissão que substitua com êxito as transmissões automáticas, reduzindo o consumo de combustível, além de disponibilizar uma gama maior de perfis de mudança de marcha, para se adequar a cada condição de trânsito [45].

Em outra vertente, esta sendo desenvolvida como prova conceitual, uma transmissão manual de seis velocidades, controlada eletronicamente, com o objetivo de suplantat as deficiências das AMTs convencionais, utilizando componentes convencionais e

aplicando as tecnologias atuais de manufatura – o principal elemento no controle de custos. A diferença particular desta solução reside no uso de forças axiais, que ocorrem naturalmente na transmissão, para facilitar a troca de marchas. Estas forças axiais são produzidas no acoplamento de dentes de engrenagens helicoidais que distanciam as engrenagens na direção do eixo das mesmas e servem para acionar as embreagens. Em relação aos pontos de mudanças, estes são definidos eletronicamente, com um programa controlando a ativação dos pistões do sistema. Espera-se que os benefícios do uso da transmissão, ao comparar-se com outras automáticas, incluam uma redução de 20% no consumo de combustível e consequente redução de emissões, melhor aceleração, maior velocidade final, redução do custo de manufatura entre 30-35%, mínima alteração nas plantas de produção atuais, redução de 30% em massa e trocas de marchas mais suaves [85].

2.2.4.4. Transmissões com Duas Embreagens

Embora a aceitação de transmissões automáticas no mercado europeu seja pequena em relação ao Japão, ou mais particularmente, aos EUA, esta tem aumentado com o advento de novas tecnologias. Embora, as transmissões automáticas com conversor de torque estejam se popularizando no mercado de veículos mais luxuosos, e as transmissões manuais com embreagem simples estão sendo automatizadas (AMT) para veículos esportivos e modelos econômicos, a introdução de transmissões de duas embreagens (DCT) automatizada está aumentando o interesse do mercado por transmissões não-manuais [95].

As DCTs têm sido utilizadas em competições esportivas, contudo, as trocas de marchas desconfortáveis, devido aos controles eletrônico e mecânico inadequados, as tornaram inaceitáveis para o uso em modelos de produção. Para suplantiar estes inconvenientes, foi desenvolvida uma transmissão que utiliza uma caixa automática de mudanças direta, com 6 velocidades e 2 embreagens a óleo DualTronic. O uso de embreagens a óleo foi chave para garantir trocas de marchas sem interrupção de transmissão de potência. Embora embreagens a óleo ou secas possam ser utilizadas em transmissões de duas embreagens, os fabricantes optaram pela primeira. Diferentemente da seca – que desgasta o material de fricção e requer eventual substituição – possui embreagens a óleo, banhadas em fluido de transmissão que as

lubrificada e refrigera, permitindo maior longevidade e qualidade consistente de trocas de marcha em um maior espectro de condições de operação [95].

A solução encontrada propicia economia de combustível, desempenho e facilidade de trocas de marcha, superiores a uma transmissão manual. Um veículo comercializado no mercado alemão com esta transmissão, percorre 9,8km/l de combustível, de acordo com o padrão 99/100/EG do grupo de emissões de veículos automotores (*Motor Vehicle Emissions Group* – MVEG), suplantando o modelo convencional que percorre 8,7km/l. Ele ainda acelera de 0 a 100km/h em apenas 6,0s, contra 6,4s do modelo com transmissão manual. No modo automático esportivo, as unidades de controle do motor e da transmissão atavam uma forma de ajuste de velocidade entre o veículo e o motor, utilizando a velocidade da roda – por meio do ABS, o sistema de freio anti-bloqueante – e eliminam trocas de marchas em meio às curvas [95].

O sistema de duas embreagens com óleo, ajustadas hidraulicamente, possuem grande capacidade de suportar cargas térmicas e melhor regulação térmica que os modelos secos. Uma destas embreagens atende às engrenagens ímpares, mais a ré, e a outra atende às engrenagens pares – formando, basicamente, duas transmissões paralelas. Uma consequência do gerenciamento elaborado das embreagens é a ausência de interrupção de transmissão de potência em redução de marchas, em contraste com uma transmissão manual automatizada típica. A eficiência, próxima a de uma transmissão manual, é possível através de um controle eletro-mecânico lógico-avangado das duas embreagens a óleo, dos dois eixos de entrada e dos dois eixos de saída. Os controles eletrônico e hidráulico precisos permitem que a próxima marcha mais alta esteja constantemente engatada e pronta para ativação. A ativação acontece ao liberar uma embreagem e acionar a outra, correspondente à próxima marcha. O processo completo de troca de marchas ocorre entre 0,3 e 0,4s [95].

Os materiais de fricção projetados para aumentar o desempenho enquanto reduzem o tempo de sincronização, e o uso de duas embreagens que podem ser operadas independentemente, permitiram acomodar os requisitos de livre escolha do número de marchas. O desenvolvimento e otimização da troca de marchas sem interrupção da força de tração entre as engrenagens pares, bem como entre pares e ímpares é significativa, já que permite mudar diretamente da 6ª para a 2ª marcha, por exemplo –

o que é impossível para as automáticas convencionais. Diferentemente das transmissões manuais, uma unidade de mudança de marcha (trabulador) é alocada para as engrenagens 1 e 3, e outro para as engrenagens 2 e 4, e em conjunto com um elaborado projeto de sincronização, resulta tempos de troca de marchas curtos [95]. Uma solução semelhante de outra companhia, reduz o consumo de combustível em 10%, quando comparado com transmissões automáticas convencionais, apresentando o mesmo conforto de troca de marchas. A transmissão é composta por duas embreagens com controle computadorizado de mudanças de marchas – uma embreagem aciona as marchas 1ª, 3ª, 5ª e ré, enquanto a outra opera as marchas 2ª, 4ª, 6ª e engrenagem de segurança em achives [90].

2.2.4.5. Transmissões Continuamente Variáveis – CVT

Há diversas soluções para os conceitos existentes e dois tipos básicos de CVTs [51]. O mais popular em aplicações automotivas é do tipo correia-e-polia, já utilizada em “scooters” e motos para neve, mostrado na Figura 12. Neste tipo de CVT [82], a variação das razões entre entrada e saída é executada por duas metades separadas de polias, que se aproximam se ou afastam para aumentar ou diminuir o raio de uma correa que as percorre. Nos últimos anos, aumentou a aceitação das CVTs, principalmente, devido ao menor consumo de combustível em tráfego urbano, em comparação com transmissões manuais, onde há redução na eficiência de trabalho do motor e há necessidade de trocas mais frequentes de marcha.

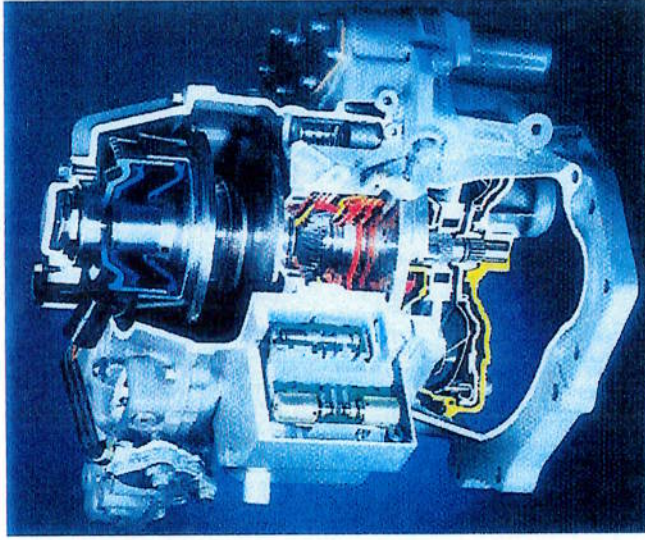


Figura 12 – CVT tipo Correia e Polia.

Em 1999, apareceu a Multitronic, que apresentava correntes de aço do tipo tracionada, ao invés do tipo com elementos de aço do tipo empurrada, com correia de borracha, introduzida em 1958. Este desenvolvimento inclui um sensor hidráulico de torque e grandes câmaras de pressão para ajustar as pressões de fechamento das metades das polias do CVT, enquanto pequenos pistões das câmaras movem as metades das polias para as alterações das razões de transmissão. O sensor de torque de fechamento permite à CVT transferir até 300N.m de torque num motor V6 de 3.000cm³, e prover uma amplitude de variação de razão de transmissão de até 6 vezes, sem deslizamento entre as uniões da corrente e as polias [82].

Em uma configuração alternativa utilizou-se também uma correia de aço para a solução Van Doorne e atingindo-se torque máximo de 335N.m. Utilizando uma rede de comunicação de alta velocidade denominada CAN (*Controller Area Network*), para transmitir as informações do trem de potência e dos sensores, tornando mais rápidos os cálculos de torque e a ação dos cilindros de fechamento na CVT [82].

O outro tipo de CVT transfere potência através de superfícies metálicas curvas, sendo mais conhecido o sistema toroidal. Charles Hunt inventou o CVT toroidal em 1877 e, a então denominada transmissão de acionamento por fricção, foi primeiro empregada em veículos na década de 1920. Problemas com durabilidade e capacidade limitada de transmitir potência eliminaram, temporariamente, as possibilidades do uso de CVTs, até que melhores materiais e processos de manufatura pudessem ser desenvolvidos [25].

Em 2001, foi desenvolvido um sistema semi-toroidal, que utiliza rolamentos para transferir a potência entre os discos de entrada e saída, capaz de transmitir alto torque. A variação da razão de redução depende do ângulo dos rolamentos, que determina onde ocorrerá o contato com o disco de entrada, acionado pelo motor, e o disco acionado, no lado da saída da transmissão. A diferença entre as CVTs semi-toroidais e toroidais está no desenho do semi-toróide que tem uma geometria semi-estérica mais eficiente que a geometria esférica entre os discos de entrada e saída. A geometria semi-estérica reduz o ângulo do rolamento, reduzindo as perdas de rotação ao compara-se com um desenho toroidal estérico [25], [48].

Neste caso, ilustrado na Figura 13, utiliza-se um óleo especial de altíssima viscosidade, que se torna quase sólido quando submetido a altas pressões nos pontos de contato. A força é transmitida através de uma camada de filme lubrificante elástico-hidrodinâmico, com espessura de 0,001mm (1µm), ao invés de contato metal-metal, reduzindo o desgaste. Além disso, desenvolveu-se uma tecnologia de aço extremamente purificado, o que reduz as inclusões não-metálicas no material, permitindo suportar as altas tensões envolvidas. Métodos de metalurgia, desenvolvida por especialistas em rolamentos, foram aplicados, visando reduzir a contaminação por partículas resultantes do desgaste por atrito das superfícies [48].



Figura 13 - Elementos de Transmissão de CVT Toroidal Semi-esférica.

Uma variação da CVT é a IVT, ilustrada na Figura 14, definida como transmissão infinitamente variável, que difere da primeira por utilizar sistema de controle de torque. Esta alternativa reduz em 20% o consumo de combustível nos veículos em que foi testada, em comparação ao sistema de transmissão usual destes veículos [76].



Figura 14 - Esquema da IVT da Torotrak.

Como na CVT, o IVT é capaz de prover todas as velocidades desde a ré, passando pela nula, até altas velocidades à frente, sem a necessidade de embreagens ou conversores de torque. O sistema utiliza um conjunto de engrenagens epicíclicas para iniciar o movimento e possui um variador de dois discos toroidais de entrada, conectados a dois discos de saída através de seis rolotes, cuja variação angular em relação às faces dos discos ocasiona a variação de velocidade entre os discos de entrada e saída. A inclinação dos rolotes é realizada por um sistema hidráulico [76].

A Tabela X, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de transmissão vistos anteriormente.

Sistema	Vantagens	Informações Técnicas
IVT – Série 3 – Torotrak [76]	- Redução do consumo de combustível em até 20%.	- Conjunto de engrenagens epicíclicas variador de discos toroidais de entrada e saída com rolotes intermediários.
Transmissões com (DCT)	- Redução no consumo de combustível em cerca de 10%, em comparação a transmissões manuais convencionais; - Redução de 6,7% no tempo de aceleração de 0 a 100km/h.	- Volkswagen DSG [95], com capacidade de torque máximo de 350N.m, reservatório de óleo de 6,4l e massa de 90kg; - DaimlerChrysler EMAT [90] – Composta por duas embreagens com controle computadorizado de mudanças de marchas; - Massa, custo e dimensões maiores do que na transmissão manual.
CVT Ford Ecotronic [90]	- Redução de 8-10% do consumo de combustível, quando comparada a uma transmissão automática de quatro velocidades; - Redução de 13% em massa e de 5% a 7% de consumo de combustível; - Aumento de 2-5% na aceleração.	- Transmissão de seis velocidades, 6HP26 – veículo BMW série 7, Jaguar S e XJ e Audi A8; - Aplicação em veículos de alto desempenho com motores de 8 a 12 cilindros e torque de entrada máximo de 600Nm a 4.200rpm
EST – transmissão de mudanças eletrônicas – Ford [8]	- Operação suave e redução do consumo entre 4-8%.	- Durashift EST - veículo conceitual Ford Fusion.
Transmissão Automática 7 velocidades [96]	- Redução de consumo de combustível em 0,6/100km e redução no tempo de aceleração de 0 a 100km/h em 0,3s; - Maior rapidez na redução de marchas não sequenciais, passando duas marchas por vez.	- Mercedes-Benz 7G-Tronic, a ser utilizada nos veículos E 500, S 430, S 500, CL 500 e SL 500; - Embreagem de travamento do conversor de torque ("lockup") operando em todas as velocidades. Dimensões e massa semelhantes aos modelos da Mercedes de cinco velocidades; - Maior e mais pesada que o modelo automático de seis velocidades.
AMT – transmissão manual automatizada	- Reduz o consumo de combustível; - Substituição de transmissão automática.	- Sistema de atuação integrado à caixa de mudanças.
Graziano [45]	- Produto e manual automatizada	
CVT tipo correia-e-polia – Van Doorne da Nissan [82]	- Capaz de transferir até 335N.m de torque, sem escorregamento; - Amplitude de variação de razão de transmissão de até 5,4 vezes.	- CVT com de corrente de aço do tipo Van Doorne; - Rede de comunicação de alta velocidade para menores tempos de resposta no controle de fechamento das polias.
CVT – tipo correia-e-polia – Multitronic da LUK [82]	- Capaz de transferir até 300N.m de torque, sem escorregamento; - Amplitude de variação de razão de transmissão de até seis vezes.	- CVT com de corrente de aço do tipo tracionada; - Sensor hidráulico de torque e grandes câmaras de pressão para ajustar as pressões de fechamento das polias.
CVT semi-toroidal Powertrons – NSK Ltd. [25], [48]	- Não é necessário o uso de sistemas de embreagens; - Capacidade de transmitir alto torque;	- Aplicação, desde 1999, nos Nissan Cedric e Gloria.
Transmissão Semi-automática – Ricardo [13]	- Redução do tempo de troca de marchas em 75%	- Transmissão semi-automática - Audi R8; - Mudança pneumática de mudança de marchas em apenas 25ms.
CVT tipo correia-e-polia – Toyota, Honda e Fuji Heavy Industries.	- Não é necessário o uso de sistemas de embreagens.	- CVT avançada de polia-e-correia de aço, combinada com conversor de torque de alta eficiência Toyota ES? [12]; - Aplicação: Honda Civic híbrido [12]; - Aplicação: Veículo conceitual Subaru HM-01 [12].

Tabela X – Resumo dos Sistemas de Transmissão.

2.3. Veículos com Propulsão Híbrida

Como discutido anteriormente, os sistemas híbridos possuem tantos componentes de veículos convencionais como de propulsão alternativa. A seguir, discutem-se os subsistemas específicos, utilizados em veículos de propulsão híbrida.

2.3.1. Alternadores, Geradores e Motores de Partida.

A ideia de utilizar-se um motor elétrico tanto para dar a partida no motor a combustão interna (MCI), quanto gerar potência elétrica não é nova, contudo, os benefícios reais que justificam o alto custo de um alternador e um motor de partida combinados tornaram-se aparentes quando utilizado em um sistema de propulsão híbrida [126]. Este sistema permite uma redução substancial do consumo de combustível através de uma variedade de métodos, bem como melhoria do desempenho do MCI e redução de emissões, como será visto a seguir. Porém, devido às restrições de volume nos eixos, às condições térmicas difíceis e às dinâmicas do MCI, esta configuração requer atenção mais cuidadosa nas considerações de projeto [132].

O alternador/motor de partida integrado (ISG) é consideravelmente mais potente e possui mais funções que o motor de partida e o alternador tradicionais. Como um motor elétrico de partida de alto torque, pode acionar o MCI e acelerá-lo até 1.300rpm em 300ms, antes mesmo que o combustível seja injetado nos cilindros. Isto permite o desligamento do MCI quando o veículo está parado, uma das funções-chaves de economia de combustível de um veículo híbrido, reiniciando-o sem atraso perceptível, de acordo com a demanda. Além disso, provê acréscimo de potência ao veículo, melhorando o desempenho geral [126].

Como um gerador de alta potência, o ISG pode recarregar a bateria quando o MCI está operando, e recapturar a energia cinética do veículo via frenagem regenerativa, uma segunda função híbrida chave.

Os pontos negativos desta solução incluem:

- dificuldades de alinhamento na montagem do motor, estator e rotor que devem estar perfeitamente alinhados, dadas as pequenas tolerâncias desejáveis de fabricação e montagem;

- modificação da carga do motor ou transmissão ou uso de espaçadores para conter o conjunto do ISG:

- aumento de esforços no eixo de manivelas e efeitos de massa adicional em balanço do rotor, como "giro do volante", descentralização e inclinação do rotor, causando redução no afastamento radial e consequente redução na eficiência elétrica, além de contato destrutivo entre rotor e estator. Como solução, pode-se aumentar a rigidez do eixo ou adicionar um rolamento de apoio, o que encarece o projeto total [126].

Nos sistemas ISG, os motores elétricos de ímãs permanentes têm sido mais comumente selecionados. Esta escolha pode ser entendida pela perspectiva de eficiência e densidade de energia. A eficiência é importante para o veículo como um todo, mas também afeta o projeto do motor elétrico, já que menor calor será dissipado numa máquina elétrica mais eficiente. Além disso, a alta densidade de energia das máquinas de ímãs permanentes auxilia no requisito de limitação de volume destes sistemas [132].

Um fabricante alemão de componentes veiculares desenvolveu um sistema integrado de motor de partida e gerador, tipo ISG. O sistema substitui o motor de partida, volante e alternador convencionais, em veículos acionados por MCI, em funções de partida do MCI e recarga da bateria. Serve para aportar potência suplementar para veículos de pequeno porte, sendo montado entre o MCI e a transmissão, conectado diretamente no eixo do virabrequim. Neste caso, a potência máxima de saída do gerador é de 8kW (11hp) com eficiência superior a 80% em toda a faixa de velocidades [14].

Um sistema alternativo apresenta características de grande separação (1-1,5mm) entre o rotor e o estator, o que permite ao ISG ser montado diretamente no eixo de manivelas. Ímãs permanentes de NdFeB permitem torques de até 400 N.m e potência de 12kW. Na função de motor de partida, este sistema consome de 100 a 300A de corrente, e sua aplicação se limita a veículos equipados com sistemas de 42V [26].

Outra solução adotada pretende solucionar o problema de consumo de combustível dos veículos comerciais, sem afetar seu desempenho através de um ISG de 42V que oferece capacidade de reduzir o consumo ao desligar o motor em descidas longas e

marcha lenta, aplicação antecipada do bloqueio do conversor de torque, com aplicação suave do torque, frenagem regenerativa e auxílio elétrico para arranque, além de melhorar a geração de potência para os sistemas embarcados [54].

Conhece-se ainda um sistema de motor de partida rápida, também chamado de “reparada” (*restarter*) para funções de parada e partida. Utiliza a tecnologia de relutância chaveada, que pode operar tanto em 12V como em 42V, ou qualquer outra tensão necessária, permitindo aplicação em qualquer arquitetura elétrica do veículo. Esta tecnologia substitui os alternadores tradicionais e diferentemente dos ISG que são montados na parte posterior do conjunto motor, o sistema de partida rápida é montado na sua parte frontal, onde não há problema de espaço para acomodar o sistema. O sistema garante os mesmos níveis de consumo de combustível que outros sistemas e permite reiniciar o motor em apenas 300ms [39].

2.3.2. Motor Elétrico Integrado à Roda

Um sistema de controle integrado à roda, foi desenvolvido recentemente, sendo composto por um motor e um sistema de controle para veículos elétricos e híbridos. Todos os controles eletrônicos estão contidos no sistema, incluindo ABS, acionado eletronicamente, e o controle de tração. O sistema é capaz de aplicar o torque total instantaneamente em cada roda [15], [84].

A aplicação é extremamente interessante já que elimina a necessidade de sistemas de transmissão adicional entre o motor as rodas que aciona.

2.3.3. Tecnologia de Armazenamento de Energia

O desenvolvimento de baterias de tração de alto desempenho é um problema chave para a futura aceitação de veículos híbridos e elétricos no mercado. O sistema de Hidreto Metálico de Níquel (NiMH) é, ao lado do sistema de Ion-Lítio (Li-Ion), o mais promissor sistema de baterias para veículos elétricos. Estas tecnologias são preferidas à tecnologia tradicional de baterias chumbo-ácidas (PbA) e Níquel-Cádmio (Ni-Cd) por razões de densidade de energia, densidade de potência e potência de saída em baixo estado de carga [115], [132].

As baterias de Ions de Lítio e NiMH possuem maior potência específica que as de tecnologia de Chumbo-Ácidas (PbA), significando que elas resultarão em pacotes de baterias muito mais leves e compactos para iguais especificações. A alta potência

específica também significa que as baterias de Íons de Lítio e NiMH são mais aptas a aceitar os altos níveis de pico de potência associados com a frenagem regenerativa, que é, frequentemente, um fator de aumento do tamanho e o peso das baterias Chumbo-ácidas. Adicionalmente, o tempo de vida útil – em termos de calendário ou ciclo de vida – é outro fator decisivo para a eficácia do custo de um sistema de bateria, especialmente em propulsão veicular. A estabilidade do ciclo é praticamente determinada pelas condições de carga e descarga aplicadas. Altas correntes de carga, especialmente com alto fator de sobrecarga, são tão danosas para o ciclo de vida como uma descarga exaustiva com altas correntes de descarga. Ciclos de operação cíclica em temperatura ambiente alta ($>35^{\circ}\text{C}$) ou baixa ($<10^{\circ}\text{C}$) podem ter efeitos igualmente danosos [115].

As baterias NiMH já estão disponíveis mundialmente e, devido a sua robustez e alta flexibilidade de projeto, o sistema de bateria NiMH é um candidato ideal para a maioria das aplicações, incluindo-se desde baterias de pequenas células a grandes baterias para tração. Atualmente, as baterias NiMH são de 4 a 5 vezes mais caras que as Chumbo-Ácidas, mas são mais adequadas sob o ponto de vista do balanceamento inerente interno de carga, embora haja características térmicas de corrente de fuga que requerem sistemas de refrigeração, além de demonstrarem severa degradação de potência de saída em baixas temperaturas. Além disso, o desempenho das baterias NiMH é pobre em baixas temperaturas, sendo que um pacote de baterias NiMH deve ter volume significativamente maior para atender requisitos de partida a frio do motor. Contudo, devido a sua grande capacidade de potência em carga e descarga, o sistema NiMH é tido como o sistema de baterias ótimo para veículos híbridos, sendo que os valores alcançados por estes sistemas são 45Wh/kg para energia específica e 1000W/kg para potência específica [120].

A tecnologia Li-Ion tem tido um crescimento sem precedente, e é considerada agora como a tecnologia de bateria recarregável mais promissora para o futuro. Não apenas no setor de pequenas baterias, onde as baterias do tipo Li-Ion já ganharam uma parcela substancial do mercado, mas também em aplicações como em veículos elétricos, levantamento de carga e sistemas aeroespaciais, esta tecnologia está em desenvolvimento intenso. A característica mais proeminente do sistema de baterias

Li-Ion está em sua alta densidade de energia volumétrica e gravimétrica. Embora ainda em estágio de desenvolvimento, grandes células prismáticas de Li-Ion alcançaram energias específicas de mais de 120Wh/kg e densidades de energia de mais de 300Wh/l. Há um potencial previsto de aumento adicional de mais de 30% para densidade específica e de mais de 60% para densidade de energia, nos próximos anos. O sistema trabalha em uma faixa ampla de temperatura (de -20 a +60°C) e pode executar mais de 1200 ciclos de carga e descarga. Contudo, requerem maior monitoração que as NiMH devido às indesejáveis características de sobrecarga e sobre-temperatura [15].

Um desenvolvimento das baterias de Ions-Lítio é uma nova bateria com tecnologia lítio-polímero. Mais eficiente que as baterias PbA e NiMH, permite carga e descarga mais rápidas devido aos ions de lítio que transitam entre o catodo e anodo, em lugar de reações químicas, além de não se aquecer durante a carga. Isto garante uma vida útil mais longa à bateria, potência específica de 1400W/kg, energia específica de 47W.h/kg, além de reduzir o tamanho e peso à cerca da metade das convencionais. O nome "polímero" refere-se às camadas plásticas que separam as placas: polímeros porosos embebidos com eletrólito, resultando em uma bateria que não verte líquido corrosivo [27].

Outra alternativa tecnológica é o ultracapacitor. O conceito de um capacitor eletroquímico de alta densidade de energia é relativamente novo, com as primeiras patentes emitidas em 1957 e o início de comercialização em 1969. Os primeiros dispositivos construídos possuíam baixa tensão e potência muito baixa. Os primeiros capacitores eletroquímicos utilizavam partículas de carbono comprimido e um eletrólito aquoso, resultando em uma célula de voltagem de 1V. Embora os capacitores sejam tradicionalmente projetados como dispositivos de alta potência, os primeiros ultracapacitores foram orientados para aplicações de baixa potência, utilizados como substitutos de pacotes de baterias, com tamanho reduzido e vida útil mais longa [13].

O primeiro ultracapacitor de alta potência foi desenvolvido a partir do início da década de 1980 para aplicações militares. O dispositivo usava eletrodos de Óxido de Rutênio/Tântalo e ácido sulfúrico como eletrólito, tinha baixa resistência e alta

capacidade de potência ($>10\text{kW/kg}$), porém, uma densidade de energia de cerca de apenas 1 Wh/kg [113].

Todavia, estes dispositivos deram início a estudos, em 1990, pelo DOE (Departamento de Energia dos EUA) para aumentar a densidade de energia de ultracapacitores para pelo menos 5Wh/kg , enquanto mantinham a densidade de potência de 1kW/kg . Simulações em veículos indicaram que tais dispositivos poderiam ser usados para substituir as baterias em veículos elétricos. Desde o fim do Programa de Desenvolvimento de Ultracapacitor do DOE, trabalhos de desenvolvimento de ultracapacitores também foram iniciados tanto na Europa quanto no Japão buscando, essencialmente, os mesmos objetivos originais: energia específica de 5Wh/kg e potência específica de $500\text{-}1.000\text{W/kg}$ [113].

No curto espaço de tempo de pesquisas e desenvolvimento de capacitores de alta potência e alta densidade de energia, um progresso rápido foi alcançado no aumento do desempenho. Estudos sobre as melhorias que podem ser esperadas no futuro, em relação ao desempenho e características dos materiais do eletrodo necessárias para atingi-las, mostram a relação direta entre desempenho do ultracapacitor, as características dos materiais utilizados em sua fabricação e nas dimensões internas dos capacitores [113].

A densidade de energia apresenta forte dependência na carga do material, capacitância específica e tensão das células e dependência mais fraca na espessura do eletrodo. A resistência é primariamente dependente da espessura do eletrodo e resistividade do eletrólito. Projeções de densidade de energia, baseadas na combinação das características descritas acima, indicam que há grande possibilidade de alcançar densidades de energia similares às de baterias com a continuidade do desenvolvimento de materiais para ultracapacitores [113].

Como resultado das pesquisas, uma montadora japonesa desenvolveu um sistema híbrido e com células de combustível, de 7 a 10% mais eficiente em energia que os sistemas de baterias de NiMH, que além disso, dispensa os sistemas de regulação e distribuição de alta tensão. O sistema, porém, ainda não foi exaustivamente testado em condições reais para comprovação de sua durabilidade e confiabilidade [12], [35], [83].

A Tabela XI, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos sistemas de veículos híbridos, vistos nos tópicos acima.

Sistema	Vantagens	Desvantagens	Informações Técnicas
ISG – gerador/motor-departida integrado	- Substitui o motor de partida convencional e o volante do motor;	- Montagem na parte posterior do motor, onde há problema de espaço para acomodar o sistema.	- Pico de potência de saída do gerador e de 8kW (11hp).
- Siemens Automotive [14];	- Eficiência superior a 80% em toda a gama de velocidades;		
ISG Dynastar –	- Permite a montagem do ISG diretamente no eixo de manivelas.	- Montagem na parte posterior do motor, onde há problema de espaço para acomodar o sistema.	- Grande separação (1-1,5mm) entre o rotor e o estator;
Sachs [26];			- Imãs permanentes de NdFeB – torques de até 400 N.m e potência de 12kW.
ISG – Delphi Corp. [54];	- Redução do consumo;	- Informação não disponível.	- Sistema de 42V com capacidade de desligar o motor em descidas longas e marcha lenta.
Motor de Partida – Dana [39];	- Montagem na parte frontal do motor, onde há mais espaço para acomodar o sistema;	- Informação não disponível.	- Retenção chaveada. Pode operar em 12V, 42V, ou qualquer tensão necessária. Aplicação em qualquer arquitetura elétrica de veículo.
E-Wheel – motor elétrico integrado à roda – Technologies M4 [15], [84];	- Capacidade de aplicar torque total independentemente;	- Informação não disponível.	- Composto por um motor e um sistema de controle para veículos elétricos e híbridos totalmente integrado no sistema;
Sistema de baterias Hidretos Metálicos de Niquel (NiMH) [15], [132], [146];	- Grande capacidade de potência para carga e descarga;	- Complexidade na carga da bateria;	- Energia específica de 45Wh/kg;
- Alta flexibilidade para projetos e robustez;	- Alta densidade de energia volumétrica e gravimétrica.	- Requer maior monitoração de controle devido às características de sobrecarga e sobre-temperatura;	- Potência específica de 1,000W/kg;
Sistema de baterias Ions de Lítio (Li-Ion) [115], [132], [146];	- Fonte de potência ideal para as próximas gerações de veículos híbridos;	- Informação não disponível.	- Energia específica de 47Wh/kg;
Bateria lítio-polímero – Delphi Automotive Systems [27];	- Mais eficiente que as baterias ácidas de chumbo e híbridas de níquel-metal, permite carga e descarga mais rápidas;		- Potência específica de 1,400W/kg, energia anodo, em lugar de reações químicas;
Ultracondutores – Honda [12], [35], [83];	- Liberação instantânea de picos de energia aos motores;	- Longos testes de durabilidade e confiabilidade não realizados.	- Densidade de energia de 3,9Wh/kg e de potência de 1,500W/kg;

Tabela XI – Resumo dos Sistemas de Veículos Híbridos.

2.3.4. Veículos de Passeio Híbridos

O sistema de propulsão híbrida *IMA* (“*Integrated Motor Assist*”) ou de Assistência de Motor Elétrico Integrado, ilustrado na Figura 15, é aplicado a vários veículos de produção e de produção de um fabricante japonês, sendo constituído basicamente por um motor de combustão interna, assistido por um motor elétrico para auxiliar na

aceleração do veículo, combinado com um CVT do tipo polia-e-correia de aço [12], [19]. A arquitetura básica é um avanço do sistema de um veículo anterior, o primeiro veículo híbrido de produção em escala da montadora [28], [160].

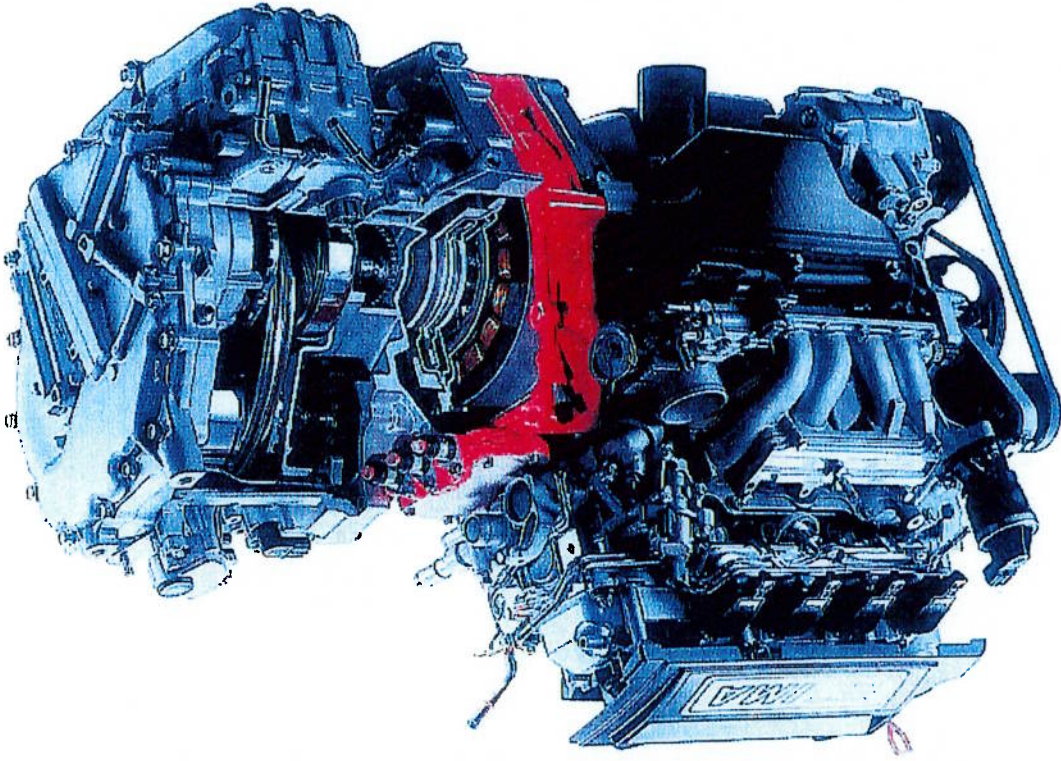


Figura 15 – Sistema IMA de Propulsão Híbrida da Honda.

Um veículo conceito, da mesma montadora, é um dos modelos que emprega o sistema IMA. Utiliza um motor de combustão experimental V6 com comando de válvula quádruplo e 3.500cm³, assistido por um motor elétrico que aciona as rodas do eixo traseiro, montados atrás da cabine, mas antes deste eixo. Além destes, mais dois motores elétricos são montados em cada uma das rodas dianteiras. A energia elétrica é armazenada em ultracapacitores ao invés de baterias. O veículo parte com a potência elétrica fornecida pelos dois motores dianteiros, e caso o capacitor fique sem carga, o motor a combustão entra rapidamente em ação. Uma vez em movimento, o motor de combustão aciona as rodas traseiras. Em acelerações rápidas ou curvas fechadas, o motor integrado gera energia aos motores dianteiros, adicionando torque nas rodas, que é dividido otimamente entre as rodas esquerda e direita para velocidade e estabilidade. Em última análise, é um sistema de acionamento de todas as rodas – não o primeiro do tipo – e um passo adiante, devido

aos dois motores de acionamento das rodas dianteiras. Para situações como curvas em declive, os motores dianteiros ainda funcionam como freios elétricos, ao mesmo tempo em que regeneram energia a ser armazenada no capacitor [12].

Ainda, a mesma montadora produz um veículo que é o primeiro híbrido com MCI e motor elétrico de assistência integrado (IC-IMA – *internal combustion* – “*integrated motor assist*”) de grande volume de produção. Este IMA é mais potente que o da geração anterior. O MCI do modelo 2003 apresenta quatro cilindros em linha, volume de 1.300cm³, rotação horária, queima limpa IDSI (*intelligent Dual Spark Ignition* – ignição de centelha dupla inteligente), é construído em alumínio e emprega um comando simples de válvulas, acionado por corrente, agindo em duas válvulas por cilindro. Um pequeno motor CC (corrente contínua) sem escovas, de ímãs permanentes e 10kW, assiste o MCI em acelerações rápidas e também auxilia a amortecer as vibrações geradas durante desacelerações com desativação de cilindros do motor (ver 2.2.2.3). O armazenamento de energia é feito em baterias NiMH com células cilíndricas. O consumo indicado pelo fabricante é 45% menor no ciclo urbano japonês, que o modelo convencional com motor 1.500cm³ [12], [19], [28], [105], [147], [148].

Diferentemente do modelo adotado acima, outro fabricante japonês optou por um sistema que permite a operação do veículo tanto com gasolina, eletrificada ou uma combinação de ambos. A fração da potência total fornecida por cada sistema, dependendo da velocidade e carga, é controlada de modo a garantir a operação de maior eficiência do veículo. A variação do acionamento deste modelo híbrido é virtualmente imperceptível aos ocupantes do veículo, graças a um dispositivo de divisão de potência, que utiliza um conjunto de engrenagens planetárias para enviar a potência do motor diretamente às rodas dianteiras e a um gerador elétrico que alimenta o motor elétrico e/ou baterias. Este veículo pode caracterizar-se como um sistema paralelo ou uma combinação de série e paralelo, de acordo com sua utilização. No sistema em série, o MCI aciona um gerador que alimenta os motores elétricos que tracionam o veículo. Já no sistema paralelo, o veículo é acionado pelo motor de elétrico em conjunto com o MCI [16], [19].

O primeiro modelo híbrido desta montadora a utilizar a opção série/paralelo combinada, foi produzido em 1997 e foi o primeiro veículo híbrido em produção à venda nos EUA, com 4 ou 5 lugares, além de espaço para bagagem. Combina um MCI com um motor elétrico para propulsão, atendendo à legislação americana de SULEV (*Super Ultra Low Emissions Vehicle* – veículo de emissões super-ultra baixas). A potência primária deste modelo é provida por um MCI a gasolina, todo em alumínio, 1.500cm³, com pico de potência de 53kW (70hp) e de torque de 111N.m a 4200rpm. O motor elétrico utiliza ímãs permanentes, requer pouca manutenção e produz potência máxima de 33kW entre 1040-5600rpm e torque de 350N.m entre 0-400rpm, com tensão de trabalho de 300V. O veículo ainda combina um sistema de freios regenerativos “by-wire”, que permite a recuperação da energia da frenagem para as baterias [16], [19], [28], [116], [121], [123].

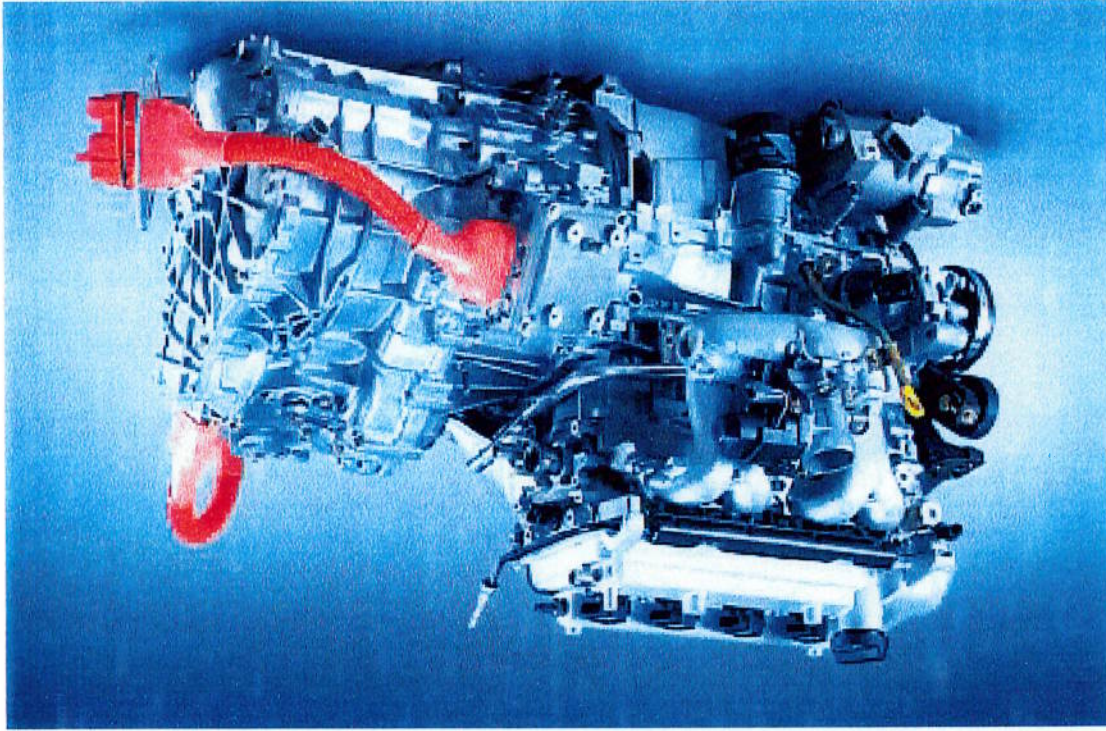


Figura 16 – Sistema Híbrido da Toyota – Hybrid Synergy Drive.

Em 2003, foi lançada a versão atualizada e revista do modelo anterior, que se diferencia por um novo sistema de propulsão denominado “Hybrid Synergy Drive” (Propulsor Híbrido de Sinergia), apresentado na Figura 16, que atinge 50% mais potência no motor elétrico de 50kW entre 1.200 e 1.540rpm, operando a 500V devido a um novo sistema de conversão de potência de alta tensão. Em compensação,

o sistema de baterias é menor em volume, massa de 45kg, e número de módulos (28 módulos contra os 38 anteriores), além de melhorar em 35% a densidade de fluxo de energia. O torque de saída do motor elétrico também é maior, com 400N.m entre 0 e 1.200rpm. O MCI é praticamente o mesmo, com ciclo de Atkinson e tecnologia de controle de sincronização de válvulas variável com maior atraso no fechamento da válvula de admissão, mas com alteração na potência de saída para 57kW a 5.000rpm, o torque permanece inalterado. O resultado final é um veículo com consumo de combustível 15% menor que o antecessor, com média de consumo de 23,5km/l, e emissões 30% menor que o modelo anterior, com quase 90% menos de emissões no escapamento que um veículo convencional equivalente, garantindo a certificação SULEV e AT-PZEV (veículo de emissão parcialmente nula – tecnologia avançada) de acordo com a legislação vigente na Califórnia e em estados dos EUA que adotam os mesmos padrões [91], [101], [105], [107], [153], [154].

Para atingir o PZEV, o veículo deve atender padrões de emissões nulas evaporativas do combustível, passar por testes de demonstração de durabilidade de 240.000km e oferecer garantia estendida para o sistema de emissões. O prefixo AT significa que o veículo contém tecnologias reconhecidas pelo Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia (CARB) como direcionadas para emissões nulas. Como diferencial, o modelo do veículo oferecido no mercado japonês ainda permite o funcionamento em modo exclusivamente elétrico em velocidades de até 55km/h, por algumas centenas de metros [107].

Uma outra variante do sistema anterior, foi projetado para auxiliar no início do movimento do veículo, durante a qual o motor de combustão é desligado para reduzir emissões e economizar combustível. Quando o pedal do freio é liberado, o motor elétrico aciona o motor a combustão interna até próximo da rotação de marcha lenta, gerando torque suficiente para sua partida. Uma bomba acionada eletricamente mantém o nível de pressão de fluido da transmissão para a transmissão do torque de acionamento. Ao pressionar-se o pedal do acelerador, o motor de combustão é ligado pelo moto-gerador e alimenta a bateria [19].

Ainda outra alternativa do mesmo sistema híbrido utiliza um sistema paralelo de propulsão híbrido, formado por um sistema de propulsão dianteiro, composto por um MCI e um sistema moto-gerador em paralelo, conectados por um mecanismo de divisão/transferência de torque do tipo engrenagem planetária de duplo pinhão, CVT de correia-e-polia controlada eletronicamente, dispositivo de alternância de potência e embreagens duplas. Além disso, existe um conjunto propulsor das rodas traseiras, que possui seu próprio moto-gerador. Em acelerações bruscas, o MCI pode auxiliar os motores elétricos, acionando todas as rodas e melhorando o desempenho. Neste caso, o sistema híbrido define, alterna e combina as três fontes de potência, empregando um ou ambos moto-geradores para recarregar o pacote compacto de baterias de NiMH. O motor elétrico de propulsão traseira é empregado quando o sistema percebe, através do pedal do acelerador, o desejo do motorista de uma partida rápida ou para aumentar a estabilidade do veículo em condições de superfície adversas, através do sistema de gerenciamento de dinâmica do veículo [19], [52], [55], [137], [138], [140], [142].

Uma montadora americana também abordou o conceito híbrido. Neste caso, o motor de combustão interna de 2.300cm³, otimizado para utilizar hidrogênio como combustível, com pistões de alta compressão, injetores de combustível especiais, sistema de ignição de bobina-na-vela, acelerador eletrônico e novo 'software' de gerenciamento do motor. A parte híbrida é o sistema de transmissão, cujo conversor de torque é substituído por um motor elétrico de alta tensão e duas embreagens hidráulicas. O motor elétrico realiza as funções de volante, motor de partida, alternador e motor de tração híbrida. O sistema híbrido opera os motores independentemente ou em conjunto para potência extra. A função de freio regenerativo é armazenar energia em pacotes de baterias de 300V. O motor de combustão interna é desligado automaticamente quando o veículo para por períodos mais longos, sendo religado em menos de 300ms, quando o acelerador é acionado pelo condutor [75], [90].

Uma tecnologia alternativas desenvolvida é um veículo Diesel híbrido de 42V. O objetivo é produzir um veículo cujo consumo de combustível seja reduzido em 20% em relação ao mesmo modelo convencional, e tenha emissões com níveis 50%

inferiores ao padrão Euro IV de emissões de escape. Um veículo utilizado para demonstração, integrando alguns sistemas de 42V, utiliza um motor Diesel pequeno, que é a base do sistema de potência. O MCI de 1.200cm³, com quatro cilindros e 74kW de torque máximo, reduz o consumo de combustível em 20% quando comparado a um motor Diesel convencional de 2.000cm³, além de uma redução de 30%, na massa, que compensa a massa adicional associada a veículos híbridos [11], [40], [77].

O projeto especial da unidade integrada permite que se possa aportar torque adicional no trem de potência em toda a extensão de rotações do motor. Na aceleração, a unidade é utilizada como motor elétrico, para atingir a mesma potência de um motor convencional de 2.000cm³. A unidade integrada de motor de partida/alternador de alta capacidade de saída ainda pode regenerar parte da energia cinética liberada na frenagem do veículo, transformando-a em energia elétrica. Ao pressionar-se o pedal do freio, um sinal eletrônico é enviado à unidade integrada, que armazena a energia convertida nas baterias. A capacidade máxima da unidade em modo gerador é de 6kW, três vezes maior que a convencional. Quando o motorista para o veículo por mais de 1,5s, o motor é automaticamente desligado, reduzindo o consumo e emissões. Engatando-se a marcha novamente, o motor silenciosa e automaticamente é religado, utilizando a unidade integrada em modo motor. O tempo de partida é de apenas 0,3s, em contraste ao 1s do motor de partida convencional, reduzindo ainda mais as emissões [11], [40], [77].

Um sistema adicional é responsável por gerenciar e otimizar a temperatura do motor de acordo com as condições de uso. Este sistema é capaz de reduzir o tempo de aquecimento do motor em 50% [11], [40].

O resultado é um motor de combustão interna com menor desgaste e emissões e consumo de combustível reduzido em até 5% com pequenas cargas para o motor. Um veículo utilizado em testes reduziu 28% o consumo de combustível, dos quais 20% são devidos a redução no volume do motor, 5% pelo sistema de energia regenerada na frenagem e os outros 3% graças ao sistema de desligamento e partida rápida do motor [77].

A Tabela XII, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos veículos híbridos de passageiros.

Veículo	Vantagens	Informações Técnicas
Plus 2004 - Toyota emissões SULEV e AT-PZEV; [91], [101], [105], [107], [153], [154]	- Atende à legislação americana de emissões super-ultra baixas. - Consumo de combustível 15% menor e emissões 30% menores que os modelos Plus anterior.	- Sistema THS - Sistema Híbrido Toyota II, com novo sistema "Hybrid Synergy Drive" (Propulsor Híbrido de Sinergia), MCI a gasolina, de 1,500cm ³ , com potência de 58kW e torque de 111N.m a 4,200rpm; - Motor elétrico de ímãs-permanentes, potência de 50kW e torque de 400N.m entre 0-1,200rpm. Opera a 500V; - Combina sistema de freios regenerativos "by-wire", que permite a recuperação da energia da frenagem para as baterias.
Plus - Toyota [19], [28], [199], [28], [152], [55], [137], [138], [140], [142]	- Atende à legislação americana de emissões super-ultra baixas. - Consumo de 18km/l no ciclo urbano japonês modo-10/15, atende a norma americana - veículo de emissão ultra baixa. - Apresenta 20% de economia de combustível quando comparado ao mesmo veículo com propulsão convencional.	- Sistema THS-C de propulsão híbrido paralela. Sistema motor-gerador em paralelo conectado por um mecanismo de divisão/transmissão de torque do tipo engrenagem planetária de duplo pinhão, CVT de correia-e-pólia controlada eletronicamente e embreagens duplas. Tração elétrica nas quatro rodas; - MCI tipo 2AZ-FXE, versão com ciclo de Atkinson, 2,400cm ³ , quatro cilindros em linha, que produz 96kW a 5,600rpm e 190N.m a 4,000rpm; - Motor-gerador dianteiro de 216V, potência de 33kW e torque de 110N.m. O motor-gerador traseiro é de 216V, com potência de 18kW e 108N.m de torque. - MCI V6, 3,500cm ³ e comando de válvulas quadruplo e motor elétrico acionam as rodas traseiras em paralelo; - Dois motores elétricos acionam cada uma das rodas dianteiras; - Sistema de ultracapacitores de armazenamento de energia.
Crown - Toyota [19], [136]	- Sistema híbrido para auxílio na fase do início do movimento do veículo, na qual o motor é desligado para reduzir emissões e o consumo de combustível. - Tração otimizada e melhor estabilidade do veículo durante pilotagem brusca ou em condições de superfície adversas.	- Sistema THS-M - Sistema Híbrido Toyota - Moderado; - MCI a gasolina, em alumínio, 3,000cm ³ , aciona as rodas traseiras, através de transmissão automática de quatro velocidades; - Moto-aliemador/gerador elétrico de 36V, potência de 3kW, trifásico de corrente alternada, conectado ao motor por uma corrente; - Sistema de armazenamento de energia de baterias de 36V.
Subaru HM-01 [12]	- Tração otimizada e melhor estabilidade do veículo durante pilotagem brusca ou em condições de superfície adversas.	- Sistema híbrido avançado tração 4x4. MCI de 4 cilindro, com 660cm ³ , combinado com uma CVT, aciona as rodas dianteiras; - Motor elétrico aciona as rodas traseiras; - O veículo possui arquitetura elétrica de 42V/14V com baterias ácidas de chumbo de 32V e 12V. Permite migração para sistemas de 42V.
Modelo U - Ford. [75]	- Sistema híbrido opera os motores em conjunto ou de forma independente para potência extra.	- MCI de 2,300cm ³ , otimizado para hidrogênio, com pistões de alta compressão, injetores de combustível especiais, sistema de ignição de bobina-na-vela, acelerador eletrônico e novo software de gerenciamento do motor; - Motor elétrico com funções de volante, motor de partida, alternador e motor de tração híbrida. Frenagem regenerativa armazena energia em baterias de 300V.
Suzuki Twin.	- Consumo estimado de 34km/l, o melhor no ciclo urbano japonês.	- MCI a gasolina com 658cm ³ , 3 cilindros em linha, 12 válvulas, comando DOHC [93]. Potência máxima de 32kW a 5,500rpm e torque de 57N.m a 3,500rpm; - Moto-gerador elétrico, trifásico, síncrono, de corrente alternada, de ímãs permanentes com 5,0kW entre 1,500 e 4,500rpm e 32N.m entre 0 e 1,500rpm; - A transmissão é um modelo automático de 4 velocidades; - Baterias ácidas de chumbo com tensão de saída de 192V.
Inteligente Motor Generator - Motor Inteligente [11], [40], [77]	- Redução de 28% no consumo de combustível; - Emissões 50% inferiores aos níveis Euro IV de emissão de escape; - Redução de 50% no tempo de aquecimento do motor.	- Parceria técnica Valeo e Ricardo para desenvolvimento de veículo Diesel híbrido de 42V. Veículo de testes Opel Astra. Integra sistemas de 42V com MCI Diesel HSDI de 4 cilindros com 744kW (100hp) de saída, 1,200cm ³ ; - Sistema integrado de motor de partida/alternador de alta eficiência montado diretamente no eixo de manivelas, entre o motor e a transmissão. O tempo de partida do motor de apenas 0,3s, reduzindo emissões. Modo gerador com 6kW; - Sistema THEMIS (Thermal Management Intelligent System - Sistema Inteligente de Gerenciamento Térmico) responsável por gerenciar e otimizar a temperatura do motor de acordo com as condições de uso.

Tabela XII - Resumo dos Veículos Híbridos de Passageiros.

2.3.5. Veículos Comerciais Híbridos

As companhias automobilísticas americanas iniciaram há 2 anos pesquisas com veículos comerciais leves (pick-ups) para aplicar a tecnologia híbrida. O principal problema reside na maior potência requerida por estes modelos para transportar carga útil em longos trechos de acive. Os módulos atuais de armazenamento de energia ainda são insuficientes para suprir a demanda destes veículos.

Uma destas companhias, pressionada pela necessidade de redução de consumo de combustível em veículos comerciais (camionetes e SUVs), está desenvolvendo um sistema de acionamento híbrido-elétrico para modelos de camionetes grandes, equipadas com MCI V8, que permitirá uma economia de 10-15% de combustível, em relação aos mesmos modelos convencionais [10], [79], [149], [150].

Um de seus protótipos híbrido da arquitetura anterior emprega um MCI convencional a gasolina V8 de 5.300cm³, com potência nominal de 213kW (285hp). O alternador e o motor de partida convencionais foram substituídos por um motor elétrico de 4,8kW (6,4hp), integrado ao volante do MCI. Este motor integrado de partida tem capacidade instantânea de partida/parada e recupera energia durante a desaceleração. O alternador provê energia para um conjunto de baterias chumbo-ácidas de 42V, escolhidas por razões de custo e comprovada durabilidade, que suporta os sistemas elétricos. Os primeiros modelos desta montadora a serem comercializados serão do tipo híbrido-paralelo que compreende um motor elétrico de indução de 14kW entre o motor de combustão interna (MCI) e transmissão, funcionando como motor de partida/gerador, para melhorar o desempenho de parada e reinicialização do motor ("stop-start") e frenagem regenerativa [104].

Outro fabricante americano possui outras alternativas que enfatizam a sistemática modular usando uma caixa de transferência (transaxle). A caixa de transferência de acionamento do eixo traseiro abrange um motor elétrico de imãs permanentes de 65kW, um gerador de 28kW, um controlador eletrônico e um conjunto de engrenagens planetárias. O MCI utilizado no híbrido é uma variante com ciclo de Atkinson do motor a gasolina de quatro cilindros em linha de 2.000cm³. Um conjunto de baterias de hidretos metálicos de níquel de 300V armazena energia recuperada durante a desaceleração e aciona o motor elétrico. O veículo atende às normas

SULEV e PZEV de emissões e estará disponível no mercado americano na segunda metade de 2004 [28], [62], [67], [91], [100].

Os benefícios do veículo acima incluem aceleração semelhante ao de um modelo com MCI V6, todavia, apresenta consumo de combustível entre 15-17km/l em tráfego urbano [104].

Também fabricantes europeus estão se preocupando com os sistemas híbridos. Um deles desenvolveu um utilitário esportivo com MCI V8 de 4.400cm³, que pode desenvolver até 1.000N.m de torque a 1.000rpm. Sozinho, o motor elétrico instalado entre o MCI e o sistema de transmissão, pode produzir 660N.m e 65kW, e, tão logo o MCI tenha atingido velocidades de operação médias, podendo desenvolver potência suficiente, o motor elétrico é desligado. O motor elétrico é acionado por, no máximo, seis segundos, antes do MCI atingir 3.000rpm. A estimativa é de que o tempo de aceleração do veículo híbrido pode ser reduzido entre 30% e 40% e o consumo geral de combustível em 15%, quando comparado com um veículo convencional. Ultracapacitores, que podem armazenar até 200W/h de energia, alimentam o motor elétrico protótipo assíncrono com 65kW disponíveis por 5 a 6 segundos. Um sistema de frenagem regenerativa é aplicado para prover energia para o motor e a rede de sistemas eletrônicos a bordo. Não há estimativa para o custo adicional deste sistema caso seja aplicado em produção, e no veículo protótipo, as massas adicionais são cerca de 65kg para os capacitores, 45kg para o motor elétrico e 60kg para o inversor [102].

Uma montadora japonesa investiga modelos utilitários esportivos que podem chegar ao mercado em 2006. Ambos utilizam o mesmo sistema de propulsão com um MCI V6 de 3.300cm³ que emprega o ciclo Atkinson, com comando duplo de válvulas no cabeçote (DOHC), tecnologia de comando variável de válvulas. Estes veículos terão a mesma arquitetura do sistema híbrido utilizado em veículos de passeio da montadora, contudo haverá alterações no conceito, com a adição de um motor elétrico acionando o eixo traseiro para permitir tração 4x4. Especificações ainda não foram divulgadas, mas segundo dados preliminares, o sistema de propulsão gasolina-elétrico deverá produzir 150kW de potência, e, adicionado ao propulsor do eixo traseiro, produzirá uma potência total de cerca de 200kW. O consumo de

combustível de tráfego combinado urbano/estrada do padrão EPA (Environmental Protection Agency) dos EUA será melhor que a média de 11,8km/l dos modelos sedas compactos disponíveis no mercado americano [100], [106].

A Tabela XIII, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos veículos comerciais híbridos.

Veículo	Vantagens	Informações Técnicas
GM 800 - GMC [10], [79], [149], [150], [160].	- Economia de 10-15% em camiones grandes, sem comprometer a capacidade de transporte de carga ou tração.	- Sistema híbrido denominado FlexPower, com um motor elétrico de indução de 14kW entre o motor MCI e transmissão, funcionado como motor de partida/gerador. - Funções de parada e reinicialização do motor ("stop-start") em semáforos e frenagem regenerativa.
Chevrolet Silverado [10], [149], [150], [160].	- Motor integrado de partida; - Capacidade de partida/parada e regeneração de energia durante a desaceleração.	- Motor convencional GM V8 de 5,300cm ³ com potência de 213kW (285hp); - Motor elétrico de 4,8kW (6,4hp), integrado ao volante do motor; - Sistema de armazenamento formado por um conjunto de baterias chumbo-ácidas de 42V.
Saturn VUE 2006 [79], [104], [160].	- Eficiência cidade/estrada até 50% maior, quando comparado com o mesmo modelo convencional.	- Sistema avançado de dois motores elétricos de 20kW e controles eletrônicos.
SUP - Mitsubishi [79].	- Tração integral 4x4 elétrica, disponível de acordo com a demanda.	- Motor de combustão interna a gasolina de injeção direta e sistema de motor elétrico híbrido, montado à dianteira do veículo, acionando as rodas dianteiras (GDI-ISA); - Motores elétricos duplos acionando as rodas traseiras, de acordo com a demanda do veículo; - Todos os motores elétricos regeneram energia elétrica durante a desaceleração, armazenada em bateria de íons de lítio compacta de 36V, numa arquitetura de 42V.
Escape HEV e Explorer HEV - Ford [28], [62], [67], [91], [100], [104], [160].	- Atendem às normas SULEV e PZEV de emissões; - Aceleração semelhante ao de um modelo com MCI V6; - Consumo de combustível entre 15-17km/l em tráfego urbano.	- Sistema modular que enfatiza a caixa de transmissão (transaxle) com tecnologias desenvolvidas pela Volvo e Aisin AW; - Caixa de transferência de acionamento do eixo traseiro com motor elétrico integrado de ímãs permanentes de 65kW; - Gerador de 28kW, um controlador eletrônico e um conjunto de engrenagens planetárias; - MCI de 2,000cm ³ ; Zetec a gasolina no Escape híbrido com ciclo de Atkinson, quatro cilindros em linha; - Conjunto de baterias de hidretos metálicos de níquel de 300V armazena energia regenerada durante a desaceleração e aciona o motor elétrico.
BMW X5 híbrida moderada [102].	- Redução no tempo de aceleração entre 30% e 40%; - Redução de 15% no consumo geral de combustível.	- BMW X5 de testes com motor V8 de 4,400cm ³ , que pode desenvolver até 1,000N.m de torque a 1,000rpm; - O motor elétrico sozinho, instalado entre o motor e o sistema de transmissão, pode produzir 660N.m e 65kW; - Ultracapacitores, que podem armazenar até 200Wh/h de energia, alimentam o protótipo do motor elétrico assíncrono com 65kW por 5 a 6 segundos; - Sistema de frenagem regenerativa prove energia para o motor e a rede de sistemas eletrônicos a bordo; - Penalidades de massa são cerca de 65kg para os capacitores, 45kg para o motor elétrico e 60kg para o inversor, num total de 170kg.
Toyota Highlander e Lexus RX400h [100], [106], [160].	- Consumo de combustível de tráfego combinado urbano/estrada do padrão EPA melhor modelos sedas compactos.	- Motor de combustão interna V6, de 3,300cm ³ , com ciclo Atkinson, (DOHC), tecnologia de comando variável de válvulas (VVT); - Arquitetura "Hybrid Synergy Drive" (HSD), com um motor elétrico adicional para o eixo traseiro, permitindo tração 4x4; - Sistema de propulsão deverá produzir 150kW de potência, adicionado ao propulsor do eixo traseiro de 50kW, com total de 200kW.

Tabela XIII - Resumo Veículos Híbridos Comerciais.

2.4. Veículos com Propulsão Puramente Elétrica

2.4.1. Veículos Elétricos

A crescente preocupação com questões ambientais estimulou a indústria automotiva a experimentar métodos alternativos de propulsão, para reduzir o consumo de combustível e emissões causadoras de poluição. Os veículos puramente elétricos (VE – veículos elétricos) são o exemplo de uma solução frequentemente considerada a mais ambientalista e foram os primeiros a serem investigados. É uma solução muito elegante, já que demonstrou que uma fonte de potência constante – que é exatamente do que se trata o motor elétrico – provê a melhor fonte de tração. As características excelentes de torque-velocidade das máquinas elétricas solucionam as discrepâncias entre a tração solicitada e as características do motor de combustão interna convencional, resultando em alta eficiência total [128], [141].

Contudo, os aspectos negativos como limitações da armazenagem de energia nas baterias, alto tempo de carga e autonomia limitada do veículo têm ocasionado obstáculos comerciais a esta abordagem. O desenvolvimento de VEs foi incentivado primariamente pelos requerimentos do CARB (*California Air Resources Board*), através do qual, os fabricantes venderiam uma porcentagem mínima de ZEV (veículos de emissão nula) do seu total de vendas de veículos no estado. Os fabricantes desenvolveram VEs como requisitado, mas sustentaram que a solução era inviável, face às limitações tecnológicas disponíveis no momento. Nos poucos anos desde que os VEs estão disponíveis, as vendas têm sido fracas, dando crédito à posição sustentada pelas montadoras. Porém, apesar das predições negativas, não se ofereceu de imediato uma solução alternativa e prática ao VE puro [128].

Uma montadora americana disponibilizou, em 1997, um veículo de produção, totalmente elétrico que transporta até 2 pessoas, com um volume de bagagem de 0,27m³, apresentando o inconveniente da bateria demorar até 8 horas para ser completamente carregada. Em 2000, uma segunda geração foi disponibilizada, com melhoria da capacidade da bateria regular e outra bateria opcional de níquel híbrida com maior capacidade. Possui autonomia de até 150km, com bateria convencional, ou 200km com a bateria opcional. A potência do motor é de 102kW entre 7.000 e 13.000rpm [3].

A Tabela XIV, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos veículos elétricos.

Veículo	Vantagens	Desvantagens	Informações Técnicas
EV1 - GM [3]	- Autonomia de até 150km, com bateria convencional, ou 200km com a bateria opcional.	- Bateria demora até 8 horas para ser completamente carregada.	- Potência do motor de 102kW (134hp) entre 7.000 e 13.000rpm; - Transporta até 2 pessoas, com volume de bagagem de 0,27m ³ (270l).
Cove - Suzuki [12]	- Pode ser carregado em casa através do sistema de gás natural.	- Informação não disponível.	- Armazenamento de energia em pacote de baterias de ions de lítio; - Unidade de recarga residencial de células de combustível carrega a bateria, utilizando gás natural e um reformador, produz hidrogênio para as células de combustível.

Tabela XIV – Resumo de Veículos Elétricos.

Veículos com célula de combustível são aqueles que ao invés de um motor a combustão interna possuem um sistema que converte o combustível diretamente em energia elétrica, sem emissões, que por sua vez alimenta sistemas elétricos de propulsão para mover o veículo. Este sistema de geração, denominado células de combustível, consiste de uma pilha de células de troca gasosa, onde ions de hidrogênio do combustível reagem com gás oxigênio do ar para produzir água, calor e eletricidade. Os ions de hidrogênio podem ser obtidos diretamente de gás hidrogênio abastecido no veículo ou de combustíveis compostos de hidrocarbonetos, através de reformadores de combustíveis. O sistema de células de combustível mais comumente utilizado em automóveis é o do tipo de membrana de troca de Prtons (PEM – *Proton Exchange Membrane*) e a energia elétrica gerada pode ser utilizada diretamente nos motores e sistemas elétricos do veículo ou armazenada para consumo posterior [35], [143].

Um fabricante japonês possui aplicações, onde a parte híbrida do veículos com célula de combustível, inclui uma bateria de armazenamento secundária. Neste caso, a célula de combustível produz energia para armazenamento em baterias (de hidretos metálicos de níquel) e não diretamente para os motores, como em outros veículos de células de combustível [83]. Um veículo protótipo utiliza hidrogênio comprimido armazenado em tanques a 34,5MPa. As células de combustível são do tipo Membrana de Troca de Prtons (PEM), com potência de saída de 90kW. Os motores de imãs permanentes produzem 81kW de potência de saída e torque de 263N.m [60], [73]. O mais recente modelo disponível deste fabricante utiliza uma tecnologia de

célula de combustível de 5ª geração e o hidrogênio utilizado é obtido a partir de “hidrocarbonetos limpos”. Nesta versão, a célula de combustível é equipado com um reformador¹ de combustível de hidrocarbonetos limpo (uma variante mais limpa de gasolina, ainda não disponível comercialmente) que separa o hidrogênio, alimentando as pilhas de células de combustível [12], [19]. Um modelo de veículo de célula de combustível híbrido desta montadora é o primeiro do tipo em produção, disponível para ser adquirido por meio de “leasing” por clientes restritos como o governo ou universidades locais desde dezembro de 2002, apenas em localidades restritas no Japão e EUA. Trata-se de um veículo de tração dianteira, com um motor síncrono CA, potência de saída de 80kW e torque de saída de 260N.m [83].

Um fabricante americano desenvolveu um veículo de célula de combustível elétrico-híbrido que usa metanol como fonte de hidrogênio. Para propulsão puramente elétrica, este SUV utiliza dois motores elétricos de tração de corrente alternada de 83kW cada, acionando os eixos dianteiros e traseiros. O motor de célula de combustível consiste em um sistema reformador de metanol e pilhas de membranas de troca de prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane*). Ar comprimido é fornecido ao catodo da pilha como oxidante e hidrogênio umidificado pressurizado, proveniente da célula de combustível é provido ao anodo. O sistema de processamento de combustíveis com carbono é o de reforma de vapor de combustível para metanol. Este reformador utiliza um processo de endotérmico, que otimiza a baixa energia de ativação requerida pelo metanol e provê altas concentrações de gás hidrogênio. Um pacote de baterias de hidretos metálicos de níquel (NiMH) suplementa a energia fornecida pelo motor de célula de combustível aos motores elétricos para potência instantânea. O resultado é um veículo com desempenho semelhante ao veículo convencional com motor a gasolina, sendo que a autonomia equivalente é de 10km/l, quase o dobro do convencional [53].

A mesma montadora, desenvolveu um outro veículo, cuja inovação consiste no tipo de fonte de combustível utilizada. O hidreto bórico de sódio (NaBH₄) utilizado como fonte de hidrogênio armazena mais energia que hidrocarbonetos similares e sua

¹ Reformador – equipamento capaz de separar hidrogênio de hidrocarbonetos para uso em células de combustível.

solução aquosa pode ser armazenada em tanques plásticos leves, em condições de temperatura e pressão ambiente. Para extrair o hidrogênio do combustível, utiliza-se um sistema catalisador de hidrogênio. O veículo utiliza um sistema de regeneração de energia para o pacote de baterias de íons de lítio que provê 40kW para os motores AC de 35kW [46], [60].

Uma outra montadora americana apresentou o mais recente conceito de veículos com tecnologia de célula de combustível em 2002. O veículo, ilustrado na Figura 17, utiliza todos os sistemas desenvolvidos nos últimos anos pela empresa e seus parceiros, revolucionando processos de manufatura, tecnologia e modelo de negócios automotivos. Incorpora tecnologia "x-by-wire" de controle eletrônico de direção, frenagem e aceleração. Todo o sistema de controle e propulsão restringe-se a um chassi em forma de prancha, com as rodas integradas. Neste chassi, encontram-se as pilhas de células de combustível, tanque de armazenamento de hidrogênio, sistemas de controle "x-by-wire", climático e suspensão, além dos motores elétricos integrados às rodas. Com este conceito é possível o uso de diferentes modelos, para diversas aplicações, como sedãs, cupês e vans [23], [35], [61].

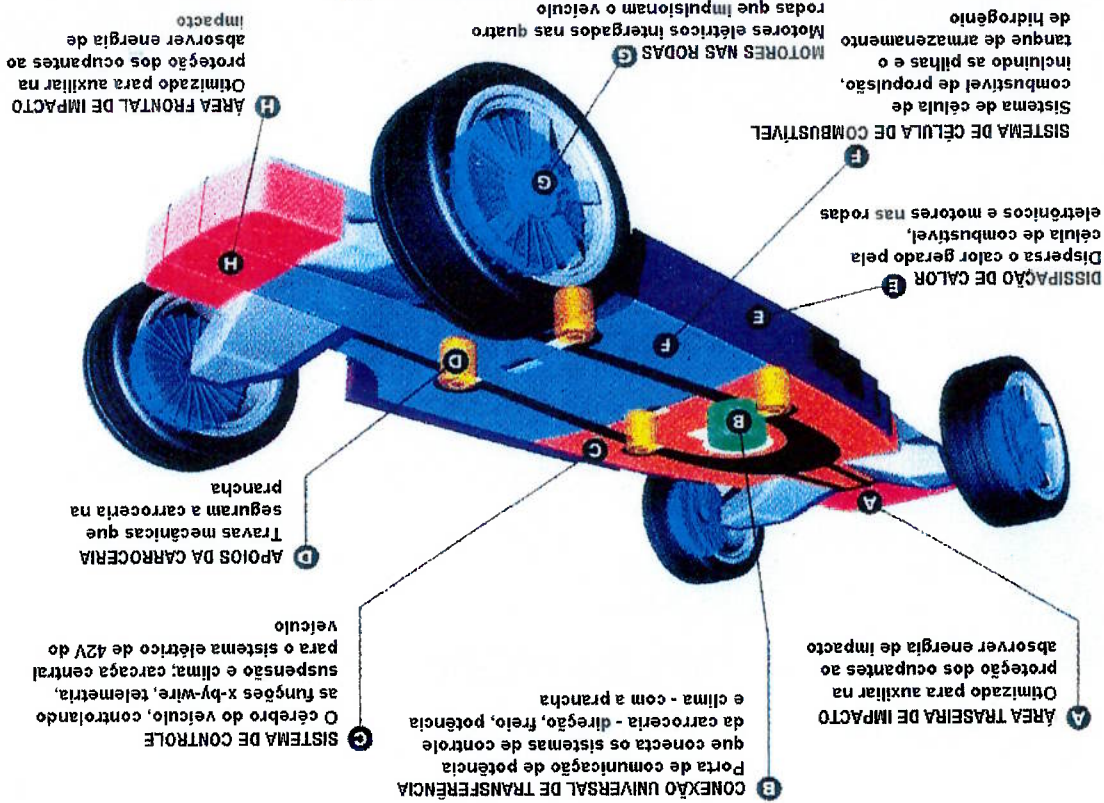


Figura 17 - Prancha do AUTONOMY da GM

Uma das variações apresentadas pela montadora anterior é um veículo conceito com características de coupê e dimensões e massa comparáveis aos modelos de luxo atuais. As pilhas de célula de combustível operam em pressões entre 1,5-2,7bar e possuem densidade de potência de 1,60kW/l, podendo produzir continuamente 94kW, com picos de até 129kW. O hidrogênio utilizado no processo é armazenado na forma gasosa comprimida em três cilindros de 350bar, com capacidade de 2kg de hidrogênio por cilindro. O motor elétrico trifásico assíncrono produz 60kW de potência máxima e 215N.m de torque máximo é montado transversalmente, acionando as rodas dianteiras por meio de engrenagem planetária de estágio único e razão de transmissão de 8,76:1. Não há baterias de armazenamento, já que as próprias células de combustível produzem toda a potência necessária ao funcionamento e propulsão do veículo [58], [88].

Além destes, a mesma montadora também possui processos mais ortodoxos, como uma camionete protótipo que utiliza gasolina comum de baixo teor de enxofre como combustível, permitindo o uso da infra-estrutura de distribuição existente [49]. O como resultado, obtém-se hidrogênio a ser usado nas células de combustível. O veículo apresenta eficiência geral de até 40%, cerca de 50% melhor que um veículo com propulsão convencional, além de redução de até 50% de emissões de dióxido de carbono (CO₂). Ainda outro modelo existente é baseado em minivãs convencionais e utiliza hidrogênio líquido ou gasoso, armazenado em tanques de aço inoxidável. Este veículo também utiliza células de combustível do tipo PEM, que produzem 94kW contínuos e picos de até 129kW, com densidade de potência de 1,6kW/l [60], [88].

Uma terceira montadora americana apresentou, recentemente, sua terceira geração de seu veículo de célula de combustível. O veículo híbrido com célula de combustível, ilustrado na Figura 18, com pequena-escala de produção, possui um pacote de baterias híbridas de hidreto níquel/metal de 300V, e um sistema de freio regenerativo da série eletro-hidráulica “break-by-wire”. Estas tecnologias e o tanque de armazenamento de hidrogênio comprimido de 34,5MPa permitem uma autonomia ao veículo entre 260km e 320km. O pacote de células de combustível tipo PEM, entrega

85kW de potência para os motores elétricos de indução AC, que produzem uma potência máxima de 230N.m e torque de 65kW e torque de 230N.m [46], [60], [61], [62].

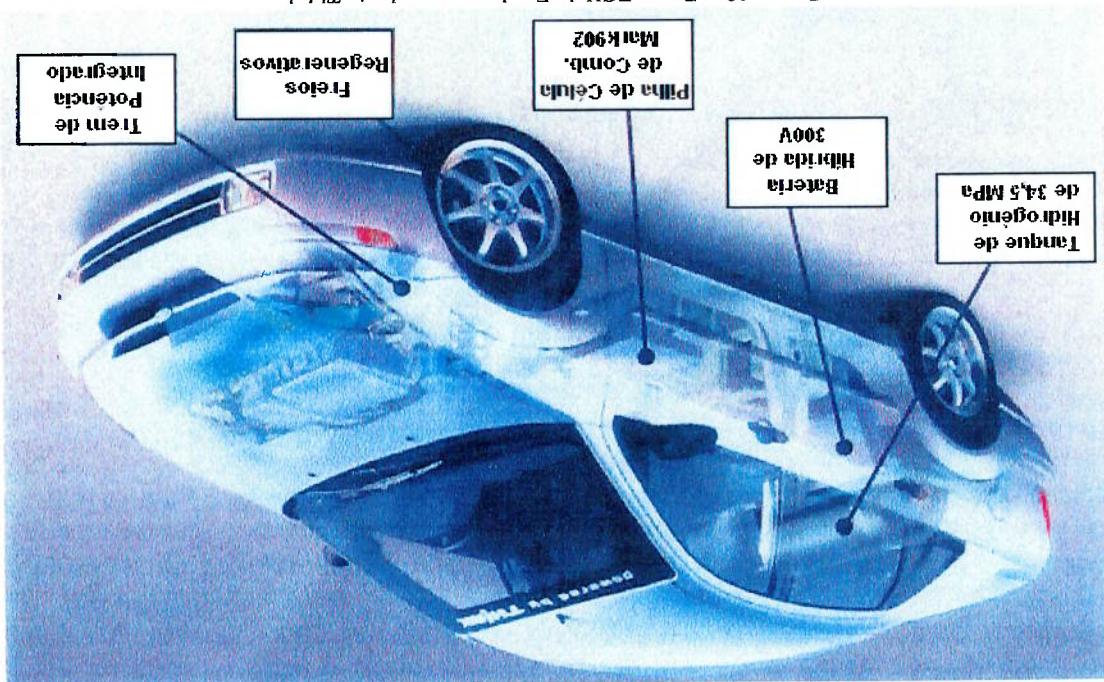


Figura 18 – Focus FCV da Ford com tecnologia Think.

Em julho de 2002, ocorreu a primeira certificação por um organismo governamental (*California Air Resource Board*) de um veículo de células de combustível como Veículo de Emissão Zero. Este veículo, de certo fabricante japonês, também foi classificado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) como Veículo Nacional de Pouca Emissão, a melhor classificação em emissão dos EUA. Além disso, em conjunto com um veículo de outro fabricante japonês, tornou-se disponível comercialmente nos EUA – nos mesmos termos do anterior. Este é um modelo pequeno que utiliza hidrogênio comprimido armazenado em tanques de 34,5MPa de pressão de armazenamento, e células de combustível do tipo PEM, que produzem 78kW. A energia excedente produzida é armazenada em ultracapacitores com densidade de energia de 3,9W.h/kg e densidade de potência de 1.500W/kg. O motor é do tipo AC síncrono, de ímãs permanentes, montados transversalmente na dianteira do veículo e acionando as rodas dianteiras através de um trem de engrenagens de redução sem transmissão. O motor elétrico apresenta potência máxima de saída de 60kW, torque de 272N.m e rotação máxima em 11.000rpm [83].

A Tabela XV, a seguir, apresenta um resumo das características mais importantes dos veículos a célula de combustível.

Veículo	Vantagens	Informações Técnicas
Jeep Commander 2 - DaimlerChrysler [53], [133].	- Desempenho semelhante ao veículo convencional. - Autonomia equivalente de 10km/l, quase o dobro da original.	- Veículo elétrico-híbrido impulsionado por sistemas metanol/célula de membranas de troca de prótons (PEM - Proton Exchange Membrane); - Motor de célula de combustível com sistema para reformar metanol e pilhas de potência de 83kW cada, acionando os eixos dianteiros e traseiros; - Propulsão elétrica com dois motores elétricos de corrente alternada, com combustível;
S10 - GM [49].	- Permite o uso da infra-estrutura de distribuição de combustível existente; - Redução de emissão de dióxido de carbono (CO ₂) de até 50%.	- Reformador existente no próprio veículo gera o hidrogênio para as células de combustível; - Utiliza gasolina comum de baixo teor de enxofre como combustível; - Pacote de baterias de hidretos metálicos de níquel (NiMH).
Natium - Chrysler [60].	- Uso de combustível de armazenamento fácil e segura. - Não há baterias de armazenamento - as próprias células de combustível produzem a potência necessária para o veículo.	- Combustível do tipo hidreto bórico de sódio (NaBH ₄) que armazena mais energia que hidrocarbonetos similares, cuja solução aquosa pode ser armazenada em tanques plásticos de pouca massa, em condições de temperatura e pressão ambiente. Sistema catalisador de hidrogênio da Millennium Cell para remover o hidrogênio; - Sistema de células de combustível Ballard Xcells. Sistema de regeneração de energia para pacotes de baterias de íons de Lítio da SAFT que provê 40kW para os motores AC de 35kW da Siemens.
HydroGen 3 - GM/Opel [60], [88].	- Autonomia ao veículo entre 260km e 320km.	- Hidrogênio líquido armazenado em tanques de aço inoxidável e células de combustível do tipo PEM, denominado Stack 2000, produz 94kW contínuo e picos de até 129kW. Densidade de potência de 1,6MW/m ² ; - Motores elétricos do tipo trifásicos assíncronos, com eletrônica de potência integrada e engrenagem planetária, produzem potência máxima de saída de 60kW e torque de 215N.m.
Focus FVC - veículo com célula de combustível - Ford [46], [60], [61], [62].	- Autonomia ao veículo entre 260km e 320km.	- Tecnologia Think da Ford, considerado um veículo híbrido devido a pacote de freio regenerativo da série eletro-hidráulica "break-by-wire"; - Pacote de células de combustível Mark 902, tipo PEM, da Ballard Power Systems, potência de 85kW. Motores elétricos de indução AC com potência de 65kW e torque de 230N.m.
Bora - Volkswagen [60].	- Novo tipo de membrana entre os catodos e anodos, mais barata que o tipo mais utilizado.	- Armazenamento em capacitores de alto desempenho - Supercaps; - Sistema Hy-Power com potência nominal de 75kW (100hp). "Supercaps" provêem 30kW (40hp) adicionais para acelerações rápidas.
FCX - Honda [83].	- Primeiro veículo a receber certificação governamental para baixas emissões.	- Utiliza hidrogênio comprimido armazenado em tanques de 34,5MPa e células de combustível do tipo PEM da Ballard, que produzem 78kW. Energia excedente é armazenada em ultracapacitores da Honda; - Motores tipo AC síncronos, com potência de 60kW e torque de 272N.m.
Toyota FCHV [83].	- Disponível para leasing no Japão e EUA.	- Veículo de tração dianteira, com um motor síncrono CA, potência de saída de 80kW e torque de 260N.m;
Toyota FCHV4 [60], [73].	- Informação não disponível.	- Sistema de célula de combustível, armazenamento e combustível iguais ao do modelo FCHV4.
AUTOnomy/Hy-wire - GM [23], [35], [61].	- Informação não disponível.	- Tecnologia "x-by-wire" de controle eletrônico de direção, frenagem e aceleração, desenvolvido em parceria com o SKF Group; - Sistema de células de combustível adaptado do sistema GM HydroGen3; Célula de combustível que produzem 94kW e hidrogênio armazenado em três cilindros de 34,5MPa (5000psi) da empresa Quantum.
Toyota FCHV4 [60], [73].	- Informação não disponível.	- Utiliza hidrogênio comprimido armazenado em tanques a 34,5MPa. As células de combustível são do tipo Membrana de Troca de Prótons (PEM), com potência de saída de 90kW; - Os motores de íons permanentes produzem 81kW de potência de saída e torque de 263N.m.
Toyota FCHV5 [12], [19].	- Informação não disponível.	- Equipado com um reformador de combustível de hidrocarbonetos limpo que separa o hidrogênio, alimentando as pilhas de células de combustível;
H ₂ O - Peugeot	- Informação não disponível.	- Unidade de potência auxiliar (APU) provê energia para bombas de água, extratores de fumaça e comunicações; - Reformador de hidrogênio, para solução aquosa de boro-hidreto de sódio e catalisador.

Tabela XV - Resumo de Veículos com Célula de Combustível.

3. DISCUSSÃO

Os veículos automotores representam fonte significativa de poluição atmosférica, resultado das emissões de Óxidos de Carbono (CO_x), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Óxidos de Enxofre (SO_x), material particulado, Aldeídos, entre outros, decorrentes da queima de combustíveis fósseis (principalmente gasolina, óleo diesel e metanol) e combustíveis alternativos como o etanol (álcool combustível) e gás natural veicular.

Pressões ambientalistas nos últimos anos levaram países integrantes da Comunidade Europeia e o Japão, a limitarem suas emissões automotivas, através de leis restritivas. No Brasil, um levantamento realizado em 2000 [111], por sensoramento remoto das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília, mostrou que 10% da frota em condições mais precárias é responsável por 50% da emissão de monóxido de carbono, enquanto que 70% da frota em melhores condições respondem por apenas 18% do total das mesmas emissões. Um outro relatório com resultados de 2002, da qualidade do ar que a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) publica anualmente [111], demonstrou que as concentrações de Monóxido de Carbono (CO), que vinham se reduzindo gradualmente por efeito de novas tecnologias adotadas nos veículos, induzidas pelo Programa de Controle de Poluição por Veículos Automotores (PROCONVE), tiveram esta tendência invertida naquele ano, devido, principalmente, à falta de inspeção e manutenção adequada nos veículos da frota nacional.

Na América do Norte, especialmente nos EUA, leis rigorosas têm sido criadas. Trata-se, contudo, de solução a longo prazo, sendo certo que aqueles veículos de maior consumo e volume de emissões, como camionetes e utilitários esportivos, têm sido beneficiados por atrasos sucessivos na efetivação de legislação mais rigorosa para este segmento [72]. De qualquer modo, as montadoras têm planos para atrair a atenção dos consumidores para suas campanhas, como, por exemplo, a campanha chamada “Cleaner Safer Sooner” (mais limpo, mais seguro, mais cedo), lançada em 2001 [22], que visava principalmente, reduzir o consumo de combustível nos utilitários esportivos (SUV) em 25%, adequar os veículos comerciais leves à classe de baixa emissão, disponibilizar um veículo de célula de combustível em 2004 e

desenvolver uma versão híbrida de um SUV para comercialização em 2003, o que não ocorreu. A campanha é parte de uma visão estratégica mais abrangente chamada “Mobilidade Sustentável” e o ponto mais difícil do problema é o equilíbrio entre as ações ambientais e aquelas relacionadas com custo e satisfação do cliente. Para certo fabricante americano, os veículos híbridos elétricos (VEH) a gasolina terão maior sucesso nos EUA que os veículos a diesel, porque seria muito custoso que estes veículos alcancarem níveis SULEV (veículo de emissões super-ultra baixas) [39]. Acredita-se que os híbridos elétricos são uma pré-condição necessária para avanços na direção das células de combustível, já que estão em caminhos convergentes.

Para certa montadora europeia, as legislações europeias de emissões Euro III e IV aparentemente resolverão o problema dos poluentes tradicionais, contudo os materiais particulados e o CO₂ ainda representam dificuldades de solução. Embora na visão muito controversa de algumas empresas, o CO₂ seja apenas suspeito de causar o aquecimento global, já que não haveria comprovação científica e, do total de CO₂ existente no Mundo, apenas 2,5% teria sido produzido pelo homem (0,1% por automóveis). A teoria seria que a poluição causada pelo homem apenas se adiciona à poluição natural, mas não haveria qualquer comprovação. Ainda segundo a empresa, para os materiais particulados, no passado, suscitou-se a hipótese na qual as partículas muito pequenas seriam tóxicas e pensava-se que estas carregavam hidrocarbonetos não-queimados que poderiam causar câncer. Com a eliminação dos hidrocarbonetos do resultado da combustão, com catalisadores, a teoria foi levemente alterada, passando-se a entender que as próprias partículas seriam suspeitas [29].

Enfiques

Várias alternativas aos motores de combustão interna tradicional têm sido propostas, algumas com viabilidade prática já disponível. Porém, as pressões de concorrência tendem a colocar estas soluções como segunda alternativa, em geral, sempre mais caras que as tecnologias atuais, e sem grande apelo comercial. Os dois principais temas enfocados nas discussões das tecnologias futuras dos veículos automotores são o combustível a ser adotado e o meio de propulsão que utilizaria este combustível. Sobre o segundo tema, as soluções são amplas e abrangentes, tais como alterações nos motores atuais para utilização de combustíveis alternativos/menos poluentes,

soluções híbridas que mesclam tecnologias de propulsão convencional com sistemas elétricos alternativos ou paralelos, e a última palavra da tecnologia: as células de combustível com motores elétricos. Cada grande conglomerado mundial, ou grupo deles, apresenta sua solução. Porém, as soluções são ainda comercialmente inviáveis ou de comercialização ainda restrita a nichos de mercado.

Futuro do Hidrogênio

Enquanto o segundo tema é, como se viu, ainda muito debatido, o primeiro tema tende a ser consensual, mesmo que em longo prazo. O hidrogênio demonstra grande receptividade em todas as companhias, embora se discuta a sistemática de distribuição, armazenamento e produção [61]. Como visto anteriormente na seção 2.2.1.2, algumas empresas iniciaram programas de avaliação do uso de hidrogênio como fonte de combustíveis de motores de combustão interna, o que permitiria sua adoção como fonte alternativa imediatamente.

Um estudo encomendado por uma grande montadora analisou 36 sistemas de combustíveis com 18 conceitos de propulsão, desde a produção até o consumo final do combustível, sob condições Européias em 2010. Os resultados mostraram que o uso de gás natural para produzir hidrogênio para uso em veículos com célula de combustível seria atrativo em termos de emissões, dependendo da fonte do gás natural. Contudo, o resultado ótimo seria conseguido com hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis de energia, como a biomassa ou de usinas eólicas e utilizando células de combustível nos automóveis [60].

Para o período de transição, discute-se qual seria a melhor solução para os combustíveis. Na Europa, o diesel tem sido a principal alternativa, graças ao consumo de 20-30% menor de combustível, quando comparado à gasolina e menores emissões de CO₂, cuja importância na Europa é muito maior que nos EUA. Quanto ao mercado americano, o diesel não tem sido considerado como alternativa, justamente pela menor importância dada às emissões de CO₂ e às maiores emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado, gerado em maior quantidade por este combustível. Já no Japão, devido aos limites mais restritos de emissões, e com o acesso à gasolina de baixos teores de enxofre e à tecnologia de injeção direta de gasolina, o diesel também não teve o mesmo sucesso que na Europa [38].

Uma alternativa, seria o uso de combustíveis sintéticos, demonstrada através de um processo em pequena escala industrial. Uma vez que os pesquisadores da indústria automobilística tenham criado um combustível que atinja seus objetivos, seria possível criar um motor que o complementem e juntos poderiam reduzir ainda mais as emissões. Em última análise, nesta visão, o combustível a ser utilizado no futuro seria o hidrogênio e reformadores de gasolina poderiam ser utilizados na fase de introdução [29].

Convergência de Enfoques

A convergência dos dois temas propostos acima ainda é incerta, como também é incerto o período em que se daria a transição das tecnologias atuais para a tecnologia a ser adotada definitivamente no futuro. Como referência de análise, a eficiência do uso do combustível desde a produção até o acionamento da roda (“*well-to-wheel*”), que nos sistemas convencionais é de cerca de 14%, nos sistemas híbridos pode chegar a 26%, atingindo até 42%, nos sistemas híbridos atuais [56]. Resultados de previsão recente para o período 2015-2020, indicam 92% de participação de motores de combustão interna (incluindo híbridos), 6% de veículos híbridos e 2% de veículos com células de combustível [43].

Híbridos

Para os híbridos, Wallace [28] prevê um crescimento lento até, pelo menos, o meio década de 2000, quando tecnologias mais caras se tornarão mais plausíveis em termos econômicos, e de acordo com Ford [28], os veículos híbridos representarão 20% do mercado dos EUA em 10 anos.

Assim, todas as companhias americanas têm planos para lançar até 2005 vários modelos comerciais leves híbridos para disputar uma fatia neste mercado, já ocupado em outro segmento por montadoras japoneses, uma delas com planos de vender 300.000 veículos híbridos por ano, nos EUA, até 2005 [28]. No entanto, Rovera [43] é mais cauteloso acerca dos híbridos por causa de seu alto custo, peso e desafios de tecnologia de armazenamento de energia. Outros concordam que as soluções híbridas são válidas apenas para nichos de mercado muito pequenos, enquanto que os motores de combustão interna de hidrogênio ofereceriam um futuro mais promissor [43].

[61].

Resultados recentes, contudo, têm demonstrado grande capacidade em responder à demanda dos consumidores, adaptando seus produtos aos mercados. O caso que melhor exemplifica este ponto é a Toyota com seu modelo Prius. Quando lançado em 1997 no Japão, o modelo foi desenhado como um subcompacto e essencialmente atendia as emissões do nível LEV (veículo de emissões baixas). Em 2000, foi lançado no mercado americano, como um modelo compacto com consumo de 22,2km/l em tráfego urbano, 19,2 km/l em auto-estrada e 20,5km/l para uma combinação de tráfego urbano/estrada, e já atendia as especificações SULEV (veículo de emissões super-ultra baixas). Como outros avanços tecnológicos, o Prius modelo 2004 é um veículo médio com consumo de 25,6km/l em tráfego urbano, 21,8 km/l em auto-estrada e 23,5km/l para uma combinação de tráfego urbano/estrada, classificado como AT-PZEV (veículo de emissões parcialmente nulas – tecnologia avançada), de acordo com a legislação vigente no estado da Califórnia, EUA [100]. [105].

Células de Combustível

Em relação a células de combustíveis, especialistas da indústria especulam [24] que seu sucesso na indústria automotiva ocorrerá num prazo de 5 a 10 ou 30 anos. Numa destas avaliações, sistemas de potência auxiliares poderão ser introduzidos em 2005 [30], contudo em 2010, apenas 1% dos veículos produzidos possuirão tração a partir de célula de combustível e em 2020, veículos de produção acionados por células de combustível representarão 10-15% do volume total produzido [61].

Outros são mais cautelosos, acreditando que não haverá entrada significativa de células de combustível para propulsão no mercado antes de 2020, e que a produção de larga escala de veículos de células de combustível ocorrerá, provavelmente, daqui a duas décadas, embora frota controlada possam ser disponibilizadas mais cedo, como já vem acontecendo com certos fabricantes japoneses. Assim, há previsão de que 100.000 veículos com célula de combustível estarão nas ruas entre 2010 e 2020. Contudo, o grande problema seria que a manufatura e instalação de células de combustível em veículos de produção são muitíssimo mais complexos que os sistemas de laboratório podem demonstrar [43]. Outros mais otimistas acreditam que os primeiros veículos em produção já estarão disponíveis a partir de 2010, mesmo

assim, os motores de combustão interna ainda seriam os meios dominantes no mercado [43], [43], [56], [56].

Para certa companhia americana, a célula de combustível não substituirá o motor MCI pois há muitos fatores fundamentalmente econômicos e técnicos que precisam ser suplantados antes que isso aconteça. De fato, preconiza-se também que a tecnologia híbrida apresenta uma oportunidade para a otimização do motor MCI, garantindo que o mesmo continuará a ser parte vital do automóvel para o futuro previsível [144].

Visando incentivar o desenvolvimento destes sistemas, o governo dos EUA substituiu, em janeiro de 2002, o programa de "Parceria para Nova Geração de Veículos" (PNGV), que visava criar um veículo médio que consumisse 34km/l, pelo chamado "Freedom CAR" (*Cooperative Automotive Research* - Pesquisa Automotiva Cooperativa) que irá focar em tecnologias para permitir a produção em massa de veículos com célula de combustível, abastecidos com hidrogênio, com custo acessível, bem como a infra-estrutura de suprimento de hidrogênio para suportá-los. O programa caracteriza-se por um horizonte de longo prazo, mas realista (várias décadas), contudo impõe medidas de sucesso estritas e mandatórias e objetivos de curto prazo para manter o programa sob controle [31].

Período de Transição

O que é certo, em todas as discussões e planos, é que a convivência de veículos convencionais com as tecnologias alternativas, se estenderá pelo menos pelos próximos 15 anos e que neste período, pode-se iniciar a implementação de um sistema de abastecimento convencional por uma rede de distribuição de hidrogênio. Os motores convencionais, no entanto, têm recebido novo impulso decorrente das tecnologias adotadas nos últimos anos, mais precisamente nos sistemas de injeção, controle de válvulas, e compressão, garantindo maior economia e aumento de eficiência, sem adicionar maiores custos, o que permitiria estender sua aceitação por um prazo indeterminado.

Certos fabricantes europeus, indicam que os motores de combustão interna serão os principais meios de propulsão nos programas projetados para 2020. Possivelmente, os motores de combustão interna e todas suas variantes continuarão a ser a forma

dominante de propulsão de veículos de passageiros pelo menos pelas próximas três

décadas [72].

Não há dúvida que os motores de combustão interna ainda são capazes de melhorias em termos de emissões, consumo de combustível e potência específica, sendo que em longo prazo, poderiam usar as mesmas fontes de energia alternativa tais como as de células de combustível (hidrogênio), enquanto são opções de baixo risco em termos de custo de manufatura e infra-estrutura de serviço [43]. A título de exemplo, observa-se que os MCIs tiveram seu desempenho duplicado (potência e torque) e os níveis de emissão reduzidos a um décimo nos últimos anos. Para todos, em última análise, os avanços tendem a criar um motor multi-combustível a longo prazo (além de 2010). Este novo tipo de motor permitiria, por exemplo, um sistema combinado de combustão que cobrisse o processo dos dois motores – ciclo Otto e ciclo Diesel – em um motor, mas ainda está distante da produção em massa. Este motor multi-combustível poderia utilizar desde óleo diesel a etanol, incluindo combustíveis de baixas emissões como o GNV (Gás Natural Veicular), combustíveis sintéticos ou hidrogênio, permitindo que todos os países tivessem acesso à mesma tecnologia [29].

Resultado

Concluindo, a última palavra em tecnologia de propulsão para o futuro próximo (de 20 a 50 anos), tendo em vista esta situação transitória, recairá sobre a solução que garantir o menor consumo de combustível, da maneira mais eficiente e menor efeito poluidor, com aplicação em sistemas existentes, que utilize a cadeia de distribuição de combustíveis atual e eventual, com possibilidade de adaptação a novas tecnologias que forem criadas. Para este cenário, a tecnologia híbrida é a única que se encaixa em todos os requisitos, permitindo sua adoção imediata, com grande flexibilidade para atender todos os segmentos de mercado e todas as plataformas existentes. Além disso, é adaptável às possíveis mudanças tecnológicas que por ventura venham adicionar ganhos ao sistema, tais como sistemas de armazenamento de energia (baterias/capacitores), motores elétricos e outros, como demonstrado em todos os veículos citados na seção de híbridos. Deste modo, optou-se por direcionar este trabalho para o detalhamento de sistemas híbridos, suas interfaces e o controle geral do sistema, que em última análise é o objetivo deste trabalho.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Tipos de Hibridização

4.1.1. Classificação Tradicional

No advento dos veículos híbridos, os projetistas os classificaram pela configuração de seus componentes de propulsão, já que era de grande importância determinar se o motor era diretamente conectado às rodas do veículo. Esta classificação, geralmente aceita, define se o veículo híbrido é de configuração em série ou em paralelo [127], [129].

4.1.1.1. Configuração em Série

Na configuração em série, não há conexão direta do motor com as rodas, como esquematizado na Figura 19. O motor aciona um gerador que por sua vez alimenta uma bateria, de onde é extraída a energia para acionar um ou mais motores elétricos que movimentam o veículo [127].

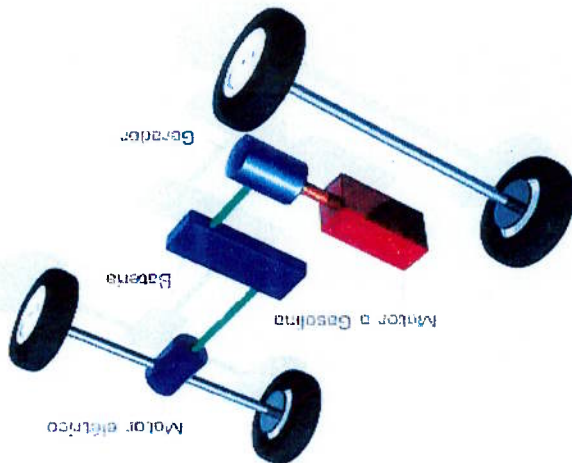


Figura 19 – Esquema de Configuração de Sistema de Propulsão Híbrida em Série.

Nesta configuração, o motor de combustão interna (MCI) trabalha sempre no ponto ótimo de operação, com redução de emissões e consumo de combustível. Por não haver necessidade de eixo de propulsão, permite arranjos muito criativos, incluindo motores elétricos integrados às rodas [143]. Embora o MCI opere nos pontos de máxima eficiência, há perdas de eficiências nos inversores e motores elétricos que podem limitar a eficiência global do veículo a cerca de 80%. Além disso, o motor

elétrico deve ser dimensionado para prover toda a força motora, por longo período e por toda a potência necessária de cruzzeiro, o que resulta num sistema de propulsão mais caro. Esta configuração é mais eficiente para grande demanda de energia, como no caso de um ônibus [129].

4.1.1.2. Configuração em Paralelo

Na configuração em paralelo, há conexão direta do MCI às rodas, como esquematizado na Figura 20, ou seja, o MCI também aciona as rodas do veículo. Esta alternativa permite a transferência de energia mecânica mais direta e eficiente do MCI e dos motores elétricos para as rodas do veículo [127].

Entre as variações existentes para a configuração em paralelo, o MCI aciona o eixo da roda e um gerador, que por sua vez alimenta uma bateria de onde é extraída a energia para acionar um ou mais motores elétricos. Em alguns casos, os próprios motores elétricos podem funcionar como geradores [127].

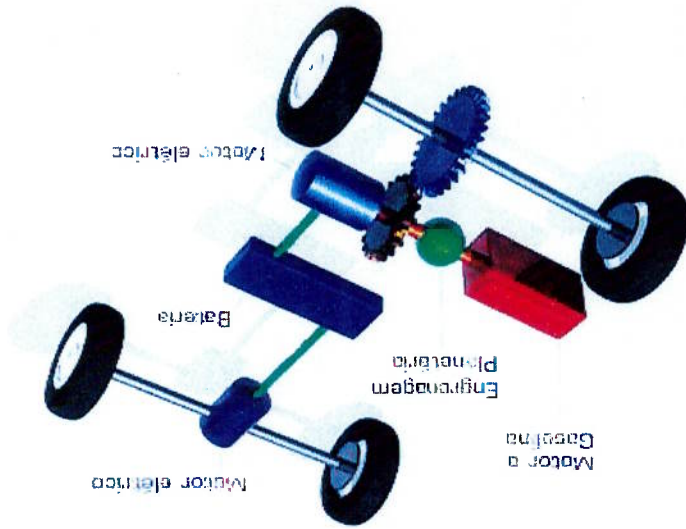


Figura 20 – Esquema de Configuração de Sistema de Propulsão Híbrida Paralela.

Como as rodas são acionadas pelo MCI, o motor ou motores elétricos, adicionam potência e torque à propulsão, possibilitando a redução da capacidade do MCI, e reduzindo, conseqüentemente, emissões e consumo de combustível. Esta configuração é mais adequada para satisfazer demanda de alta potência em estradas (altas velocidades ou acelerações), o que a faz mais apropriada para transporte pessoal, como no caso de veículos de passageiros [129].

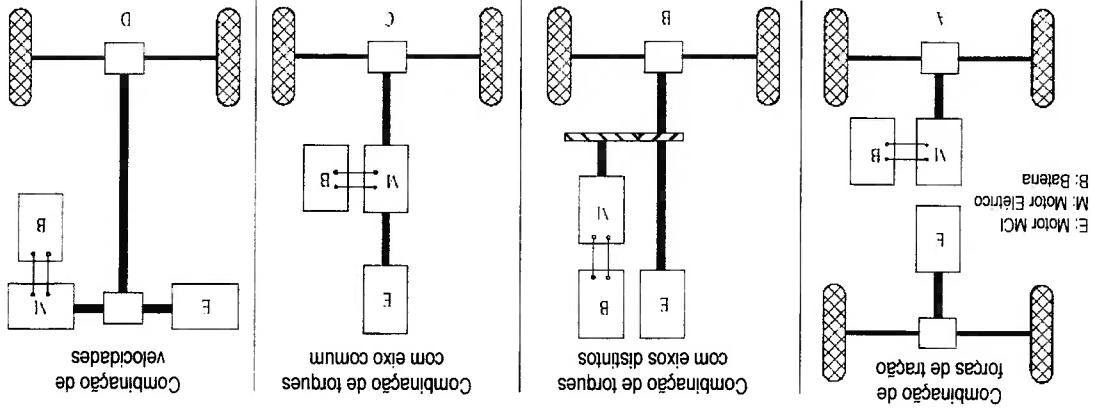
Diferentemente da configuração em série – que é única – a configuração em paralelo apresenta muitas variações. A literatura apresenta 4 técnicas, como mostra a Figura 21 [127]:

A. combinação de forças de tração – o torque de tração dos motores de combustão e elétricos são aplicados em pares de rodas diferentes, combinados através da interação mútua com a pista;

B. combinação de torques com eixos distintos – os torques de acionamento dos motores, aplicados em eixos de acionamento diferentes são combinados mecanicamente (por meio de engrenagens ou correias) em um eixo comum antes da roda;

C. combinação de torques com eixo comum – os motores compartilham um eixo de propulsão comum;

D. combinação de velocidades – os motores de combustão e elétricos operam em velocidades distintas e a entrada de seus torques de acionamento respectivos se faz num sistema de engrenagens complexo que combina mecanicamente os torque antes de transmiti-los ao diferencial.



4.1.2. Classificação por Missão

O debate da divergência da técnica de cada uma das configurações da classificação tradicional obscureceu o fato de que a conexão mecânica não ser a metodologia de classificação mais lógica. A discussão perdurou até o aparecimento de sistema que não era de natureza puramente serial ou paralela. Ao contrário, este operava em modo predominantemente paralelo durante cruzeiro em altas velocidades, e em modo

predominantemente serial durante transitórios em baixa velocidade. Em resumo, a solução proveu ambas configurações “em série” e “em paralelo”, permitindo melhor compreensão da configuração híbrida como um espectro amplo de possibilidades ao invés de opções discretas e simplistas [128].

Conseqüentemente, foi criado outro método para diferenciar os sistemas de propulsão híbridos baseado no tipo de missão para a qual o sistema foi projetado. A classificação, baseada em “missão”, divide os veículos híbridos em três classes: híbridos moderados (“mild hybrids”); híbridos de potência (“power hybrids”) e híbridos de energia (“energy hybrids”). De acordo com esta classificação, a Tabela XVI mostra custos adicionais² aproximados dos sistemas de propulsão e serve como base de comparação econômica dos diversos sistemas híbridos. Os custos reais podem variar de acordo com o volume e condições da aplicação [128].

Híbrido Moderado (5-10kW/1-3kWh)	Híbrido de Potência (20-40kW/3-4kWh)	Híbrido de Energia (70-100kW/15-20kWh)
US\$ 450	US\$ 2.200	US\$ 4.200
US\$ 650	US\$ 1.600	US\$ 1.600
US\$ 350	US\$ 350	US\$ 400
US\$ 350	US\$ 650	US\$ 700
US\$ 1.800	US\$ 4.800	US\$ 6.900
Total		

Tabela XVI – Custos Adicionais dos diferentes sistemas de propulsão híbridos [128].

4.1.2.1. Híbridos Moderados ou Leves

Nesta classe de veículos híbridos, as denominações se multiplicam, tais como moderados [128], [134], leves [143], [151], auxílio a potência (power-assist) [145], ou de “baixo requisito de armazenamento” (low storage requirement – LSR) [151]. Esta é a classe que apresenta o menor custo adicional ao sistema de propulsão, como apresentado na Tabela XVI, embora com efeitos moderados na economia de combustível, quando comparada a outras abordagens que empregam um maior grau de “hibridização”. Certos fabricantes têm obtido grande economia relativa de combustível ao empregar uma combinação de abordagem moderada com tecnologia avançada Diesel, contudo, uma grande porção da redução do consumo de combustível pode ser atribuída ao MCI Diesel, que não se encontra contabilizado na

² Custos não abrangendo a redução de peças dos sistemas convencionais.

Tabela XVI. Uma redução típica média no consumo de combustível devido à hibridização moderada é da ordem de 10 a 15%.

A máquina elétrica é do tipo de motor de partida/gerador integrado, podendo ser acionado por correia ou montado no eixo de manivelas do MCI.

O sistema de baterias nos híbridos moderados, usualmente, possui tensão inferior a 60V e provê capacidade de manipular baixos níveis de potência junto ao sistema de transmissão. O nível de potência elétrico típico é da ordem de 5kW, embora 10kW possam ser alcançados por curtos períodos de tempo. A potência elétrica é limitada a estes níveis relativamente baixos, com o intuito de prover algum nível de hibridização, mantendo os custos iniciais dentro dos parâmetros desejados. Este resultado é obtido, minimizando-se a máquina elétrica e o sistema de armazenamento de energia, geralmente baterias.

Os métodos utilizados para redução do consumo de combustível são o desligamento do motor em paradas prolongadas – quando este não é necessário, religando-o imediatamente quando necessário, numa abordagem conhecida como “stop-start” – frenagem regenerativa e pequena redução da capacidade original do MCI. Um motor-gerador realiza a função geral de acionar equipamentos auxiliares quando o MCI está desligado, carregar as baterias, além de auxiliar na partida do MCI. A Figura 22 mostra um esquema de configuração típico de um sistema de propulsão híbrida moderada. Nela podemos visualizar a baterias de baixa tensão, além de acessórios necessários ao controle do fluxo de eletricidade.

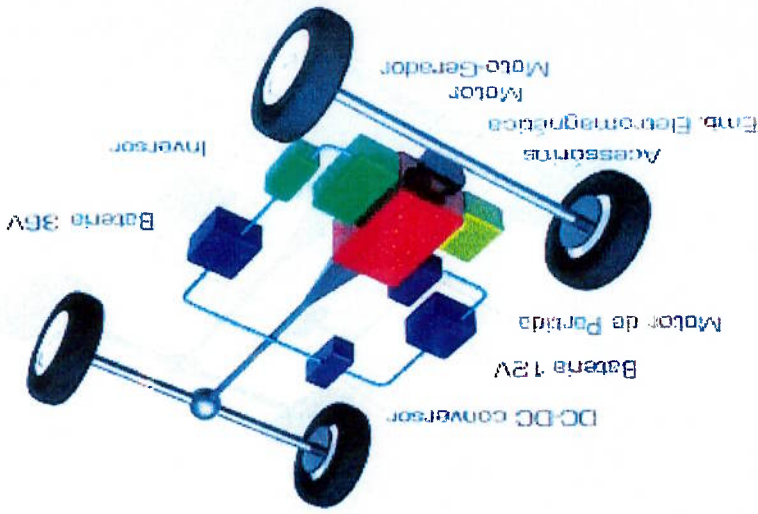


Figura 22 – Sistema de Propulsão Híbrida Moderada.

4.1.2.2. *Híbridos de Potência ou Médios*

A classe dos veículos híbridos de potência [128], médios [132] ou modo-dual (“dual-mode”) [145], é uma classe de hibridização intermediária. Apresentam custos de sistemas de propulsão elétrica mais significativos que na classe moderada. O nome híbrido de “potência”, também denominado híbrido médio, sugere que uma quantidade significativa de potência pode ser manipulada de e para a bateria (cerca de 20 a 40kW), embora o sistema de bateria seja projetado com pequena capacidade de armazenamento de energia. São capazes de recapturar mais agressivamente a energia cinética do veículo já que os motores elétricos, inversores e baterias são dimensionados para esses maiores níveis de potência [132].

Os benefícios desta classe de hibridização incluem redução no consumo de combustível de até 80% e melhoria nas emissões do MCI, quando comparados com os da classe moderada, devido a maior ênfase no programa de carga do MCI. Híbridos de potência, como os híbridos moderados, recebem toda a energia motora da combustão do combustível fóssil, tipicamente um líquido derivado de petróleo. A penalidade decorrente dos benefícios é o aumento da complexidade do sistema, custo e massa. Tais ganhos de eficiência são principalmente visíveis nos ciclos de tráfego urbano e menos apreciáveis nas auto-estradas.

4.1.2.3. *Híbridos de Energia*

A classe dos veículos híbridos de energia é uma classe com nível de hibridização acima dos híbridos de potência. Como os híbridos de potência, os híbridos de energia empregam sistema de baterias de com maior nível de potência, mas diferentemente dos anteriores, os híbridos de energia empregam sistema de bateria de alta energia, capazes de movimentar o veículo por aproximadamente 110km. Este sistema possui potência maior que a presente nos híbridos de potência, já que os motores elétricos são os principais acionadores nesta classe. Deste modo, as baterias precisam ser capazes de prover níveis de potência significativos, até 70kW, para permitir manobras de ultrapassagem em altas velocidades [128].

O motor de combustão interna opera quando é necessário atingir a mesma autonomia de um veículo convencional em longa distância, principalmente em auto-estradas. O

sistema de propulsão dos híbridos de energia é muito mais caro que nas outras classes, como apresentado na Tabela XVI, devido principalmente, aos altos custos envolvidos com seu grande sistema de baterias.

O sistema híbrido de energia caracteriza-se principalmente pelos métodos alternativos de carga das baterias como, por exemplo, a conexão do veículo a uma tomada elétrica residencial. Esta estratégia, unida ao pequeno motor de combustão interna existente no veículo híbrido de energia, elimina a necessidade de uma nova infra-estrutura de abastecimento de energia. A necessidade desta infra-estrutura tem impedido o estabelecimento de novas tecnologias de sistemas de propulsão [128].

Pode-se ainda, caracterizar os híbridos de energia como os híbridos elétricos com célula de combustível, descritos na seção 2.4.2. Neste caso, a eletrificação é o único meio de propulsão do veículo e a célula de combustível é utilizada para carregar as baterias.

4.2. Sistemas e Funcionalidades

4.2.1. Motores Elétricos

Os motores elétricos executam uma função primordial nos veículos híbridos elétricos (Veh). Sua função é converter energia elétrica em mecânica e vice-versa, gerando energia elétrica ou movimentando o veículo, por isso também são referenciados como máquinas elétricas. Seu número, características técnicas e funções variam de acordo com a configuração e nível de hibridização do veículo.

Na função geradora, o motor pode trabalhar como um gerador, acionado pelo motor de combustão interna ou no processo de frenagem regenerativa (descrito em 4.2.4). O resultado desta geração de energia elétrica pode ser utilizado para carregar baterias e capacitores, acionar outros motores elétricos presentes no veículo (configuração em série), ou acionar acessórios do próprio veículo ou externos a este. Na conversão de energia elétrica para mecânica, o motor elétrico pode ser alimentado por geradores (configuração paralela), baterias, capacitores, ou combinação destas fontes.

Atualmente, as máquinas elétricas com excitação em ímãs permanentes de NdFeB são amplamente reconhecidas como as candidatas mais adequadas para aplicações como geradores em veículos híbridos [122].

Dentro da ampla categoria de máquinas de ímãs permanentes (PM), diversas configurações de circuito magnético podem ser identificadas e estas incluem topologia de máquinas de ímãs permanentes de campo axial (AFPM) com terminações sem ranhuras, que ultimamente tem recebido substancial interesse em várias aplicações. A adoção destes arranjos particulares em máquinas PM para geradores, acionados por motores a combustão interna, a serem usados em veículos híbridos, demonstra o reconhecimento de características únicas, tais como densidade de torque por volume muito maior e maior eficiência quando comparado com topologias de máquinas convencionais [122].

4.2.2. Inversores e Controle de Potência

Tradicionalmente, até o final da década de 1990, sistemas de distribuição de potência de corrente contínua (CC) eram utilizados em veículos elétricos. No entanto, novos estudos demonstraram não só a viabilidade do uso de sistemas de corrente alternada (CA) de fase simples e alta frequência, como sua superioridade ante os sistemas CC [114].

O sistema de alta frequência CA possui uma vantagem singular de chaveamento suave dos dispositivos em tensão nula. Como consequência, há eliminação da perda no chaveamento, maior confiabilidade, menor interferência eletro-magnética, ausência de ruído acústico e menor estresse de variação de tensão no isolamento do motor elétrico. A tensão de distribuição, que é independente da tensão da bateria, pode ser isolada e regulada para valores mais altos, permitindo a otimização dos projetos de baterias, conversores e máquinas elétricas. Embora o sistema prescinda de um inversor ressonante adicional e transformador de alta frequência, os custos dos sistemas de suprimento de potência auxiliar para o veículo podem ser reduzidos. Finalmente, os cálculos gerais de dimensionamento dos componentes dos sistemas CC e CA indicam alguma vantagem de custo e eficiência dos sistemas CA.

Em relação à tensão de trabalho do sistema de propulsão, altas tensões nos inversores reduzem o nível necessário de corrente de fase, contudo, requerem o uso de tecnologia de chaveamento por Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT) ao invés de Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Oxidos Metálicos (MOSFET), além de maior atenção na segurança veicular no isolamento e operação do sistema.

Reunindo características de comutação e pequenas perdas de condução de Transistores Bipolares de Potência (TBP), à elevada impedância de entrada do MOSFET e sua facilidade de acionamento, o IGBT se torna cada vez mais popular nos circuitos de controle em eletrônica embarcada. Juntando o que há de bom nesses dois tipos de transistores, o IGBT é um componente que se torna cada vez mais recomendado para comutação de carga de alta corrente em regime de alta velocidade [132]. Este dispositivo semicondutor de chaveamento trabalha aumentando a tensão da bateria e convertendo o sinal CC do sistema de armazenamento de energia em sinal AC para acionar o motor elétrico, minimizando a geração de calor [153].

Quanto ao número de máquinas elétricas a serem utilizadas, o uso de dois motores no veículo requer o uso de dois inversores capazes de gerenciar as tensões de cada um dos motores utilizados, o que significa um aumento de custo total do veículo. Para suprir esta necessidade, pode-se utilizar uma abordagem de projeto de dois inversores diferentes e independentes, o que aumenta o custo e tempo de projeto e o número de componentes diferentes no sistema, ou o uso de dois inversores iguais, sendo que um inversor estará superdimensionado ao ser utilizado no motor menor, o que diminui o tempo e custo de projeto e número de componentes diferentes no sistema. Conseqüentemente, é a solução mais cara [132].

Controle dos Motores – Nos inversores, os controladores dos motores são a inteligência que monitora os sensores e executa um sofisticado controle de malha fechada nos motores elétricos. A sofisticação do controle varia de acordo com a aplicação. Em veículos com dois motores elétricos, o requisito dinâmico do motor de propulsão principal é geralmente pequeno. Assim, pode ser dispensável o uso de algoritmos de controle de alto desempenho, tais como estratégias de controle vetoriais. Porém, dois controladores de motores e duas estratégias diferentes para os sensores são utilizados devido à separação de funções de propulsão e funcionamento motor/gerador dos motores elétricos [132].

Já os veículos com sistema ISG, que apresentam apenas um motor, necessitam de maior capacidade computacional para o controle, já que os modos de operação para suprimir as oscilações do eixo de saída ou cancelar as vibrações de pulso, decorrentes da combustão nos cilindros do motor, requerem maior desempenho dinâmico.

4.2.3. Sistemas de Armazenamento de Energia

Como visto na seção 2.3.3, os veículos híbridos mais recentes, protótipos ou produção, utilizam pacotes de baterias com tecnologia de Hidreto Metálico de Níquel (NiMH) ou Ions de Lítio [132], ou ainda sistemas com ultracapacitores.

Em estudos realizados recentemente, demonstrou-se que para veículos médios ou pequenos, os sistemas de Li-Ion são mais adequados para veículos de hibridização pequena, enquanto que os sistemas NiMH apresentam melhor desempenho geral em veículos de hibridização média-alta [119].

O tipo de baterias NiMH de células de potência ultra alta (UHP) é o mais recentemente desenvolvido e está sendo considerado para aplicação em novas classes de veículos híbridos. Nesta configuração, os picos de carga durante a aceleração são cobertos pela drenagem de energia de baterias reservas de alta potência e também requerem a absorção de pulsos de alta potência na frenagem regenerativa. O sistema eletrodo do NiMH é refinado para este propósito, podendo levar a um aumento de potência significativo. Existem atualmente células com capacidade de até 10Ah, mas o objetivo é atingir até 20Ah. A resposta de carga de carregamento das células é superior a de outros tipos de célula de NiMH. Em relação ao ciclo de vida, estas células são operadas apenas em pequena variação de carga (<5%), mas com correntes de carga e descarga muito altas. Como exemplo, testes realizados com carga e descarga de 4%, demonstraram não haver redução na capacidade do sistema em mais de 150.000 ciclos completados [115].

O projeto do pacote de baterias é extremamente importante e requer cuidadosa análise para a determinação da estratégia adequada. No dimensionamento do pacote de baterias, a potência de pico requerida torna-se de importância dominante. A habilidade de manejar a frenagem regenerativa e os picos de demanda do motor define os níveis de potência que o pacote de baterias precisa atender. Os requisitos de potência também são definidos pelo desempenho esperado em baixas temperaturas. Isto contrasta com veículos elétricos onde a capacidade de fornecimento de energia define o projeto do pacote de baterias devido ao requisito de maximização do alcance. Também é importante considerar a tensão utilizada, já que para dada demanda de potência, a alta tensão do sistema permite diminuir a demanda de

corrente, o que reduz as perdas, o volume da bateria e os custos em conectores e cabos [115].

Em relação aos sistemas de ultracapacitores, estes ainda não foram exaustivamente testados em condições reais para comprovação de sua durabilidade e confiabilidade, o que torna inviável seu uso imediato [12].

4.2.4. Frenagem Regenerativa

Para a maioria dos veículos que operam numa gama muito grande de ciclos de tráfego, pelo menos um terço da energia necessária para impulsionar o veículo é utilizada para vencer sua inércia [131]. A energia cinética é dissipada tanto na forma de calor na atmosfera através da aerodinâmica ou no piso por meio do atrito de rolamento do pneu, quanto na forma de calor nas pastilhas de freio. Com o uso de um sistema de propulsão eletrônico, como no caso dos híbridos, parte da energia perdida durante a desaceleração pode ser recuperada ao utilizar-se o motor elétrico de propulsão como um gerador. Este método de recuperação de energia é geralmente referido como “frenagem regenerativa”:

Ao recuperar parte desta energia perdida em forma de calor durante a desaceleração, o veículo pode reduzir o consumo de combustível em até 33%. Somente este efeito tem o potencial de superar qualquer perda de eficiência do sistema resultante da redução nas dimensões do motor de combustão interna. Contudo, certos fatores impedem a realização do completo potencial regenerativo de frenagem, dentre os quais podemos citar [131],[151]:

- embora a maior parte da potência de desaceleração de um veículo ocorra nas rodas dianteiras, alguma tração é sempre dissipada nas rodas traseiras e, para um veículo de tração dianteira, não há motor para recapturar a energia dissipada nas rodas traseiras;
- dependendo das dimensões do motor elétrico e da estratégia de controle de frenagem, a frenagem regenerativa pode realmente prover torque de frenagem excessivo, especialmente a baixas velocidades e assim, ser limitada para garantir um nível de conforto razoável aos passageiros;

- a energia de frenagem que é convertida, sofre perdas no ciclo mecânico-elétrico e no elétrico-químico na volta através de todas as conversões para prover energia mecânica às rodas.
- a capacidade de regeneração é limitada ao nível de potência geral dos componentes de propulsão elétrica do veículo e à capacidade do pacote de baterias.

O resultado geral é que, enquanto há grande quantidade de energia disponível durante a frenagem, apenas uma fração pode ser capturada e armazenada nas baterias. Devido a todas as perdas, valores mais realistas de recuperação de frenagem regenerativa estão situados entre 20 a 25% da energia necessária para acionar um veículo híbrido [131].

4.2.5. Sistema de Transmissão

Os sistemas de transmissão disponíveis no mercado ou em desenvolvimento apresentam um largo espectro de opções. CVTs, transmissões automáticas, transmissões mecânicas comuns ou automatizadas mostram-se capazes de transmitir o torque e a potência necessários. Alguns sistemas mais sofisticados permitem controlar as trocas de marchas de acordo com a operação do veículo, contudo, o custo associado cresce proporcionalmente à automatização e sofisticação do sistema [134], [135].

A estratégia de seleção do sistema transmissão deve ser baseada na maior eficiência de transmissão de torque, garantindo o conforto dos ocupantes e a otimização da operação das máquinas elétricas e do motor de combustão interna [132].

4.2.6. Motor de Combustão Interna

A definição do motor de combustão interna requer estudo cuidadoso das características de operação em conjunto com as máquinas elétricas a serem utilizadas. As características de torque e potência desejadas no veículo são resultado direto do tipo e do nível de hibridização a ser adotado. Assim, por exemplo, um híbrido leve, que utiliza um gerador/motor-de-partida integrado, terá um motor mais próximo do convencional, do que um veículo híbrido de energia com configuração paralela, no qual o motor de combustão interna será selecionado de acordo com a capacidade do motor elétrico de propulsão e das baterias.

Devido, ainda, à massa extra dos sistemas híbridos, a estratégia de motorização deve garantir alta eficiência no consumo de combustível, aliado à alta potência de saída. Motores turbocomprimidos com injeção direta a Diesel e conduto comum são opções muito atrativas, já que atendem a todas as características mencionadas. Contudo, ainda há restrições em alguns mercados em relação às emissões deste tipo de motor. Uma alternativa seria um motor turbocomprimido com injeção direta de gasolina, que elimina o problema de emissões de Oxidos de Nitrogênio e material particulado dos motores Diesel [132].

Além disso, novas tecnologias disponíveis em veículos convencionais como desligamento de cilindros e comando variável de válvulas já são utilizadas com sucesso em diversas soluções [37].

5. ESTUDO DE CASO

5.1. Projeto do Sistema de Propulsão

No projeto do sistema de propulsão veicular, as especificações mais comumente estabelecidas para o dimensionamento dos componentes são: a aceleração inicial, a velocidade máxima e as inclinações do percurso [129]. Um sistema de propulsão capaz de atender estas especificações irá operar adequadamente em outros regimes de

operação.

O desempenho do veículo elétrico híbrido (VEH) depende, obviamente, da taxa de hibridização, definida pela razão percentual entre a potência elétrica e a potência de propulsão total. A hibridização do sistema de propulsão, em geral, aumenta o peso total do veículo com conseqüências no tempo de aceleração.

A comparação entre conceitos de controle de híbridos paralelos, indica que maiores taxas de hibridização levam a um menor consumo de combustível e à redução de emissões. O controle mais adequado é do tipo “eletronicamente assistido” cuja estratégia é usar o motor a combustão interna (MCI) como a principal fonte de potência nos pontos de maior eficiência e o motor elétrico apenas nos casos em que o MCI funciona ineficientemente ou quando potência extra seja necessária [129].

5.1.1. Aspectos Econômicos e Ambientais

A produção de veículos no Brasil cresceu continuamente da década de 1950 até o ano de 1980, quando atingiu a marca de 1,165 milhões de unidades produzidas, consolidando o país como um dos mais promissores produtores mundiais. Mudanças na conjuntura econômica, ocorridas em 1981, provocaram abrupta queda na produção, com apenas 780 mil unidades produzidas naquele ano. No início dos anos 1990, o parque industrial automobilístico brasileiro, montado nos 30 anos anteriores, volta a crescer e atinge sua maturidade, com montadoras distribuídas em 12 marcas distintas [162].

A partir de 1996, com a adoção do Regime Automotivo Brasileiro, teve início uma nova fase de expansão do setor – antes restrito a São Paulo, Rio Grande do Sul, Paraná e Minas Gerais. Voltado para modificar e ampliar o parque automobilístico

instalado, tanto nas unidades preexistentes como na instalação de novas fábricas, os governos articularam um processo de descentralização na indústria automotiva, motivando a criação de novas unidades de produção em outros estados da União. A estagnação dos mercados na Europa associada aos mecanismos introduzidos pelo governo brasileiro, que permitiram a renúncia fiscal pelas unidades da Federação, foram decisivos para que o Brasil atrairse um grande volume de investimentos externos para o setor automotivo. Ao final do último milênio, o país já contabilizava 20 marcas distintas de veículos.

Em 1997, é atingido o volume de 2,069 milhões de unidades produzidas no país, o equivalente a mais de 126% em relação à produção de 1990. E novamente, o ciclo de crescimento na produção foi interrompido, quando a indústria produziu apenas 1,35 milhões de unidades em 1999, com nova recuperação em 2000 com a produção de 1,671 milhões de unidades [162].

Apesar do crescimento da população e das vendas na década de 1990, o Brasil apresenta limites consideráveis para o aumento da frota de veículos automotores. A estagnação da renda *per capita* e a continuidade do processo concentrador de renda impedem que novos consumidores se agreguem ao mercado. E, apesar de possuir o décimo maior PIB do mundo, o país tem uma das piores distribuições de renda. No caso específico do mercado de veículos, considerando-se a população total do país, apenas 1% da população brasileira pôde adquirir veículos novos no ano de 2000 [162].

O aumento do poder aquisitivo das classes menos favorecidas da população brasileira, observado nos últimos anos, principalmente após o Plano Real (1994-2000), gerou um deslocamento do número de indivíduos na pirâmide social em direção ao topo. E, apesar da renda familiar das classes C e D ser menor, o consumo total é maior do que o da classe média [162]. Segundo pesquisa do IBOPF em 2000, 99% da população de Classe C e 94% da população de Classe D possuem pelo menos um televisor em suas residências, contudo, há falta de veículo próprio pela maior parte da população destas classes [164].

Os movimentos na taxa de juros e inflação ocorridos naquele período, exerceram grande influência no volume de vendas das concessionárias. Em 2000 foram

vendidos apenas 6,7% a mais que o volume de veículos comercializados em 1994. Como 47% dos veículos comercializados foram objetos de financiamento, a taxa de juros exerceu influência direta na decisão do consumidor. A diminuição na renda média real da falta da população brasileira que pode adquirir um automóvel, exerceu importância fundamental no volume de veículos comercializados. O rendimento médio nominal do consumidor apresentou uma redução de 13,1% em comparação à inflação medida no período do Plano Real (1994-2000). Além disso, as perdas salariais e o desemprego são elementos significativos neste processo. Em 1998, o retorno financeiro sobre vendas de automóveis para os concessionários correspondeu à metade do retorno das vendas dos supermercados e um sexto do lucro do setor de eletrodomésticos [162].

Para 2004, os analistas econômicos brasileiros quase que por unanimidade estimam que a economia deve crescer algo entre 3,5% e 4%. Dois segmentos da indústria destacaram-se nos últimos meses de 2003: bens de consumo duráveis e bens de capital. Ambos mostraram taxas de crescimento da ordem de 10% em dezembro último em relação a dezembro de 2002, após apresentarem em outubro e novembro variações também positivas do mesmo indicador. Entre os bens de consumo durável, o destaque é para a produção de automóveis. Beneficiada pela queda da taxa de juro e por medidas tópicas de incentivo, como a isenção de IPI por determinado período, em setor cresceu 2,7% em novembro e mais de 20% em dezembro últimos, em comparação com os mesmos meses do ano anterior [163].

Todavia, incertezas em relação ao comportamento futuro das taxas de câmbio e de juros têm, obviamente, efeito deletério sobre investimentos. Sem condições de vislumbrar uma trajetória de médio e longo prazo de expansão do produto, as empresas tendem a repressar investimentos, postergando projetos de maior envergadura, limitando-se apenas a promoção de ajustes marginais na capacidade [163].

No Brasil, a carga tributária federal para veículos (IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados) é diferenciada de acordo com o volume do motor instalado no veículo. Infelizmente, a política de alteração, redução e revisão das alíquotas de imposto praticada recentemente não permite qualquer planejamento ou uso dos

valores em vigor. Além disso, não há no país qualquer incentivo para redução de consumo de combustível, o que tornaria os híbridos mais vantajosos.

Por outro lado, uma eventual redução no consumo de combustível, favoreceria a aceitação do veículo pelos consumidores, num processo semelhante ao que vem ocorrendo, no país, com os veículos convertidos para o consumo de gás natural, em decorrência da economia significativa de combustível.

No aspecto ambiental, a necessidade de se criar um programa nacional que contemplasse as emissões atmosféricas de origem veicular, começou a tomar corpo no início dos anos oitenta, a partir da constatação de que a grave poluição ambiental verificada nos grandes centros urbanos era causada predominantemente pelos poluentes atmosféricos gerados na queima de combustíveis em veículos automotores. Para tanto, o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA criou, em 1986, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE. considerado, mesmo a nível internacional, como um dos mais bem elaborados para o controle de emissão em fontes móveis [161].

A CETESB é o órgão técnico conveniado pelo IBAMA para assuntos de homologação de veículos em âmbito nacional, e teve a responsabilidade pela implantação e operacionalização PROCONVE. A CETESB adaptou as metodologias internacionais às necessidades brasileiras e desenvolveu os fundamentos técnicos para combater a poluição gerada pelos veículos automotores, que serviu de base para que o CONAMA criasse o Programa. O PROCONVE foi baseado na experiência internacional dos países desenvolvidos e exige que os veículos e motores novos atendam a limites máximos de emissão, em ensaios padronizados e com combustíveis de referência. O programa impõe ainda a certificação de protótipos e de veículos da produção, a autorização especial do órgão ambiental federal para uso de combustíveis alternativos, o recolhimento e reparo dos veículos ou motores encontrados em desconformidade com a produção ou o projeto, e proíbe a comercialização dos modelos de veículos não homologados, segundo seus critérios. O PROCONVE tem como objetivos a redução dos níveis de emissões de poluentes nos veículos automotores, além de incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automotiva, como em métodos e equipamentos para a realização

de ensaios e medições de poluentes. Os limites máximos de emissão de poluentes foram fixados, com um cronograma específico para três categorias distintas de veículos, são elas: "Veículo Leve de Passageiros" (automóveis); "Veículo Leve Comercial" (camionetes, vans, utilitários etc.) e "Veículo Pesado" (ônibus e caminhões). Todos os modelos de veículos automotores, nacionais ou importados, necessitam da "Licença para Uso da Configuração do Veículo ou Motor - LCVM", emitida pelo IBAMA, para poderem ser comercializados no Brasil [157].

Desde que foi implantado, em 1986, houve redução na emissão de poluentes de veículos novos em cerca de 97%, por meio da limitação progressiva da emissão de poluentes, através da introdução de tecnologias como catalisador, injeção eletrônica de combustível e melhorias nos combustíveis automotivos [157].

Os veículos leves foram considerados prioritários pelo PROCONVE, devido a sua grande quantidade e intensa utilização, que os caracterizam como o maior problema a ser enfrentado. Atualmente, discutem-se juntamente com as montadoras e os refinadores de petróleo, os avanços do PROCONVE, para o estabelecimento de novas fases do controle de veículos automotores. O cronograma de implantação, com limites progressivamente mais restritivos em suas diversas fases, está previsto para ser implementado até 2011. Os avanços do PROCONVE abrangem veículos leves e pesados, tanto os do ciclo Diesel como os do ciclo Otto e a medição para veículos leves segue a Norma NBR6601, que é baseada na norma americana US-FTP75 [157].

Os limites vigentes de emissões de veículos leves encontra-se na Tabela XVII.

Modelo e Data	CO	HC	NO _x	RCHO _x	MP _{2.5}	EVAP _s	CARTER	CO ₂ M.L.
Veículos Leves - Jan./1997	2,0	0,3	0,6	0,03	0,05	6,0	nula	0,5

Tabela XVII – Limites máximos de emissão para veículos leves novos, segundo o Proconve [157].

O PROCONVE considera a qualidade do combustível e a concepção tecnológica do motor como os principais fatores da emissão dos poluentes. Para obter a menor emissão possível, é necessário dispor de tecnologias avançadas de combustão e de

³ Medição de aldeídos válida apenas para motores de ciclo Otto.

⁴ Material Particulado apenas para veículo ciclo Diesel.

⁵ Apenas para veículos a gasolina C (78% gasolina + 22% etanol) ou álcool.

⁶ Apenas para veículos a gasolina C (78% gasolina + 22% etanol) ou álcool. M.L. – marcha lenta.

dispositivos de controle de emissão, bem como de combustíveis "limpos" (baixo potencial poluidor). O Brasil, pelo fato de ter adicionado 24% de álcool à gasolina, passou a produzir um combustível de elevada qualidade sob o ponto de vista ambiental e nos colocou como pioneiros na utilização em larga escala na adição de compostos oxigenados à gasolina e no uso de combustíveis renováveis. Além disso, a compatibilidade entre o motor e o combustível é fundamental para o pleno aproveitamento dos benefícios que podem ser obtidos, tanto para a redução das emissões, quanto para a melhoria do desempenho, dirigibilidade, consumo de combustível e manutenção mecânica. Ainda, a disponibilidade do etanol hidratado e da mistura Gasolina C, no mercado nacional desde o princípio da década de 80, trouxe benefícios para o meio ambiente e para a saúde pública, destacando-se a redução drástica das concentrações de chumbo na atmosfera, visto que o etanol é também um antidetonante substituto do aditivo a base de chumbo, totalmente retirado do combustível nacional desde 1991. Além disso, a adição de etanol à gasolina trouxe reduções imediatas da ordem de 50% na emissão de CO da frota antiga.

Há uma tendência mundial para a adição de alguns compostos oxigenados à gasolina, visando a redução do impacto poluidor. A experiência internacional nesse sentido tem demonstrado a superioridade da utilização de álcoois, notadamente do etanol como no caso brasileiro, em relação aos éteres, sob o ponto de vista ambiental e de saúde pública.

5.1.2. Modelo Proposto

5.1.2.1. Modelo do veículo

Observando-se o mercado global de veículos de passeio, os veículos médios apresentam o maior volume de comercialização. Prova disto é o modelo Corolla da Toyota, atualmente, o veículo mais vendido no mundo, mesmo levando-se em conta o Fusca da Volkswagen, cujo tempo de comercialização é muito maior.

De fato, a maioria dos veículos híbridos disponíveis no mercado encontram-se nesta categoria [118], [121].

Dentro desta categoria, os modelos sedãs apresentam a melhor possibilidade de hibridização, já que o volume ocupado pelos sistemas adicionais como pacote de baterias, poderia ocupar parte do compartimento do porta-malas sem afetar em

demasia a capacidade de carga útil. Além disso, os consumidores desta categoria podem pagar um prêmio extra por funcionalidades diferenciadas. No mercado brasileiro, podemos citar os modelos Chevrolet Vectra e Chevrolet Astra, Toyota Corolla, Volkswagen Santana e Volkswagen Bora, Fiat Marea e Honda Civic. Para o estudo de caso a ser desenvolvido neste trabalho, optou-se pelo uso das características Chevrolet Vectra, cujos dados técnicos são mais facilmente acessíveis, e é um modelo com longo tempo no mercado.

5.1.2.2. Configuração Híbrida

O problema de definição da configuração a ser utilizada exige uma análise apurada das possibilidades existentes, restringindo-se ao uso das soluções mais comumente adotadas, o que limita favoravelmente tanto o esforço de análise, quanto o número de combinações possíveis.

A Tabela XVIII mostra as principais configurações discutidas na seção 4.1, seus efeitos e funções disponíveis.

Efeito na Redução do Consumo de Combustível		Efeito no Desempenho do Veículo						
Marcha Lenta	o Motor em Regenerativa	Frenagem	Controle de Operação com	Alta Eficiência	Elétrica	Redução de Vibração do Motor	Atracada e Auxílio na	Alta Potência Adicional
Excelente	Excelente	Superior	Superior	Excelente	-	Pouco Favorável	Pouco Favorável	-
Superior	Superior	Reduzido	Pouco Favorável	-	-	Superior	Pouco Favorável	-
Híbrido Moderado (acionamento por correia)	Superior	Reduzido	Pouco Favorável	-	-	Superior	Pouco Favorável	-
Híbrido Moderado (motor de partida/gerador integrado)	Superior	Superior	Pouco Favorável	-	-	Excelente	Superior	Reduzido
Híbrido de Potência (Sêne/Paralelo)	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	-	Superior	Superior	Superior

Tabela XVIII – Comparação de Funcionalidades e Efeitos dos Sistemas Híbridos [151] e [153].

Através da análise do quadro apresentado, observa-se claramente que a configuração híbrido de potência é superior ou excelente na maioria dos quesitos apresentados. Apenas no quesito de redução da vibração do motor ela se mostra sem efeito, já que o gerador, que serve para dar partida o motor, não está conectado ao mesmo eixo do virabrequim do MCI. Neste quesito, apenas a configuração de motor de partida/gerador integrado ao MCI pode ser utilizada para reduzir a vibração no veículo, garantindo mais conforto aos ocupantes. Porém, como visto nas seções 2.3.1 e 4.2.2, esta configuração ainda apresenta problemas de construção e controle.

A configuração série/paralela, é a mais utilizada em veículos híbridos de potência atualmente comercializados ou em fase de comercialização [151], [155]. Graças à

capacidade do MCI em mover o veículo e alimentar as baterias, através do motor-gerador, ou acionar o motor elétrico, esta configuração apresenta boa eficiência em condições de cruzeiro em altas velocidades, ou em situações transitórias em baixas velocidades. Contudo, o sistema apresenta a ineficiência inerente provocada pela conversão permanente de energia no gerador.

Para acomodar todas as vantagens dos sistemas apresentados, propomos um método novo de hibridização, a ser comparado com o sistema híbrido de potência do Toyota Prius, por estar a mais tempo no mercado, já que foi o primeiro veículo de produção em massa a ser comercializado [153].

O novo sistema, apresentado na Figura 23, consiste em uma configuração paralela/série de potência, utilizando motor-de-partida/gerador integrado com tração nas rodas dianteiras, pacote único de baterias NiMH e mínima alteração nos demais sistemas de um veículo existente.

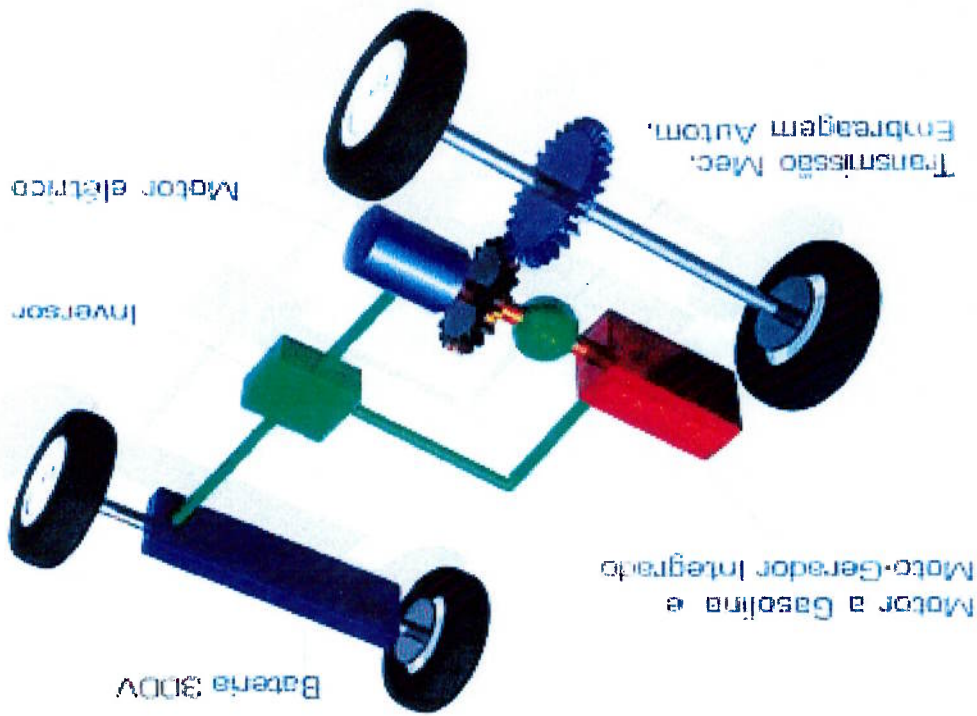


Figura 23 – Configuração de Hibridização Proposta.

O resultado final esperado para economia de combustível e emissões deve ser superior ao convencional, algo que não pode ser alcançado apenas com o uso de novas tecnologias no motor de combustão interna.

A comparação das duas configurações encontra-se na Tabela XIX. Como pode ser observado na comparação, a solução proposta não é superior àquela utilizada pelo Toyota Prius, que além de exaustivamente testado, possui benefícios inerentes que a solução proposta não comporta. Deste modo, utilizaremos o modelo do Toyota Prius.

Híbrido Proposto	Híbrido de Potência – Toyota Prius 2004	Análise
------------------	---	---------

Componentes Gerais		
Motor de Combustão Interna e Acessórios.	Gerador/Motor de Partida Integrado (ISG) ao motor de combustão interna.	Motor de Combustão Interna Simples, sem acessórios como motor de partida ou alternador.
Motores Elétricos.	Um motor ISG e um motor elétrico de propulsão principal.	Dois moto-geradores de capacidades e funções distintas.
Sistemas de Transmissão e Acoplamento.	Embreagem eletrônica, transmissão manual de 5 velocidades.	Engrenagem planetária simples, sem embreagem
Baterias.	Pacote de baterias NiMH de alta tensão (300V) para o ISG e motor principal.	Pacote de baterias NiMH de alta tensão (500V) para os moto-geradores.
Inversores.	Inversor duplo de 300V para o ISG e motor principal.	Inversor duplo de 500V para os moto-geradores.
Funcionalidades Híbridas		
Capacidade de Partida do MCI.	Partida realizada pelo ISG.	Partida realizada pelo componente denominado gerador, através da planetária.
Abrangeção do Controle dos Sistemas.	Controle dos Sistemas de embreagem, motores elétricos e MCI, baterias e inversores.	Controle dos Sistemas de motores elétricos e MCI, baterias e inversores.
Complexidade do Controle dos Sistemas.	Os componentes podem trabalhar isoladamente ou em conjunto o que exige controle dos torques aplicados nos eixos.	O sistema exige o trabalho de simultaneamente, adequando as velocidades das engrenagens planetárias.

Tabela XIX – Comparação entre as configurações Proposta e do Toyota Prius.

5.1.2.3. Motor e Transmissão

Para o veículo híbrido proposto, escolheu-se um motor que possa mover o veículo, mesmo com baixo desempenho. Motores de 1.600cm³ a 2.000cm³, são opções disponíveis, mas no caso do Chevrolet Vectra, o motor 1.600cm³ já foi utilizada com sucesso em aplicações na Europa. No Brasil, a menor motorização já utilizada no Vectra foi o motor de 1.800cm³.

Sendo assim, o modelo proposto deverá apresentar as seguintes características:

- Motor de Combustão Interna: motor de a gasolina, quatro cilindros em linha, com 2 válvulas por cilindro, volume deslocado dependente dos resultados de simulação com os dados disponíveis. Admite-se, eventualmente, o uso de tecnologias adicionais disponíveis para ampliar a potência, como através da elevação da taxa de compressão, da tecnologia de controle variável de válvula e

da desativação de cilindros. Esta opção apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

- redução de custo devido à diferenciação de impostos incidentes sobre a cilindrada do motor – dependente da política a ser adotada no futuro;
- menor consumo de combustível, graças à redução do volume de deslocamento do motor e seleção da tecnologia de 8 válvulas, que apresenta melhor curva de torque em regimes de rotação menor;
- capacidade de torque reduzida do motor, compensada pelo torque do motor elétrico, associado à hibridização;
- uso de gás natural como combustível foi pretendido devido à necessidade adicional de espaço para o tanque de armazenamento de combustível.

- Transmissão Eletro-CVT: idêntica ao sistema utilizado no Toyota Prius, que garante as seguintes vantagens:

- não há necessidade de marcha à ré, provida pelos motores elétricos.
- garante que o MCI trabalhará mais próximo ao ponto ótimo de funcionamento, reduzindo emissões e consumo de combustível;
- menor custo em relação aos outros modelos de troca de marcha automática, como a transmissão automática ou CVT convencional.

5.1.2.4.

Motores e Sistemas Elétricos

Motores Elétricos: serão utilizados dois motores elétricos de tração, PM, AC, instalados no compartimento do motor, na dianteira do veículo. O motor de partida/gerador é conectado na engrenagem solar do sistema planetário da CVT e outro motor é conectado à engrenagem anelar, acionando o eixo de saída que traciona as rodas dianteiras. O MCI é montado de forma a acionar o suporte das engrenagens planetárias.

- Motor-Gerador de Propulsão Principal (aqui denominado Motor), com tensão de trabalho nominal de 300V, é conectado diretamente ao eixo de acionamento das rodas por engrenagens redutoras, garantindo maior eficiência na regeneração da frenagem, além de apresentar as seguintes funções [130]:

- regeneração de energia durante a frenagem;

- aporte de potência extra em aceleração máxima;
- acionamento do veículo em baixas velocidades, e em marcha à ré.

- Motor de Partida/Gerador: sistema integrado de 300V, conectado à engrenagem solar. É ponto importante no controle da velocidade de saída do sistema de engrenagens planetária e apresenta as seguintes funções:

- carrega as baterias, em operação de modo “em série”, e é acionado pelo MCI, quando há potência disponível ou se faça necessário;
- controla a rotação da engrenagem solar e consequentemente a diferença da rotação das engrenagens planetárias, garantindo que o MCI trabalhe sempre em seu ponto ótimo;
- funciona como motor de partida para o MCI;

Inversores: operam como sistema de controle de carga e distribuição de eletricidade para as baterias e motor elétrico, convertendo as tensões e transformando a corrente contínua da bateria para alternada para o motor e vice-versa. Haverá dois circuitos independentes – um para cada motor elétrico do sistema de 300V.

Baterias: o pacote híbrido será composto por baterias de NiMH, com tensão nominal de 300V, garantido maior potência com menor corrente;

5.1.2.5. Sistemas de Controle

O modelo de controle a ser utilizado, será aquele utilizado no Toyota Prius, o qual usamos como modelo, e que por sua vez, usa uma abordagem de controle distribuída, como pode ser observado na Figura 24.

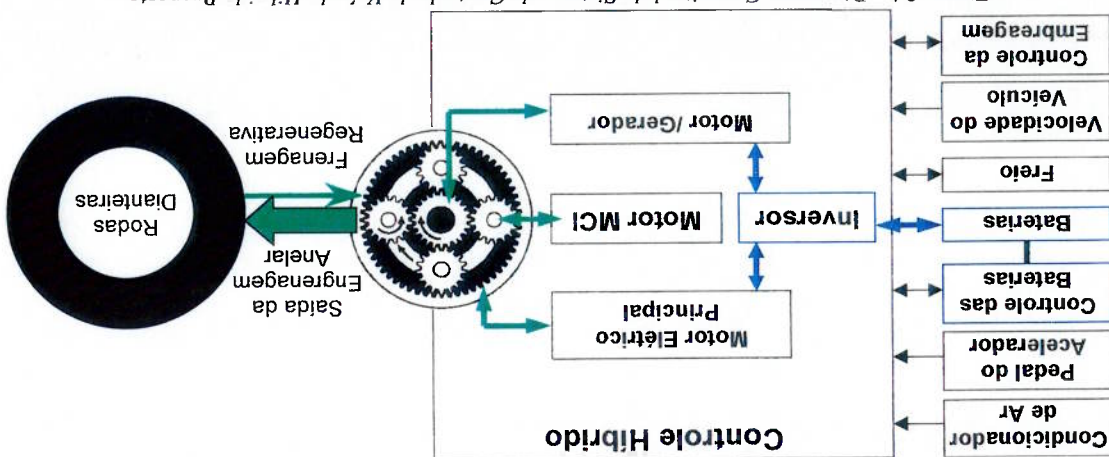


Figura 24 – Diagrama Conceitual do Sistema de Controle do Veículo Híbrido Proposto.

Nesta abordagem, cada componente tem seu próprio controle individual, gerenciado por um controle híbrido central e com o qual se comunica através da rede de comunicação interna do veículo.

O sistema de controle híbrido do veículo proposto irá determinar, coordenar e controlar [130]:

- o torque de tração para todos os motores elétricos e de combustão, tanto nas marchas à frente, quanto na marcha à ré;
- o torque de frenagem distribuído entre frenagem regenerativa no motor de tração elétrico e frenagem hidráulica no sistema de freio;
- a partida e desligamento do MCI para redução de emissões e consumo de combustível;
- a distribuição de torque de tração entre o motor de combustão e as máquinas elétricas, de acordo com a aceleração e velocidade requeridos pelo motorista.

5.1.3. Simulações e Resultados

Para avaliarmos os resultados do modelo proposto, utilizaremos o software ADVISOR 2002, que permite a simulação de diferentes configurações e arquiteturas de veículos convencionais, híbridos ou elétricos [152]. A tela para entrada de dados do sistema e seleção de modelos é apresentada na Figura 25.

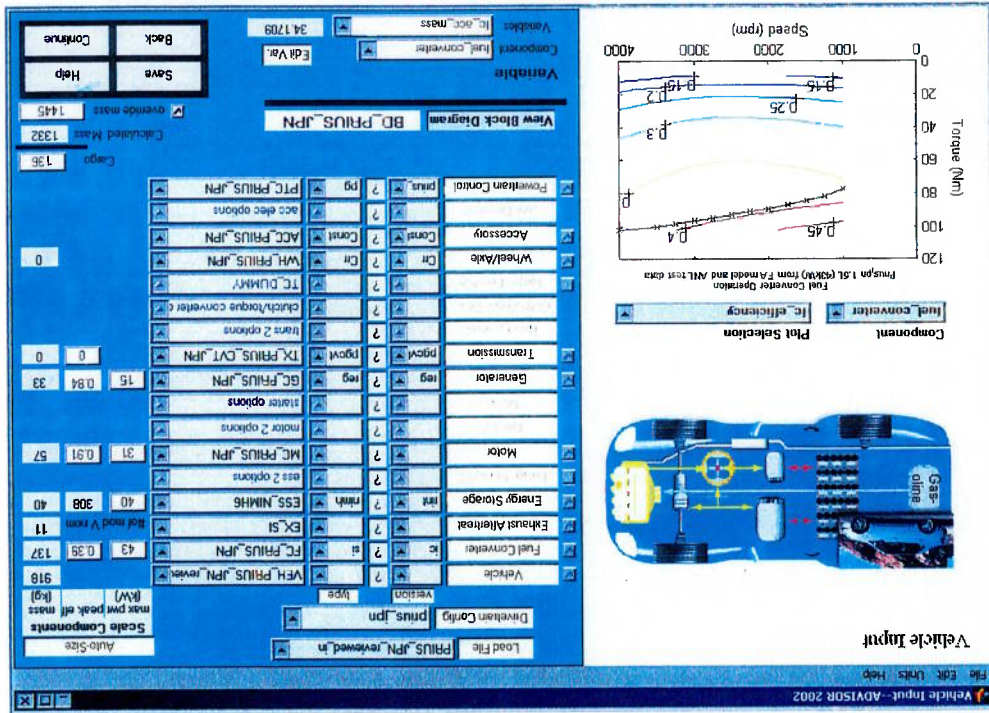


Figura 25 – Tela de Seleção de Modelos de Veículo e Dados no ADVISOR 2002.

O ADVISOR, ou Simulador de Veículos Avançados, foi desenvolvido inicialmente em 1994 para suportar o programa de sistemas de propulsão híbrida do Departamento de Energia dos EUA, e foi projetado para ser preciso, rápido, fácil de compartilhar e de usar [152]. O sistema – fundamentalmente baseado em uma abordagem empírica – usa o desempenho dos componentes do trem de potência para estimar o consumo de combustível e emissões em um dado ciclo de tráfego, bem como a capacidade de aceleração do veículo em esforço máximo. Conceitualmente, o ADVISOR usa uma abordagem híbrida de controle em retrocesso/avanço, que é fortemente relacionada com uma abordagem estrita de retro-observação. Nesta abordagem, como pode ser observado na Figura 26, nenhum modelo de comportamento do motorista é necessário e as forças necessárias para acelerar o veículo em cada incremento de tempo, são calculadas diretamente da velocidade definida pelo ciclo de tráfego utilizado [117].

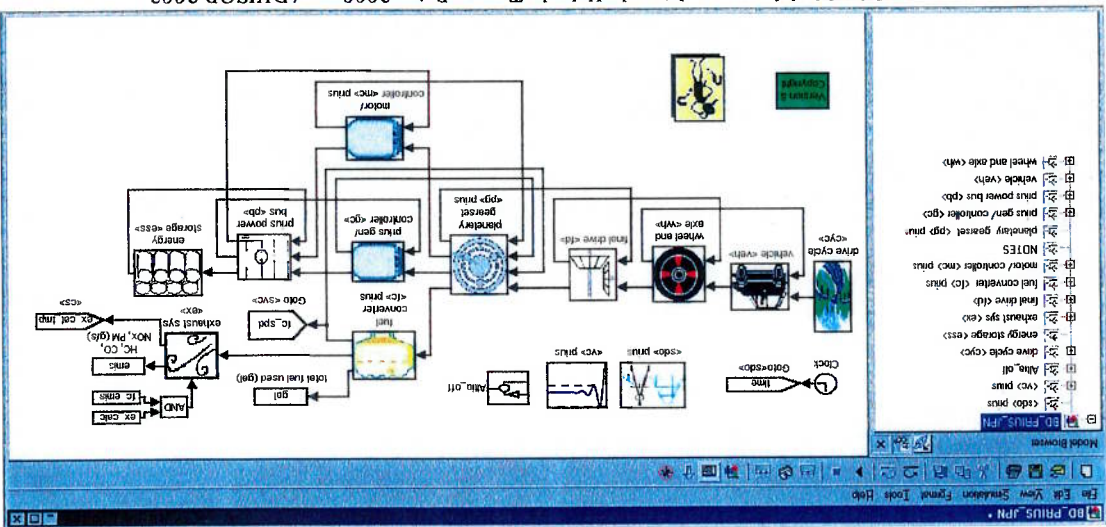


Figura 26 – Modelo matemático do Veículo Toyota Prius 2000 no ADVISOR 2002.

Esta abordagem é única no modo como manipula os limites de desempenho dos componentes em seu cálculo em fluxo de retrocesso, com a adição de um cálculo simples de fluxo direto. As hipóteses que descrevem a combinação de abordagens diretas e de retrocesso são:

1. nenhum componente irá solicitar do elemento anterior, mais torque ou potência além do que ele pode usar;
2. a eficiência de um componente é igual, tanto nos cálculos diretos, quanto nos cálculos em retrocesso.

Estudos recentes avaliaram os resultados produzidos pelo ADVISOR e os compararam com dados obtidos em testes de veículos reais. Certo estudo mostra que a precisão dos resultados difere apenas em 0,8% para o tempo de aceleração e 1,9% para uso de energia [117].

No entanto, outro estudo, utilizando a versão 3.1 do ADVISOR, especificamente para o Toyota Prius 1997, demonstra que algumas considerações do modelo empírico devem ser revistas, para aproximar melhor os resultados do modelo com aqueles obtidos em testes de um veículo real [139]. Vários ciclos de tráfego são utilizados no estudo e, no pior caso, obtém-se 9% de diferença entre os dados de testes e os dados de simulação. O estudo ainda indica que a versão citada do programa não atende condições de partida-a-frio no motor, provocando divergências de resultados em alguns ciclos de tráfego que exigem partida a frio, como pode ser observado na área indicada na Figura 27.

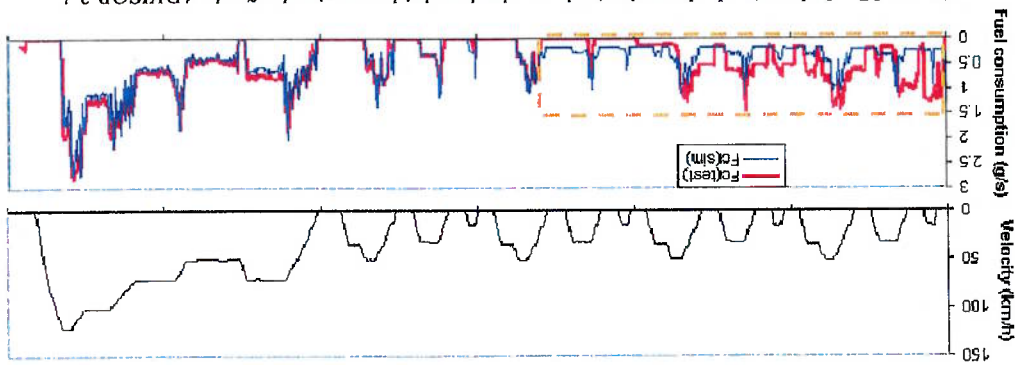


Figura 27 – Indicação de divergência de resultados obtidos na simulação do ADVISOR 3.1.

Através da análise dos resultados de simulações do Toyota Prius, conclui-se ainda, que o ADVISOR também não é preciso no aspecto de resultados de emissões atmosféricas. Os resultados analisados mostram que as emissões do Prius, de acordo com os parâmetros da Agência de Proteção Ambiental americana (EPA), teoricamente estão próximas dos limites estabelecidos para veículos automotores no Brasil, o que contraria outros dados disponíveis [124].

Considerando-se que o objetivo deste trabalho é avaliar as soluções construídas do sistema, seus aspectos técnicos e teóricos e resultados de simulações, a precisão apresentada é considerada suficiente para comparação de resultados, principalmente em relação a aspectos como consumo de combustível e desempenho do sistema. Os

aspectos emissões e comportamento a frio, serão apresentados apenas para referência e indicação de possíveis melhorias.

Revisão do Modelo do Toyota Prius

As considerações dos estudos indicados acima foram efetuadas, tanto quanto possível, ao modelo existente na versão 2002 do programa, e os resultados obtidos foram confrontados com os dados apresentados nos estudos citados. Contudo, ao avaliar-se o modelo apresentado na versão 2002, pode-se observar que algumas modificações já haviam sido incorporadas pelos desenvolvedores do programa, em acordo com alterações realizadas no veículo Prius 2000. Isto influenciou os resultados obtidos como consumo de combustível e emissões, tal como aconteceu ao veículo real.

O resultado da simulação do modelo revisado do Prius para o novo ciclo de tráfego europeu (NEDC - *New European Driving Cycle*) pode ser observado na Figura 28.

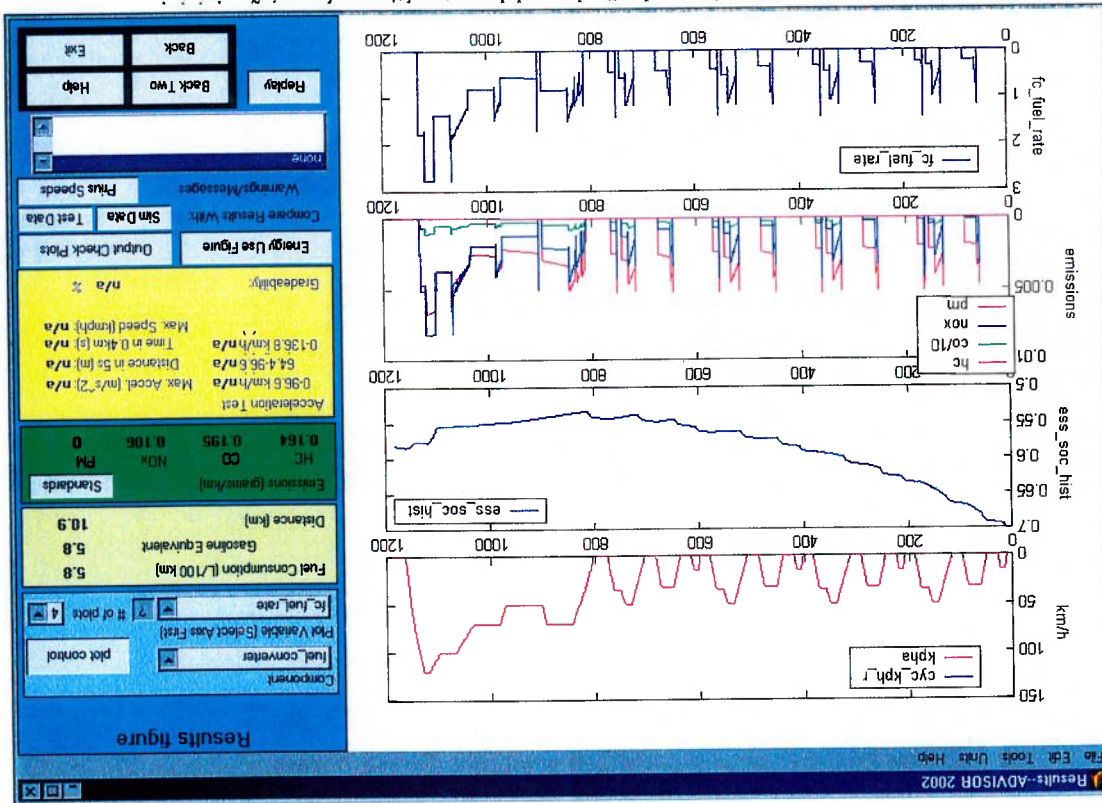


Figura 28 – Resultados da simulação do modelo matemático após revisões iniciais.

As principais alterações a serem incorporadas ao modelo, de acordo com o estudo realizado, estão no módulo de controle de funcionamento do motor, módulo de

injeção de combustível e parâmetros de correlação da velocidade de operação do motor com a potência solicitada [139].

As mudanças ocorridas no módulo de funcionamento do motor, apresentado na configuração final na Figura 29, têm por objetivo permitir que o veículo trabalhe mais tempo em modo elétrico apenas, ou desligar o motor quando este não é necessário. Elementos adicionais de entradas do controle envolvem a velocidade e aceleração do veículo, potência necessária e carga das baterias.

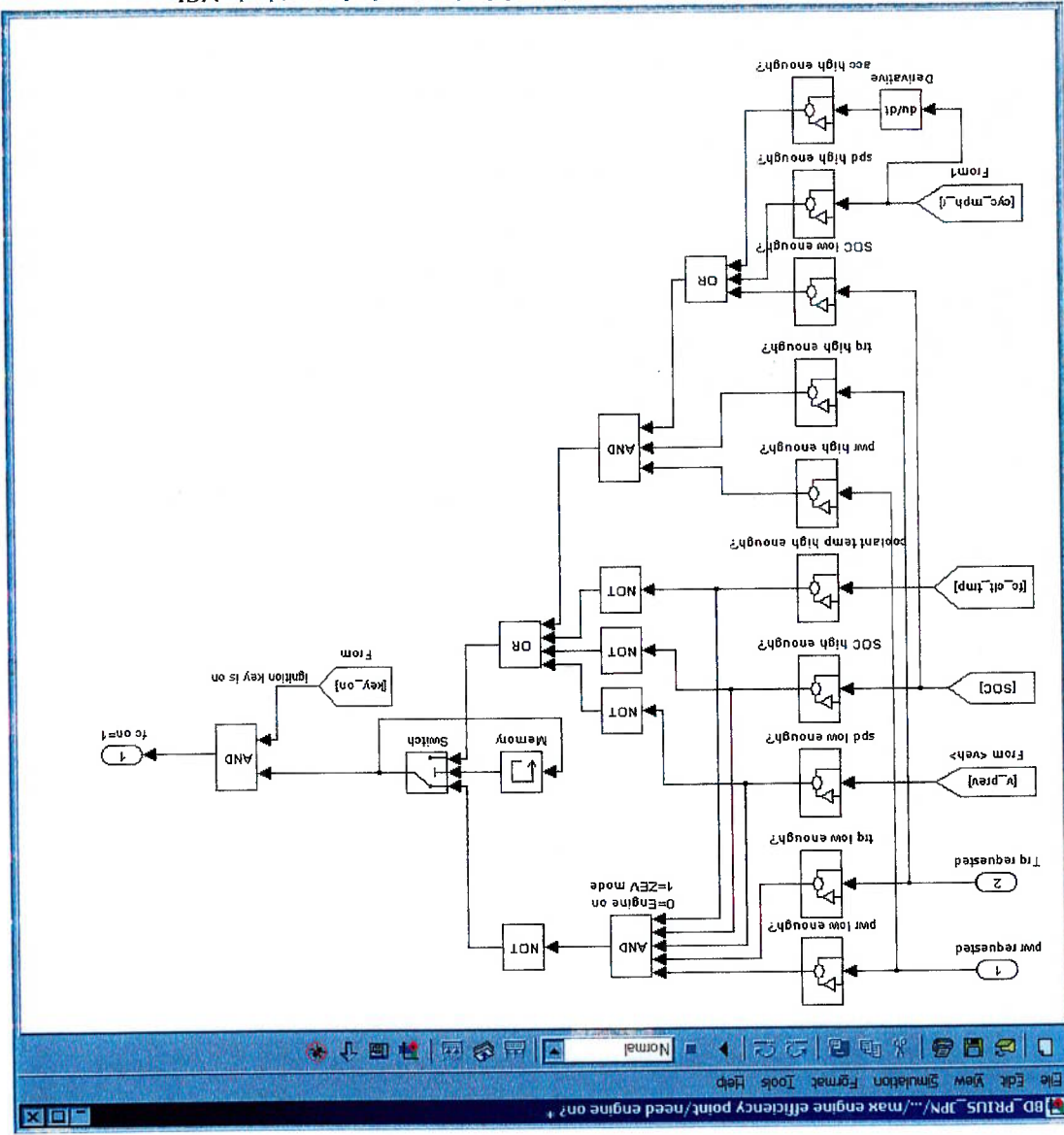


Figura 29 – Modelo matemático do módulo de controle de partida do MCI.

Para o módulo de injeção de combustível, apresentado na configuração final na Figura 30, agregou-se verificação da velocidade, aceleração, temperatura do motor e carga da bateria. Estas alterações permitem ao modelo cortar a injeção de

combustível nos casos que o motor está em funcionamento com carga baixa, e, normalmente, em desaceleração, reduzindo o consumo e as emissões.

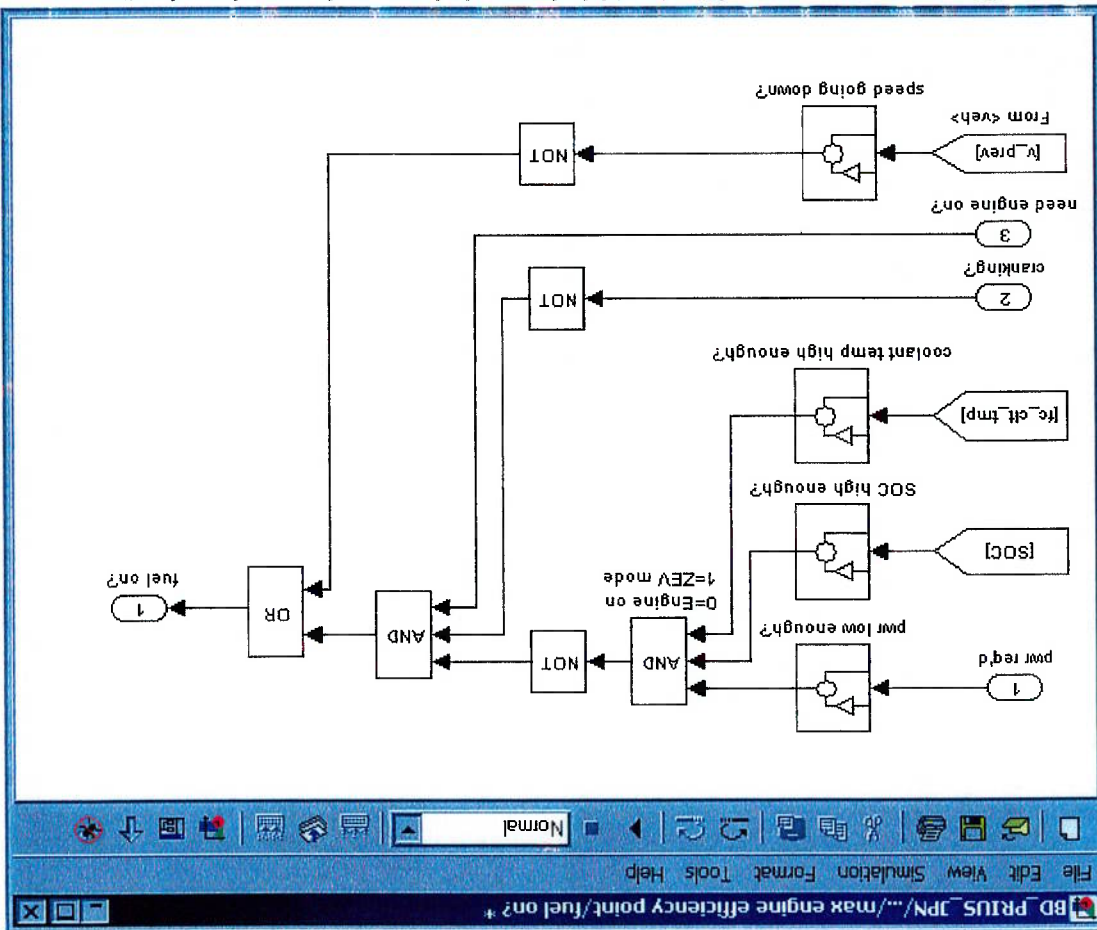


Figura 30 – Modelo matemático do módulo de controle de injeção de motor de combustão.

No geral, como pode ser observado na Tabela XX, os resultados da simulação do modelo após a alteração, conduziram a níveis inferiores de consumo e emissões, ao comparar-se com resultados obtidos na simulação do modelo original do programa.

Modelo no Advisor 2002 – Original		Modelo no Advisor 2002 – Reviso		Diferenças nos resultados do modelo reviso com o original	
Autonomia (km/l)	Emissões (g/km)	Autonomia (km/l)	Emissões (g/km)	Autonomia (%)	Emissões (%)
62,5	0,083/ 0,079/ 0,022	28,6	0,163/ 0,151/ 0,042	-54%	49% 48% 48%
33,3	0,144/ 0,167/ 0,053	21,3	0,170/ 0,195/ 0,081	-36%	15% 14% 35%
25	0,144/ 0,172/ 0,074	17,2	0,164/ 0,195/ 0,106	-31%	12% 12% 30%
25,6	0,125/ 0,135/ 0,064	17,5	0,143/ 0,171/ 0,106	-32%	13% 21% 40%
ECE+ EUDC					
J1015					
NEDC					
Ciclo de Tráfego					

Tabela XX – Resultados de simulações dos modelos matemáticos.

Na análise realizada no ADVISOR 2002 após as alterações anteriores do modelo proposto e consultando diferentes fontes de informações técnicas sobre os diversos modelos Prius lançados até hoje [116], [121], [123], [152], [153], [154], percebe-se

que algumas melhorias e alterações realizadas no Prius 2004, podem ainda ser agregadas ao modelo matemático, melhorando o desempenho geral do modelo apresentado. Usa-se, para efeito de ilustração, os resultados gráficos e numéricos obtidos com o ciclo de tráfego NEDC (*New European Driving Cycle*), ilustrado na Figura 31, demonstrando os ganhos percebidos nas alterações realizadas no modelo matemático.

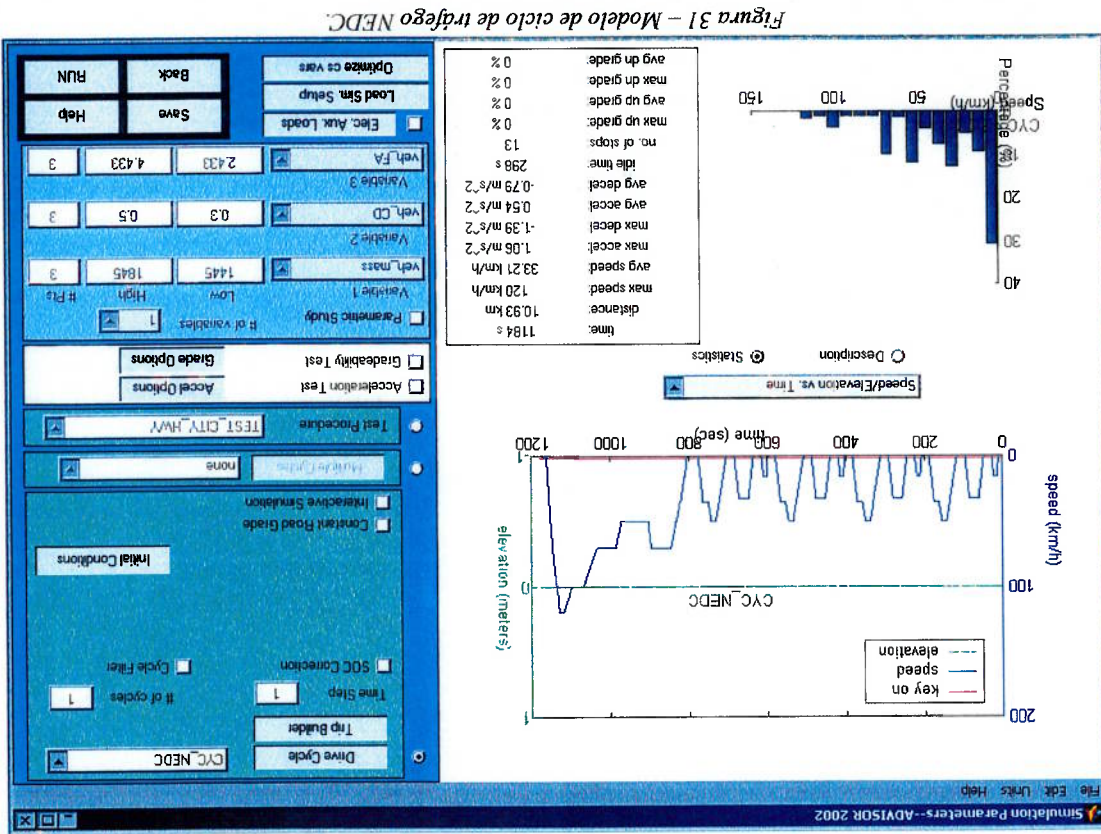


Figura 31 – Modelo de ciclo de tráfego NEDC.

Segundo a fonte da revisão inicial, quando a aceleração do veículo é menor que 0,15g, a velocidade máxima na qual o motor de combustão interna do Prius permanece desligado é de 20km/h [139]. Contudo, na geração seguinte do Prius, esta velocidade foi redefinida como 45km/h [152]. Além disso, no modelo anterior, a frenagem regenerativa é utilizada apenas como uma pequena tração da força total de frenagem, o que resulta em menos energia a ser recarregada na bateria para o próximo ciclo de aceleração. No novo Prius, a parcela regenerativa passou a ser o principal componente da frenagem do veículo, sendo que o freio mecânico é usado apenas como elemento de segurança ou em casos em que a demanda por frenagem é máxima. O valor definido para parcela de frenagem regenerativa geral é de 90%

[154]. Assim, ajustando-se os parâmetros do modelo de acordo com os valores acima, percebe-se que há reduções em consumo de combustível e em algumas emissões, como apresentado na Figura 32.

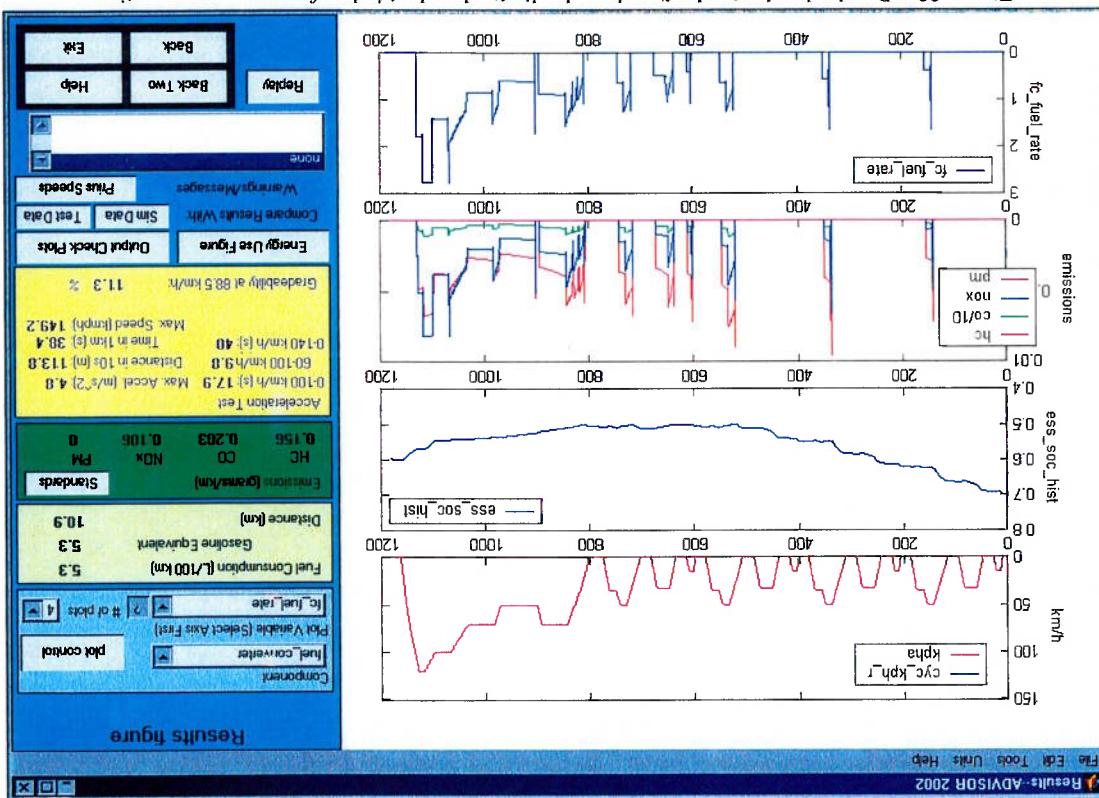


Figura 32 – Resultados de simulação, alterados limite de velocidade e frenagem regenerativa.

Os resultados da Figura 32, em comparação com os resultados da Figura 28, são cerca de 9% menor no consumo de combustível, e possivelmente 5% menor na emissão de hidrocarbonetos, enquanto que as emissões de óxidos de nitrogênio se mantêm constantes, com provável aumento de 4% nas emissões de monóxido de carbono. Como visto, as emissões não podem ser consideradas como resultados confiáveis e servem apenas como referência. Um outro resultado direto da revisão do procedimento de frenagem regenerativa é o estado de carga (SOC) das baterias ao final do ciclo, que tem um acréscimo de cerca de 3% no valor final. Continuando a análise do modelo, um outro parâmetro a ser verificado é aquele que delimita a potência mínima, acima da qual o motor deve aplicar torque máximo. A lógica do controle original, apresentada na Figura 33, estabelece que acima de certo limite de potência solicitada, o motor de combustão deve prover a potência máxima.

Inadvertidamente, em nossa opinião, este parâmetro está ajustado para cerca de 15kW, forçando o motor a trabalhar a plena carga, mesmo quando isto não é necessário. Como alternativa proposta, substituiu-se o modelo de limite de potência mínima por um modelo de avaliação da aceleração da rotação do motor, apresentado na Figura 34.

Figura 33 – Lógica do modelo original para controle dos pontos de operação do motor.

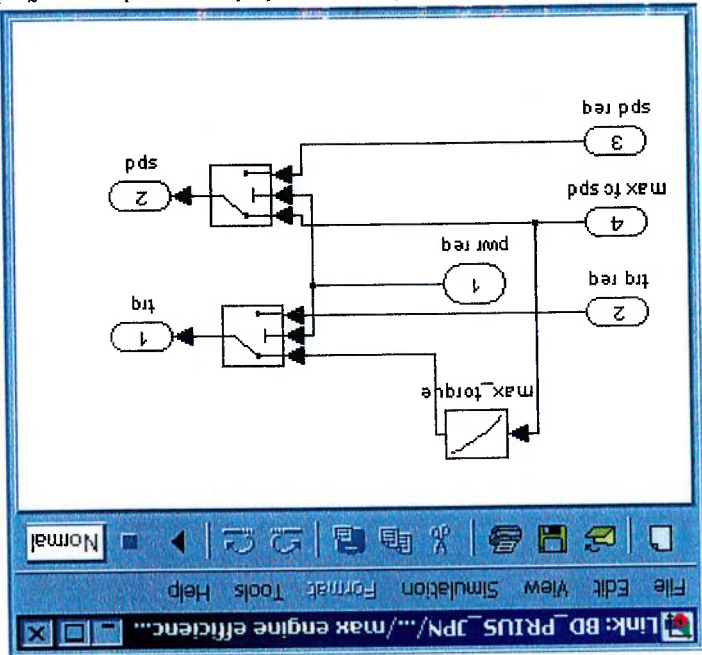
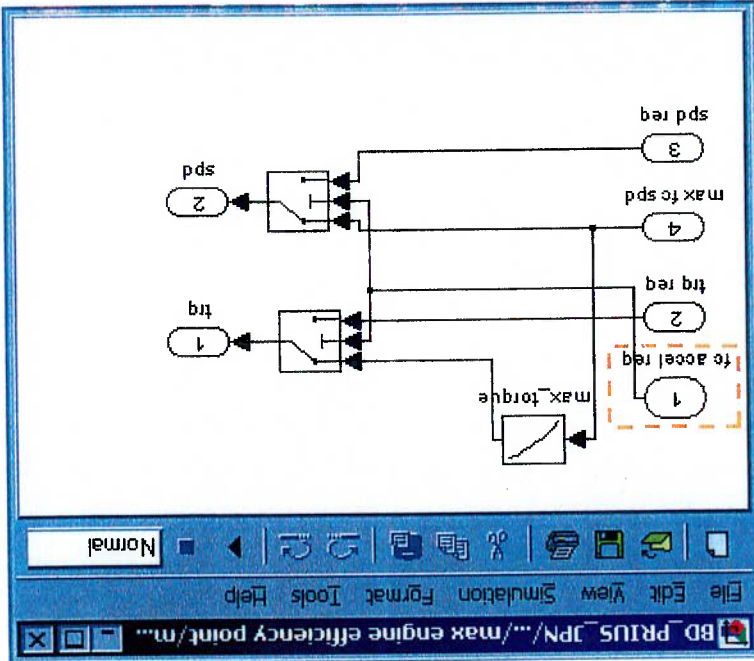


Figura 34 – Modelo proposto para controle dos pontos de operação do motor.



na Figura 34.

O modelo foi implementado de tal modo que, toda vez que variação da rotação do motor ultrapassar um valor mínimo, o motor passa a trabalhar em carga plena. O valor adotado é equivalente ao definido na revisão inicial do Prius no modelo, ou seja, o equivalente a 0,15g [139].

Como pode ser observado na Figura 35, o conjunto fica mais tempo em carga parcial e foram eliminados alguns picos de consumo e regiões de trabalho em plena carga, o que é mais evidente na seção direita do gráfico. Os resultados gerais mostram redução adicional no consumo de combustível de 4% e redução potencial de 1% na emissão de hidrocarbonetos, 2% nas emissões de monóxido de carbono e cerca de 3% nas emissões de óxidos de nitrogênio. A desvantagem é a redução adicional no estado final da carga das baterias de cerca de 2%, o que ocorre devido à eliminação do excesso de torque disponível para recarregar as baterias.

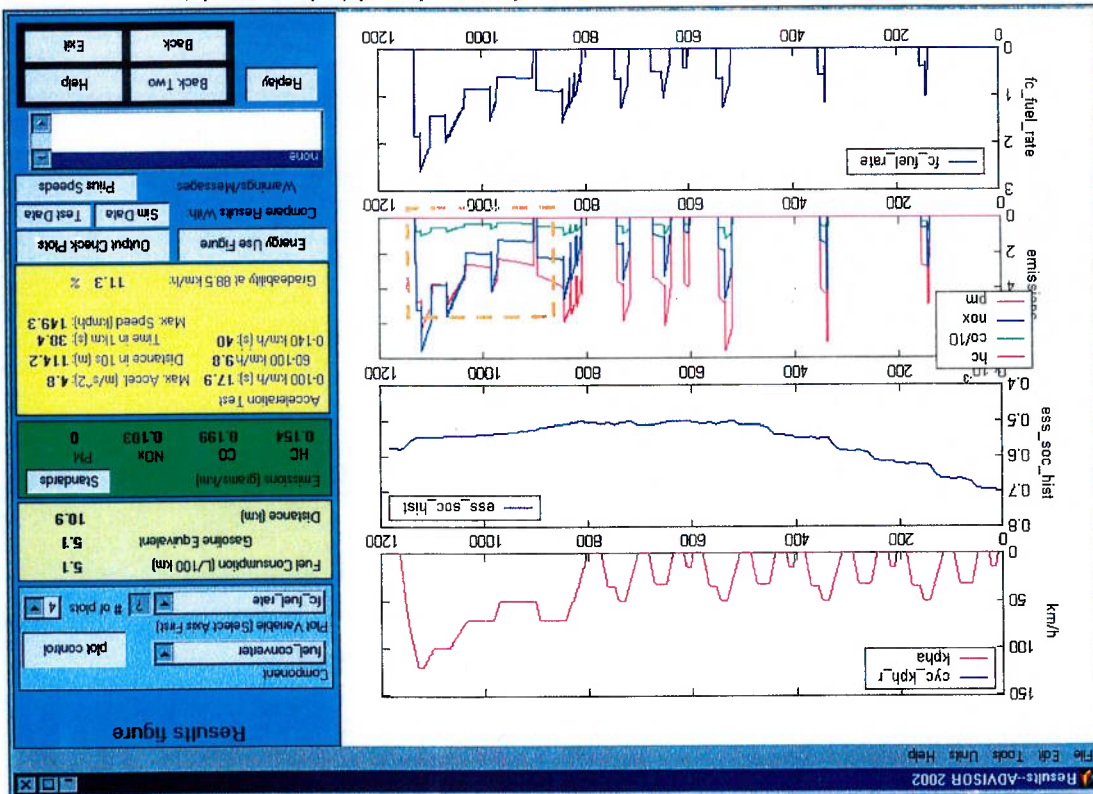


Figura 35 – Resultados de Simulação de Simulação com alteração do modelo de carga máxima.

À seguir, observou-se que em simulações executadas com incremento de tempo pequeno, o sistema apresenta instabilidade sem qualquer interferência externa aparente. Investigando-se o módulo de simulação do motor, percebeu-se que há uma realimentação do sistema para a predição de carga no motor, ilustrado na Figura 36.

Esta realimentação utiliza a média da velocidade entre o instante anterior e o atual para prever qual é a carga do motor no próximo instante de tempo, adicionando uma carga extra de inércia e, deste modo, permitindo que o motor disponha de um torque adicional para melhorar o desempenho.

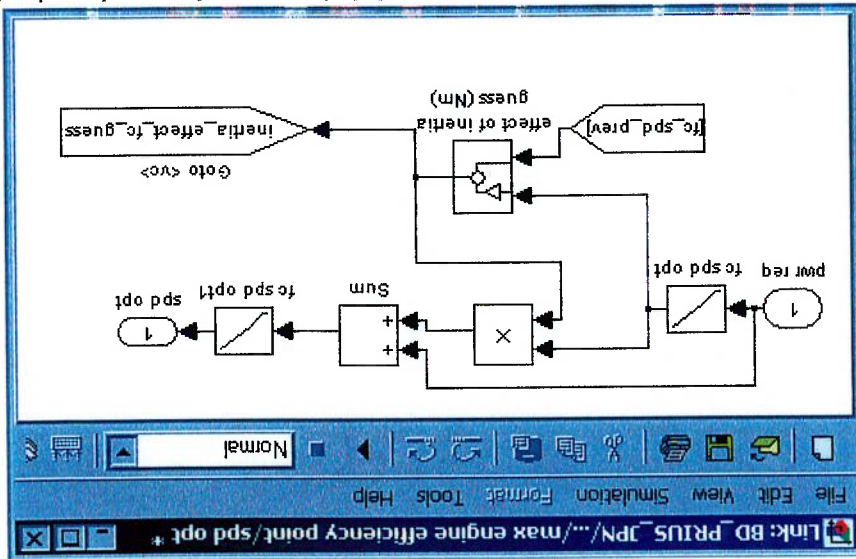


Figura 36 – Módulo original de controle da velocidade de operação do motor de combustão.

Foi constatado que este método adiciona uma carga que realmente não existe e que, portanto, há excesso de torque disponível na saída do motor. O resultado é uma oscilação das saídas do sistema. Ao remover-se a realimentação adicional do sistema, como mostrado na Figura 37, a oscilação indesejada é eliminada, e com a redução de carga significativa, o sistema apresenta, de fato, as reduções de consumo de combustível e emissões esperadas.

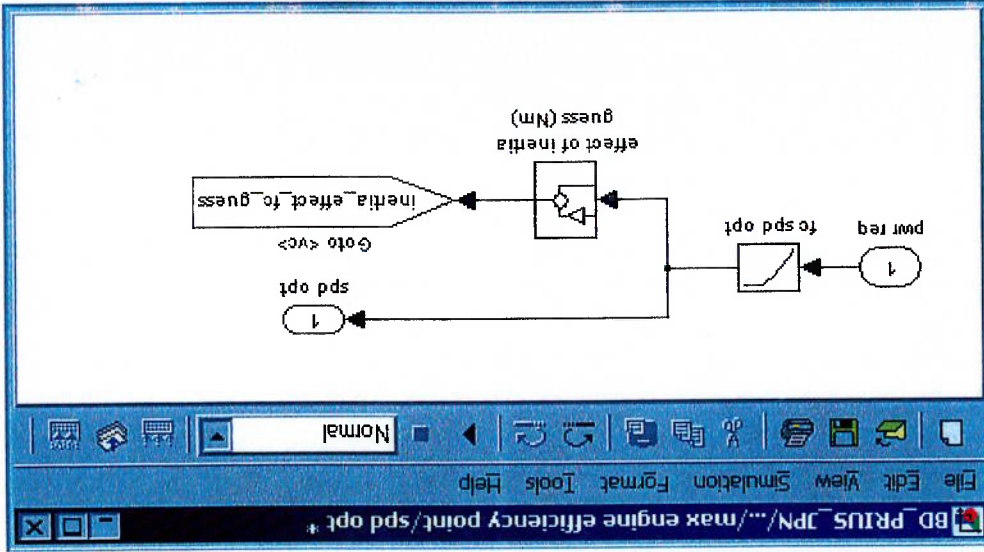


Figura 37 – Módulo proposto de controle da velocidade de operação do motor de combustão.

A Figura 38 apresenta o resultado da eliminação da previsão de carga do motor, com a redução dos picos de consumo, mais evidente na seção direita do gráfico. Os resultados gerais são 24% de redução adicional no consumo de combustível, redução de cerca de 23% de óxidos de nitrogênio. Mais uma vez, há uma redução no estado final da carga das baterias em cerca de 2%.

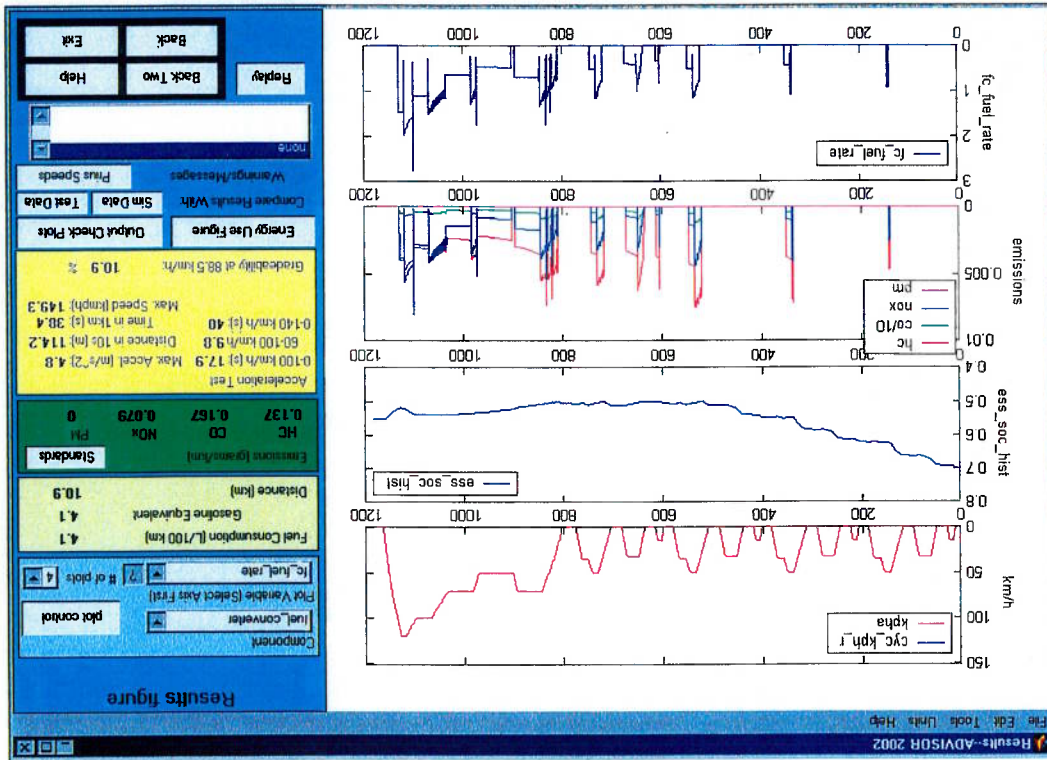


Figura 38 – Resultados de simulação com alteração do modelo de carga máxima.

Como resultado final das melhorias propostas, obtêm-se redução total de cerca de 29% no consumo original de combustível para o ciclo analisado. O potencial de redução de emissões é de cerca de 12% para hidrocarbonetos, 18% para monóxido de carbono e 26% para óxidos de nitrogênio. O estado de carga final da bateria tem redução de cerca de 5%. Ainda de acordo com as propostas analisadas, outras melhorias poderiam ser implementadas, visando principalmente a substituição dos componentes do sistema de propulsão por outros mais potentes ou de maior capacidade, tais como o motor de combustão interna, além das próprias características dinâmicas do veículo. Infelizmente, devido à indisponibilidade de dados de tais conjuntos para simulação, tornou-se inviável a adoção destas alternativas.

Aplicação no Vectra

Neste estudo, o desempenho da aceleração definido para o veículo projetado deve ser igual ou superior àquele do veículo padrão que se pretende hibridizar. Para o Vectra 2.0, a aceleração de 0 a 100km/h ocorre em 11s, sua velocidade máxima é de 193km/h no plano e sua economia de combustível urbano de 10,2km/l e na estrada de 14,5km/l, com resultado médio de 12,1km/l. A capacidade de carga útil no modelo é de 530kg, totalizando 1.800kg de massa total do veículo.

Devido à ausência de modelo específico no Advisor 2002 para o Vectra proposto com os sistemas híbridos, foi utilizado o modelo matemático do Toyota Prius, incluindo as melhorias propostas.

Na medida do possível, foram alterados parâmetros para aproximar o modelo proposto com aquele disponível. As principais características alteradas foram a massa total e sua distribuição, aspectos aerodinâmicos, relação final do diferencial e diâmetro dos pneus, como apresentado na Figura 39.

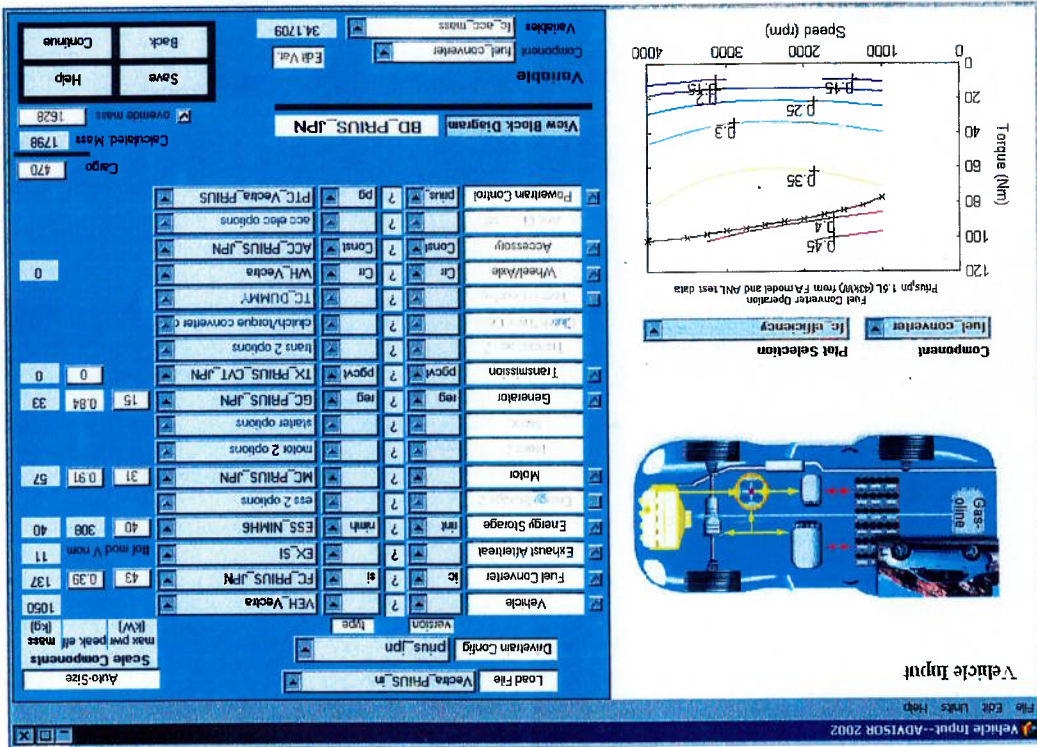


Figura 39 – Tela de dados do Vectra com configuração Toyota Hybrid System.

Para análise do modelo foi utilizado o Procedimento de Teste Federal (FTP) dos EUA, apresentado na Figura 40 e adotado no Brasil pelo CONAMA como procedimento padrão do PROCONVE [157].

Inicialmente, foi utilizado o motor original do Prius para análise do desempenho do veículo. A análise dos resultados, apresentados na Figura 41, demonstra que o MCI de 1.500cm³ e 41kW não é suficiente para suprir a demanda de torque necessário para atingir as especificações propostas.

Figura 40 – Seleção do Procedimento de teste FTP para simulação do modelo.

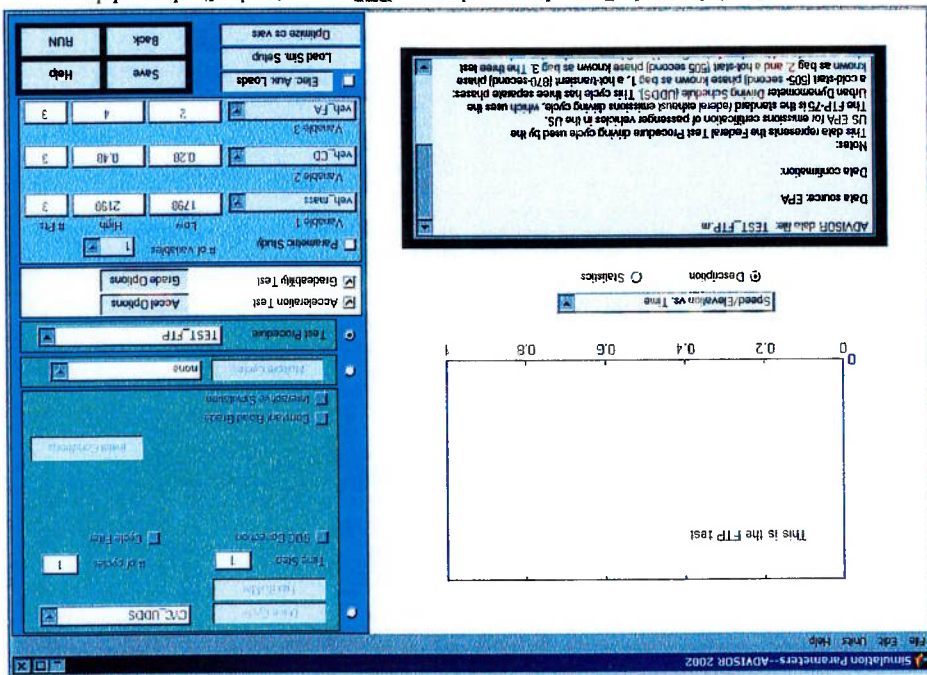
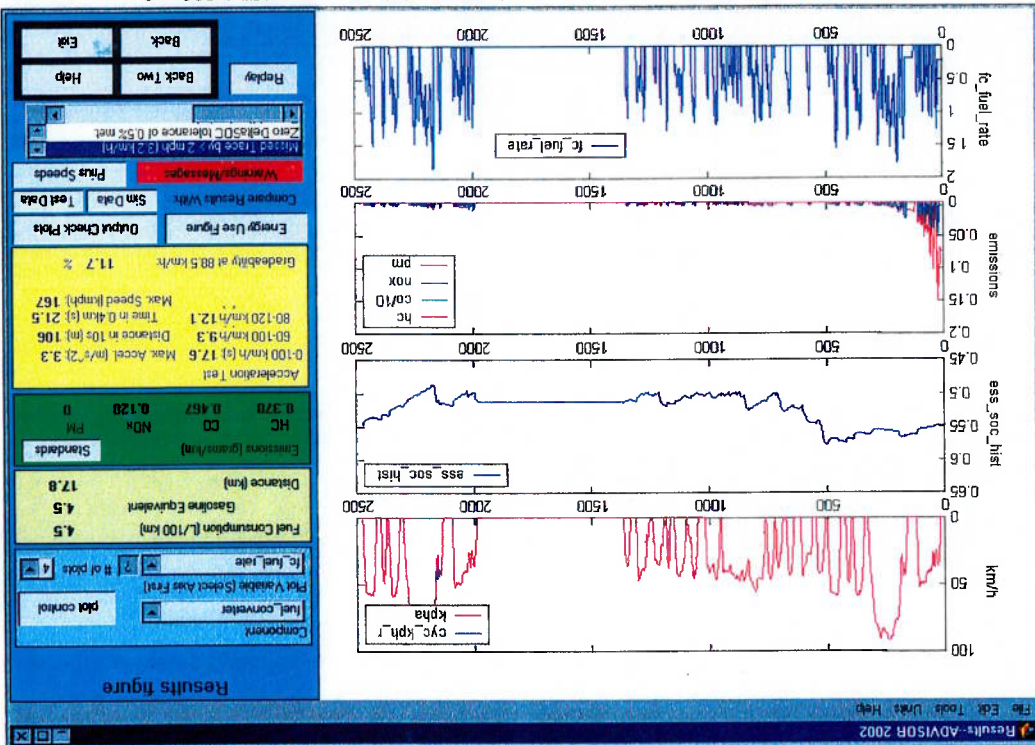


Figura 41 – Resultados das simulação do Vectra híbrido com MCI 1.500cm³.



Um dos parâmetros que afetam diretamente a aceleração e velocidade final é a relação do diferencial. Percebe-se da Tabela XXI, que quanto maior a relação do diferencial, maior o torque, e consequentemente mais rápida a aceleração do veículo, porém, com efeito inverso na velocidade final do veículo.

Relação de Diferencial	Consumo de Combustível (l/100km)	Emissões (g/km)			Velocidade Máxima (km/h)	Aceleração (s)			Capacidade de Rampa (%)	
		HC	CO	NO _x		0-100km/h	60-100 km/h	80-120 km/h		0-400m
3,50	4,7	0,381	0,472	0,13	170,8	19,6	10,3	12,7	22,4	10,7
4,00	4,6	0,379	0,469	0,128	172,4	18,0	9,4	12,2	21,6	11,6
4,17	4,5	0,378	0,467	0,128	167	17,6	9,3	12,1	21,5	11,7
4,50	4,5	0,377	0,466	0,127	153,1	16,9	8,9	12,0	21,1	11,9
5,00	4,5	0,373	0,465	0,129	137,7	16,1	8,7	12,1	20,6	11,9
5,50	4,5	0,372	0,468	0,13	125	15,6	8,6	12,0	20,3	12,0

Tabela XXI – Resultados de simulações do modelo para várias relações de diferenciais.

Na Figura 42, fica mais evidente que acima de 1:5 na relação do diferencial, os ganhos tendem a ser menores e além disso, as emissões tendem a piorar. Deste modo, utilizaremos a relação de diferencial 1:5 como ótima na aplicação do modelo proposto.

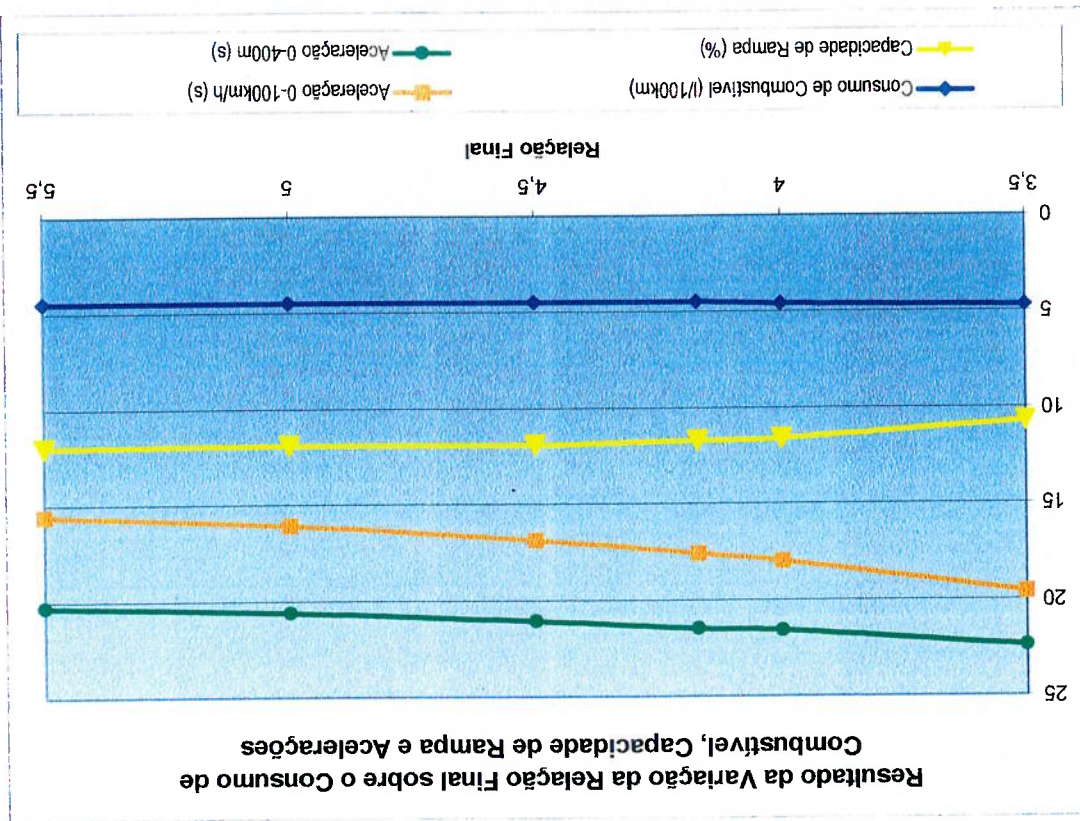


Figura 42 – Gráfico dos resultados da variação da relação do diferencial.

Outros MCI foram simulados e seus resultados avaliados usando o mesmo modelo proposto e a relação 1:5, como apresentado na Tabela XXII. Uma análise geral da tabela, demonstra que a arquitetura proposta com o e-CVT, apresenta problemas de aceleração (até 46% inferior) e capacidade de rampa (até 63% inferior), explicados pelo fato de a relação final de marcha em baixa velocidade ser menor que o da transmissão manual do Vectra original. Em oposição, o consumo dos sistemas híbridos é, pelo menos, 24% menor e a retomada de 80 a 120km/h é, no mínimo, 16% superior ao modelo original.

Modelo Vectra Simulado	Potência Util (kW)	Carga Util (kg)	Volume do Motor (cm ³)	Relação do Motor	Relação Diferencial	Consumo de Combustível (km/l)	Velocidade Máxima (km/h)	Aceleração (s)		Capacidade de Rampa (%)
								0-100km/h	80-120 km/h	
Original 2.0	81	530	1998	4,17	12,1	193,0	11,0	14,6	N/A	
Motor Plus 1.5	41	470	1500	5	22,2	137,7	16,1	12,1	11,9	
Motor 1.9	63	400	1900	5	17,5	137,2	14,0	9,4	15,7	
Motor 1.9	95	300	1900	5	15,9	136,6	13,1	7,7	16,7	
Motor Diesel 1.7	60	300	1700	5	17,9	137,8	14,6	12,3	14,6	
Motor 1.5 (ME7 49kW)	41	470	1500	5	21,7	176,7	15,8	11,8	12,3	
Motor 1.9 (ME 49kW)	63	400	1900	5	17,2	195,1	13,3	9,1	16,2	

Tabela XXII – Resultados de simulações de diferentes motores no modelo do Vectra.

O motor 1.9 de 63kW, é um motor adaptado para baixas emissões, e consequentemente, menor potência líquida. Já o motor 1.9 de 95kW é o motor original do qual foi adaptado o anterior. Sua potência líquida é superior ao do Vectra original e, portanto, inadequado para o modelo proposto.

O motor Diesel 1.7 Tdi é um motor Diesel turbocomprimido, cujos resultados de aceleração e consumo, são próximos ao do motor de 63kW, porém com retomada apenas 80 a 120km/h e capacidade de rampa inferiores. Este modelo foi apresentada apenas para efeito de comparação, já que não pode ser comercializado no mercado brasileiro. Já o motor 1.5, com motor elétrico de 49kW, é o mesmo motor de combustão utilizado pelo Prius, com a diferença que o motor elétrico da configuração original foi substituído por um motor de maior potência. O resultado obtido em consumo de combustível é inferior em cerca de 2% ao do motor elétrico original, já que por utilizar maior potência da bateria, o MCI deve permanecer ligado por mais tempo. Positivamente, os demais resultados obtidos são 2% melhor em aceleração e 3% em capacidade de rampa, com velocidade final 28% superior.

O mesmo motor elétrico foi aplicado à configuração do Vectra com MCI 1,9 de 63kW de potência. Os resultados, apresentados na Figura 43 foram muito superiores aos obtidos originalmente e posiciona esta solução como a mais adequada para o modelo proposto. Em relação ao Vectra original, as desvantagens deste híbrido são 25% na redução da capacidade de carga, 21% no tempo maior de aceleração de 0 a 100km/h. As vantagens incluem velocidade final 1% maior, reduções de 38% no tempo de retomada de 80 a 120km/h e de 42% no consumo de combustível. Isso tudo associado a um MCI 22% menos potente que o original.

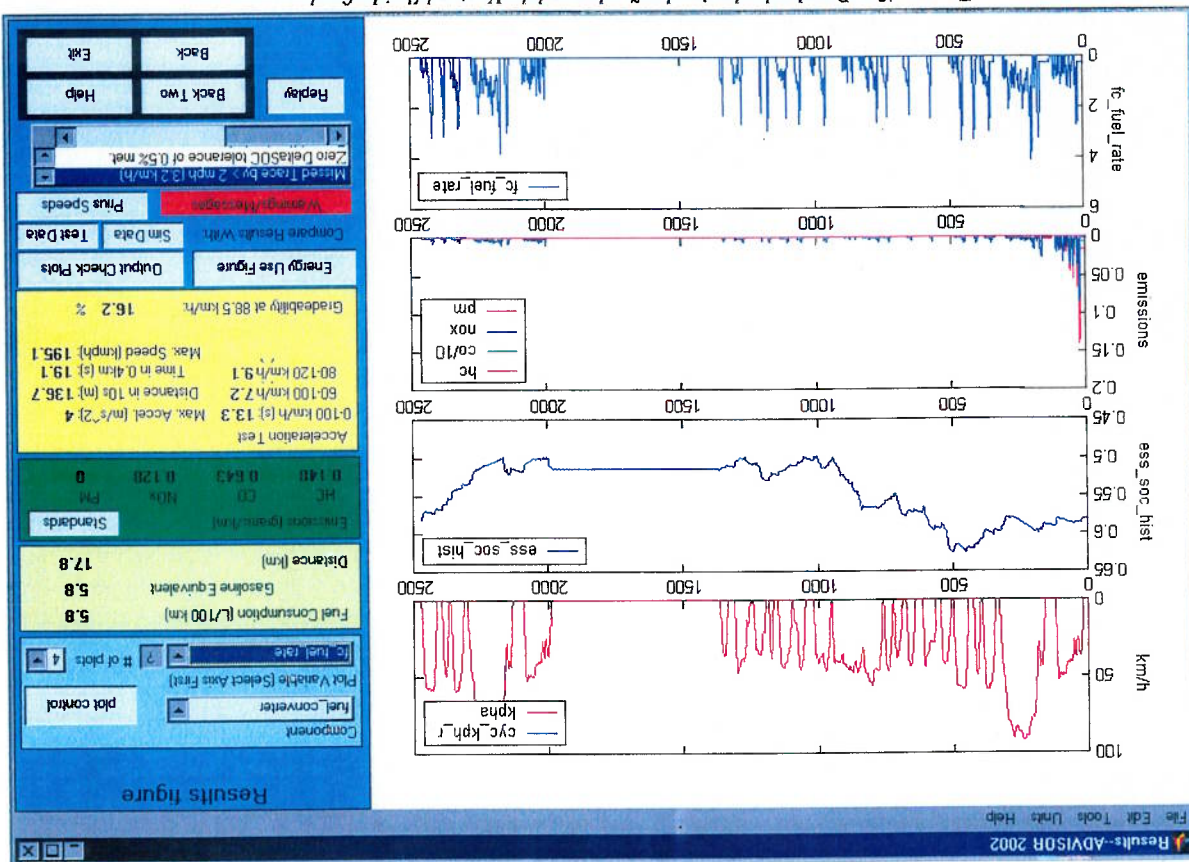


Figura 43 – Resultado de simulação do modelo Vectra híbrido final.

Isto valida a proposta inicial de hibridização do modelo, afetado apenas pela ausência de dados mais precisos de motores apropriados ao modelo híbrido. Um motor mais leve, permitiria o aumento de carga útil, ao mesmo tempo em que reduziria o tempo de aceleração do modelo.

6. CONCLUSÃO

Resultados

Atualmente, existe grande variedade de soluções em desenvolvimento e aplicações nos veículos automotores, visando aumentar sua eficiência e reduzir emissões e consumo de combustível.

Estas soluções abrangem desde pequenas melhorias em componentes isolados de sistemas existentes, como coletores de admissão do motor, passando por combinação de soluções para os sistemas convencionais, ou modelos híbridos, e chega até conceitos totalmente novos como a proposta de células de combustível com revisão de arquitetura e infra-estrutura de abastecimento.

Isto tem criado muitas frentes de pesquisa e diversificado as possibilidades de novos sistemas no futuro, adicionando mais incertezas no caminho a ser trilhado pelas tecnologias até a implementação da solução final ótima – os veículos de células de combustível abastecidos com hidrogênio.

Como solução intermediária, os veículos híbridos são os mais beneficiados pelas melhorias obtidas no desenvolvimento das demais tecnologias por poder utilizar desde combustíveis alternativos até sistemas de armazenamento de energia.

O estudo dos veículos híbridos e os sistemas a eles associados, demonstram que seu nível de maturidade é suficiente para a adoção imediata em qualquer tipo de veículo e quaisquer novos desenvolvimentos agregados aos sistemas existentes, aumentariam ainda mais seu desempenho, reduzindo seus custos.

As simulações executadas confirmam a previsão dos benefícios de hibridização de modelos convencionais e validam a proposta apresentada, apesar das dificuldades de validação dos dados com testes reais. Os resultados obtidos com a proposta híbrida foram muito superiores aos do modelo convencional. Em relação ao Vectra original, o modelo híbrido apresenta um motor de combustão interna 22% menos potente e que traz como desvantagens 25% de redução na capacidade de carga e 21% no aumento de tempo de aceleração de 0 a 100km/h. Suas vantagens compreendem velocidade final 1% maior, tempo na retomada de 80 a 120km/h 38% menor e consumo de combustível 42% menor.

As contribuições pessoais a este trabalho abrangem extensa pesquisa bibliográfica em revistas, em páginas na Internet e em *papers*, resultando em mais de 200 referências bibliográficas. No estudo de caso, as contribuições encerram as modificações do modelo matemático em relação à velocidade máxima de funcionamento em modo puramente elétrico, limite de frenagem regenerativa, controle de operação em carga plena e realimentação e previsão de carga no motor.

Direções Futuras para Pesquisa

Como proposta de continuidade de pesquisa, sugere-se a validação do modelo matemático com um veículo de teste, que também permitiria a revisão do modelo empírico adotado.

Pesquisas ou acesso a dados relativos a motores elétricos, sistemas de armazenamento e variáveis dinâmicas do veículo adotado, permitiriam novas melhorias do modelo proposto e maior precisão dos resultados. No novo modelo a ser adotado, poderia ser estudado um modelo multi-combustível, analisando os efeitos de cada combustível em separado e o efeito quando utilizado em proporções parciais.

Alternativamente, podem ser revisitos completamente todos os modelos matemáticos existentes no ADVISOR, permitindo o uso mais geral da ferramenta para modelos convencionais ou a célula de combustível.

Outra oportunidade de continuidade é relacionada a estudos de veículos similares com tecnologias diferenciadas como os elétricos puros, convencionais ou com células de combustível, que poderiam ter sua eficiência comparada com o modelo híbrido proposto para permitir avaliação das eficiências gerais dos modelos estudados. Finalmente, pode-se aprofundar o estudo do controle de cada componente apresentado no modelo matemático, avaliando a teoria envolvida, possíveis otimizações e propondo alternativas ao controle utilizado.

- [1] GRANDE, P. C. Novas tecnologias: revolução no comando. *Revista Quatro Rodas*, São Paulo, Ano 41, n.471, p.112-113, nov. 2001.
- [2] REVISTA VEJA. Automóveis: álcool ou gasolina? tanto faz. *Revista Veja*, São Paulo, Ano 35, n.24, p.68, jun. 2002.
- [3] GENERAL MOTORS. **2000 guide to General Motors cars & trucks**. S.I.:n., Nov. 1999, p.79. Catálogo.
- [4] JOST, K. Global vehicles: Cien showcase Northstar XV12. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.10, p.10-15, Oct. 2001. SAE International.
- [5] BROGE, J. L. Tech briefs: ZF six-speed debut on BMW's 7 series. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.10, p.36, Oct. 2001. SAE International.
- [6] BIRCH, S. New car highlights: BMW re-engineers the 7 series. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.10, p.71-73, Oct. 2001. SAE International.
- [7] PONTICEL, P. New car highlights: Acura RSX: innovation under the hood. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.10, p.91-92, Oct. 2001. SAE International.
- [8] BIRCH, S. Global vehicles: Ford shows off its Fiesta and Fusion concept. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.11, p.14-16, Nov. 2001. SAE International.
- [9] BUCHHOLZ, K. Tech briefs: Bosch accents Diesel technology. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.11, p.38-40, Nov. 2001. SAE International.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- [10] CARNEY, D. Tech briefs: GM hybrid-electric truck technology. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.11, p.40-42, Nov. 2001. SAE International.
- [11] BROGE, J. L. Focus on electronics: Valeo and Ricardo team for 42-V Diesel vehicle. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.11, p.56-59, Nov. 2001. SAE International.
- [12] YAMAGUCHI, J. Global vehicles: concepts from Tokyo – 2001 Tokyo motor show. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.12, p.8-24, Dec. 2001. SAE International.
- [13] BUCHHOLZ, K. Tech briefs: Ricardo's durable motorsports transmission. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.12, p.30-31, Dec. 2001. SAE International.
- [14] SAE INTERNATIONAL. Top technology stories of the year: integrated starter generator. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.12, p.58, Dec. 2001.
- [15] _____. Top technology stories of the year: E-wheel control from Technologies M4. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.12, p.59-60, Dec. 2001. SAE International.
- [16] _____. Top technology stories of the year: Toyota Prius: best engineered car of 2001. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.12, p.60, Dec. 2001. SAE International.
- [17] _____. Top products of the year: air-assisted injection. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.109, n.12, p.65, Dec. 2001. SAE International.
- [18] BIRCH, S. Global vehicles: Fiesta time at Ford. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.1, p.14-16, Jan. 2002. SAE International.
- [19] YAMAGUCHI, J. Global vehicles: technology from Tokyo. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.1, p.18-25, Jan. 2002. SAE International.

- [20] JOST, K. Spark-ignition engine trends. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.1, p.26-39, Jan. 2002. SAE International.
- [21] BOKLICH, F. Eaton adds variability to displacement on demand. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.1, p.42-43, Jan. 2002. SAE International.
- [22] PONTICEL, P. Ford exec sees great value in SAE congress. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.1, p.52-54, Jan. 2002. SAE International.
- [23] JOST, K. Fuel cell autonomy. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.35-37, Feb. 2002. SAE International.
- [24] BROGE, J. L. Revving up for Diesel. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.40-49, Feb. 2002. SAE International.
- [25] CARNEY, D. Tokyo motor show supplier technology: NSK Poweros unit CVT. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.67, Feb. 2002. SAE International.
- [26] _____. Tokyo motor show supplier technology: Sachs Dynastart. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.70-72, Feb. 2002. SAE International.
- [27] _____. Tokyo motor show supplier technology: Delphi lithium-polymer battery. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.72-73, Feb. 2002. SAE International.
- [28] PONTICEL, P. High time for hybrids. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.77-80, Feb. 2002. SAE International.
- [29] BIRCH, S. VW thinks ahead. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.146-149, Feb. 2002. SAE International.
- [30] DANA CORPORATION. Innovation by design. *In: Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.5, Feb. 2002. SAE International.

- [31] PONTICEL, P. Regulations and standards: PNGV replaced by fuel-cell initiative. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.2, p.176, Feb. 2002. SAE International.
- [32] JOST, K. BMW 7 series: AEI's best engineered vehicle for 2002. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.3, p.24-32, Mar. 2002. SAE International.
- [33] CARNEY, D. Tech briefs: Toyota MR-2 Spyder SMT. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.3, p.37-38, Mar. 2002. SAE International.
- [34] BIRCH, S. Tech briefs: Audi injects track technology into cars. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.3, p.40-44, Mar. 2002. SAE International.
- [35] CARNEY, D. Developments in fuel cell. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.3, p.47-52, Mar. 2002. SAE International.
- [36] TRIGO, L. Tech briefs: Ford hydrogen engine. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.4, p.42-43, Apr. 2002. SAE International.
- [37] YAMAGUCHI, J. Power by Honda. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.4, p.64-69, Apr. 2002. SAE International.
- [38] PONTICEL, P. Regulations and standards: Diesel gets 'green' light from panel. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.4, p.128, Apr. 2002. SAE International.
- [39] GEHM, R. Global viewpoints North America: powering the future. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.5, p.40-49, May 2002. SAE International.
- [40] BIRCH, S. Tech briefs: Valeo and Ricardo ready the i-MoGen. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.5, p.71-72, May 2002. SAE International.

- [41] _____. Tech briefs: BMW's hydrogen message. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.5, p.76, May 2002. SAE International.
- [42] _____. Global vehicles: Jaguar supercharges the S-type. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.6, p.20, June 2002. SAE International.
- [43] _____. Global viewpoints Europe: engines for growth. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.6, p.25-30, June 2002. SAE International.
- [44] _____. Tech briefs: Mercedes' direct-injection-gasoline engine. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.6, p.44, June 2002. SAE International.
- [45] _____. Tech briefs: a change for the better? *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.6, p.46-48, June 2002. SAE International.
- [46] JOST, K.; BUCHHOLZ, K.; GEHM, R. Advances on fuel-cell development. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.6, p.67-73, June 2002. SAE International.
- [47] BIRCH, S. Global vehicles: Mercedes-Benz CLK. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.24-26, July 2002. SAE International.
- [48] KLUGER, M. A. Drivetrains: challenging the design philosophy. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.28-31, July 2002. SAE International.
- [49] BROGE, J. L. Tech briefs: GM's driveable fuel-cell lab. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.32, July 2002. SAE International.
- [50] BIRCH, S. Tech briefs: direct injection for Audi A2. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.33-35, July 2002. SAE International.

- [51] ADAMS, T. Elastohydrodynamic lubricants for CVTs. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.45-47, July 2002. SAE International.
- [52] SOGA, M. et al. Hybrid vehicle dynamics. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.54-60, July 2002. SAE International.
- [53] TRAN, D.; CUMMINS, M. Jeep Commander 2. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.66-72, July 2002. SAE International.
- [54] SIMPOULOS, G. N. et al. Improving SUV fuel economy. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.7, p.78-82, July 2002. SAE International.
- [55] YAMAGUCHI, J. Global viewpoints Japan: chassis trend. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.8, p.31-33, Aug. 2002. SAE International.
- [56] ———. Global viewpoints Japan: engines and electric motors. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.8, p.35-43, Aug. 2002. SAE International.
- [57] BIRCH, S. Tech briefs: electrically boosting turbochargers. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.8, p.47-48, Aug. 2002. SAE International.
- [58] JOST, K. Global vehicles: Paris debut for GM fuel-cell/by-wire concept. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.9, p.10-12, Sept. 2002. SAE International.
- [59] BIRCH, S. Global vehicles: Porsche gives Boxster more punch. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.9, p.14, Sept. 2002. SAE International.
- [60] JOST, K. Fuel-cell commercialization. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.9, p.26-33, Sept. 2002. SAE International.

- [61] CHINWORTH, M. Hydrogen and the automobile. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.9, p.89-96, Sept. 2002. SAE International.
- [62] BUCHHOLZ, K. Global vehicles: packaged power from Ford. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.10, p.8-10, Oct. 2002. SAE International.
- [63] GEHM, R. New vehicles technology highlights: a heavy-duty Ram. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.10, p.55-59, Oct. 2002. SAE International.
- [64] BIRCH, S. New vehicles technology highlights: Enzo Ferrari: the car. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.10, p.65-70, Oct. 2002. SAE International.
- [65] YAMAGUCHI, J. New vehicles technology highlights: Nissan 350Z. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.10, p.97-102, Oct. 2002. SAE International.
- [66] BIRCH, S. Global vehicles: 2002 Paris Mondial de l'Automobile. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.11, p.10-32, Nov. 2002. SAE International.
- [67] PONTICEL, P. Escape hybrid is a showstopper. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.11, p.81-83, Nov. 2002. SAE International.
- [68] BUCHHOLZ, K. Next-generation Northstar. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.11, p.93-96, Nov. 2002. SAE International.
- [69] YAMAGUCHI, J. New vehicles technology highlight: Mazda 6. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.11, p.101-103, Nov. 2002. SAE International.
- [70] CARNEY, D. Global vehicles: Lincoln upgrades LS. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.12, p.24, Dec. 2002. SAE International.

- [71] BUCHHOLZ, K. Tech briefs: power promoting from GM. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.110, n.12, p.33-34, Dec. 2002. SAE International.
- [72] JOST, K. Engine strategies and engineering. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.1, p.19-38, Jan. 2003. SAE International.
- [73] BROGE, J. Tech briefs: Toyota's lease on fuel cells. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.1, p.43-44, Jan. 2003. SAE International.
- [74] GEHM, R. NAIAS concepts: Ford Mustang GT. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.2, p.48, Feb. 2003. SAE International.
- [75] ALEXANDER, D. NAIAS concepts: Ford Model U. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.2, p.48, Feb. 2003. SAE International.
- [76] BIRCH, S. Tech briefs: Torotrak developments. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.2, p.65-66, Feb. 2003. SAE International.
- [77] ———. Tech briefs: Ricardo + Valeo = i-MoGen. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.2, p.69-70, Feb. 2003. SAE International.
- [78] ———. Tech briefs: supercharging with Visteon. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.2, p.80, Feb. 2003. SAE International.
- [79] JOST, K. Global vehicles: NAIAS production vehicles – GM hybrids. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.3, p.10-12, Mar. 2003. SAE International.
- [80] ———. Global vehicles: NAIAS production vehicles – Cadillac SRX. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.3, p.17, Mar. 2003. SAE International.
- [81] ———. Volvo XC90: AEI best engineered vehicle for 2003. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.3, p.32-42, Mar. 2003. SAE International.

- [82] WEISSELER, P. Tech briefs: a traditional CVT from Nissan. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.3, p.53, Mar. 2003. SAE International.
- [83] YAMAGUCHI, J. Leading the way. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.3, p.54-58, Mar. 2003. SAE International.
- [84] SAE INTERNATIONAL. AEI tech 2003 awards: motors and generators. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.3, p.75, Mar. 2003.
- [85] BIRCH, S. Tech briefs: AAD: shifting for itself. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.4, p.36-40, Apr. 2003. SAE International.
- [86] _____. Tech briefs: 1.3-l diesel from FIAT. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.4, p.41, Apr. 2003. SAE International.
- [87] CARNNEY, D. Forced induction. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.4, p.62-66, Apr. 2003. SAE International.
- [88] BIRCH, S. Driving the Hy-Wire. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.4, p.105-108, Apr. 2003. SAE International.
- [89] _____. Tech briefs: PSA and Ford team on diesel. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.5, p.30-32, May 2003. SAE International.
- [90] GEHM, R. Global viewpoints North America: a powerful mix. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.5, p.50-56, May 2003. SAE International.
- [91] JOST, K.; CARNNEY, D. Global vehicles: New York revival. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.6, p.8-18, June 2003. SAE International.
- [92] BROGE, J. L. Tech briefs: Ford improves on the V8. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.6, p.31-32, June 2003. SAE International.

- [93] YAMAGUCHI, J. Global vehicles: Suzuki builds pint-size twins. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.7, p.14-16, July 2003. SAE International.
- [94] _____. Global vehicles: Daihatsu revamps Mira. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.7, p.17-18, July 2003. SAE International.
- [95] JOST, K. A different automatic. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.7, p.32-36, July 2003. SAE International.
- [96] BIRCH, S. Tech briefs: Mercedes automatically goes from 5 to 7. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.7, p.38-40, July 2003. SAE International.
- [97] _____. Tech briefs: diesel advances. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.8, p.30-32, Aug. 2003. SAE International.
- [98] ALEXANDER, D. Tech briefs: Eaton helps lotus with camless technology. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.9, p.36, Sept. 2003. SAE International.
- [99] JOST, K. Tech briefs: new car supplier engineering: Bosch third-generation common rail for Audi. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.11, p.30-31, Nov. 2003. SAE International.
- [100] BUCHHOLZ, K. Tech briefs: hybrids in the U.S. now and later. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.12, p.42, Dec. 2003. SAE International.
- [101] SAE INTERNATIONAL. 2003 technology in review: Toyota launches THS-II Prius. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.12, p.55-56, Dec. 2003.
- [102] BIRCH, S. BMW looks to the future. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.111, n.12, p.85-87, Dec. 2003. SAE International.

- [103] ———. Tech briefs: new fuel-injector technology from Delphi. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.112, n.2, p.36, Feb. 2004. SAE International.
- [104] PONTICEL, P. GM hybrid story on SAE congress agenda. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.112, n.2, p.114-120, Feb. 2004. SAE International.
- [105] BUCHHOLZ, K. Technology shifts to overdrive. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.112, n.2, p.144-146, Feb. 2004. SAE International.
- [106] CARNEY, D. High-performance hybrids. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.112, n.3, p.50-56, Mar. 2004. SAE International.
- [107] YAMAGUCHI, J. Toyota Prius: AFI best engineered vehicle 2004. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.112, n.3, p.58-68, Mar. 2004. SAE International.
- [108] BIRCH, S. Performance & aftermarket: battery technology races ahead. *Automotive Engineering International*, Brimfield, v.112, n.3, p.105, Mar. 2004. SAE International.
- [109] FERRAN, L. Indústria automobilística: EcoSport, um novo estilo. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial*, São Paulo, ano 3, n.14, p.10-13, 2003. SAE Brasil.
- [110] ITOKAZU, T. Novas tecnologias: Brasil na era dos carros flex. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial*, São Paulo, ano 3, n.15, p.40-43, 2003. SAE Brasil.
- [111] BRANCO, G. M. Meio ambiente: inspeção e manutenção de veículos: um requisito para a qualidade do ar. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial*, São Paulo, ano 3, n.15, p.72, 2003. SAE Brasil.
- [112] VIRGILIO, A. Engenharia veicular: evolui a cada dia a tecnologia do uso de combustíveis alternativos. *Engenharia Automotiva e Aeroespacial*, São Paulo, ano 3, n.16, p.26, 2003. SAE Brasil.

- [113] BURKE, A. F. Prospect for ultracapacitors in electric and hybrid vehicles. [S.I.]: IEEF, 1996. 6p. IEEF 0-7803-2994-5/96.
- [114] BOSE, B. K.; KANKAM, M. D. High frequency ac vs. dc distribution system for next generation hybrid electric vehicle. [S.I.]: IEEF, 1996. 7p. IEEF 0-7803-2775-6/96.
- [115] KOEHLER, U. et al. High performance nickel-metal hydride and lithium-ion batteries. [S.I.]: [s.n.], 1996. 6p. 97238.
- [116] SASAKI, S. Toyota's newly developed hybrid powertrain. From Proceedings of 1998 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER SEMICONDUCTOR DEVICES & ICS, Kyoto. [S.I.]: IEEF, 1998. 6p.
- [117] WIPKE, K. B.; CUDDY, M. R.; BURCH, S. D. Advisor 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. In: IEEF TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, Vol. 48, No. 6, November 1999. [S.I.]: IEEF, Nov. 1998. 11p. IEEF 0018-9545/99.
- [118] WYCZALEK, F. A. Hybrid Electric Vehicles Year 2000. [S.I.]: AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2000. 7p. AIAA-200-2855.
- [119] BALCH, R. C.; BURKE, A.; FRANK, A. A. The affect of battery pack technology and size choices on hybrid electric vehicle performance and fuel economy. [S.I.]: IEEF, 2001. 7p. IEEF 0-7803-6545-3/01.
- [120] HANSEN, E.; et al. Full system nickel-metal hydride battery packs for hybrid electrical vehicle applications. [S.I.]: IEEF, 2002. 8p. IEEF 0-7803-7132-1/02.
- [121] CHANG, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. In: Proceedings of the IEEF, Vol. 90, No. 2, FEBRUARY 2002. [S.I.]: IEEF, Feb. 2002. 29p. IEEF 0018-9219/02.
- [122] CRESCIMBINI, F.; et al. Compact permanent-magnet generator for hybrid vehicle applications. [S.I.]: IEEF, 2003. 8p. IEEF 0-7803-7883-0/03.

- [123] ROSS, F. Cover story: top10 techno-cool cars. *IEEE Spectrum*. [S.l.], p.30-35, Feb. 2003. IEEE.
- [124] DEPARTMENT OF ENERGY – UNITED STATES OF AMERICA. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. *Technology Snapshot: featuring the Toyota Prius*. [S.l.]: Argonne National Laboratory, Jan. 2001. 8p.
- [125] GAMEZ, M. Giro Chevrolet: a liberdade não tem preço. *Panorama*, São Caetano do Sul, ano 42, n.7, p.6-7, jul. 2003. General Motors do Brasil.
- [126] LEVIN, M. B. et al. *Design and analysis of starter-alternator installation in a hybrid-electric vehicle*. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, Detroit, Michigan, Mar. 1-4, 1999. Reimpresso de: Hybrid Vehicle Engines and Fuel Technology (SP-1422). Warrendale: SAE, 1999. 13p. SAE Technical Paper Series 1999-01-0917.
- [127] NEDUNGADI, A.; WALLS, M.; DARDALIS, D. *A parallel hybrid drivetrain*. In: FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, Costa Mesa, California, Aug. 17-19, 1999. Reimpresso de: Electric and hybrid electric vehicles and fuel cell technology (SP-1466). Warrendale: SAE, 1999. 8p. SAE Technical Paper Series 1999-01-2928.
- [128] RONNING, J. J.; GRANT, G. L. *Global hybrid electric vehicle markets and missions*. In: FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, Costa Mesa, California, Aug. 17-19, 1999. Reimpresso de: Electric and hybrid electric vehicles and fuel cell technology (SP-1466). Warrendale: SAE, 1999. 15p. SAE Technical Paper Series 1999-01-2946.
- [129] RAHMAN, Z.; BUTLER, K. L.; EHSANI, M. *A comparison study between two parallel hybrid control concepts*. In: SAE 2000 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 6-9, 2000. Warrendale: SAE, 2000. 11p. SAE Technical Paper Series 2000-01-0994.
- [130] KOSOWSKI, M. G.; DESAI, P. H. *A parallel hybrid traction system for GM's "Precept" PNGV vehicle*. SAE, 2000. 7p. SAE Technical Paper Series 2000-01-1534.

- [131] FRIEDMAN, D. J. et al. **Hybridization: cost and efficiency comparisons for PEM fuel cell vehicles**. In: SAE 2000 WORLD CONGRESS, Detroit, Michigan, Mar. 6-9, 2000. Warrendale: SAE, 2000. 14p. SAE Technical Paper Series 2000-01-3078.
- [132] WALTERS, J.; HUSTED, H.; RAJASHEKARA, K. **Comparative study of hybrid powertrain strategies**. In: FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE, Costa Mesa, Aug. 20-22, 2001. Reimpresso de: New energy systems and environmental impact (SP-1637). Warrendale: SAE, 2001. 12p. SAE Technical Paper Series 2001-01-2501.
- [133] TRAN, D.; CUMMINS, M. **Development of the Jeep Commander 2 fuel cell hybrid electric vehicle**. In: FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, Costa Mesa, Aug. 20-22, 2001. Reimpresso de: HYBRID ELECTRIC VEHICLES 2001 (SP-1633). Warrendale: SAE, 2001. 10p. SAE Technical Paper Series 2001-01-2508.
- [134] KUSUMI, H. et al. **42V power control system for mild hybrid vehicle (MHV)**. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: 42 VOLT TECHNOLOGY 2002 (SP-1661). Warrendale: SAE, 2002. 11p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0519.
- [135] OZEKI, T.; UMEYAMA, M. **Development of Toyota's transaxle for mini-van hybrid vehicles**. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: TRANSMISSION AND DRIVELINE SYSTEMS SYMPOSIUM 2002 (SP-1655). Warrendale: SAE, 2002. 11p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0931.
- [136] ITAGAKI, K. et al. **Development of the Toyota mild-hybrid system (THS-M)**. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology (SP-1697). Warrendale: SAE, 2002. 11p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0990.
- [137] OBA, H. et al. **Development of a hybrid powertrain system using CVT in a minivan**. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002.

- Reimpresso de: Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology (SP-1697). Warrendale: SAE, 2002. 9p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0991.
- [138] KOJIMA, M. et al. **Highly efficient hybrid minivan with super low emissions.** In: SAE 20 SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology (SP-1697). Warrendale: SAE, 2002. 9p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0992.
- [139] WEIHUA, W. **Revisions on the model of Toyota Prius in advisor 3.1.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology (SP-1697). Warrendale: SAE, 2002. 14p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0993.
- [140] KONDO, K.; SEKIGUCHI, S.; TSUCHIDA, M. **Development of an electrical 4WD system for hybrid vehicles.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: TRANSMISSION AND DRIVELINE SYSTEMS SYMPOSIUM 2002 (SP-1655). Warrendale: SAE, 2002. 9p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1043.
- [141] ROUTEX, J. Y.; GAY-DESHARNAIS, S.; EHSANI, M. **Study of hybrid electric vehicle drive train dynamics using gytrator-based equivalent circuit modeling.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology (SP-1697). Warrendale: SAE, 2002. 12p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1083.
- [142] SHUKUYA, K. et al. **A new battery system for the Estima hybrid minivan.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: Advanced Hybrid Vehicle Powertrain Technology (SP-1697). Warrendale: SAE, 2002. 4p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1090.
- [143] BROWN, P. et al. **A hybrid and fuel cell vehicle future?** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 Future Car Congress on CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 8p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1908.

- [144] LOUCKES, T. **The opportunity for IC engines in a hybrid world.** In: Proceedings of the 2002 Future Car Congress on CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 9p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1910.
- [145] NELSON, P. et al. **Simulation of lithium-ion battery performance in hybrid electric vehicles.** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 FUTURE CAR CONGRESS ON CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 13p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1915.
- [146] STUART, T. et al. **A modular battery management system for HEVs.** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 Future Car Congress on CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 13p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1918.
- [147] IZUMIURA, A.; OGAWA, H. **Development of the motor assist system for the hybrid automobile – the civic hybrid.** In: CONVERGENCE 2002, Detroit, Oct. 21-23, 2002. Reimpresso de: CONVERGENCE 2002 PROCEEDINGS: TRANSPORTATION ELECTRONICS = PROCESS + BUSINESS + TECHNOLOGY (P-381). Warrendale: SAE, 2002. 7p. SAE Technical Paper Series 2002-21-0034.
- [148] OGAWA, H.; MATSUKI, M.; EGUCHI, T. **Development of a power train for the hybrid automobile - the civic hybrid.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: ADVANCED HYBRID VEHICLE POWERTRAINS 2003 (SP-1750). Warrendale: SAE, 2003. 12p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0083.
- [149] EVANS, D. G.; VAN MAANEN, K. D. **Electric machine powertrain integration for GM's hybrid full-size pickup truck.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: ADVANCED HYBRID VEHICLE POWERTRAINS 2003 (SP-1750). Warrendale: SAE, 2003. 12p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0084.

- [150] EVANS, D. G. et al. **Powertrain architecture and controls integration for GM's hybrid full-size pickup truck**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: **ADVANCED HYBRID VEHICLE POWERTRAINS 2003** (SP-1750). Warrendale: SAE, 2003. 12p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0085.
- [151] HUSTED, H. L. **A comparative study of the production applications of hybrid electric powertrains**. In: **FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION**, Costa Mesa, June 23-25, 2003. Reimpresso de: **Hybrid Vehicle and Energy Storage Technologies** (SP-1789). Warrendale: SAE, 2003. 11p. SAE Technical Paper Series 2003-01-2307.
- [152] **ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator) 2002**. [S.l.]: Midwest Research Institute, Apr. 30, 2002. Software developed at National Renewable Energy Laboratory (NREL) of Department of Energy (DOE) of the United States of America. Copyright 1998-2003.
- [153] TOYOTA MOTOR CORPORATION. **Public Affairs Division. Hybrid synergy drive: Toyota hybrid system – THS II**. Tokyo: [s.n.], May 2003. 24p. 4-8 Koraku 1-chome, Bunkyo-ku, 112-870.
- [154] _____. **A guide to hybrid synergy drive**. Japan: [s.n.], May 2003. 6p. PR-E-03BC11.
- [155] FORD MOTOR COMPANY. **EUA. Veículos e tecnologias desenvolvidos pela montadora**. Disponível em: <<http://www.ford.com>>. Acesso em 14 fev. 2004.
- [156] COMGÁS – Companhia de Gás de São Paulo. **Brasil. Gás natural veicular**. Disponível em: <http://www.comgas.com.br/pv/gas_natural_veicular/sobre_gnv.asp>. Acesso em 08 maio 2004.
- [157] CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **Brasil. Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/proconve.asp>>. Acesso em 23 mar. 2004.

- [158] AMERLIS — Agência Municipal de Energia de Lisboa. Portugal. **Gás natural veicular**. Disponível em: <<http://www.amerlis.pt/gnv/gnv.htm>>. Acesso em 08 maio 2004.
- [159] U.S. DOE – United States Department of Energy. EUA. **Flex fuel vehicles**. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/feg/flextech.shtml>>. Acesso em 08 maio 2004.
- [160] _____. EUA. **Hybrid vehicles news**. Disponível em: <http://www.fueleconomy.gov/feg/hybrid_news.shtml>. Acesso em 08 maio 2004.
- [161] IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Brasil. **Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/Proconve.html>>. Acesso em 16 maio 2004
- [162] PIMENTA, L. J. **A crise na rede de concessionárias de automóveis no Brasil**. 2002. 158p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Salvador. Salvador, 2002.
- [163] BOLETIM QUADRIMESTRAL DO CENTRO DE ESTUDOS DE CONJUNTURA E POLÍTICA ECONÔMICA. **Política econômica em foco: que recuperação é essa?**. [S.l.]: Instituto de Economia da Unicamp, n. 2, set./dez. 2003, 19 fev. 2004. 4p. Suplemento.
- [164] FECAP – FUNDAÇÃO ESCOLA DE COMÉRCIO ALVARES PENTEADO. Brasil. **Administração on line: Impacto do Comércio Eletrônico nos Negócios**. ISSN 1517-7912. Volume 2, Número 2 (abril/maio/junho - 2001) Disponível em: <http://www.fecap.br/adm_online>. Acesso em 06 jun. 2004.

- WALLENTOVITZ, H.; LUDS, R. System control application for hybrid vehicles. [S.l.]: IEEE, 1994. 12p. IEEE 0-7803-1872-2/94.
- HENNBERGER, G. Brushless motors for electric and hybrid vehicles. London: IEE – The Institution of Electrical Engineers, 1996. 4p.
- BARBARISI, O.; et al. State of charge estimator for NiMH Batteries. In: Proceedings of the 41st IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, Las Vegas, Nevada USA, Dec. 2002. [S.l.]: IEEE, Dec. 2002. 6p. IEEE 0-7803-7516-5/02.
- RJEZENMAN, M. J.; ROSENBLATT, A. Transportation: hybrid vehicles are worth it!. *IEEE Spectrum*, [S.l.], p. 79-84, May 2001. IEEE.
- BHATIKAR, S. R. et al. Artificial neural network based energy storage system modeling for hybrid electric vehicles. SAE, 2000. 24p. SAE Technical Paper Series 2000-01-1564.
- SHEPARD JR., W. L. et al. Architecture for robust efficiency: GM's "Precept" PNV vehicle. SAE, 2000. 13p. SAE Technical Paper Series 2000-01-1582.
- LYSHEVSKI, S. E. et al. Advanced hybrid-electric vehicle propulsion systems with individual wheel brushless traction motors. In: 2000 FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE, Costa Mesa, California, Aug. 21-23, 2000. Reimpresso de: HYBRID ELECTRIC VEHICLES (SP-1560). Warrendale: SAE, 2000. 7p. SAE Technical Paper Series 2000-01-3110.
- CONLEY, J. et al. The development of a fourth generation hybrid electric vehicle at West Virginia University. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 5-8, 2001. Reimpresso de: FUTURETRUCK 2000 (SP-1617). Warrendale: SAE, 2001. 14p. SAE Technical Paper Series 2001-01-0682.
- ROUSSEAU, A. et al. The new PNV system analysis toolkit PSAT v4.1 – evolution and improvement. In: FUTURE TRANSPORTATION

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, Costa Mesa, Aug. 20-22, 2001. Warrendale: SAE, 2001. 10p. SAE Technical Paper Series 2001-01-2536.
- OCHIAI, S.; OHNUKI, Y. **Description of hybrid technology mounted to production model.** SAE, 2001. 8p. SAE Technical Paper Series 2001-01-3418.
- PAGANELLI, G.; GUEZENNEC, Y.; RIZZONI, G. **Optimizing control strategy for hybrid fuel cell vehicle.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: FUEL CELL POWER FOR TRANSPORTATION 2002 (SP-1691). Warrendale: SAE, 2002. 11p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0102.
- COOK P.; JAMES, P.; WILLOWS, M. **Rapid prototyping of generic hybrid concept vehicles.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Warrendale: SAE, 2002. 10p. SAE Technical Paper Series 2002-01-0755.
- LEBLANC, N. et al. **Analysis of performance results from FutureTruck 2001.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: FUTURETRUCK 2001 (SP-1701). Warrendale: SAE, 2002. 9p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1209.
- MEYR, N. et al. **Design and development of the UC Davis FutureTruck.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: FUTURETRUCK 2001 (SP-1701). Warrendale: SAE, 2002. 18p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1210.
- HAAPALA, K. et al. **Design and development of the 2001 Michigan Tech FutureTruck, a power-split hybrid electric vehicle.** In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 4-7, 2002. Reimpresso de: FUTURETRUCK 2001 (SP-1701). Warrendale: SAE, 2002. 18p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1212.
- SOGA, M. et al. **Development of vehicle dynamics management system for hybrid vehicles – ECB system for improved environmental and vehicle dynamic performance.** In: SAE AUTOMOTIVE DYNAMICS AND STABILITY CONFERENCE AND EXHIBITION, Detroit, May 7-9, 2002. Reimpresso de:

- Proceedings of the 2002 SAE AUTOMOTIVE DYNAMICS AND STABILITY CONFERENCE AND EXHIBITION (P-377). Warrendale: SAE, 2002. 6p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1586.
- DI NAPOLI, A.; PEDE G. **Hybrid storage system: an optimization case.** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 FUTURE CAR CONGRESS ON CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 13p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1914.
- FRANCFORT, J. E.; SLEZAK, L. A. **Electric and hybrid vehicle testing.** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 FUTURE CAR CONGRESS ON CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 10p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1916.
- MORIYA, K. et al. **Design of the surge control method for the electric vehicle powertrain.** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 FUTURE CAR CONGRESS ON CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 6p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1935.
- LANDGREBE, A. et al. **Overview of technologies for batteries for electric and hybrid vehicles.** In: 2002 FUTURE CAR CONGRESS, Arlington, June 3-5, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 FUTURE CAR CONGRESS ON CD-ROM (FCC2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 7p. SAE Technical Paper Series 2002-01-1949.
- JUDA, Z. **Hybrid electric city car – simulation of conceptual solutions.** In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXHIBITION AND AUTOMOTIVE & TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE, Paris, July 9-11, 2002. Reimpresso de: Proceedings of the 2002 SAE INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE AND AUTOMOTIVE & TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONGRESS ON CD-

ROM (BAT2002CD). Warrendale: SAE, 2002. 6p. SAE Technical Paper Series 2002-01-2145.

LARSEN, M.; DE LA SALLE, S.; REUTER, D. **A reusable control system architecture for hybrid powertrains.** In: POWERTRAIN & FLUID SYSTEMS CONFERENCE & EXHIBITION, San Diego, Oct. 21-24, 2002. Reimpresso de: ADVANCED CONCEPTS AND POWER SOURCES (SP-1721). Warrendale: SAE, 2002. 5p. SAE Technical Paper Series 2002-01-2808.

KIEFFER, S. et al. **Economic analysis of powertrain control technologies.** In:

CONVERGENCE 2002, Detroit, Oct. 21-23, 2002. Reimpresso de:

CONVERGENCE 2002 PROCEEDINGS: TRANSPORTATION

ELECTRONICS = PROCESS + BUSINESS + TECHNOLOGY (P-381).

Warrendale: SAE, 2002. 8p. SAE Technical Paper Series 2002-21-0035.

PROBST, G. et al. **Integrated powertrain management (IPM®) and competitive**

energy supply solution for mild hybrids. In: CONVERGENCE 2002, Detroit,

Oct. 21-23, 2002. Reimpresso de: CONVERGENCE 2002 PROCEEDINGS:

TRANSPORTATION ELECTRONICS = PROCESS + BUSINESS +

TECHNOLOGY (P-381). Warrendale: SAE, 2002. 10p. SAE Technical Paper

Series 2002-21-0037.

JAVURA, A. K.; MILLER, J. M. **HEVs - vehicles that go the extra mile and are fun**

to drive! In: CONVERGENCE 2002, Detroit, Oct. 21-23, 2002. Reimpresso de:

CONVERGENCE 2002 PROCEEDINGS: TRANSPORTATION

ELECTRONICS = PROCESS + BUSINESS + TECHNOLOGY (P-381).

Warrendale: SAE, 2002. 10p. SAE Technical Paper Series 2002-21-0040.

TAKIMOTO, M. **Experience and perspective of hybrids.** In: CONVERGENCE

2002, Detroit, Oct. 21-23, 2002. Reimpresso de: CONVERGENCE 2002

PROCEEDINGS: TRANSPORTATION ELECTRONICS = PROCESS +

BUSINESS + TECHNOLOGY (P-381). Warrendale: SAE, 2002. 10p. SAE

Technical Paper Series 2002-21-0068.

NIASAR, A. H. **Control of independent rear wheel drives for electric and**

hybrid vehicles using one neuro-fuzzy controller. In: SAE 2003 WORLD

CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: IN-VEHICLE NETWORKS, SAFETY CRITICAL SYSTEMS, ACCELERATED TESTING, AND RELIABILITY (SP-1783/SP-1783CD). Warrendale: SAE, 2003. 12p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0107.

RODATZ, P. et al. **Performance and operational characteristics of a hybrid vehicle powered by fuel cells and supercapacitors.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: FUEL CELL POWER FOR TRANSPORTATION 2003 (SP-1741 / SP-1741CD). Warrendale: SAE, 2003. 12p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0418.

THIJSSEN, J. H. J. S.; MELLO, J. P.; LINNA, J. R. **Cost competitiveness of fuel cell vehicles through novel hybridization approaches.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: FUEL CELL POWER FOR TRANSPORTATION 2003 (SP-1741 / SP-1741CD). Warrendale: SAE, 2003. 10p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0809.

YE, Z. **Automotive hybrid system optimization using dynamic programming.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 6p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0847.

ZEIDAN, S. **Management controller for an electric vehicle implemented with the real-time workshop embedded coder.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 4p. SAE Technical Paper Series 2003-01-0852.

SCHOENBERG, J.; WOODS, R. **Design and development of the 2002 Cornell University hybrid electric vehicle.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 18p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1256.

BARTLEY, B. et al. **Design and development of the 2002 Michigan Tech FutureTruck, a parallel hybrid electric vehicle.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 16p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1257.

- KLEBACK, B.; INMAN, S.; NOSS, R. **Design and development of the 2002 Penn State University parallel hybrid electric explorer, the *Wattmuncher***. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 18p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1258.
- HELGREEN, J. M. et al. **Design and development of the University of Wisconsin's parallel hybrid-electric sport utility vehicle**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 17p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1259.
- MEYR, N. et al. **Design and development of the 2002 UC Davis FutureTruck**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 18p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1263.
- GURSKI, S. et al. **Design of a zero emission sport utility vehicle for FutureTruck 2002**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 17p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1264.
- WILLIAMS, A. et al. **Design and development of the university of Tennessee 2002 FutureTruck**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 18p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1265.
- KREIG, B. et al. **The excite – The University of Maryland's Pre-Transmission Parallel Hybrid Ford Explorer**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 16p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1266.
- BOND, C. et al. **Design and development of the 2003 University of Alberta hybrid electric vehicle**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 7p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1268.
- GILSTRAP, M et al. **The 2002 Ohio State University FutureTruck – the buckhybrid002**. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 18p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1269.

BIGGERS, C. et al. **Georgia Tech's FutureTruck split-parallel hybrid SUV design.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Warrendale: SAE, 2003. 18p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1270.

HYOUNG-JIN Y.; SE-JIN L. **An optimized control strategy for parallel hybrid electric vehicle.** In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, Mar. 3-6, 2003. Reimpresso de: VIRTUAL ENGINEERING, SIMULATION, & OPTIMIZATION (SP-1779). Warrendale: SAE, 2003. 8p. SAE Technical Paper Series 2003-01-1329.

ÍNDICE REMISSIVO

A	Alcool etílico hidratado	3, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 72
B	Ballard, 71	
	BMW, 19, 23, 24, 25, 34, 47, 64	
	BorgWarner Turbo Systems, 29	
C	Carbono	
	dióxidos, 13, 69, 71, 73, 74	
	Cummins, 38	
	CVT, 6, 38, 44, 45, 46, 47, 55, 59, 61, 101	
D	DaimlerChrysler, 16, 29, 34, 38, 47, 71	
	Chrysler, 71	
	Mercedes-Benz, 29, 40, 47	
	Dana, 54	
	Delphi Automotive Systems, 16, 27, 38, 54	
	Denso Corp., 38	
	Diesel, 3, 4, 12, 22, 27, 28, 29, 31, 34, 36, 38, 59, 61, 74, 78, 82, 91	
	DOHC, 5, 23, 25, 61, 63, 64	
	Adam Opel GmbH, 23, 27, 34, 61, 71	
	Cadillac, 23, 25, 27, 34	
E	Eaton, 23, 26, 27	
F		
	FIAT, 38	
	Ferrari, 25	
	Ford Motor Company, 9, 16, 23, 25, 29, 34, 38, 47, 61, 64, 70, 71	
	Jaguar, 47	
	Mazda, 30, 38	
	Fuji Heavy Industries, 47, 61	
	Subaru, 47, 61	
G		
	Garret Engine Boosting System, 28, 29	
	Gás Liquefeito de Petróleo, 8	
	Gás Natural Veicular, 3, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 78	
	Gasolina, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 37, 56, 57, 61, 62, 64, 67, 69, 71, 72, 73, 74, 91, 100	
	General Motors Corp., 16, 25, 27, 29, 38, 64, 66, 68, 71	

O	Orbital Engine Corp., 34		
	Otto		
	Ciclo, 3, 4, 8, 14, 16, 23, 30, 31, 34, 78		
	Oxidos de Nitrogênio, 18, 23, 72		
P			
	Porsche, 21, 23		
	Prodrive, 47		
	PSA Peugeot Citröen		
	Citröen, 29, 38		
	Peugeot, 29, 38, 71		
R			
	Ricardo Consulting Engineers, 47, 61		
	Robert Bosch GmbH, 16, 35, 38		
S			
	Sachs, 54		
	Siemens, 18, 23, 54, 71		
	Siemens VDO, 38		
	SKF, 71		
	Supercompressores, 6		
	Suzuki, 61, 66		
T			
	Toyota Motor Corp., 47, 61, 64, 71, 76, 97,		
	98, 99, 100, 104, 105		
	Daihatsu, 34		
	NSK, 47		
	38, 72, 108		
	óxidos, 3, 18, 20, 23, 25, 27, 30, 33, 34, 36,		
	Nitrogênio		
	Nissan, 23, 47		
N			
	Mitsubishi, 64		
	M4, 54		
M			
	Luk, 47		
L			
	Acura, 20, 23, 25		
	54, 55, 61, 71		
	Honda Motor Corp., 20, 23, 25, 27, 30, 47,		
	Hidrogênio, 13, 16, 71, 74		
	108		
	89, 90, 91, 92, 95, 97, 98, 99, 102, 103,		
	71, 73, 75, 78, 79, 82, 83, 84, 85, 86, 88,		
	54, 55, 56, 57, 59, 61, 62, 63, 64, 67, 69,		
	veículos, 7, 14, 30, 34, 47, 48, 50, 51, 53,		
	Híbridos		
H			
	Group Lotus, 23, 27		
	Graziano, 47		
	Chevrolet, 16, 64, 98, 100		
	motores Northstar, 23, 25, 27, 34		

Valeo, 61	V
Turbocompressores, 6, 29	
Lexus, 64	
Volkswagen, 16, 47, 71, 97, 98	
Audi, 5, 34, 47	
ZF, 39, 47	Z