

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CURITIBA – SEDE CENTRAL
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

FERNANDO WOSNIAK

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
HÍBRIDOS A ETANOL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

FERNANDO WOSNIAK

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
HÍBRIDOS A ETANOL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eloi Rufato Junior

CURITIBA

2016

Fernando Wosniak

Viabilidade Técnica e Econômica de Veículos Elétricos Híbridos a Etanol

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de novembro de 2016.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Eloi Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Saul Hirsch, Esp.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eloi Rufato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

WOSNIAK, Fernando. Viabilidade técnica e econômica de veículos elétricos híbridos a etanol. 2016. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia de Controle e Automação, Curitiba, 2016.

Este trabalho aborda um estudo de viabilidade técnica e econômica do desenvolvimento de um veículo híbrido elétrico que utiliza como combustível o etanol. Apresenta os modelos disponíveis atualmente no mercado automobilístico brasileiro, assim como suas principais características construtivas e de desempenho, assim como estudos que medem e estimam o desempenho do etanol quando comparado a gasolina. Apresenta-se um estudo de viabilidade econômica baseado no preço histórico dos combustíveis e suas características de consumo, tanto para o veículo convencional quanto o híbrido. Ao final, traz como resultado um promissor desempenho do veículo a etanol, mas salienta que futuros trabalhos devem ser conduzidos afim de validar outros modelos e projetar o veículo em si.

Palavras-chave: Veículo híbrido. Etanol. Viabilidade.

ABSTRACT

WOSNIAK, Fernando. Technical and Economic Viability of Ethanol Hybrid Electric Vehicles. 2016. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia de Controle e Automação, Curitiba, 2016.

This work presents a study of technical and economic feasibility of developing an electric hybrid vehicle that uses fuel like ethanol. It presents the models currently available in the Brazilian automotive market and its main constructive and performance characteristics as well as studies that measure and estimate the performance of ethanol when compared to gasoline. Presents an economic feasibility study based on historical fuel prices and characteristics of consumption, for both the conventional and the hybrid vehicle. At the end, it brings as a result a promising ethanol vehicle performance, but stresses that further work should be conducted in order to validate other models and design the vehicle itself.

Keywords: Hybrid Vehicle. Ethanol. Viability.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REQUERIMETOS BÁSICOS PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS DE CHUMBO – ÁCIDO EM VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS.	30
TABELA 2 - REQUERIMETOS BÁSICOS PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS DE NICD EM VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS.....	30
TABELA 3 - REQUERIMETOS BÁSICOS PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS DE NIMH EM VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS	31
TABELA 4 - REQUERIMETOS BÁSICOS PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS DE LI-ÍON EM VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS.....	33
TABELA 5 - REQUERIMETOS BÁSICOS PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS DE LIFEP04 EM VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS.....	33
TABELA 6 - REQUERIMETOS BÁSICOS PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS DE LIFEP04 EM VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS.....	34
TABELA 7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES BATERIAS APRESENTADAS	35
TABELA 8 – VELOCIDADE DE ROTAÇÃO PARA NÚMEROS DE PÓLOS COMUMENTE USADOS.....	37
TABELA 9 - COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.....	46
TABELA 10 - ESPECIFICAÇÕES DO ETANOL ANIDRO COMBUSTÍVEL (EAC) E ETANOL HIDRATADO COMBUSTÍVEL (EHC).....	47
TABELA 11 - COMPARAÇÃO DE MODELOS E TECNOLOGIAS	55
TABELA 11 - COMPARAÇÃO DE MODELOS E TECNOLOGIAS	56
TABELA 12 - PROPRIEDADES E IMPACTOS DAS MISTURAS ETANOL-GASOLINA.....	59
TABELA 13 - AUMENTO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DAS MISTURAS QUANDO COMPARADAS A GASOLINA.....	60
TABELA 14 - PARÂMETROS PARA OS VEÍCULOS CONVENCIONAL E SÉRIE PLUG-IN	66
TABELA 15 - CONSUMO DE ENERGIA DA BATERIA PARA OS 5 CICLOS UDDS E DIFERENTES MISTURAS ETANOL-GASOLINA.....	68
TABELA 16 - COMPARAÇÃO DO AUMENTO DO CONSUMO PARA O VEÍCULO HÍBRIDO E O CONVENCIONAL.....	68
TABELA 17 - SÉRIE HISTÓRICA DE PREÇOS DO ETANOL E DA GASOLINA COMUM.....	73
TABELA 17 - SÉRIE HISTÓRICA DE PREÇOS DO ETANOL E DA GASOLINA COMUM.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – EMISSÕES GLOBAIS DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) EM 2012.....	12
GRÁFICO 2 – ESTOQUE GLOBAL DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	13
GRÁFICO 3 – PREÇO DO LITRO DO ETANOL DESDE 2013.....	71
GRÁFICO 4 – PREÇO DO LITRO DA GASOLINA DESDE 2013.....	72
GRÁFICO 5 – RAZÃO ENTRE O PREÇO DO ETANOL E DA GASOLINA DESDE 2013.....	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ARQUITETURA PARALELA.....	22
FIGURA 2 - ARQUITETURA SÉRIE	23
FIGURA 3 - ARQUITETURA SÉRIE-PARALELA	24
FIGURA 4 - ARQUITETURA SÉRIE COM FLYWHEEL	25
FIGURA 5 - BANCO DE BATERIAS NIMH GM OVONIC PARA EV1 (30 KWH) DA GENERAL MOTORS E PARA A CHEVROLET S-10 ELECTRIC PICKUP (30 KWH)	32
FIGURA 6 - FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE EM TRÊS INSTANTES DE TEMPO	36
FIGURA 7 - CURVA TÍPICA DE TORQUE/ POTÊNCIA EM RAZÃO DA VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO	37
FIGURA 8 - MAPA DE EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE MOTOR DE INDUÇÃO.....	38
FIGURA 9 - VISTA EM CORTE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO ASSÍNCRONO	38
FIGURA 10 - MOTOR DE INDUÇÃO ASSÍNCRONO	39
FIGURA 11 - CONFIGURAÇÕES CONSTRUTIVAS ROTOR INTERNO, ROTOR EXTERNO E ROTOR AXIAL.....	40
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DO ROTOR DE UM MOTOR CC ELEMENTAR	40
FIGURA 13 - CIRCUITO INVERSOR MOTOR BRUSHLESS COM TRÊS FASES..	40
FIGURA 14 - MOTOR CC COM DUAS ESCOVAS E UM COMUTADOR	41
FIGURA 15 - CURVA TÍPICA DE TORQUE/ POTÊNCIA EM RAZÃO DA VELOCIDADE DE UM MOTOR BRUSHLESS	41
FIGURA 16 - MAPA DE EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE MOTOR BRUSHLESS	42
FIGURA 17 - (A) CORRENTE SENOIDAL E FLUXO SENOIDAL; (B) CORRENTE RETANGULAR E FLUXO TRAPEZOIDAL	42
FIGURA 18 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE POR OTIMIZAÇÃO DE EFICIÊNCIA.....	43
FIGURA 19 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE DIRETO DE TORQUE....	44
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	44
FIGURA 21 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE SEM SENSORIMENTO DE POSIÇÃO.....	45
FIGURA 22 - SISTEMA HDS DO TOYOTA PRIUS.....	50
FIGURA 23 - SISTEMA COMPLETO DO TOYOTA PRIUS	50
FIGURA 24 - FUNCIONAMENTO DOS MOTORES.....	51
FIGURA 25 - BANCO DE BATERIAS DO PRIUS	51
FIGURA 26 - MODO TOTALMENTE ELÉTRICO	53
FIGURA 27 - MODO HÍBRIDO SÉRIE	53
FIGURA 28 - MODO HÍBRIDO PARALELO	54
FIGURA 29 - SISTEMA HÍBRIDO DO BMW I8	55
FIGURA 30 - ARQUITETURA DO VEÍCULO DA OSU.....	57
FIGURA 31 - MODO TOTALMENTE ELÉTRICO	57
FIGURA 32 - MODO SÉRIE.....	58
FIGURA 33 - MODO PARALELO.....	58
FIGURA 34 - CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE UM VEÍCULO CONVENCIONAL PARA TRÊS MISTURAS DE COMBUSTÍVEL	60
FIGURA 35 - CARGA VERSUS CONSUMO TOTAL DE COMBUSTÍVEL	61
FIGURA 36 - EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA VERSUS CARGA	62
FIGURA 37 - EMISSÃO DE NOX VERSUS CARGA.....	63

FIGURA 38 - EMISSÃO DE CO VERSUS CARGA.....	64
FIGURA 39 - EMISSÃO DE CO ₂ VERSUS CARGA.....	65
FIGURA 40 - EMISSÕES DE HC VERSUS CARGA.....	65
FIGURA 41 - ESTADO DE CARGA DA BATERIA E VELOCIDADE DO MCI PARA O VEÍCULO HÍBRIDO	67
FIGURA 42 - CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA OS CICLOS UDDS 3, 4 E 5..	68
FIGURA 43 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TRÊS COMBUSTÍVEIS.....	69
FIGURA 44 - MAPA DE EFICIÊNCIA E85 VERSUS GASOLINA.....	70
FIGURA 45 - MAPA DE EFICIÊNCIA SOBREPOSTO POR PONTOS DE OPERAÇÃO DO MCI.....	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA.....	12
1.1.1 Delimitação do Tema	14
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS.....	14
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 JUSTIFICATIVA.....	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 REVISÃO HISTÓRICA	17
2.2 ARQUITETURAS GERAIS PARA VEÍCULOS HÍBRIDOS	21
2.2.1 Arquitetura Paralela.....	22
2.2.2 Arquitetura Série	23
2.2.3 Arquitetura Série-Paralela	24
2.2.4 Arquitetura Complexa.....	24
2.2.4.1 Arquitetura Série com Unidade de Pico de Potência	25
2.3 NÍVEIS DE HIBRIDIZAÇÃO	25
2.3.1 Micro-Híbridos.....	26
2.3.2 Parcialmente Híbridos	26
2.3.3 Totalmente Híbridos	26
2.3.4 Híbridos Plug-in.....	27
2.4 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM VEÍCULO HÍBRIDO.....	27
2.4.1 Gerador de Energia Elétrica	28
2.4.2 Baterias e Sistema de Armazenamento de Energia	28
2.4.2.1 Tipos Básicos de Baterias para Veículos Híbridos	29
2.4.2.1.1 Bateria de Chumbo-Ácido	29
2.4.2.1.2 Bateria de Níquel – Cádmio (NiCd).....	30
2.4.2.1.3 Bateria de Níquel – Metal Hidreto (NiMH)	31
2.4.2.1.4 Bateria de Lítio – Íon (Li-íon)	32
2.4.2.1.5 Bateria de Lítio – Ferro – Fosfato (LiFePO ₄)	33
2.4.2.1.6 Ultracapacitores	34
2.4.2.2 Comparação entre as Baterias	34
2.4.3 Motor elétrico	35
2.4.3.1 Motor de indução assíncrono	36
2.4.3.2 Motor de ímã permanente brushless	39
2.4.3.2.1 Estratégias de controle de motores de ímã permanente brushless.....	42
2.4.3.2.1.1 Controle por Otimização de Eficiência (COE)	43
2.4.3.2.1.2 Controle Direto de Torque (CDT)	43
2.4.3.2.1.3 Controle com Inteligência Artificial (CIA)	44
2.4.3.2.1.4 Controle sem Sensoriamento de Posição (CSP)	45
2.4.3.2.2 Comparação entre as Estratégias de Controle de Motores de Ímã Permanente Brushless	45
2.4.4 Motor de Combustão Interna.....	47
2.5 ÁLCOOL COMBUSTÍVEL	47
2.6 O MOTOR FLEX.....	48
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	49

3.1	MODELOS E TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS NO MERCADO BRASILEIRO	49
3.1.1	Toyota Prius	49
3.1.1.1	Características de performance do Toyota Prius	51
3.1.2	Lexus CT 200	52
3.1.2.1	Características de performance do Lexus CT 200	52
3.1.3	Mitsubishi Outlander PHEV	52
3.1.3.1	Características de performance do Outlander PHEV	54
3.1.4	BMW i8	54
3.1.4.1	Características de performance do BMW i8	55
3.2	COMPARATIVO DOS MODELOS E TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS NO MERCADO BRASILEIRO	55
3.3	A ECOCAR 2	56
3.3.1	O veículo da OSU	56
3.3.1.1	Modos de Operação	57
3.3.1.2	Resultados dos testes do veículo da OSU	58
3.4	OS EFEITOS DO ETANOL EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	58
3.4.1	Resultados de experimentação com diferentes misturas de gasolina e etanol	59
3.4.1.1	Resultados para motores de combustão interna convencionais	60
3.4.1.2	Resultados para motor de combustão interna em veículo híbrido	66
3.4.1.2.1	O experimento com o veículo híbrido	66
3.5	VIABILIDADE ECONÔMICA DO VEÍCULO HÍBRIDO A ETANOL	71
3.5.1	Os preços dos combustíveis	71
2.5.2	Outros incentivos e custos dos veículos híbridos no Brasil	74
4	RESULTADOS E CONCLUSÕES	75
5	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Com o crescente aumento da preocupação da comunidade científica e técnica, além claro, da sociedade, pelos efeitos que as mudanças climáticas estão tendo sobre toda a humanidade, cresce cada vez mais o interesse em energias mais limpas e renováveis. De acordo com Trigg et al (2013), o setor de transportes foi responsável por 23% da emissão global de dióxido de carbono (CO₂) no ano de 2012, conforme mostrado no gráfico 1, ficando atrás apenas do setor de geração de energia elétrica e aquecimento, responsável por 42% das emissões globais. Como um grande agente poluidor, o sistema de transportes também está sendo transformado. Hoje existem inúmeras iniciativas, tanto no campo acadêmico quanto no campo industrial, e tanto no setor público quanto privado, na tentativa de desenvolver e oferecer opções ambientalmente mais amigáveis a esse mercado (TRIGG et al, 2013).

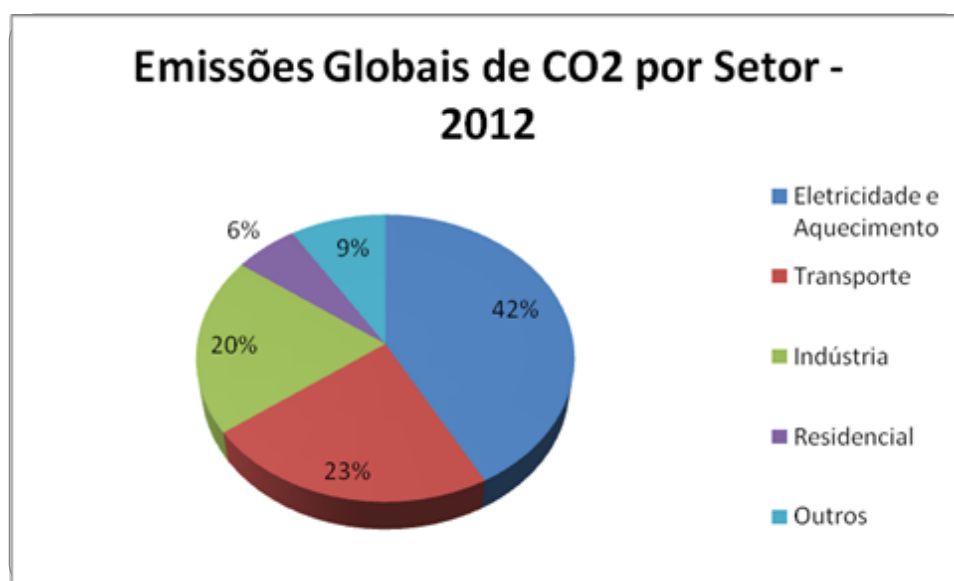


Gráfico 1 – Emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) em 2012.

Fonte dos dados: 2012 CO₂ Emissions Overview.

Nessa linha de pensamento e desenvolvimento tecnológico surgiram algumas iniciativas voltadas especificamente ao setor de transportes. Algumas das mais promissoras são os carros elétricos, híbridos ou que utilizam combustíveis alternativos e renováveis como etanol e hidrogênio. Nos últimos anos houve uma expansão global do mercado para esses automóveis, expansão essa que continua ocorrendo e cada

vez mais acentuadamente. Alguns países como Estados Unidos, Japão, Noruega e Holanda já têm um mercado relativamente formado para veículos elétricos e híbridos, enquanto no Brasil o mercado automobilístico vem, desde vários anos, sendo dominado pelos veículos denominados flex, cujo combustível pode ser tanto a gasolina, proveniente do petróleo e conseqüentemente não renovável, quanto o etanol, proveniente principalmente da cana de açúcar logo, altamente renovável. O Ministério de Minas e Energia (2014) projeta um total de 77% da frota de veículos nacionais sendo flex até 2023.

Apesar dessa revolução elétrica que está começando a ocorrer no setor de transportes mundial, não podemos afirmar que se trata de uma tecnologia de transporte limpa e renovável, apesar de ser mais eficiente, tendo em vista que muitos dos países que possuem esse mercado já de tamanho significativo possuem sua matriz elétrica dependente de combustíveis não renováveis como carvão, gás natural e nuclear. Os Estados Unidos, sendo o maior mercado para veículos elétricos atualmente, contava com aproximadamente 38% do estoque mundial no ano de 2012 segundo a *International Energy Agency*, conforme mostra o gráfico 2. Todavia, de acordo com dados da *U.S. Energy Information Administration*, no ano de 2014 apenas 11,3% da sua energia elétrica foi gerada a partir de fontes renováveis.

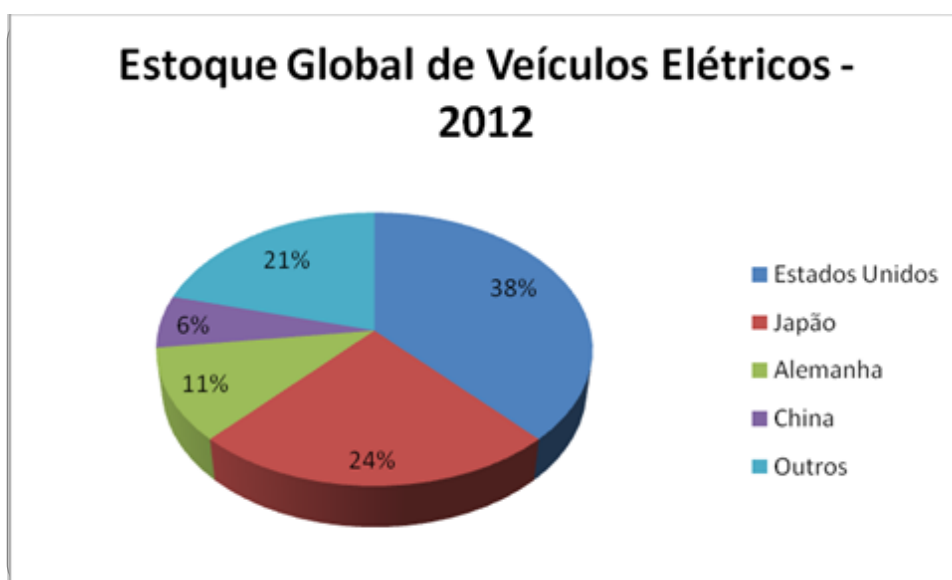


Gráfico 2 – Estoque global de veículos elétricos.

Fonte dos dados: Global EV Outlook.

O Brasil, possuindo o melhor dos dois mundos, no caso uma matriz elétrica com grande participação de fontes renováveis, 74,8% segundo o relatório de

informações gerenciais de junho de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica, e disponibilidade de um combustível renovável e bastante difundido como o etanol, ainda necessita de mais pesquisa e desenvolvimento no setor de transportes alternativos.

1.1.1 Delimitação do Tema

Este trabalho tem o objetivo de explorar de maneira teórica as possibilidades técnicas e os custos aproximados dos principais componentes de um veículo elétrico híbrido a etanol no Brasil.

Não é objetivo projetar um carro híbrido e seus componentes, mas apenas realizar um levantamento teórico dos principais componentes, como motor a etanol, motor elétrico e outros componentes necessários a hibridização de um automóvel leve, com foco em características de custo e desempenho quando comparados a similares convencionais. Não serão abordados ou realizados estudos sobre viabilidade para veículos de carga ou transporte como caminhões e ônibus.

1.2 Problema e Premissas

Com o desenvolvimento desse trabalho analisou-se se um veículo elétrico híbrido a etanol seria viável ao mercado brasileiro, tendo em vista o pouco material técnico e teórico versando sobre este tema com o enfoque específico abordado aqui, em especial no Brasil. Este trabalho também contribui para a geração de literatura em português, ainda escassa no estudo de veículos híbridos, servindo de fonte de material bibliográfico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica e econômica de veículos híbridos elétricos a etanol através de uma exploração teórica das diversas tecnologias de hibridização presentes no mercado, não apenas o brasileiro, tendo em vista a baixa oferta desses modelos no Brasil.

1.3.2 Objetivos Específicos

Esse trabalho tem os seguintes objetivos:

- Descrever e comparar arranjos de veículos híbridos existentes no mercado;
- Caracterizar e descrever motores a etanol;
- Comparar indicadores de veículos a combustível fóssil com similares híbridos;
- Explorar a viabilidade técnica e econômica de um veículo híbrido a etanol, tanto para motor de combustão interna auxiliado por motor elétrico, quanto como gerador para carregamento de baterias e tração totalmente elétrica;
- Verificar quais dos tipos de hibridização de veículo a etanol estudados seriam viáveis para implementação no mercado brasileiro.

1.4 Justificativa

Com esse trabalho pretende-se avaliar a adoção de uma nova tecnologia de transporte, que seja mais eficiente, ambientalmente mais amigável e que contribua para a diminuição das emissões de gases do efeito estufa no setor de transporte brasileiro.

Outra importante contribuição dessa pesquisa é fomentar a pesquisa brasileira na área de novas matrizes energéticas para o setor automotivo e também prover um novo enfoque no uso do etanol, combustível renovável que ainda não conseguiu se tornar uma fonte alternativa ao petróleo de maneira definitiva, pelo menos no setor de transporte leve.

1.5 Procedimentos Metodológicos

Em um primeiro momento realizou-se uma pesquisa ao material disponível sobre o tema, tanto na literatura em português quanto em inglês. Após essa pesquisa foi feito o levantamento do material que realmente foi utilizado na elaboração do trabalho e como referência bibliográfica para dar suporte ao restante do trabalho e suas premissas. Após a sustentação da pesquisa sobre bases teóricas sólidas e

reconhecidas, iniciou-se a coleta de dados técnicos e de desempenho dos modelos que foram utilizados para comparação. Salienta-se porém, que os dados não foram gerados através de experimentos próprios, mas sim obtidos por meio de testes e relatórios de desempenho disponibilizados pelos próprios fabricantes e montadoras dos veículos e arranjos híbridos que foram avaliados.

A partir dos resultados desse estudo foi dado início a comparação de dados a fim de se buscar os melhores arranjos para serem usados com motores a etanol, buscando-se assim o objetivo final do trabalho, tornar esses motores mais competitivos perante os motores que utilizam combustíveis fósseis incorporando-os a um sistema híbrido etanol/elétrico.

1.6 Estrutura Do Trabalho

A fase inicial de desenvolvimento desse trabalho consistiu na pesquisa e captação de material teórico disponível sobre o tema, a partir do qual foi feita uma análise para o embasamento teórico.

Após realizar-se o levantamento de material e concluir-se a base teórica do trabalho deu-se início à fase de comparação entre os métodos alternativos de motorização para transporte, considerando-se então vários indicadores como custo de implementação, eficiência e sustentabilidade do conceito.

Após a comparação pode-se então iniciar-se a última fase, concluir se e qual das alternativas poderiam vir a ser implementadas no mercado de automóveis como alternativa aos carros flex e outras tecnologias de veículos elétricos e híbridos elétricos.

Os capítulos que constituem esse trabalho são os seguintes:

No Capítulo 1: Introdução: nesse capítulo é introduzido o tema e a forma com que ele será abordado.

No Capítulo 2: Fundamentação teórica: nesse capítulo são relacionadas e sintetizadas as diversas tecnologias existentes disponíveis no mercado e suas principais características, assim como o embasamento da tecnologia de motorização a etanol.

No Capítulo 3: Procedimento metodológico: esse capítulo é composto pela análise e comparação entre os casos utilizados para o embasamento teórico do trabalho, tendo como enfoque principal as tecnologias a etanol.

No Capítulo 4: Resultados e conclusões: onde são apresentados os resultados das comparações feitas e também as conclusões sobre a viabilidade técnica e econômica das hibridizações elétricas com motorização a etanol.

A última parte desse trabalho é composta pelas referências, apêndices e anexos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Revisão Histórica

Não podemos deixar de relatar que a história do carro elétrico é intimamente ligada a história das baterias (HØYER, 2007; HANDY, 2014 e ANDERSON E ANDERSON, 2010). Em 1800, o inventor italiano Alessandro Volta demonstrou uma maneira de armazenar energia elétrica quimicamente, a pilha de Volta. Em 1821, Michael Faraday, aplicando o invento de Volta, demonstrou os princípios de um motor e gerador elétrico. Posteriormente, em 1831, Faraday utilizou a correlação entre a corrente elétrica e o magnetismo para demonstrar os princípios da indução eletromagnética. Ainda nesse mesmo ano, Joseph Henry, um professor de matemática americano, constrói o primeiro motor elétrico. Inspirado nesse trabalho, Thomas Davenport desenvolve o primeiro motor elétrico rotativo, no ano de 1834. Durante as próximas décadas os avanços em eletroquímica culminam no invento da bateria recarregável, no ano de 1854 por Wilhelm J. Sinsteden. Em 1859, o belga Gaston Planté demonstra a primeira bateria de chumbo-ácido comercialmente viável.

Em 1881, temos um desacordo entre autores quanto ao nome do inventor, um francês, chamado Charles Jeantaud por Handy (2014) e senhor Trouvé por Høyer (2007), apresenta o primeiro veículo elétrico conhecido. Este veículo tratou-se de um triciclo que utilizava uma bateria de Planté como fonte de energia. Segundo Hoyer, esse mesmo inventor demonstrou, naquele mesmo ano, um barco elétrico com uma motorização similar. Apenas como adendo, em 1876 Nikolaus August Otto patenteia um motor de quatro tempos para uso estacionário. O primeiro veículo com motor de combustão interna é demonstrado por German Benz, apenas em 1885. (ANDERSON e ANDERSON, 2010; HANDY, 2014; HØYER, 2007).

Thomas Edison, ao ver grande potencial nos veículos elétricos, começa a desenvolver baterias mais eficientes. Em 1901, é desenvolvida a bateria de Nickel-Ferro, que podia armazenar até 40% mais energia por unidade de peso que as

baterias de chumbo. Os custos dessa bateria, infelizmente, a inviabilizaram para o uso em veículos elétricos comerciais. Nesse mesmo período foram inventadas também as baterias de Nickel-Zinco e as de Zinco-Ar, segundo Høyer assume-se inclusive que essas baterias foram aplicadas em veículos elétricos ainda antes da virada do século XIX para o XX (HØYER, 2007).

Toda essa evolução presenciada nos veículos elétricos, no período entre 1880 e 1900, é chamada por Westbrook (2011) de início da “Era de Ouro” para esse tipo de transporte, terminando no início da década de 1920 (WESTBROOK, 2001). Segundo Høyer, durante a Feira Mundial de Chicago em 1893, haviam seis tipos de carros elétricos expostos. Em 1897, haviam 15 taxis elétricos em Londres e 13 em Nova York (HØYER, 2007).

Em 1903, dos 4000 veículos motorizados registrados em Nova York, 53% eram a vapor, 27% de combustão interna e 20% elétricos. Em 1912 foi atingido o pico de veículos elétricos nos Estados Unidos, um total de aproximadamente 30000 veículos (WAKEFIELD, 1994).

Em 1914, haviam apenas 50 estações de recarga de baterias entre Nova York e São Francisco, tornando o carro elétrico uma opção apenas para uso urbano. No ano de 1915, apoiadores dos veículos elétricos argumentavam que a maior quantidade de veículos elétricos aumentaria a demanda por estações e essas se multiplicariam. Uma grande vantagem do carro elétrico era sua segurança e facilidade de partida, os veículos a combustão necessitavam de arranque manual e muitas vezes perigoso. Nessa época já haviam sido descobertas as grandes reservas de petróleo em solo americano, tornando a gasolina muito barata. A invenção do motor de arranque elétrico em 1912 e sua popularização nos modelos de combustão interna acabou por tornar a partida dos modelos a gasolina tão prática e segura quanto a dos veículos a bateria. Nos anos 1920, a velocidade, praticidade, custos e distâncias percorridas pelos veículos a combustão acabaram por tornar os veículos elétricos obsoletos (ANDERSON e ANDERSON, 2010).

No período das grandes guerras mundiais os veículos elétricos voltaram a desempenhar um papel importante na sociedade, devido ao esforço de guerra e racionamento de combustível. No final da Primeira Guerra Mundial, apenas nos Estados Unidos, havia uma frota estimada em 50000 veículos elétricos. Nos anos 1940 haviam mais de 6000 vans elétricas fazendo a distribuição de leite e pães na Inglaterra, em 1950 esse número chegou a 30000 em todo o Reino Unido. Com o final da Segunda Guerra Mundial e a normalização na oferta mundial de petróleo, os

veículos elétricos foram novamente deixados de lado (ANDERSON e ANDERSON, 2010; WAKEFIELD, 1994; WESTBROOK, 2001).

Na década de 1970, com a crescente preocupação com o meio ambiente, a energia nuclear e principalmente a crise do petróleo de 1973, causada pelo embargo dos países produtores de petróleo, serviram como estímulo para o desenvolvimento de energias renováveis. Dentro de poucos anos, as fontes renováveis como solar, eólica, bio-massa, entre outras, passaram não apenas a serem parte do debate público mas também dos planos de desenvolvimento energético dos governos (HØYER, 2007).

De acordo com Wakefield (1994), os anos 70 foram um período de intenso desenvolvimento para os carros elétricos. Nos Estados Unidos, Europa e Japão, a maioria das grandes montadoras estavam desenvolvendo seus próprios veículos elétricos nas mais variadas configurações e tipos de baterias. Em 1975, o *US Energy Research and Development Administration (ERDA)* iniciou um programa para avançar as tecnologias de veículos híbridos e elétricos. Um ano depois, o congresso americano aprovou o *Electric and Hybrid Vehicle Act of 1976*, estabelecendo um programa pioneiro para fazer dos Estados Unidos uma economia totalmente baseada em carros elétricos até o ano 2000. Uma nova companhia foi fundada no Reino Unido apenas para desenvolver carros elétricos, mas com o fim do embargo e apenas 300 veículos produzidos, a companhia fechou as portas em 1979. Nesse ano, o desenvolvimento de veículos elétricos já havia sido novamente abandonado no mundo todo, a *General Motor*, após investir quantias razoáveis no desenvolvimento de carros híbridos e elétricos, concluiu que esses não eram capazes de competir com os veículos com motores de combustão interna (ANDERSON e ANDERSON, 2010; WAKEFIELD, 1994).

Com o aumento da preocupação com a poluição nas grandes cidades, em 1990, o governo da Califórnia, através do *California Air Resources Board (CARB)*, introduziu suas primeiras regulações para emissões zero. As regras forçavam as montadoras que atuavam no estado a venderem uma certa quantidade de veículos a bateria até 1998 ou sofreriam pesadas sanções econômicas (ANDERSON e ANDERSON, 2010; HOYER, 2007). Com o passar dos anos o *CARB* foi compelido a reduzir suas regulações, incluindo os veículos híbridos, os veículos que utilizassem combustíveis alternativos, reduzindo restrições e criando um banco de créditos. Segundo Anderson e Anderson, essas modificações demonstraram que novas

tecnologias e demanda de mercado não poderiam ser criadas por decisões políticas (ANDERSON e ANDERSON, 2010).

No final da década de 1990 e início dos anos 2000, surgem novas oportunidades para os veículos elétricos, surgem institutos de pesquisa públicos e privados em todo o mundo, principalmente Estados Unidos, Europa e Japão. Todos voltados a reduzir as emissões dos gases do efeito estufa, principalmente o CO₂, através do aumento da eficiência dos motores a combustão e incentivos fiscais para modelos elétricos e híbridos. O primeiro modelo a fazer sucesso no mercado foi o Toyota Prius, fabricado no Japão desde 1997 e vendido nos EUA a partir de 2000. A Audi apresentou o Duo III em 1997. Em 2006, a Ford, através de sua subsidiária Volvo Cars, estabelece um centro de desenvolvimento de sistemas híbridos em Gothenburg, Suíça. Seu primeiro resultado é o Ford Scape híbrido, para o mercado europeu. Em 2007, uma iniciativa da *Google*, intitulada *RechargeIT*, transformou o Toyota Prius e o Ford Scape em modelos híbridos plug-in, alcançando uma autonomia de 39,75 quilômetros por litro e 20,87 quilômetros por litro respectivamente (ANDERSON e ANDERSON, 2010; HANDY, 2014; HØYER, 2007).

No ano de 2008 debuta o primeiro carro da *Tesla Motors*, o *Tesla Roadster*, com uma autonomia de mais de 200 milhas por carga de bateria. Em 2009, a Ford lança o Ford Fusion híbrido e um ano depois, o Nissan Leaf totalmente elétrico começa a ser vendido. Em 2011 outro híbrido chega ao mercado americano, o Chevy Volt (HANDY, 2014). No ano de 2015, a Toyota supera a marca de 8 milhões de veículos híbridos vendidos desde 1997 (EDELSTEINT, 2015).

Já quanto ao etanol produzido no Brasil, a partir da década de 1930, o governo de Getúlio Vargas tentou, com o decreto 19717, estimular o uso do etanol. Com a publicação do decreto, os importadores de gasolina passaram a ser obrigados a adicionar 5% de etanol produzido nacionalmente a gasolina importada (BRASIL, 1931). De acordo com Kovarik (2006), o número de destilarias de etanol aumentou de 1 em 1933 para 31 em 1939, com a produção aumentando de 100 mil litros em 1933, para 51,1 milhões de litros em 1937. Ainda de acordo com Kovarik (2006), durante a segunda guerra mundial muitos países utilizaram o etanol como um sistema de combustível emergencial. No entanto, após o final da guerra e com a oferta de petróleo barato do Oriente Médio, quase todos os países abandonaram seus programas de produção e uso do etanol combustível. O Brasil foi um dos poucos países que continuou a misturar etanol a gasolina (KOVARIK, 2006).

Em 1973, os países exportadores de petróleo do Oriente Médio decidem retaliar os países ocidentais envolvidos na Guerra de Yom Kippur. Através do embargo, criou-se uma crise internacional do petróleo e o preço do óleo bruto aumentou mais de 400% entre 1973 e 1974, o Brasil teve que procurar uma alternativa ao uso dos combustíveis derivados do petróleo. Segundo Barzelay (1986), com quase 50 anos de experiência na produção e uso de etanol, não foi necessária uma “imaginação excepcional” para se encontrar uma alternativa ao petróleo importado. Em 14 de novembro de 1975 é criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) (BRASIL, 1975).

Na primeira etapa do programa os esforços foram concentrados na expansão da produção de álcool etílico anidro para ser adicionado a gasolina, essa fase vai até 1979 (BARROS, 2007). A segunda fase destinou-se a produção do álcool hidratado para ser usado puro, como combustível. Até o final de 1983, mais de 1,5 milhão de carros movidos a etanol tinham sido comercializados e aproximadamente 95% dos carros fabricados no Brasil possuíam motores a etanol (BARROS, 2007).

Com os preços internacionais do petróleo voltando a patamares competitivos, o fim do regime militar, principal incentivador do Proálcool e a onda inflacionária que atingiu o Brasil em 1989, o etanol começa a perder sua vantagem econômica perante a gasolina (GAGNER, 2014). Segundo Gagner (2014), para combater a inflação, os produtores de cana-de-açúcar passaram a produzir açúcar para exportação, diminuindo a oferta de etanol no mercado interno. Com a escassez de etanol e os preços vantajosos do açúcar e da gasolina no mercado internacional o combustível alternativo entra em declínio (GAGNER, 2014). Após a derrocada dos veículos movidos apenas a etanol, esse combustível passa por um período de pouca relevância. Entretanto, no ano 2000, com a aprovação do projeto de lei 3546, instituindo a mistura de 20% a 26% de etanol à gasolina e com o início da produção de veículos com a tecnologia de motores *flex*, o etanol retoma um espaço de destaque no mercado brasileiro de combustíveis (GUARDABASSI, 2006).

2.2 Arquiteturas Gerais para Veículos Híbridos

A seguir serão apresentadas as arquiteturas básicas empregadas em veículos híbridos elétricos. Todas elas suportam tecnologias de recuperação de energia, como freios regenerativos. Em todas elas, o motor elétrico principal pode ser substituído por

dois ou quatro motores *inwheel* (motores montados na própria roda do veículo), eliminando a necessidade de acoplamentos mecânicos adicionais, aumentando a eficiência geral do sistema (LO, 2009).

2.2.1 Arquitetura Paralela

Na arquitetura paralela, existe um acoplamento mecânico entre o motor de combustão interna (MCI), o motor elétrico e a transmissão. A configuração mais comumente utilizada é manter o MCI quase sempre operando no seu ponto de maior eficiência e utilizar o motor elétrico apenas para suprir a demanda extra de potência. Quando a energia gerada pelo MCI é maior que a necessária, o motor elétrico passa a atuar como gerador e carrega as baterias. Outras configurações são o uso exclusivo do MCI ou apenas a motorização elétrica para suprir a potência demandada. Algumas desvantagens dessa arquitetura são o complexo controle para se manter o MCI em sua zona de alta eficiência e a complexidade mecânica devido ao acoplamento mecânico de dois motores a transmissão (CHAN, BOUSCAYROL e CHEN, 2010; LO, 2009). Na Figura 1 é mostrado um esquemático dessa arquitetura.

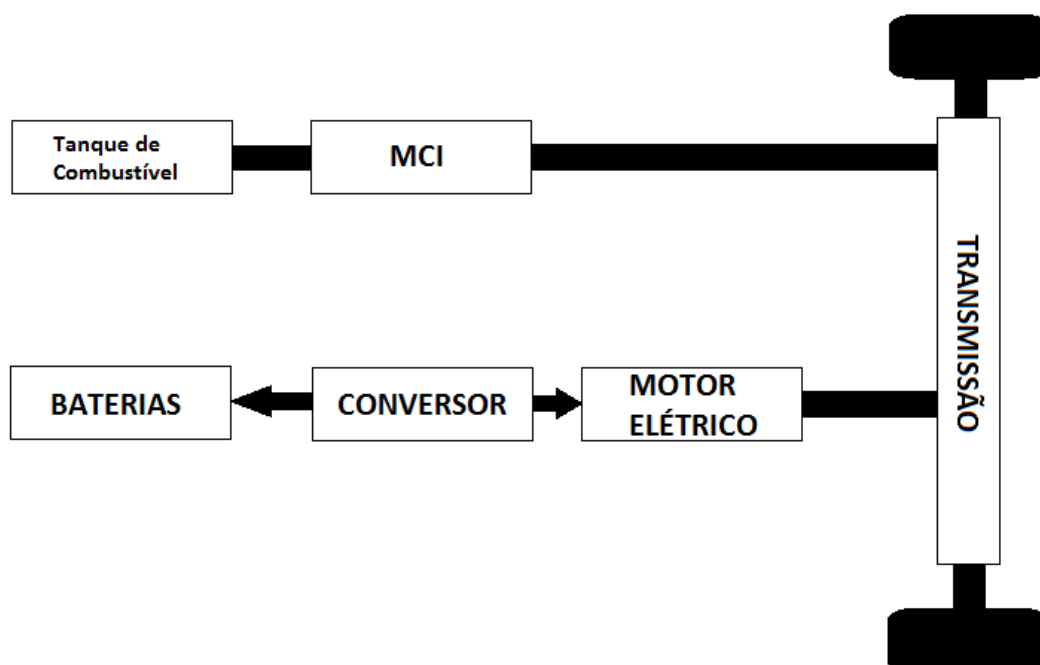


Figura 1 - Arquitetura paralela
Fonte: autoria própria.

2.2.2 Arquitetura Série

Na arquitetura série, o MCI é utilizado apenas para gerar energia elétrica, que pode ser utilizada para carregar as baterias, suprir diretamente o motor elétrico ou ambos, quando há sobra de potência gerada pelo MCI. Como o carregamento das baterias pode ser feito tanto pelo MCI quanto pela rede (em modelos plug-in), uma grande vantagem desse modelo é sua elevada autonomia. O controle em um carro híbrido com configuração série é muito mais simples, devido a existência de apenas uma fonte constante de carga, o gerador. O acoplamento mecânico à transmissão também é mais simples, pois apenas o motor elétrico é acoplado mecanicamente. As desvantagens dessa arquitetura são o seu custo elevado, devido ao uso de três motores, o MCI, o motor elétrico e um motor/gerador elétrico e também a baixa eficiência devido a estrutura em cascata (CHAN, BOUSCAYROL e CHEN, 2010; LO, 2009). A Figura 2 mostra essa arquitetura.

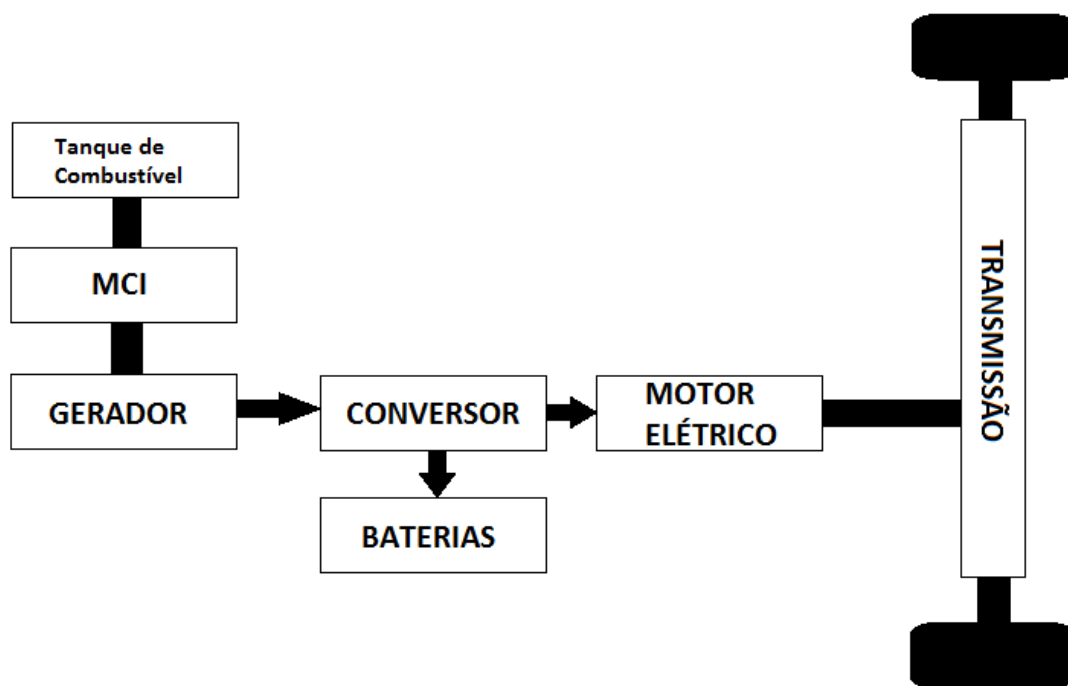


Figura 2 - Arquitetura série
Fonte: autoria própria.

2.2.3 Arquitetura Série-Paralela

Adicionando um segundo acoplamento mecânico e um gerador ao MCI, passamos de uma configuração paralela a uma série-paralela. Outra montagem é utilizarmos dois motores elétricos e um MCI acoplados mecanicamente à transmissão e, através do controle de um dos motores elétricos, manter o MCI operando em máxima eficiência, enquanto os motores elétricos proveem adicional potência ao conjunto ou um deles é utilizado para gerar energia elétrica. Essa arquitetura acaba sendo a mais complexa em termos mecânicos, de controle e, conseqüentemente, a mais custosa entre as três apresentadas (CHAN, BOUSCAYROL e CHEN, 2010; LO, 2009). Temos uma representação dessa arquitetura na Figura 3.

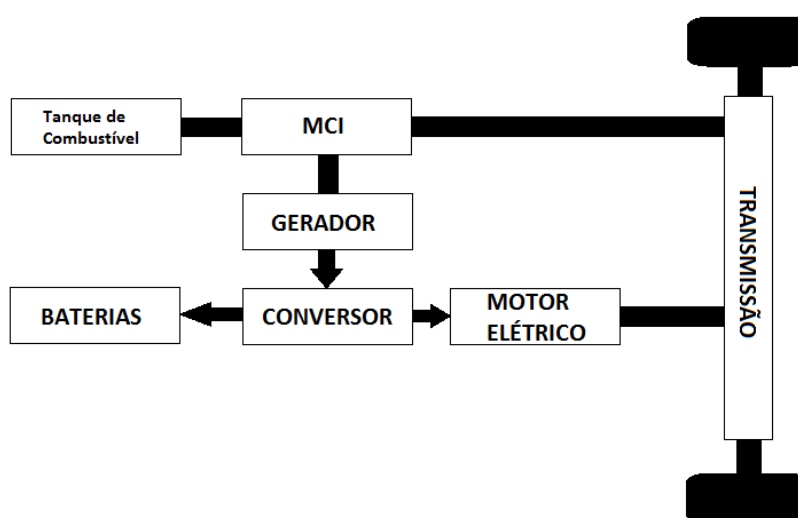


Figura 3 - Arquitetura série-paralela
Fonte: autoria própria.

2.2.4 Arquitetura Complexa

Lo refere-se a todas as outras configurações para veículos híbridos que diferem das citadas previamente como arquiteturas complexas. Todas essas variações buscam compensar as desvantagens apresentadas pelas configurações anteriores, com um adicional de complexidade, complicações e custos. Uma dessas arquiteturas é a série com unidade de pico de potência, que será tratada a seguir (LO, 2009).

2.2.4.1 Arquitetura Série com Unidade de Pico de Potência

Essa arquitetura trata-se de uma extensão da arquitetura série, onde um dispositivo, geralmente uma *flywheel*¹, é acoplado à saída do motor para absorver picos de potência/torque (LO, 2009). A energia é armazenada como energia mecânica em uma massa girante, onde:

$$E = \frac{1}{2} * J\omega^2 \quad (1)$$

E é a quantidade de energia armazenada, J é o momento de inércia e ω é a velocidade de rotação da *flywheel*. A energia armazenada pode ser transferida mecanicamente, através de uma transmissão variável, ou eletricamente, em que a *flywheel* é acoplada a um gerador (GAO et al., 2003). Na Figura 4 é mostrada essa configuração.

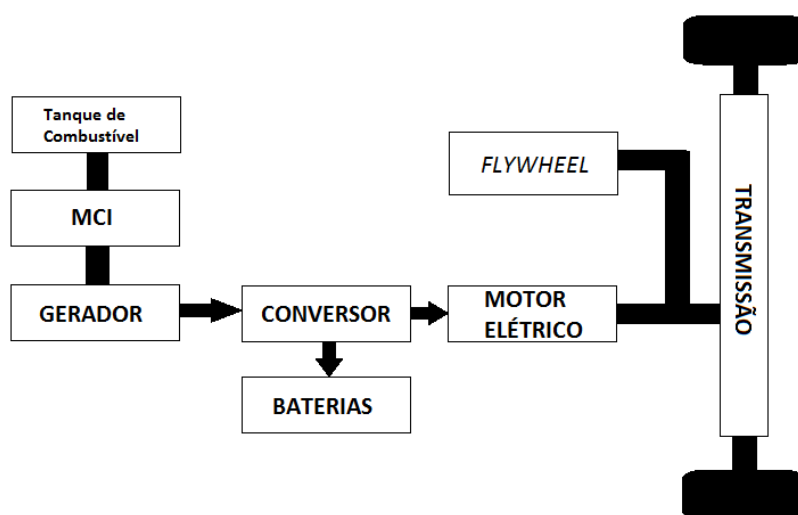


Figura 4 - Arquitetura série com flywheel
Fonte: autoria própria.

2.3 Níveis de Hibridização

A depender da configuração escolhida, dos requerimentos de projeto, disponibilidade de tecnologias e nicho de mercado, os veículos híbridos podem possuir diferentes níveis, ou graus, de hibridização. A seguir é mostrada essa classificação.

¹ Dispositivo mecânico em formato cilíndrico que armazena energia de forma cinética, através da rotação

2.3.1 Micro-Híbridos

Veículos micro-híbridos utilizam um pequeno e limitado motor elétrico como um alternador. O MCI é que propicia a propulsão ao veículo. A função do motor elétrico é tão somente auxiliar o MCI a atingir melhores condições de partida. Devido a essa configuração, esses modelos implementam a função “*start-and-go*” ou “*start-stop*”, ou seja, o MCI pode ser desligado quando o veículo está em repouso, por exemplo, parado em um semáforo. A economia de combustível para um ambiente urbano é estimada entre 2% a 10% (LO, 2009).

2.3.2 Parcialmente Híbridos

Os veículos com esse nível de hibridização apresentam além das características de um micro-híbrido, também um auxílio do motor elétrico para aceleração ou frenagem, aplicando um torque suplementar. Isso possibilita também o uso de freios regenerativos para a recarga de baterias. Entretanto, o motor elétrico não pode movimentar o veículo sem o auxílio do MCI. A economia de combustível pode variar entre 10% e 20% (LO, 2009).

2.3.3 Totalmente Híbridos

Veículos totalmente híbridos possuem um sistema de tração totalmente elétrico, assegurando que o veículo possa ser tracionado apenas pelo motor elétrico, sem auxílio do MCI. Quando o veículo é movido apenas pelo sistema elétrico, ele se torna um veículo de emissões-zero, que pode ser usado em centros urbanos e/ou pequenos trajetos. Entretanto, a propulsão pode ser feita também pelo MCI apenas e pelo MCI e o motor elétrico ao mesmo tempo. As estimativas para a economia de combustível variam entre 20% a 50% (LO, 2009).

2.3.4 Híbridos Plug-in

Os veículos híbridos plug-in recebem essa denominação por poderem ter suas baterias carregadas externamente através da rede. Em alguns casos, os veículos plug-in podem ser veículos a bateria com pequenos MCI. Em outros casos, a autonomia do veículo elétrico pode ser estendida carregando as baterias através da energia gerada pelo MCI. Esse tipo de veículo é também chamado veículo elétrico com autonomia estendida. Esses modelos são promissores em questão de economia de combustível, podendo chegar a 100% caso o MCI não seja utilizado para carregar as baterias (LO, 2009).

De acordo com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, para um veículo híbrido ser considerado um *plug-in*, ele deve possuir ao menos essas três características: um sistema de baterias de 4 kWh ou mais, autonomia de ao menos 10 milhas sem o auxílio do MCI e, obviamente, meios de se conectar a rede elétrica para recarga das baterias (ANUMOLU et al., 2008). Alguns estudos mostram que os veículos do tipo *plug-in* podem reduzir o pico de demanda de energia elétrica através da conexão desses veículos na rede e tecnologias de conexão V2G (*vehicle-to-grid*). Entretanto, para não tornarem-se um problema, como uma carga extra no pico de demanda ao invés de um fornecedor de energia, são necessários carregadores inteligentes, tecnologias de gerenciamento de carga e, principalmente, motoristas conscientes (CHUKWU e MAHAJAN, 2011; WIRASINGHA, SCHOFIELD e EMADI, 2008).

2.4 Principais Componentes de um Veículo Híbrido

A escolha das estruturas de um veículo híbrido é uma questão decisiva devido a constante evolução da tecnologia e performance dos componentes (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000).

A seguir serão listados os principais componentes de um veículo híbrido elétrico, assim como suas particularidades e funcionalidades.

2.4.1 Gerador de Energia Elétrica

Para gerar energia elétrica, a tendência é o uso de geradores de imã permanente, devido a sua eficiência em torno de 90% a 95% para cargas de trabalho constantes (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000).

2.4.2 Baterias e Sistema de Armazenamento de Energia

Comparadas as dos veículos puramente elétricos, as baterias dos veículos híbridos são caracterizadas por sua reduzida capacidade de armazenamento e maior requerimento de potência. Os requerimentos mínimos para uma bateria com essa função são ao menos 50 Wh/kg de energia específica e potência específica em torno de 100 W/kg, contínua, com 200 W/kg ou 300 W/kg apresentando vantagens de eficiência no projeto (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000).

As baterias fazem parte do sistema de armazenamento de energia, que consiste também em medidores de tensão, corrente e temperatura, um circuito balanceador de carga nas células e um sistema de resfriamento. Nota-se que um algoritmo de estimativa de carga nas baterias é de suma importância (LIU, 2013).

Segundo Liu, os requerimentos básicos para um sistema de armazenamento de energia incluem segurança, confiabilidade, alta eficiência e baixo custo. Entretanto, esses requerimentos variam de acordo com as configurações dos veículos híbridos, são elas: velocidade máxima, aceleração, autonomia totalmente elétrica e modos de operação. Liu cita os seguintes critérios a serem observados quando dimensionamos um sistema de armazenamento (LIU, 2013):

- Capacidade do banco de baterias (Ah)
- Pico de potência e de carga e descarga contínuas (kW)
- Tensão máxima e mínima de operação (V)
- Corrente máxima e mínima de operação (A)
- Faixa de temperatura de operação (C)
- Capacidade de potência de arranque a frio (kW)
- Taxa de descarga máxima (Wh/dia)
- Faixa permitida de operação de estado de carga (%)
- Eficiência energética mínima (%)
- Vida-útil da bateria (anos)
- Ciclos da bateria

- Massa do banco de baterias (kg)
- Precisão e taxa de medidas de corrente, tensão e temperatura
- Precisão da estimativa de estado de carga

2.4.2.1 Tipos Básicos de Baterias para Veículos Híbridos

A seguir serão listadas as principais baterias sendo utilizadas para aplicações em sistemas de veículos híbridos.

2.4.2.1.1 Bateria de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido são umas das mais antigas baterias recarregáveis, sendo usadas nos primeiros veículos elétricos ainda no século 18 (ANDERSON e ANDERSON, 2010; HØYER, 2007; LIU, 2013; WAKEFIELD, 1994). Dois tipos de baterias são utilizadas em veículos, a de partida e a de ciclo profundo. As baterias de partida consistem de placas finas para maximizar sua área de superfície e corrente de saída. São utilizadas para a partida de MCI e manter um estado de carregamento flutuante. Se este tipo de bateria fosse usada em veículos híbridos, onde seria repetidamente carregada e descarregada, ela seria danificada. Para esse tipo de aplicação são utilizadas baterias de ciclo profundo especialmente projetadas para ciclos frequentes de carga e descarga, com placas muito mais grossas para atingir uma vida útil maior (LINDEN e REDDY, 2002; LIU, 2013).

De acordo com Liu, as principais vantagens das baterias de chumbo-ácido são: custo reduzido quando comparadas a outras baterias, alta tensão por célula, fácil reciclagem e indicação precisa do estado de carga. Já as desvantagens incluem uma vida de ciclos limitada entre 500 e 800 ciclos completos, baixa densidade de energia, tipicamente 30 Wh/kg a 40 Wh/kg, alta taxa de descarga e baixa eficiência de carga e descarga (LIU, 2013). Os requerimentos técnicos básicos para baterias de chumbo-ácido em aplicações de veículos elétricos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de chumbo – ácido em veículos híbridos e elétricos.

Energia específica	30 – 40 Wh/kg
Densidade de energia	60 – 90 Wh/ L
Potência específica	250 – 600 W/kg
Eficiência de carga/descarga	75 – 90%
Taxa de descarga	5 – 15%/mês
Ciclos	500 – 800 ciclos
Tensão nominal por célula	~2,1 V

Fonte dos dados: Liu (2013, p.19).

2.4.2.1.2 Bateria de Níquel – Cádmio (NiCd)

De acordo com Liu, as baterias de NiCd possuem uma capacidade superior de carga e descarga instantânea, sendo largamente utilizadas em aplicações que requerem alta potência de carga/descarga (LIU, 2013).

Comparadas a outras baterias, as principais vantagens das baterias NiCd quando comparadas as outras, em aplicações para veículos híbridos, são: alta taxa de carga/descarga, sendo possível descarregá-las em altas taxas dentro de apenas uma hora, ampla faixa térmica de operação, variando de -40 C até 50 C, podem suportar mais de 1000 ciclos completos de carga/descarga e possuem elevada vida útil quando armazenadas em qualquer estado de carga (LINDEN e REDDY, 2002; LIU, 2013).

As principais desvantagens das baterias NiCd são sua baixa capacidade, efeito memória, ou seja, a tensão e capacidade se degradam com os ciclos, e os problemas ambientais em relação ao uso de cádmio (LIU, 2013). Os requerimentos técnicos básicos para baterias de NiCd em aplicações de veículos elétricos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de NiCd em veículos híbridos e elétricos

(continua)

Energia específica	40 – 60 Wh/kg
Densidade de energia	80 – 140 Wh/ L
Potência específica	300 – 800 W/kg

Tabela 2 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de NiCd em veículos híbridos e elétricos

(conclusão)

Eficiência de carga/descarga	75 – 93%
Taxa de descarga	5 – 15%/mês
Ciclos	800 – 1200 ciclos
Tensão nominal por célula	~1,2 V

Fonte: Liu (2013, p.20).

2.4.2.1.3 Bateria de Níckel – Metal Hidreto (NiMH)

As baterias de NiMH utilizam como material ativo negativo uma liga metálica impregnada com hidrogênio. Como o eletrodo de metal hidreto possui uma densidade de energia maior que o de cádmio, essas baterias possuem uma capacidade e vida útil maiores que as de NiCd (LINDEN e REDDY, 2002; LIU, 2013). Também, como são livres de cádmio, as baterias NiMH são consideradas mais ambientalmente amigáveis. A alta energia específica e a boa quantidade de ciclos suportados fazem das NiMH muito propícias de serem usadas em veículos híbridos (LIU, 2013). Os requerimentos técnicos básicos para baterias de NiMH em aplicações de veículos elétricos são mostrados na Tabela 3. Na Figura 5, temos bancos de baterias usados pela *General Motors*.

Tabela 3 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de NiMH em veículos híbridos e elétricos

Energia específica	40 – 80 Wh/kg
Densidade de energia	90 – 160 Wh/ L
Potência específica	900 – 1600 W/kg
Eficiência de carga/descarga	80 – 95%
Taxa de descarga	5 – 15%/mês
Ciclos	800 – 1200 ciclos
Tensão nominal por célula	~1,2 V

Fonte: Liu (2013, p. 21).

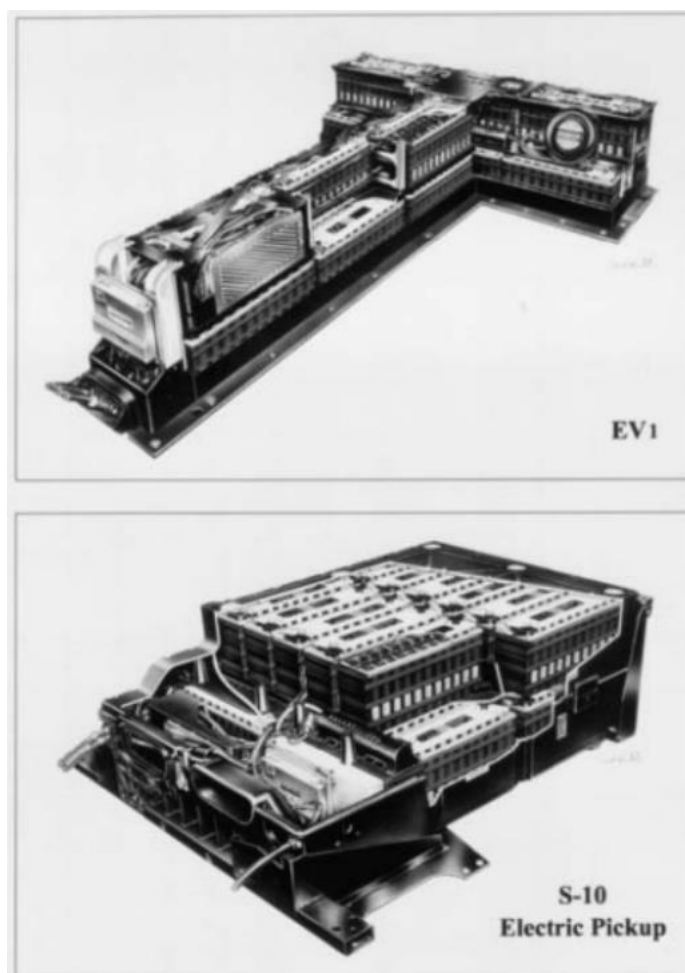


Figura 5 - Banco de baterias NiMH GM Ovonic para EV1 (30 kWh) da General Motors e para a Chevrolet S-10 Electric Pickup (30 kWh)
Fonte: Linden e Reddy (2002).

2.4.2.1.4 Bateria de Lítio – Íon (Li-íon)

As baterias Li-íon apresentam alta eficiência, alta potência específica e densidade de energia, baixa taxa de descarga e longa vida útil, além de serem amigáveis ao meio ambiente. Essas características fizeram com que estas baterias rapidamente fossem empregadas nos sistemas híbridos de propulsão (LIU, 2013). Algumas desvantagens dessas baterias são seu custo, degradação em temperaturas elevadas, necessidade de um circuito de proteção, perda de capacidade e fuga térmica quando sobrecarregadas (LINDEN e REDDY, 2002). Os requerimentos técnicos básicos para baterias de Li-íon em aplicações de veículos elétricos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de Li-íon em veículos híbridos e elétricos

Energia específica	130 – 200 Wh/kg
Densidade de energia	180 – 320 Wh/ L
Potência específica	1200 – 4000 W/kg
Eficiência de carga/descarga	85 – 96%
Taxa de descarga	< 5%/mês
Ciclos	1500 – 2000 ciclos
Tensão nominal por célula	~3,75 V

Fonte: Liu (2013, p. 21).

2.4.2.1.5 Bateria de Lítio – Ferro – Fosfato (LiFePO₄)

Com o avanço das tecnologias para veículos híbridos, os requerimentos de performance, tempo de vida e custo estão se tornando cada vez mais rigorosos. A partir disso surgiram as baterias LiFePO₄, uma bateria a base de Lítio recentemente desenvolvida para cumprir esses novos requisitos. Entre as vantagens desse tipo de bateria estão a facilidade de reciclagem, segurança (termicamente estável), baixo custo e tempo de vida maior devido ao uso de Fosfato. A principal desvantagem é a curva de tensão em razão do estado de carga ser extremamente plana, dificultando a estimação e balanceamento de carga nas células (LIU, 2013). Os requerimentos técnicos básicos para baterias de LiFePO₄ em aplicações de veículos elétricos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de LiFePO₄ em veículos híbridos e elétricos

Energia específica	70 – 180 Wh/kg
Densidade de energia	150 – 250 Wh/ L
Potência específica	1000 – 3800 W/kg
Eficiência de carga/descarga	82 – 94%
Taxa de descarga	2 - 5%/mês
Ciclos	~ 2000 ciclos
Tensão nominal por célula	~3,3 V

Fonte: Liu (2013, p. 23).

2.4.2.1.6 Ultracapacitores

Ultracapacitores, também conhecidos como supercapacitores, são capacitores de dupla-camada. Diferentemente das baterias, os ultracapacitores armazenam energia fisicamente, em forma de cargas positivas e negativas separadas por materiais dielétricos. Esses capacitores apresentam uma área muito maior que capacitores convencionais, possibilitando um maior acúmulo de cargas (LIU, 2013). Entre as vantagens dos supercapacitores destacam-se sua alta densidade de potência, excelente quantidade de ciclos de carga e descarga suportados, alta eficiência e possibilidade de reciclagem (BURKE, 2007; LIU, 2013). As desvantagens dos ultracapacitores são sua baixa densidade de energia e alta taxa de descarga (LIU, 2013). Os requerimentos técnicos básicos para ultracapacitores em aplicações de veículos elétricos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Requerimentos básicos para aplicação de baterias de LiFePO₄ em veículos híbridos e elétricos

Capacitância	1000 – 5000 F
Densidade de energia	3,5 – 4,5 Wh/kg
Potência específica	< 10000 W/kg
Eficiência de carga/descarga	85 - 98%
Ciclos	> 500000 ciclos
Tensão nominal por célula	~2,7 V

Fontes: Burke (2007), Ferdowski, (2007), Liu (2013).

2.4.2.2 Comparação entre as Baterias

A seguir, na Tabela 7, é feita uma comparação entre as diversas baterias apresentadas anteriormente.

Tabela 7 - Comparação entre as diferentes baterias apresentadas

	Chumbo-ácido	NiCd	NiMH	Li - íon	LiFePO₄
Energia específica	30 – 40 Wh/kg	40 – 60 Wh/kg	40 – 80 Wh/kg	130 – 200 Wh/kg	70 – 180 Wh/kg
Densidade de energia	60 – 90 Wh/ L	80 – 140 Wh/ L	90 – 160 Wh/ L	180 – 320 Wh/ L	150 – 250 Wh/ L
Potência específica	250 – 600 W/kg	300 – 800 W/kg	900 – 1600 W/kg	1200 – 4000 W/kg	1000 – 3800 W/kg
Eficiência de carga/descarga	75 – 90%	75 – 93%	80 – 95%	85 – 96%	82 – 94%
Taxa de descarga	5 – 15%/mês	5 – 15%/mês	5 – 15%/mês	< 5%/mês	2 - 5%/mês
Ciclos	500 – 800 ciclos	800 – 1200 ciclos	800 – 1200 ciclos	1500 – 2000 ciclos	~ 2000 ciclos
Tensão nominal por célula	~2,1 V	~1,2 V	~1,2 V	~3,75 V	~3,3 V

Fonte: Liu (2013).

2.4.3 Motor elétrico

Quando falamos de motores elétricos para veículos híbridos, dois tipos se sobressaem, o motor de indução assíncrono e o de ímã permanente sem escovas (“*brushless*”) (LIU, 2013). O primeiro tem a vantagem da robustez, enquanto o segundo apresenta um custo maior mas, uma melhor eficiência e pode ser integrado as rodas (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000). O motor de indução pode parecer inadequado para aplicações em que se utilizem fontes de corrente contínua, mas devido aos avanços na eletrônica de potência, uma corrente alternada pode facilmente ser obtida através de um inversor (LIU, 2013). Com o advento da eletrônica de potência com microprocessadores embarcados, os motores assíncronos também avançam em aplicações que exigem velocidade variável (MORA, 2000).

2.4.3.1 Motor de indução assíncrono

Os motores de indução são os motores mais largamente usados nas indústrias, devido ao seu baixo custo, baixa necessidade de manutenção e confiabilidade, apesar de apresentarem perdas significativas e baixa eficiência (KHAJEPOUR, FALLAH e GOODARZI, 2014). Em um motor de indução, a corrente no rotor é induzida através de um campo magnético girante criado pelas correntes trifásicas que percorrem os enrolamentos do estator. A formação desse campo magnético é mostrada na Figura 6.

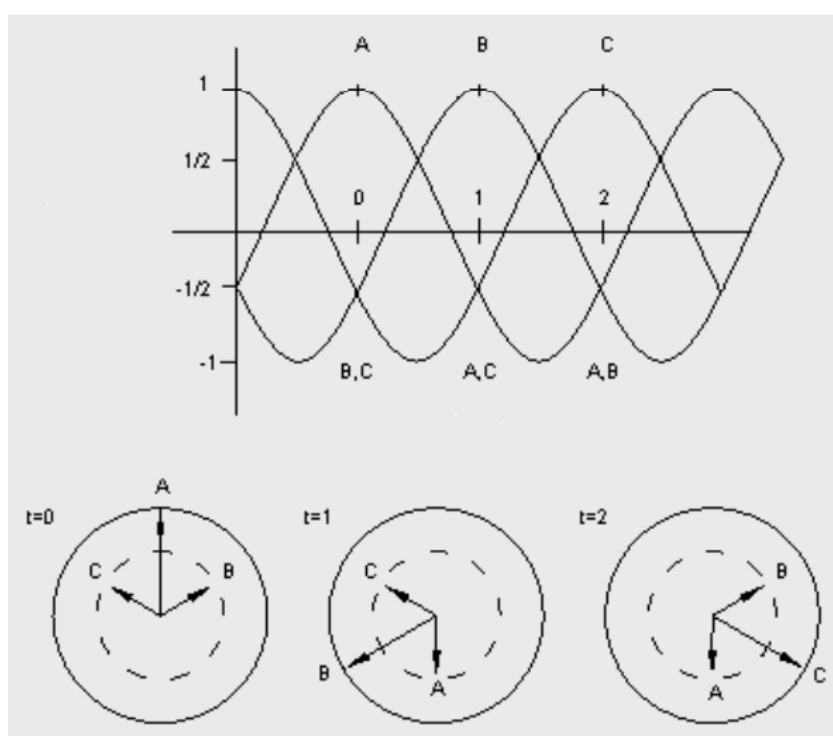


Figura 6 - Formação do campo magnético girante em três instantes de tempo
 Fonte: Keyes (2007, p. 20).

A corrente induzida no rotor irá gerar o campo magnético no rotor. A diferença entre a velocidade de rotação do rotor e do campo magnético no estator causará uma interação entre os campos magnéticos, resultando na rotação do rotor. A designação assíncrono provém justamente dessa necessidade de haver uma diferença de velocidade entre os campos magnéticos para que o rotor gire (LIU, 2013). A expressão geral para a velocidade do campo girante é a seguinte:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2)$$

Onde N_s é a velocidade do campo, expressa em revoluções por minuto [rpm], f é a frequência, em hertz [Hz] e p é o número de pólos do motor. O número de pólos deve ser par, pois para cada pólo norte deve haver um pólo sul (HUGHES e DRURY, 2013). Velocidades para números de pólos comumente usados são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Velocidade de rotação para números de pólos comumente usados

Número de pólos	Velocidade [rpm]	
	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

Fonte: adaptado de Hughes e Drury (2013).

A curva característica de torque/potência em razão da velocidade em um motor de indução é mostrada na Figura 7.

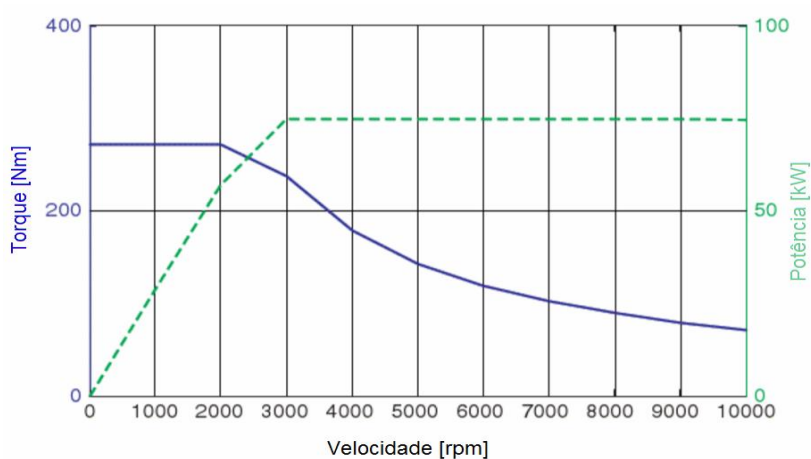


Figura 7 - Curva típica de torque/ potência em razão da velocidade de um motor de indução

Fonte: adaptado de Liu (2013, p. 16).

Na Figura 8, é mostrado o mapa de eficiência de um motor de indução.

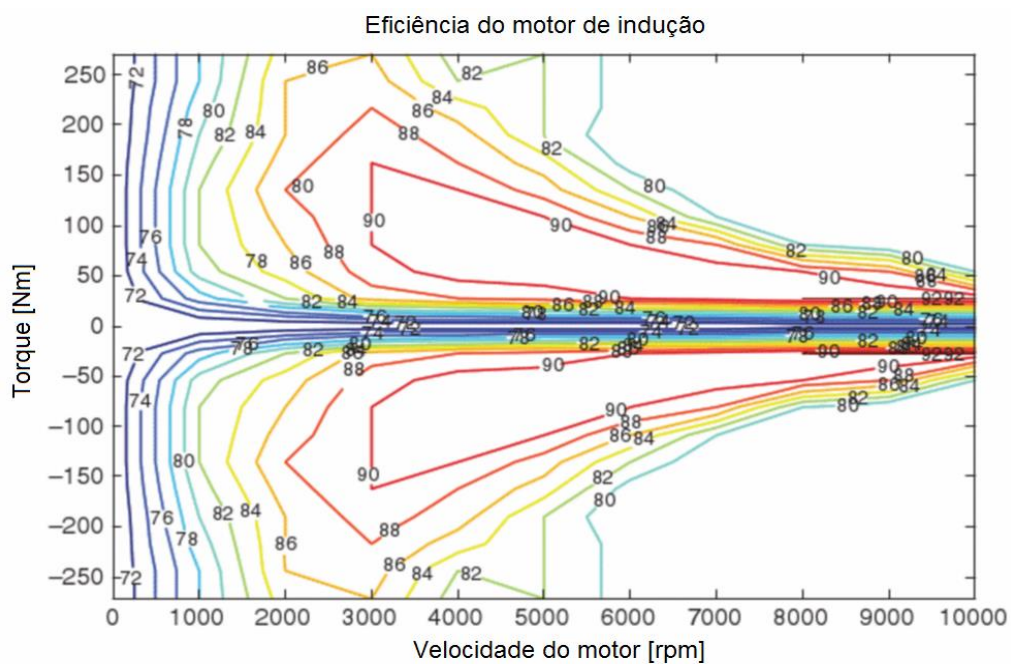


Figura 8 - Mapa de eficiência de um sistema de motor de indução
 Fonte: adaptado de Liu (2013, p. 17).

Na Figura 9 é mostrada uma vista em corte de um motor de indução assíncrono, em seguida, na Figura 10, é representado um esquemático do motor.

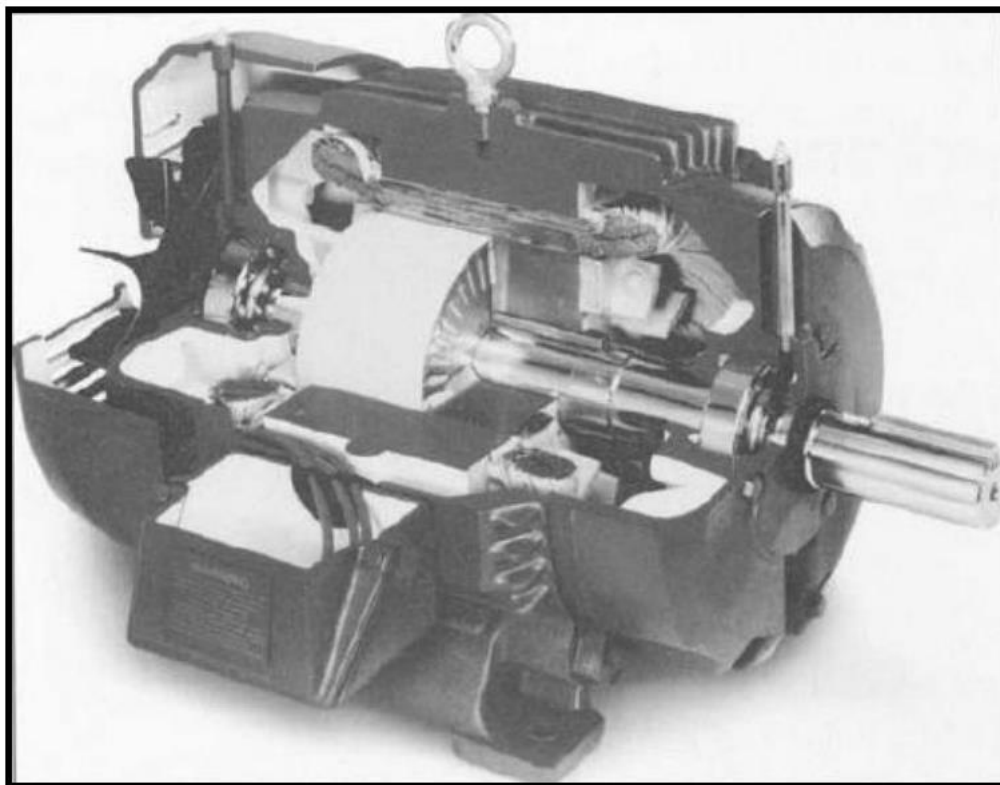


Figura 9 - Vista em corte de um motor de indução assíncrono
 Fonte: adaptado de Fitzgerald (2003, p. 307).

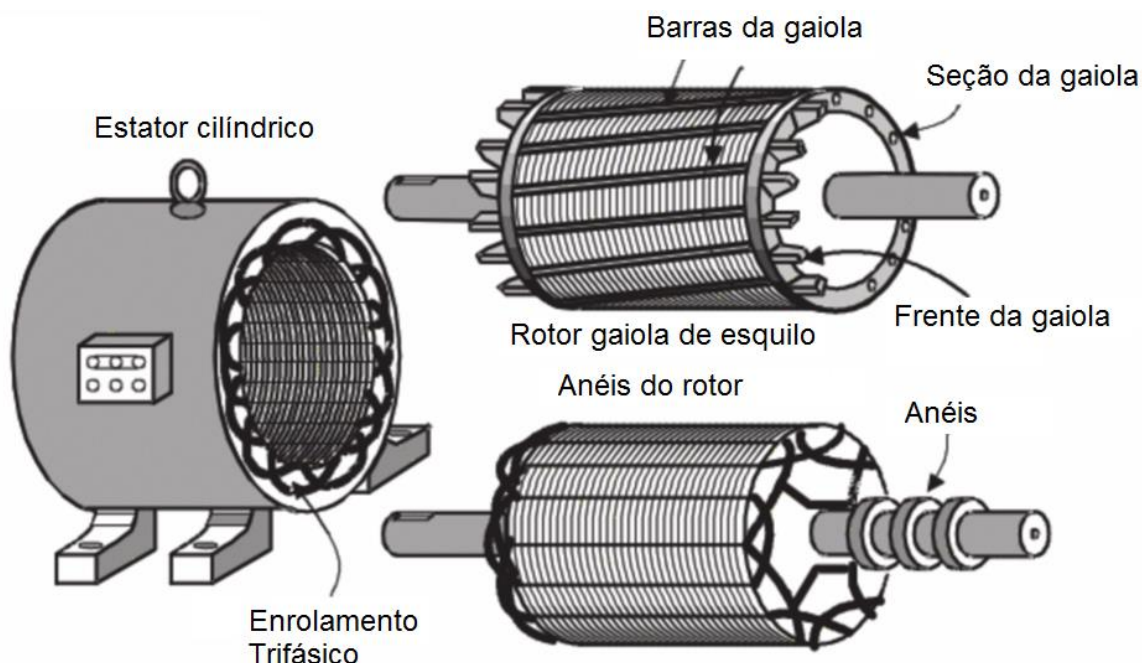


Figura 10 - Motor de indução assíncrono
 Fonte: adaptado de Mora (2000, p. 289 - 290).

2.4.3.2 Motor de imã permanente *brushless*

Em um motor *brushless*, o comutador mecânico é substituído por um sistema de controle eletrônico fixo. Nesse motor a corrente e o torque, assim como a tensão e a velocidade de rotação, são linearmente dependentes (LIU, 2013). O motor brushless é essencialmente configurado como um imã permanente rotacionando em torno de um enrolamento estacionário, construtivamente equivalente a um motor com comutadores invertido, pois nesse os imãs são estacionários (HENDERSHOT e MILLER, 1994).

Existem diversas variantes de motores *brushless*, com três configurações básicas sendo a com rotor interno, rotor externo e rotor axial (HENDERSHOT e MILLER, 1994). Uma representação dessas três configurações é mostrada na Figura 11. Para comparação, na Figura 12 é mostrado um rotor de um motor de corrente contínua elementar, girando em um campo magnético fixo.

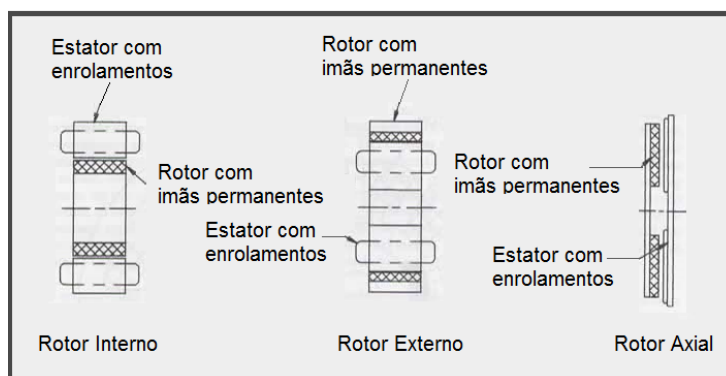


Figura 11 - Configurações construtivas rotor interno, rotor externo e rotor axial

Fonte: adaptado de Hendershot e Miller (1994, p.6).

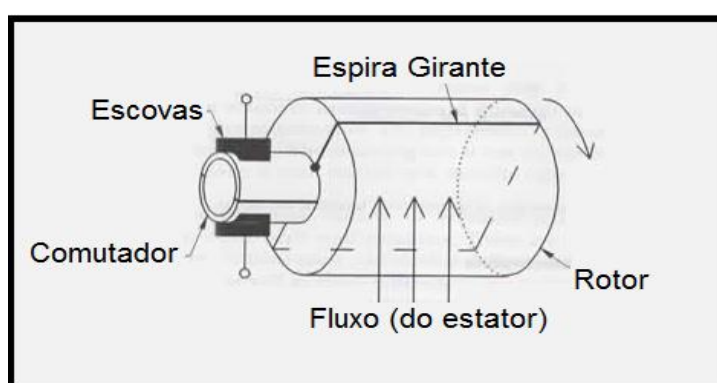


Figura 12 - Representação do rotor de um motor cc elementar

Fonte: adaptado de Hendershot e Miller (1994, p.6).

Como os motores *brushless*, como o próprio nome sugere, não possuem escovas ou comutadores, esse papel é desempenhado por um circuito inversor com transistores (HENDERSHOT e MILLER, 1994). Na Figura 13 é mostrado um circuito inversor para um motor brushless com três fases. Para comparação, na Figura 14 é mostrado um motor elementar de corrente contínua com duas escovas e um comutador de três segmentos.

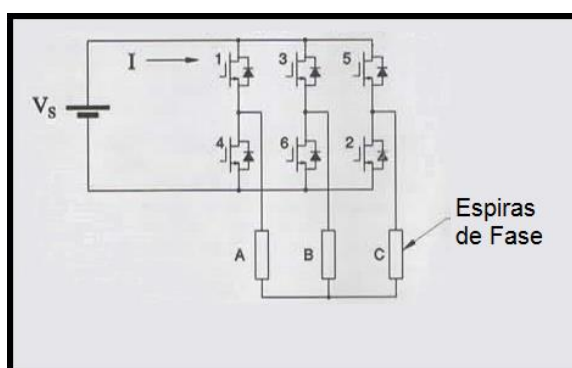


Figura 13 - Circuito inversor motor brushless com três fases

Fonte: adaptado de Hendershot e Miller (1994, p.10).

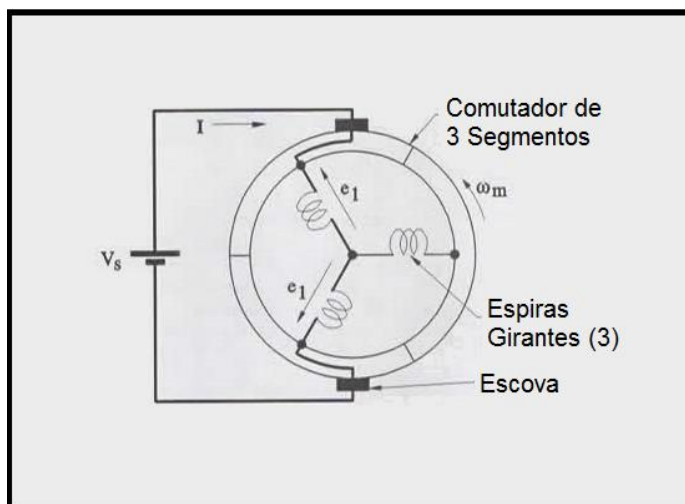


Figura 14 - Motor cc com duas escovas e um comutador
 Fonte: adaptado de Hendershot e Miller (1994, p.10).

A curva característica de torque/potência em razão da velocidade em um motor de imã permanente *brushless* é mostrada na Figura 15.

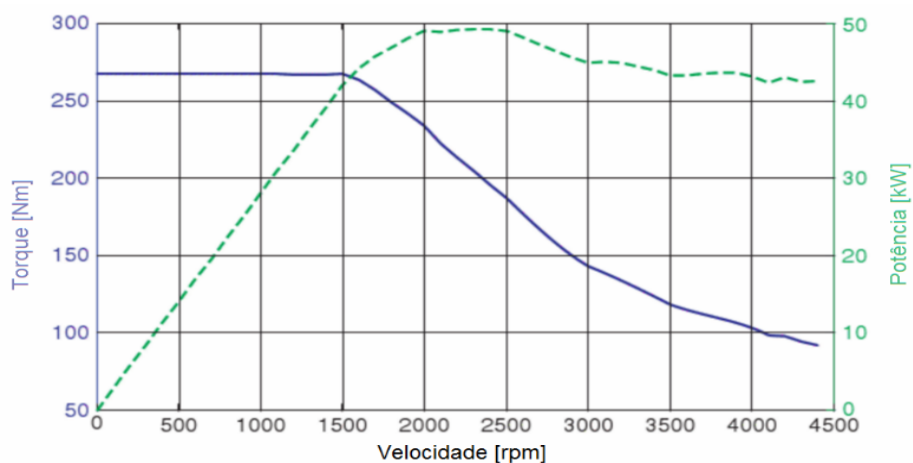


Figura 15 - Curva típica de torque/ potência em razão da velocidade de um motor *brushless*
 Fonte: adaptado de Liu (2013, p. 17).

A seguir, na Figura 16, é mostrado o mapa de eficiência de um motor *brushless*.

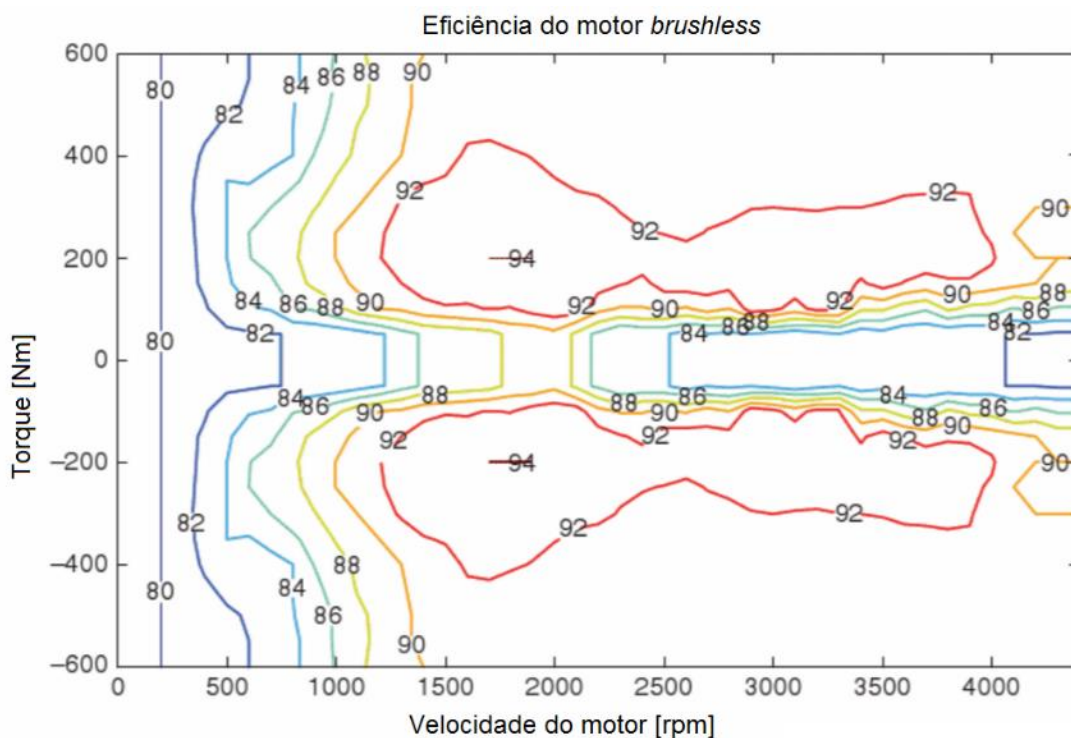


Figura 16 - Mapa de eficiência de um sistema de motor brushless
 Fonte: adaptado de Liu (2013, p. 18).

Dependendo da forma de corrente sendo injetada nos terminais do motor, os controladores dos motores *brushless* podem ser classificados como senoidal, também conhecido como controlador de motores brushless de ímã permanente de corrente alternada, e retangular, também chamado controlador de motores brushless de corrente contínua (GAN et al., 2000). Na Figura 17, temos o formato das correntes injetadas e o formato de seus respectivos fluxos no entreferro.

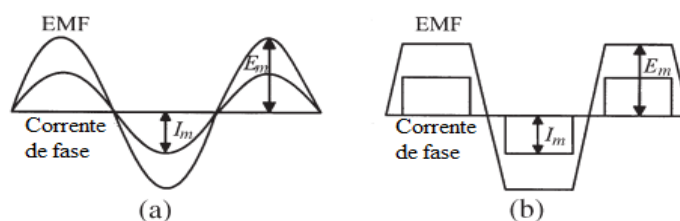


Figura 17 - (a) corrente senoidal e fluxo senoidal; (b) corrente retangular e fluxo trapezoidal
 Fonte: adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

2.4.3.2.1 Estratégias de controle de motores de ímã permanente *brushless*

A seguir serão abordadas algumas estratégias de controle de motores de ímã permanente *brushless*, são elas: controle por otimização de eficiência, controle direto de torque, controle com inteligência artificial e controle sem sensoriamento de posição.

2.4.3.2.1.1 Controle por Otimização de Eficiência (COE)

A otimização de eficiência para controle de motores *brushless* é altamente desejável para veículos híbridos e elétricos, já que a quantidade de energia disponível no sistema é bastante limitada. Diferentes tipos de controle empregam diferentes maneiras de otimizar a eficiência (CHAU, CHAN e LIU, 2008).

Para o controle em corrente alternada de rotores de motores *brushless*, por exemplo, a otimização pode ser obtida fazendo-se o *tuning online* da corrente de entrada ou a corrente de armadura I_2 para minimizar as perdas totais P_{total} , como na equação a seguir:

$$P_{total}(I_2, T, \omega) = P_{Cu}(I_2, T, \omega) + P_{Fe}(I_2, T, \omega) \quad (3)$$

Onde P_{Cu} é a perda no cobre e P_{Fe} é a perda no ferro para um dado torque T e velocidade ω . Podemos perceber que há apenas um único ponto ótimo de operação para um determinado conjunto de valores. Particularmente, a menor perda total ocorre com uma corrente de armadura menor do que aquela que gera a perda mínima no cobre, ou seja, maximizando o torque por corrente não maximiza a eficiência de controladores em corrente alternada de rotores de motores *brushless* (CHAU, CHAN e LIU, 2008). O diagrama de blocos desse controle é mostrado na Figura 18.

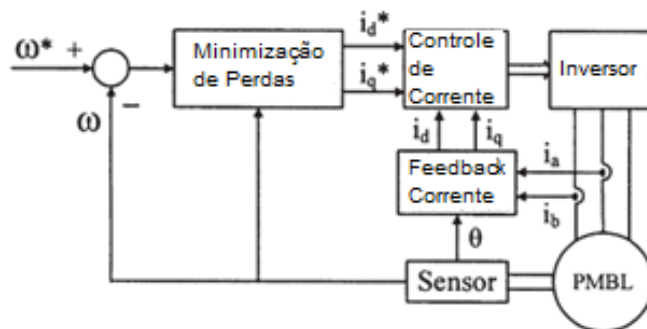


Figura 18 - Diagrama de blocos do controle por otimização de eficiência
 Fonte: adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

2.4.3.2.1.2 Controle Direto de Torque (CDT)

O controle direto de torque está se tornando atrativo para veículos elétricos, particularmente aqueles com arquitetura paralela, que requerem uma resposta rápida

de torque. Esse controle não depende do controle de corrente e é menos dependente dos parâmetros. Para controladores em corrente alternada, essa estratégia controle o torque e o concatenamento do fluxo independentemente. A saída do controlador, via inversor, providencia uma tensão que força estas duas variáveis para trajetórias pré-definidas (CHAU, CHAN e LIU, 2008). Na Figura 19, temos a representação desse controle em diagrama de blocos.

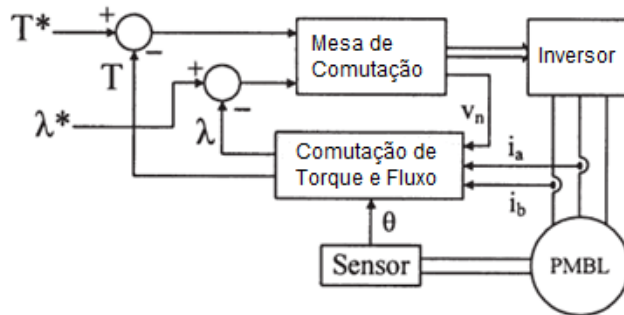


Figura 19 - Diagrama de blocos do controle direto de torque
 Fonte: adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

2.4.3.2.1.3 Controle com Inteligência Artificial (CIA)

Toda estratégia de controle baseada em inteligência artificial como por exemplo, lógica fuzzy, redes neurais, neuro-fuzzy e algoritmos genéricos são classificadas como controle com inteligência artificial. Entre todas essas estratégias citadas, o controle com lógica fuzzy e redes neurais são as mais desenvolvidas para controle de motores *brushless*. Essas duas podem lidar efetivamente com as não-linearidades e sensibilidade do sistema às variações de parâmetros (CHAU, CHAN e LIU, 2008). O diagrama de blocos desse controle é apresentado na Figura 20.

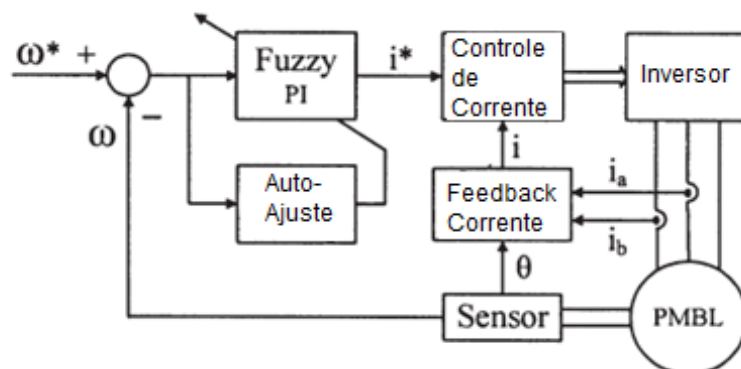


Figura 20 - Diagrama de blocos do controle com inteligência artificial
 Fonte: adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

2.4.3.2.1.4 Controle sem Sensoriamento de Posição (CSP)

Para atingirmos uma alta performance no controle de veículos elétricos e híbridos, a medição ou *feedback* da posição é quase obrigatório. Entretanto, por dispensar o custoso e volumoso encoder de posição, o controle sem sensoramento de posição está se tornando atrativo. As técnicas para implementação dessa estratégia de controle podem ser classificadas como relativos ao movimento do campo eletro-magnético, variação de indutância e variação do fluxo concatenado. Basicamente, a informação sobre a posição é conseguida através da medição e análise das correntes e tensões nos enrolamentos da máquina (CHAU, CHAN e LIU, 2008). O diagrama de blocos na Figura 21 é a representação desse controle.

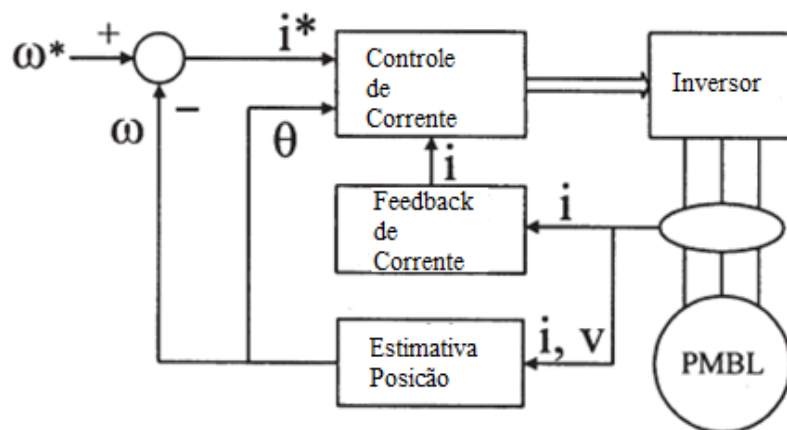


Figura 21 - Diagrama de blocos do controle sem sensoramento de posição
 Fonte: adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

2.4.3.2.2 Comparação entre as Estratégias de Controle de Motores de Ímã Permanente *Brushless*

A seguir, na Tabela 9, é mostrada uma comparação entre as diferentes estratégias de controle de motores de ímã permanente *brushless*, suas vantagens, desvantagens e técnicas.

Tabela 9 - Comparação entre as estratégias de controle

	Vantagens	Desvantagens	Técnicas
COE	Minimiza as perdas gerais; desnecessário um modelo preciso para perdas; funciona para uma ampla faixa de velocidade e torque.	Origina oscilações no sistema, assim como problemas de convergência	Controla a tensão de entrada ou corrente na armadura; controle da corrente de campo contínuo.
CDT	Rápida resposta de torque; desnecessário controle de corrente; menor dependência de parâmetros.	Erros devido a lenta estimação do fluxo concatenado no estator e variação da resistência do estator.	Gera os vetores de tensão usando computação de torque e fluxo independentes.
CIA	Algoritmo de controle flexível; adaptável a variações de parâmetros e não linearidades.	Necessita de conhecimento especializado ou computação intensa e equipamentos sofisticados.	Incorpora lógica fuzzy, redes neurais e outras técnicas de inteligência artificial em estratégias de controle tradicionais.
CSP	Elimina o sensor de posição, reduzindo o tamanho e peso do sistema.	Requer intensa computação e equipamentos sofisticados.	Estima a posição baseado no movimento do campo eletromagnético, variação da indutância ou do fluxo concatenado.

Fonte: adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

2.4.4 Motor de Combustão Interna

O MCI de um veículo híbrido pode ser usado para tração, geração de energia elétrica ou ambos, logo sua potência será definida pelo grau de hibridização do veículo (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000).

2.5 Álcool Combustível

No Brasil, o álcool combustível é utilizado de duas formas, como Álcool Etílico Anidro Combustível é adicionado à gasolina pura tipo A, já o álcool vendido diretamente ao consumidor é o Álcool Etílico Hidratado Combustível. De acordo com o artigo 2º da resolução ANP Nº 19 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015), as denominações Álcool Etílico Anidro Combustível e Álcool Etílico Hidratado Combustível são equivalentes, respectivamente, a Etanol Anidro Combustível (EAC) e Etanol Hidratado Combustível (EHC), abaixo denominados simplesmente por etanol. Na Tabela 10, baseada na ANP Nº 19, temos algumas especificações do EAC e do EHC.

Tabela 10 - Especificações do Etanol Anidro Combustível (EAC) e Etanol Hidratado Combustível (EHC).

Característica	EAC	EHC	Método
Massa Específica a 20°C (kg/m ³)	791,5 máx	805,2 a 811,2	NBR 5992 NBR 15639
Teor Alcoólico (%massa)	99,3 mín	92,5 a 94,6	NBR 5992 NBR 15639

Fonte: adaptado da resolução ANP Nº 19 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015).

O etanol e a mistura entre gasolina e etanol estão sendo consideradas uma alternativa para a gasolina em motores de combustão interna (SHIDORE et al, 2011). Apesar de apresentar algumas desvantagens como maior consumo volumétrico de combustível e problemas na partida a frio devido ao maior calor latente de vaporização, algumas vantagens tornam o etanol interessante para a aplicação em veículos híbridos (SHIDORE et al, 2011; WALLNER, SHIDORE e ICKES, 2010). O etanol possui octanagem maior que a gasolina, queima mais limpa e apresenta um índice antidetonante superior, resultando em maior eficiência em cargas mais altas (OWEN e COLEY, 1995; WALLNER, SHIDORE e ICKES, 2010). Como o motor de

um veículo híbrido irá atuar com cargas maiores que veículos convencionais, é possível diminuir os efeitos da menor densidade energética devido a maior eficiência do motor. (DUOBA, LOHSE-BUSCH e BOHN, 2005). Maiores valores de torque e potência, assim como economia de combustível, podem ser atingidos com um projeto adequado de motor para uso do etanol, como por exemplo uma maior taxa de compressão, tempo de avanço de ignição e relação estequiométrica mais precisa (CARVALHO, 2011; OWEN e COLEY, 1995).

De acordo com Carvalho (2011), a melhoria da eficiência térmica quanto ao uso do etanol torna-se possível graças a algumas características desse combustível que diferem da gasolina, tais como: a menor temperatura de chama, acarretando menor perda de calor, a taxa de queima superior, apresentando uma maior eficiência de torque e a maior pressão que a combustão do etanol gera nos cilindros, devido ao maior volume de produtos dessa reação.

Segundo Alves (2007), o uso do etanol vaporizado poderia aumentar a eficiência e diminuir o consumo de etanol em regimes permanentes, tornando essa estratégia bastante atrativa para aplicações em veículos híbridos.

2.6 O Motor *Flex*

O motor conhecido como *flex*, é um motor de combustão interna trabalhando com o ciclo Otto. Trabalha em quatro etapas: a admissão, a compressão, a combustão e o escape, nesse quesito não se diferencia dos motores exclusivamente a gasolina ou etanol. As principais diferenças são algumas especificações construtivas, componentes periféricos e o *software* da unidade de comando (REDAÇÃO, 2016).

A taxa de compressão foi a característica construtiva mais modificada. Se um motor projetado para funcionar apenas com gasolina possui uma taxa de compressão em torno de 10:1, esse mesmo motor a etanol teria uma taxa de compressão de 13,5:1, já na tecnologia *flex*, esse motor operaria a uma taxa de 11:1 (REDAÇÃO, 2016).

Segundo Paulo Ewald, engenheiro mecânico que trabalhou no programa Proálcool, não houve evolução significativa no desempenho de motores *flex* em relação ao uso do etanol, cujo consumo continua praticamente o mesmo de vinte anos atrás. Ainda segundo Ewald, o motor *flex* é bom com gasolina, mas apenas regular com etanol (MENEZES, 2009).

Analisando-se o motor a partir da primeira e segunda leis da Termodinâmica, o motor a etanol mostra um melhor desempenho quanto ao rendimento térmico, eficiências exergéticas e pressão média efetiva quando comparado ao motor a gasolina (DE CARVALHO, TORRES e PAU, 2010).

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

3.1 Modelos e tecnologias disponíveis no mercado brasileiro

A seguir serão apresentados os modelos e suas respectivas tecnologias híbridas disponíveis atualmente no mercado brasileiro.

3.1.1 Toyota Prius

O Toyota Prius foi o primeiro veículo híbrido a ser oferecido no mercado brasileiro e conta com a tecnologia *Hybrid Synergy Drive* (HSD), desenvolvida pela Toyota a partir do *Toyota Hybrid System*, utilizado entre 1997 e 2003 (CASE STUDY, 2011).

No sistema HSD, a caixa de engrenagens, o alternador e o motor de arranque são substituídos por dois motores elétricos, um sistema de controle computadorizado e um dispositivo mecânico de distribuição de potência. Ambos motores também atuam como geradores, convertendo energia mecânica em energia elétrica e vice-versa.

Através de conexões mecânicas existentes no sistema, o computador pode utilizar a energia mecânica fornecida pelo motor a combustão de três maneiras distintas: torque ou velocidade de rotação extras nas rodas e geração de eletricidade.

O motor elétrico principal (MG2) é o responsável pela movimentação do veículo e recuperação de energia durante frenagens, enquanto o outro motor (MG1) atua como gerador, transferindo energia do MCI para recarga das baterias e o suprimento de energia para o MG2. Os motores elétricos e uma engrenagem planetária² são utilizadas para variar a relação entre o MCI e as rodas sem o uso de embreagem ou aparatos hidráulicos (BURRET et al, 2011). Na Figura 22 tem-se uma representação do sistema HSD e na Figura 23, uma imagem de todo sistema do veículo.

² Engrenagem planetária é um elemento mecânico formado por uma engrenagem solar (central), engrenagens satélites que giram em torno dela (planetárias), engrenagem anelar onde as planetárias se engrenam e um eixo de suporte.

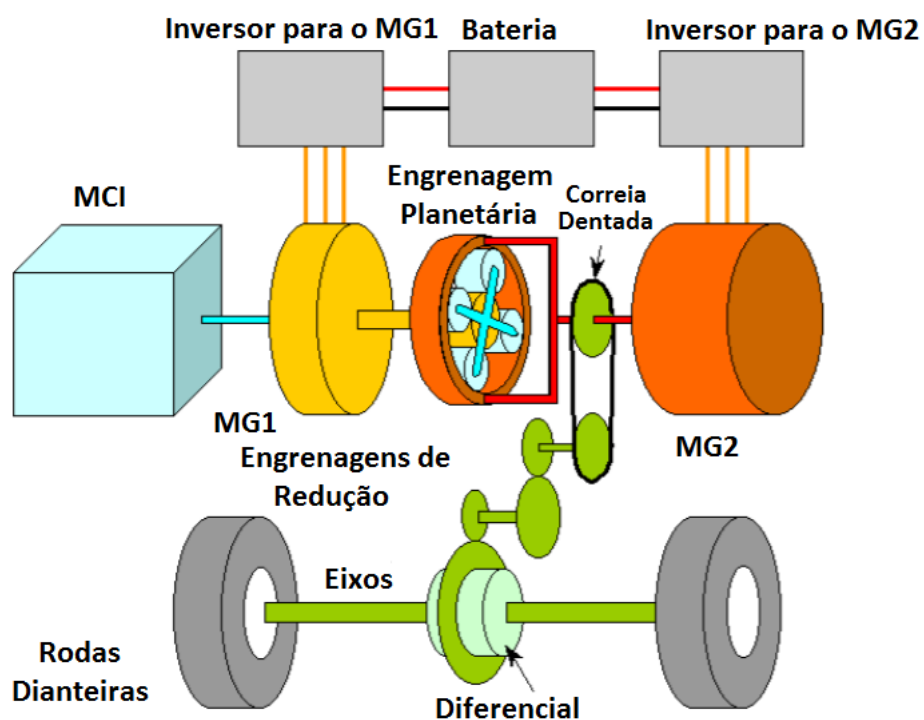


Figura 22 - Sistema HDS do Toyota Prius
Fonte: adaptado de case study (2011).

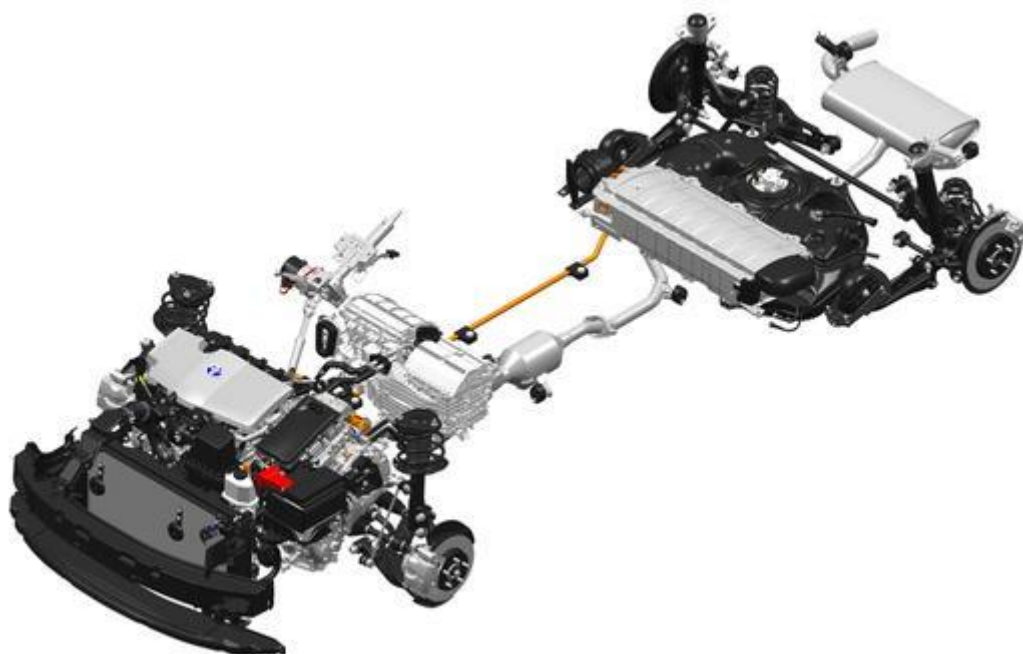


Figura 23 - Sistema completo do Toyota Prius
Fonte: Toyota (2016).

O Toyota Prius pode utilizar apenas o motor elétrico para a propulsão, fazendo desse modelo um veículo totalmente elétrico. Esse modo de operação pode ser utilizado desde que não haja demanda por mais torque, baixo estado de carga das baterias, alta temperatura dos motores ou baterias ou qualquer outra situação em que

seja necessário uma suplementação energética pelo MCI (CASE STUDY, 2011; BURRES et al, 2011).

Na Figura 24 pode-se ver uma sequência de situações e como o sistema HDS gerencia o funcionamento dos motores.

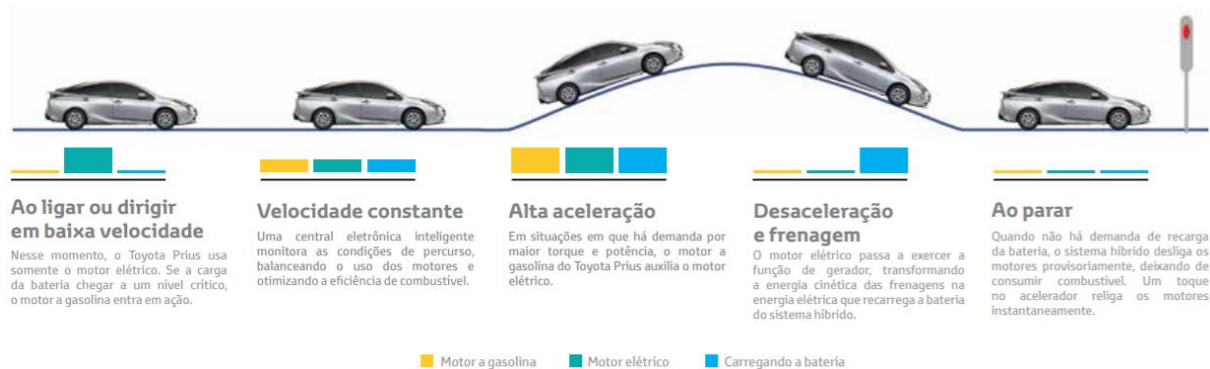


Figura 24 - Funcionamento dos motores
Fonte: Toyota Brasil (2016).

3.1.1.1 Características de performance do Toyota Prius

O Toyota Prius fabricado a partir de 2010 também conhecido como Prius de terceira geração, tem uma média de consumo estimada em 18,9 km/l na cidade e 17 km/l na estrada (INMETRO, 2016). O veículo conta com um motor Atkinson de 4 cilindros a gasolina com taxa de compressão de 13,0:1, 1,8 litro de 98 cv (73 kW) e 14,2 kgfm de torque e um motor elétrico principal de 72 cv (60 kW) e 16,6 kgfm de torque (TOYOTA BRASIL, 2016). O banco de baterias de Ni-MH, mostrado na Figura 25, tem uma potência de 27 kW (BURRES et al, 2011).

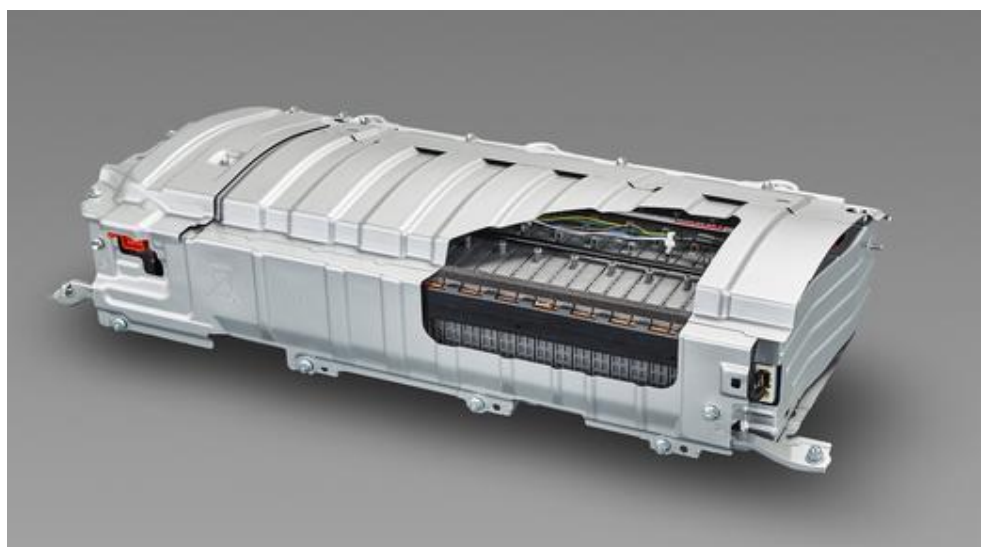


Figura 25 - Banco de baterias do Prius
Fonte: Toyota (2016).

Em 2017, a Toyota irá lançar o Prius Prime, um modelo híbrido plug-in, que terá como principais mudanças no HDS, o uso de ambos motores elétricos para propulsão e um banco de baterias de Li – íon de 8,8 kWh (TOYOTA USA NEWSROOM, 2016).

3.1.2 Lexus CT 200

O Lexus CT 200 é um veículo híbrido que chegou ao mercado brasileiro em 2012. Conta com o sistema *Lexus Hybrid Drive* (LHD) desenvolvido pela Toyota, já que a Lexus é uma subdivisão de luxo da marca (CASE STUDY, 2011).

3.1.2.1 Características de performance do Lexus CT 200

Esse veículo conta com um motor a gasolina, 1,8 litro de 98 cv e um motor elétrico de 72 cv, os mesmos utilizados no Toyota Prius (CASE STUDY, 2011 e LEXUS USA NEWSROOM, 2016). O banco de baterias de Ni-MH é selado e possui uma tensão nominal de 201,6 V (LEXUS USA NEWSROOM, 2016).

3.1.3 Mitsubishi Outlander PHEV

Esse modelo utiliza a tecnologia *plug-in*, ou seja, é possível recarregar as baterias através de uma fonte externa, não somente através do MCI ou freio regenerativo.

As três formas de operação do conjunto de motores são as seguintes maneiras:

Totalmente elétrico: os dois motores elétricos acionam as quatro rodas utilizando eletricidade das baterias, esse modo de operação permite viagens de até 52 quilômetros (MITSUBISHI MOTORS, 2016). Essa configuração é mostrada na Figura 26.

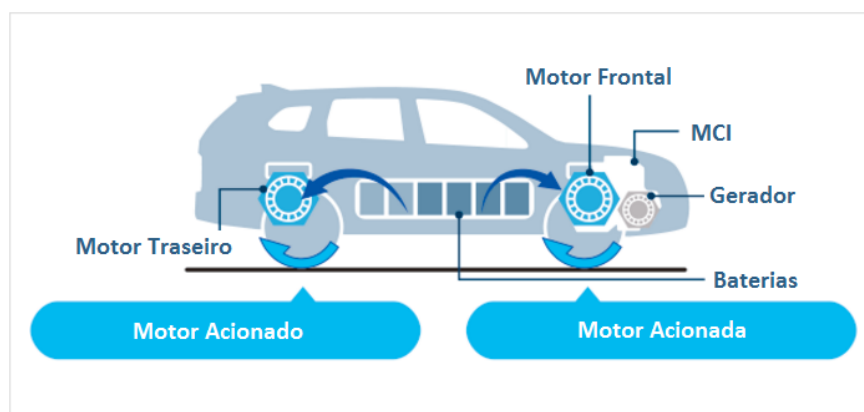


Figura 26 - Modo totalmente elétrico
Fonte: adaptado de Mitsubishi Motors (2016).

Modo Série: nessa configuração o MCI é utilizado apenas para gerar energia elétrica, recarregar as baterias e suprir os motores elétricos(MITSUBISHI UK, 2016). Esse modo de operação é mostrado na Figura 27.

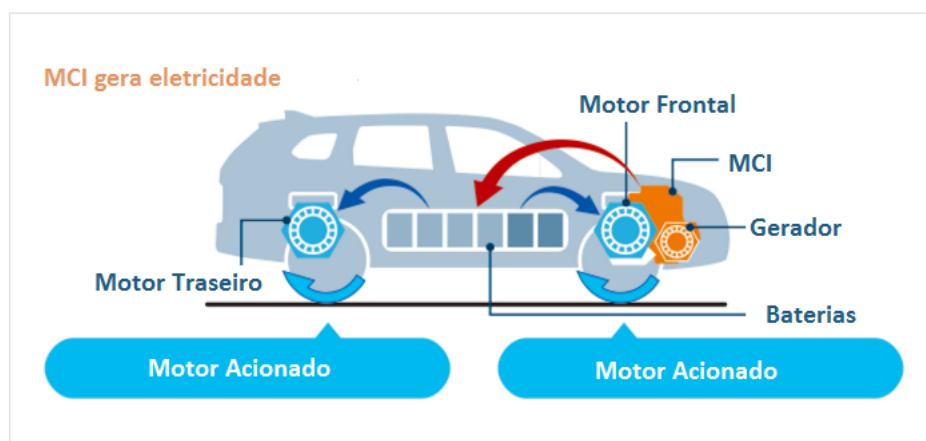


Figura 27 - Modo híbrido série
Fonte: adaptado de Mitsubishi Motors (2016).

Modo Paralelo: nessa configuração o MCI provê a maior parte da potência, recebendo auxílio dos motores elétricos quando necessário. Esse modo de operação só é utilizado em altas velocidades(MITSUBISHI UK, 2016). Essa forma de operação é mostrada na Figura 28.

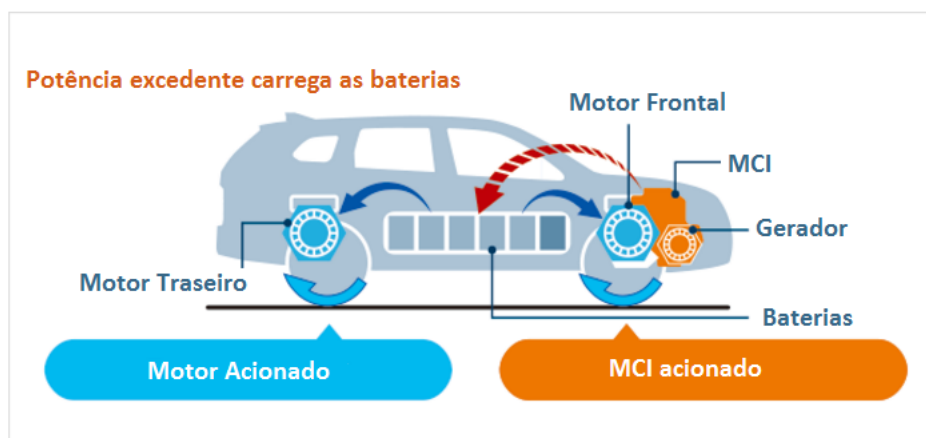


Figura 28 - Modo híbrido paralelo
 Fonte: adaptado de Mitsubishi Motors (2016).

3.1.3.1 Características de performance do Outlander PHEV

O Outlander PHEV conta com um motor 1.9 l a gasolina, capaz de gerar 89 kW de potência e torque máximo de 190 Nm. Possui um banco de baterias de Li-íon com capacidade de 12 kWh e 300 V de tensão nominal. O motor elétrico dianteiro é capaz de fornecer 60 kW de potência e 137 Nm de torque, enquanto o traseiro fornece 60 kW e 195 Nm de torque. Tem autonomia totalmente elétrica de até 52 km (MITSUBISHI MOTORS, 2016).

3.1.4 BMW i8

O BMW i8 é um modelo super esportivo híbrido *plug-in*. Possui um motor elétrico no eixo dianteiro e um motor a gasolina no eixo traseiro. Conta com três modos de direção, o COMFORT, ECO PRO e SPORT, além do botão eDrive, que gerencia o modo de condução totalmente elétrico. No modo COMFORT o motor elétrico propicia as arrancadas e o MCI só é acionado caso a velocidade ultrapasse os 65 km/h, desde que o estado de carga das baterias esteja elevado. No modo ECO PRO, o MCI só será acionado caso a velocidade ultrapasse os 65 km/h ou o estado de carga das baterias atinja um nível mínimo. O modo SPORT fornece todo o torque disponível pelo motor elétrico e pelo MCI, além disso, esse modo permite a máxima regeneração de energia durante a frenagem e a inércia do motor a combustão. Ao ativar o botão eDrive, o sistema do BMW i8 se adapta para fornecer uma condução totalmente elétrica até os 120 km/h ou até o estado de carga das baterias atingir o nível mínimo. Na Figura 29, tem-se a representação do sistema híbrido do BMW i8 (BMW, 2016).

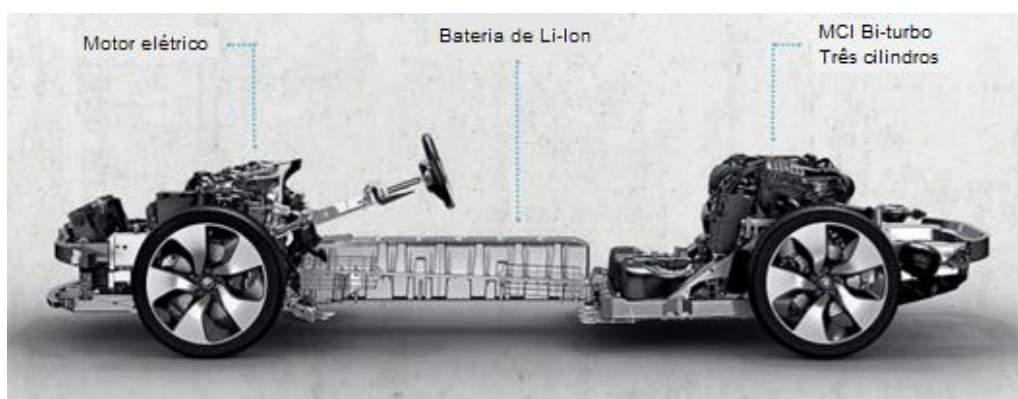


Figura 29 - Sistema híbrido do BMW i8
Fonte: BMW (2016).

3.1.4.1 Características de performance do BMW i8

O BMW i8 conta com um motor a gasolina bi-turbo, 1.5 litros de três cilindros com 170 kW (231 cv) e 320 Nm de torque, localizado no eixo traseiro. O motor elétrico tem potência de 96 kW e 250 Nm de torque, está localizado no eixo dianteiro. Possui autonomia totalmente elétrica de até 37 km (BMW, 2016).

3.2 Comparativo dos modelos e tecnologias disponíveis no mercado brasileiro

Na Tabela 11 é mostrado um comparativo entre os modelos e suas respectivas tecnologias, são mostrados apenas carros disponíveis no mercado brasileiro.

Tabela 11 - Comparação de modelos e tecnologias

(continua)

Modelo	Toyota Prius	Lexus CT 200h	Mitsubishi Outlander PHEV	BMW i8
Configuração do sistema híbrido	Série-Paralelo com controle computadorizado	Série-Paralelo com controle computadorizado	Série-Paralelo com controle computadorizado	Série-Paralelo com controle computadorizado
Plug-in	Não	Não	Sim	Sim
Freio regenerativo	Sim	Sim	Sim	Sim
Número de motores elétricos	2 motores	2 motores	2 motores	1 motor
Potência dos motores elétricos (kW)	60 (motor principal)	60 (motor principal)	60 (ambos motores)	96

Tabela 12 - Comparação de modelos e tecnologias

	(conclusão)			
Potência dos MCI (kW)	73	73	89	170
Tipo de baterias	Ni-MH	Ni-MH	Li-íon	Li-íon
Capacidade do banco de baterias (kWh)	1,3	1,3	12	5,2
Autonomia totalmente elétrico (km)	-	-	52	37

Fonte: autoria própria.

3.3 A EcoCAR 2

A EcoCAR 2 foi uma competição desenvolvida nos Estados Unidos, patrocinada pelo *U.S. Department of Energy* e a *General Motors*. O objetivo da competição era que equipes fizessem uma re-engenharia em um Chevrolet Malibu afim de aumentar sua economia de combustível e diminuir suas emissões sem alterar suas características de performance e aceitabilidade do consumidor. Dentre todos os veículos resultantes dessa competição, foi abordado nesse trabalho o desenvolvido pela equipe da *Ohio State University (OSU)*.

3.3.1 O veículo da OSU

O veículo desenvolvido pela equipe da OSU é de interesse para esse trabalho pois foi um veículo transformado em um série-paralelo *plug-in*, sendo dotado de um motor Honda 1.8 litros a etanol e dois motores elétricos com potência de 80 kW cada, um conectado ao eixo dianteiro e outro ao eixo traseiro, numa configuração que lembra a do Mitsubishi Outlander PHEV. Um esquema da arquitetura utilizada é mostrado na Figura 30.

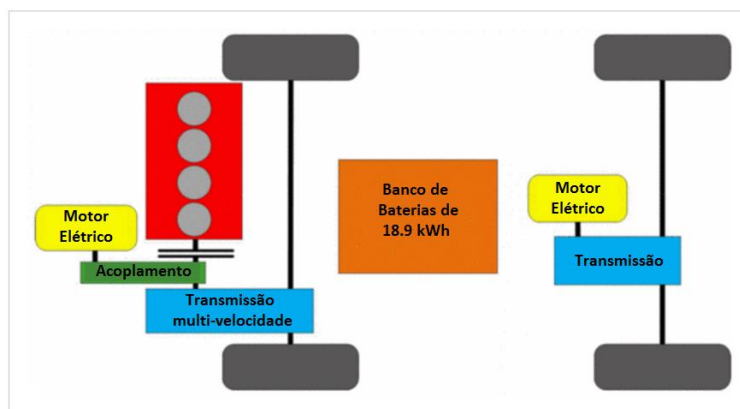


Figura 30 - Arquitetura do veículo da OSU
 Fonte: adaptado de Bovee et al (2014).

3.3.1.1 Modos de Operação

O veículo da OSU possui três modos de operação, o modo totalmente elétrico, o modo híbrido paralelo e o híbrido série. No modo totalmente elétrico os dois motores elétricos são responsáveis pela tração, como mostrado na Figura 31.

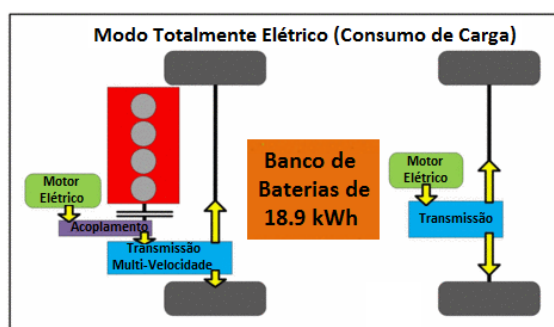


Figura 31 - Modo totalmente elétrico
 Fonte: Adaptado de Bovee et al (2014).

Quando o estado de carga das baterias fica abaixo dos 18%, o MCI a etanol é ligado. Para velocidades abaixo dos 48 km/h, o veículo opera em modo série, como mostrado na figura Figura 32.

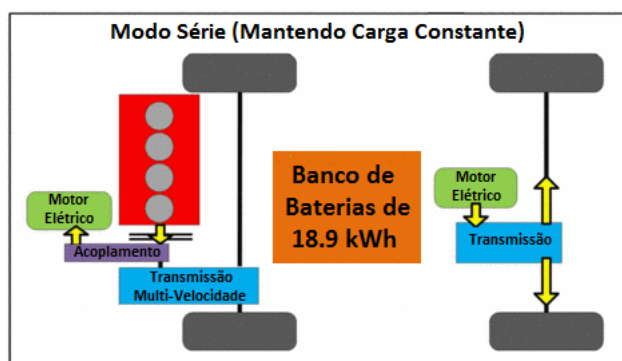


Figura 32 - Modo série
 Fonte: Adaptado de Bovee et al (2014).

Quando a velocidade demandada supera os 56 km/h, o modo de operação passa a ser paralelo, como mostrado na Figura 33. Esse intervalo de 8 km/h é definido para que o sistema não oscile demasiadamente entre os dois modos de operação.

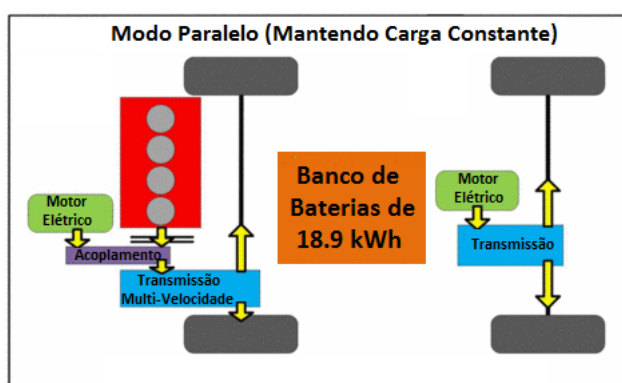


Figura 33 - Modo Paralelo
 Fonte: Adaptado de Bovee et al (2014).

3.3.1.2 Resultados dos testes do veículo da OSU

A equipe da Ohio State University foi capaz de desenvolver um veículo híbrido plug-in, com autonomia de 67 km totalmente elétrico e emissões estimadas de 114,4 gCO₂/km, abaixo da regulação europeia, de 130 gCO₂/km (BOVEE et al, 2014).

3.4 Os efeitos do etanol em um motor de combustão interna

A mistura de etanol a gasolina, em diferentes quantidades, está sendo avaliada para seu uso em veículos híbridos. Algumas vantagens dessas misturas são a maior eficiência em altas cargas e a origem mais limpa do etanol. Entretanto, apresentam

algumas desvantagens, como maior consumo volumétrico de combustível e problemas de partida a frio (SHIDORE et al, 2011).

Na Tabela 13 são mostrados alguns impactos dessas misturas no MCI e na performance do veículo, assim como as propriedades das mesmas.

Tabela 13 - Propriedades e impactos das misturas etanol-gasolina

Propriedade da mistura de etanol na gasolina	Impacto no MCI	Impacto no veículo
Menor densidade de energia	Maior consumo volumétrico de combustível para a mesma potência	Maior consumo volumétrico de combustível
Maior calor latente de vaporização	Problemas de partida a frio e baixa temperatura de combustão	Maiores emissões devido a queima incompleta de combustível
Melhores propriedades de explosão	Eficiente em operações com alta carga	Menor consumo em cargas altas

Fonte: Shidore et al (2011).

A maior eficiência das misturas de gasolina e etanol quando o motor é submetido a cargas mais altas pode ser atribuída a maior octanagem do etanol, essa eficiência pode ser explorada nos veículos híbridos.

Alguns resultados obtidos por experimentação de Shidore et al são vistos a seguir. Cabe salientar que o motor utilizado para o experimento foi um Ecotec 2.2l da Opel, em uma aplicação híbrida para um SUV, esse motor seria menor, como no caso do 1.9 l utilizado pela Mitsubishi.

3.4.1 Resultados de experimentação com diferentes misturas de gasolina e etanol

Primeiramente se fez uma análise dos impactos de diferentes misturas etanol-gasolina em motores convencionais e, a seguir, seus efeitos em um veículo híbrido. Para tanto, foram utilizados dados e experimentos provenientes de diversos estudos já publicados.

3.4.1.1 Resultados para motores de combustão interna convencionais

No quesito consumo de combustível são apresentados os resultados de dois experimentos realizados e publicados anteriormente. Shidore et al (2011), utiliza um MCI Ecotec 2.2l da Opel e um único ciclo de direção urbano em um dinamômetro. Pai et al (2013), utiliza um MCI VILLIERS de cilindro único, 4 tempos e 2,5 kW com uma rotação constante de 3000 rpm e cargas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. As cargas foram geradas por um dinamômetro acoplado ao MCI.

No experimento de Shidore et al (2011), como mostrado na Figura 34, é possível notar um aumento no consumo volumétrico de combustível conforme a mistura torna-se mais rica em etanol.

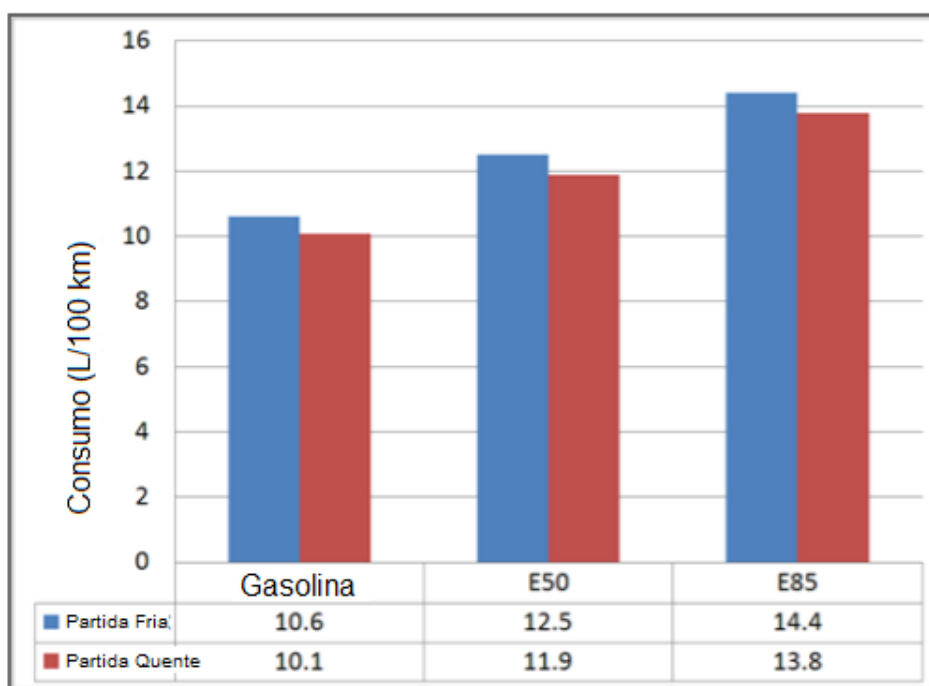


Figura 34 - Consumo de combustível de um veículo convencional para três misturas de combustível

Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

Na Tabela 14, pode-se ver o aumento percentual do consumo de combustível das duas misturas, E50 e E85, quando comparados a gasolina.

Tabela 14 - Aumento do consumo de combustível das misturas quando comparadas a gasolina

Partida	E50	E85
Quente	18,6%	37,2%
Fria	18,4%	35,9%

Fonte: Shidore et al (2011).

No experimento de Pai et al (2013), pode-se observar esse mesmo aumento no consumo de combustível conforme a mistura torna-se mais rica em etanol, como mostrado na Figura 35.

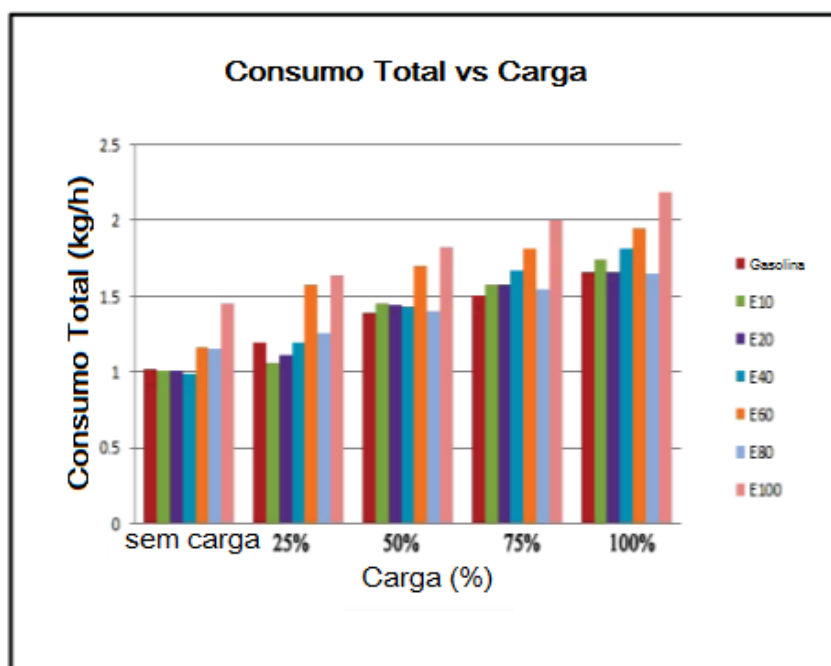


Figura 35 - Carga versus consumo total de combustível
Fonte: adaptado de Pai et al (2013).

Para uma carga de 100%, tem-se um consumo de gasolina pura de 1,661 kg/h, enquanto para o etanol puro, E100, o consumo é de 2,1854 kg/h.

Em ambos os experimentos, o aumento no consumo volumétrico de combustível deve-se ao fato do etanol apresentar um valor calorífico de 27000 kJ/kg, menor que o da gasolina, de 44000 kJ/kg.

Além do consumo de combustível, o experimento de Pai et al (2013) também traz outros resultados, como a eficiência volumétrica, emissões de Óxidos de Nitrogênio (NOx), emissões de Óxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) e Hidrocarbonetos (HC) em função da carga para as diferentes misturas de combustível. Esses resultados são mostrados respectivamente nas Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40.

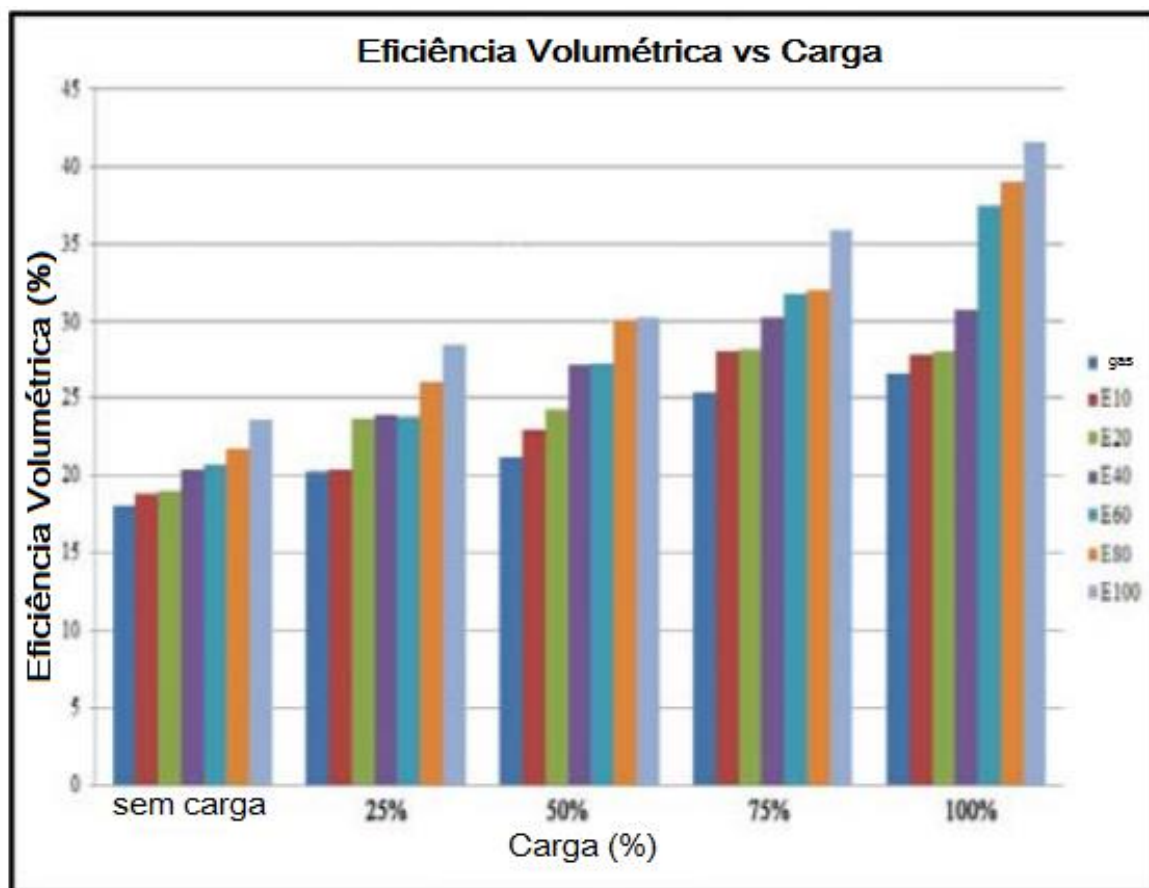


Figura 36 - Eficiência volumétrica versus carga
 Fonte: adaptado de Pai et al (2013).

Analisando a Figura 36, Pai et al (2013) conclui que, conforme a mistura vai tornando-se mais rica em etanol e a carga vai aumentando, tem-se um aumento na eficiência volumétrica, sendo a mais alta no E100. Para a carga mais elevada, a gasolina mostra uma eficiência de 27,70%, enquanto com o E100, essa eficiência atinge 41,62%.

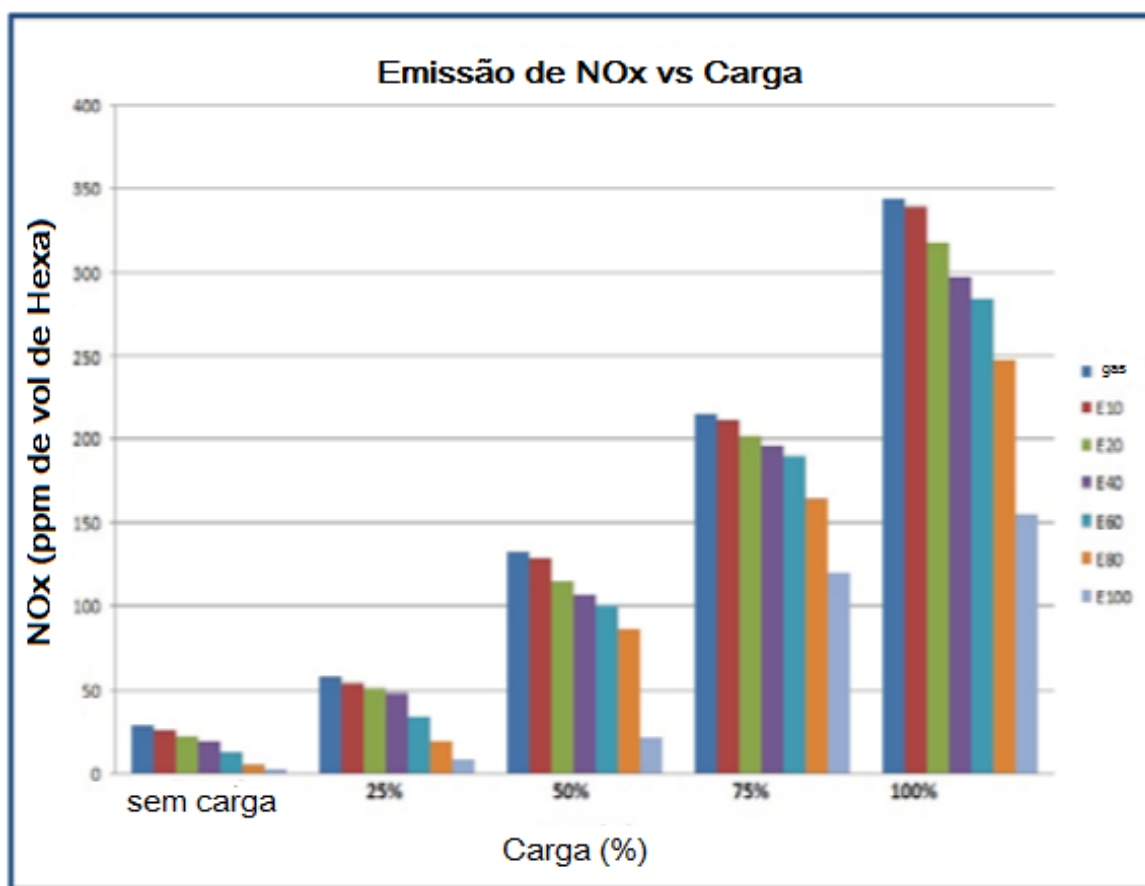


Figura 37 - Emissão de NOx versus carga

Fonte: adaptado de Pai et al (2013).

Pode-se observar da Figura 37 que, para a carga total, a emissão de NOx presente nos gases de escape para a gasolina atinge as 344 ppm e para o E100, apenas 155 ppm. Segundo Pai et al (2013), essa diminuição é grandemente influenciada pelo maior calor latente de vaporização do etanol e sua menor temperatura de combustão.

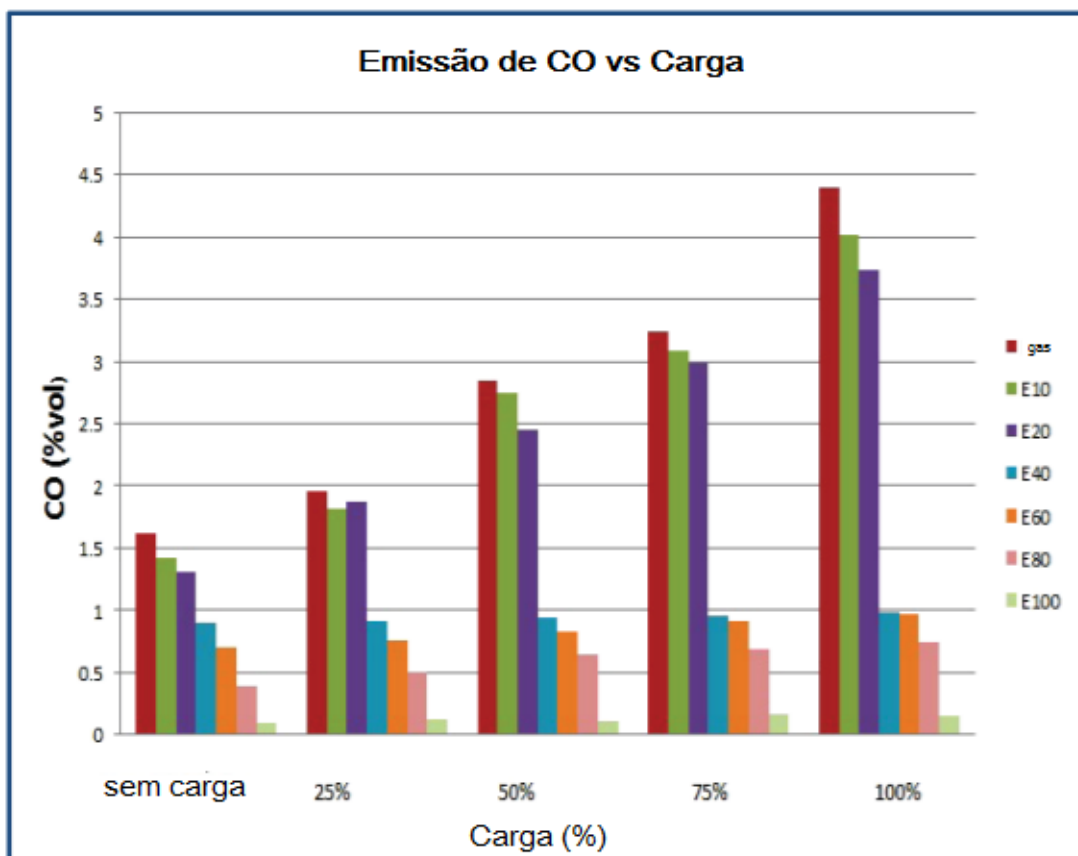


Figura 38 - Emissão de CO versus carga

Fonte: adaptado de Pai et al (2013).

Na Figura 38, pode-se perceber a drástica diminuição da presença de monóxido de carbono nos gases de exaustão quando utilizado as misturas de etanol. Enquanto para a gasolina pura essas emissões chegam aos 4,4% do volume, para o E100 é de apenas 0,16%. Como o etanol é um combustível oxigenado e o CO é formado devido a deficiência de oxigênio na combustão, as misturas de gasolina e etanol tem uma queima com maior presença de oxigênio que a gasolina pura, diminuindo a chance de formação de CO (PAI et al, 2013).

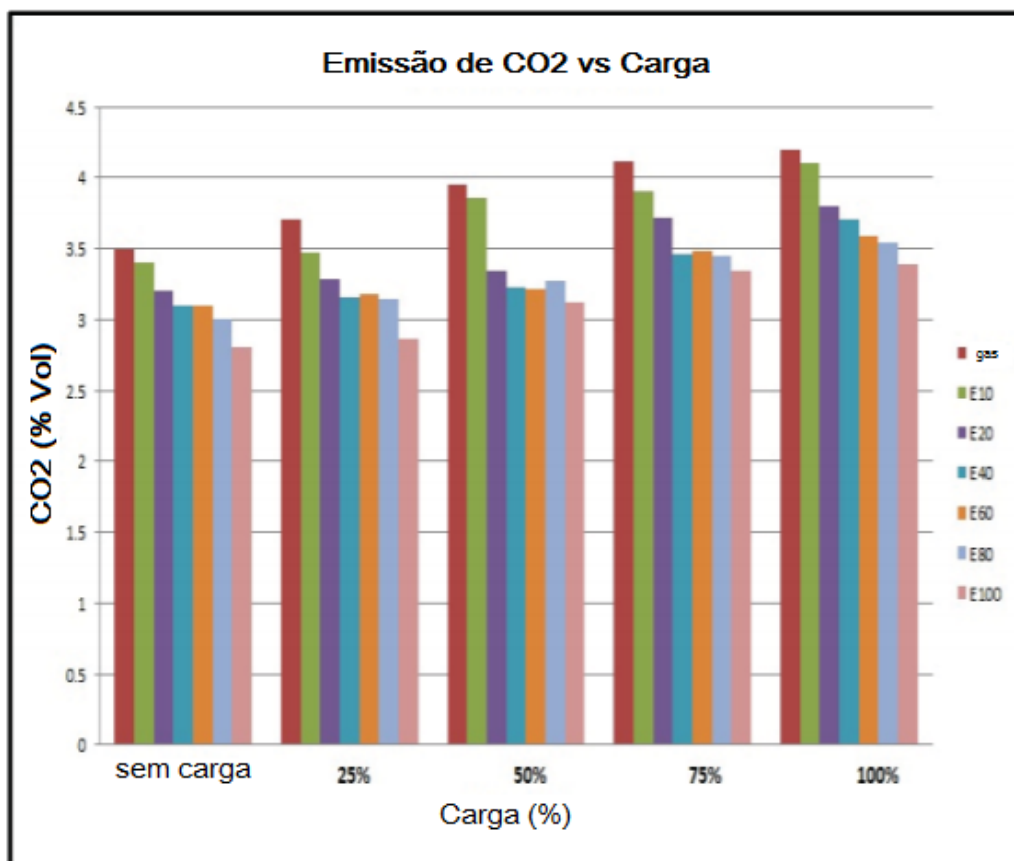


Figura 39 - Emissão de CO₂ versus carga
Fonte: adaptado de Pai et al (2013).

Na Figura 39, Pai et al (2013) observa que a emissão de dióxido de carbono também diminui como o aumento do percentual de etanol na mistura combustível. Observa-se que para a carga mais elevada a presença de CO₂ nos gases de exaustão atinge os 4,2% em volume, para o E100 esse percentual atinge apenas 3,39%.

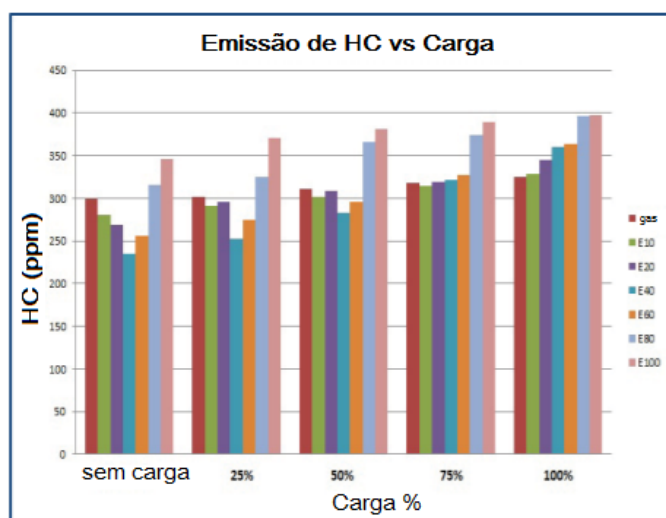


Figura 40 - Emissões de HC versus carga
Fonte: adaptado de Pai et al (2013).

Na Figura 40, pode-se observar que há um aumento nas emissões de Hidrocarbonetos para as misturas mais elevadas de etanol, segundo Pai et al (2013), esse aumento deve-se a diminuição da temperatura do cilindro. A baixa temperatura causa a queima incompleta ou irregular nas regiões próximas a parede da câmara de combustão, aumentando a presença de hidrocarbonetos nos gases de exaustão. Para a carga máxima, com o E100, observou-se a presença de 325 ppm-Hexano, para o E100, de 398 ppm-Hexano.

Com esse experimento Pai et al (2013) conclui que o etanol pode ser um substituto para a gasolina, queimando mais eficientemente e gerando menores emissões de NO_x, CO e CO₂. Para as misturas etanol-gasolina, há um aumento de performance para o MCI submetido a cargas médias e altas.

3.4.1.2 Resultados para motor de combustão interna em veículo híbrido

Os resultados mostrados nessa seção fazem parte do experimento conduzido por Shidore et al (2011). Como citado anteriormente, nesse estudo foi utilizado um motor Ecotec 2.2 I da Opel que, segundo o próprio autor, não é o ideal para o experimento mas o único disponível para uso. Um motor ideal seria um com menor tamanho, potencializando as características de desempenho e eficiência do etanol em altas cargas.

3.4.1.2.1 O experimento com o veículo híbrido

Nesse experimento, Shidore et al (2011) mede o consumo de combustível de um veículo série *plug-in* em cinco ciclos de direção urbano em um dinamômetro (UDDS). Os parâmetros dos veículos comparados são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros para os veículos convencional e série plug-in

Parâmetro	Veículo Convencional	Série Plug-in
Peso de teste (kg)	1783	1936
Potência do motor elétrico	NA	130
Potência do gerador	NA	110
Capacidade das baterias	NA	41 Ah, 10 kWh

Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

Todos os parâmetros do teste foram mantidos iguais, apenas a duração da injeção de combustível foi alterada para cada tipo de combustível. Entretanto, o que varia é a quantidade de combustível consumida e a eficiência do motor em gerar a potência demandada. A Figura 41 mostra o estado de carga da bateria assim como a velocidade de rotação do MCI para o veículo híbrido submetido a 5 ciclos UDDS consecutivos.

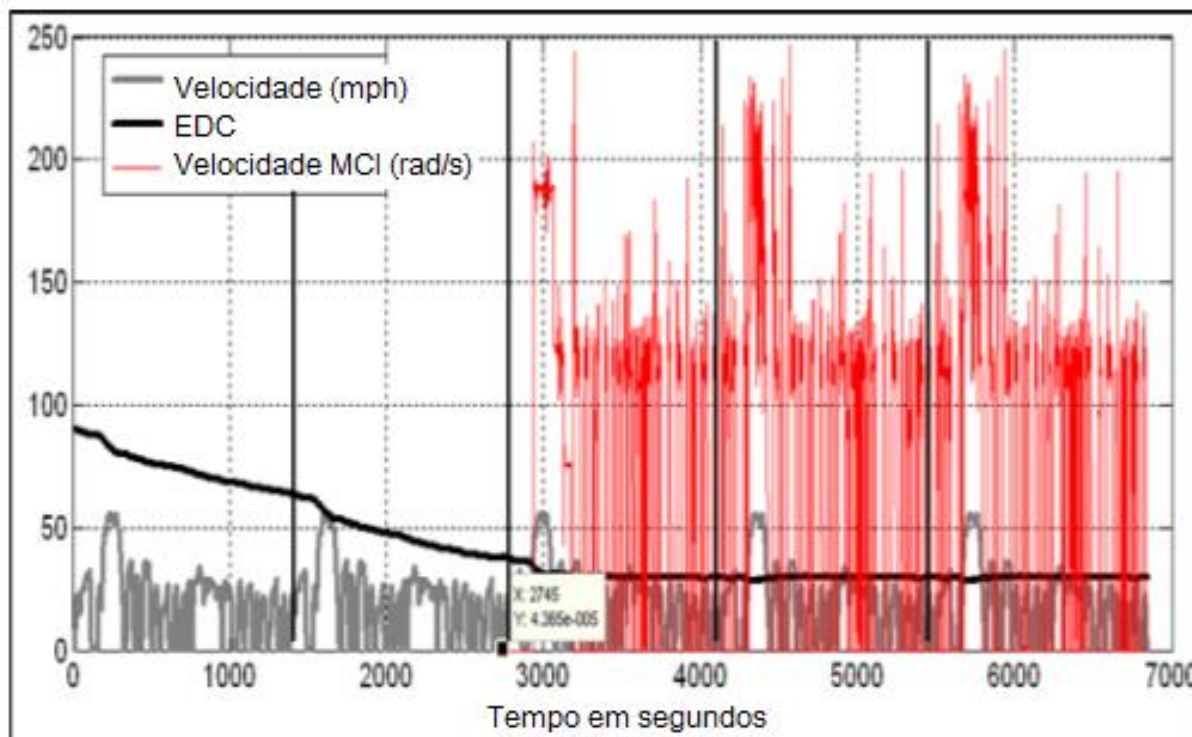


Figura 41 - Estado de carga da bateria e velocidade do MCI para o veículo híbrido
 Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

Na Figura 41, as linhas verticais representam o fim de um ciclo UDDS e o início do próximo. Nos dois primeiros ciclos o modo de operação é apenas elétrico, no terceiro há uma rotação constante do MCI a 180 rad/s para aquecimento e então o veículo mantém o estado de carga da bateria em 30% pelos últimos dois ciclos (SHIDORE et al, 2011).

Na Tabela 16, pode-se ver que o consumo de energia da bateria se mantém constante para qualquer mistura. Logo, pode-se concluir que o consumo de energia e potência do MCI são idênticos para qualquer combustível. Isso corrobora a afirmação feita anteriormente de que as únicas diferenças são o consumo e a eficiência do MCI. O consumo da energia é dado em Wh/milha.

Tabela 16 - Consumo de energia da bateria para os 5 ciclos UDDS e diferentes misturas etanol-gasolina

Combustível	UDDS #1	UDDS #2	UDDS #3	UDDS #4	UDDS #5
Gasolina	369,1	357,2	108	-6,5	-6,5
E50	369,1	357,2	107,3	-6,5	-6,5
E85	369,1	357,2	105,7	-6	-6,5

Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

A Figura 42 mostra o consumo de combustível nos ciclos 3, 4 e 5. Shidore afirma que, como esperado, a menor densidade de energia do etanol aumenta o consumo conforme a mistura se torna mais rica em etanol.

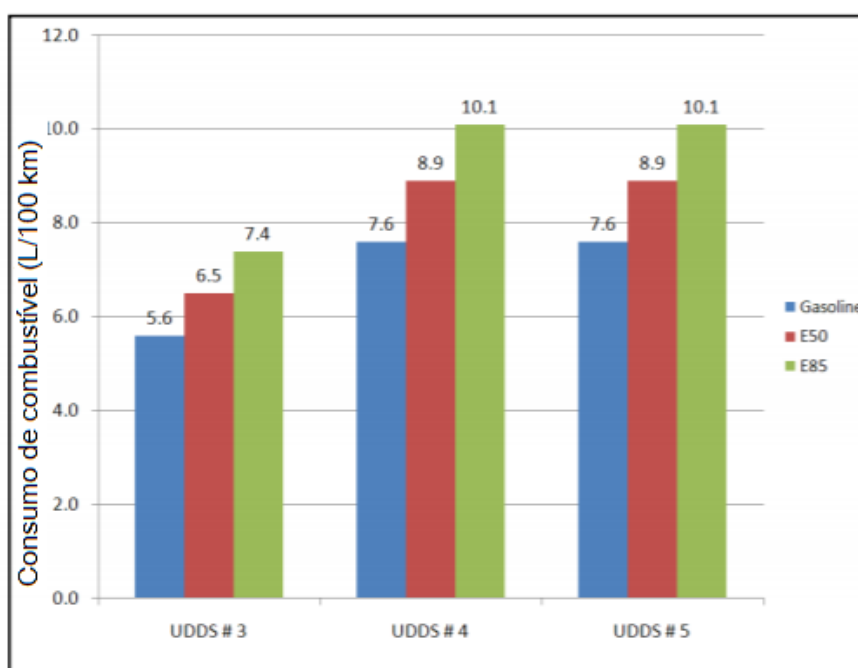


Figura 42 - Consumo de combustível para os ciclos UDDS 3, 4 e 5
Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

Apesar de haver esse aumento, para o veículo híbrido a penalidade por utilizar etanol é diminuída, como mostrada na Tabela 17, que compara o incremento do consumo das misturas E50 e E85 tanto no veículo convencional quanto no híbrido (SHIDORE et al, 2011).

Tabela 17 - comparação do aumento do consumo para o veículo híbrido e o convencional

Combustível	UDDS #4	UDDS #5	Convencional (Partida a quente)
E50	17,7%	17,9%	18,6%
E85	33,1%	33,6%	37,2%

Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

Segundo Shidore et al (2011), essa diminuição no consumo percentual deve-se ao fato do etanol possuir maior eficiência quando comparado a gasolina em MCIs com altas cargas. Como tipicamente ocorre nos MCIs operando em veículos híbridos.

Na Figura 43, pode-se ver que a eficiência energética do combustível consumido é maior para as misturas de etanol e gasolina, nos três ciclos, sendo a maior eficiência atingida com o E85 (SHIDORE et al, 2011).

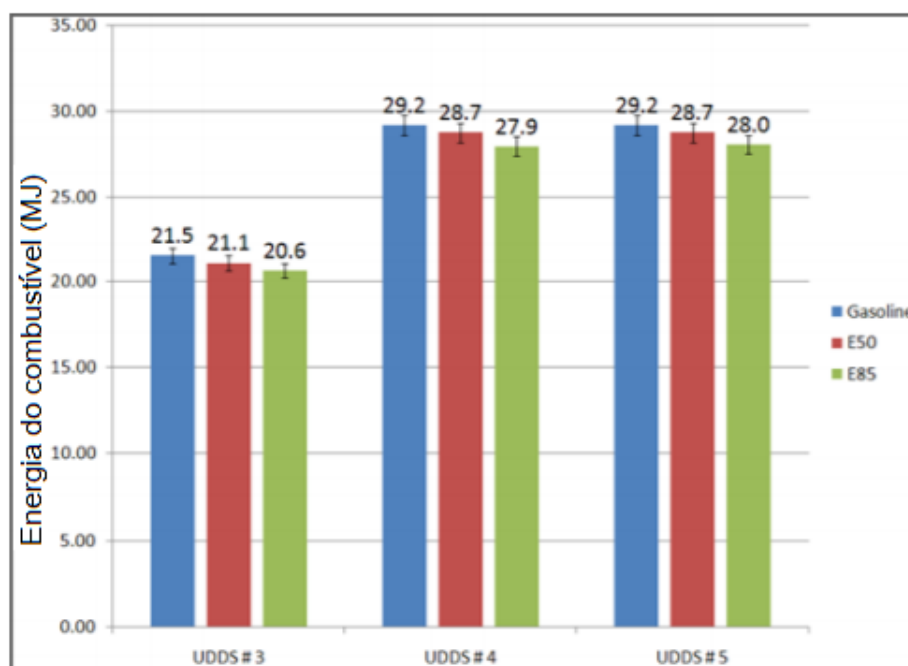


Figura 43 - Eficiência energética dos três combustíveis
Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

Na Figura 44, pode-se ver as regiões de maior eficiência do E85 quando comparado com a gasolina. Novamente pode-se notar que as regiões de carga mais elevada tornam o E85 mais eficiente (SHIDORE et al, 2011).

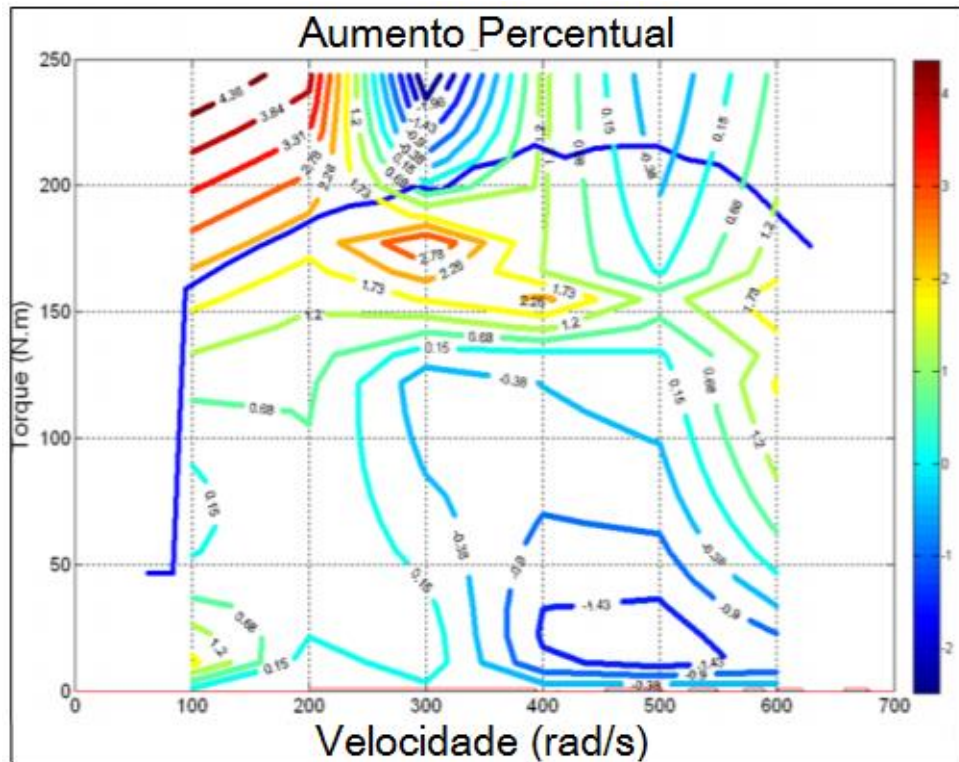


Figura 44 - Mapa de eficiência E85 versus gasolina
 Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

A Figura 45 mostra os pontos de operação do MCI abastecido com E85. Se movido a maiores velocidades, como indicado pela seta, poderia-se aproveitar melhor a eficiência da mistura (SHIDORE et al, 2011).

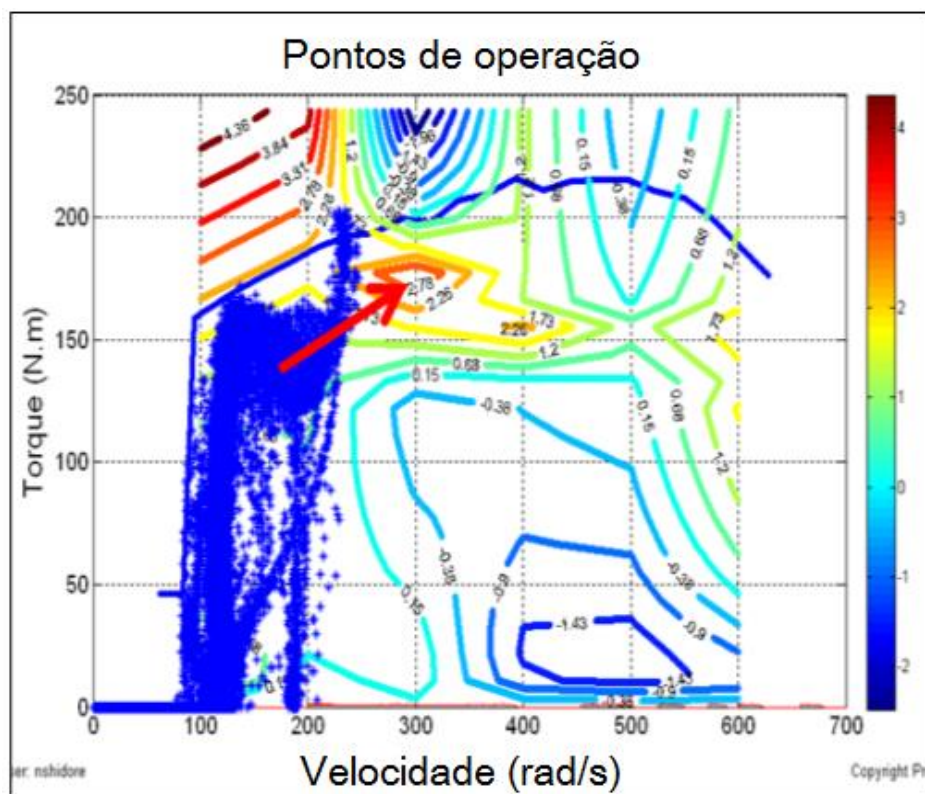


Figura 45 - Mapa de eficiência sobreposto por pontos de operação do MCI
 Fonte: adaptado de Shidore et al (2011).

3.5 Viabilidade econômica do veículo híbrido a etanol

Nesta seção será visto como os preços da gasolina e do etanol se comportaram desde 2013 e serão usados os resultados de Shidore et al para verificar-se a viabilidade econômica de um veículo híbrido série *plug-in*.

3.5.1 Os preços dos combustíveis

Baseando-se na série histórica dos preços dos combustíveis da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), foram elaborados os gráficos 3 e 4, onde pode-se ver a evolução dos preços do etanol e da gasolina, respectivamente, desde janeiro de 2013.

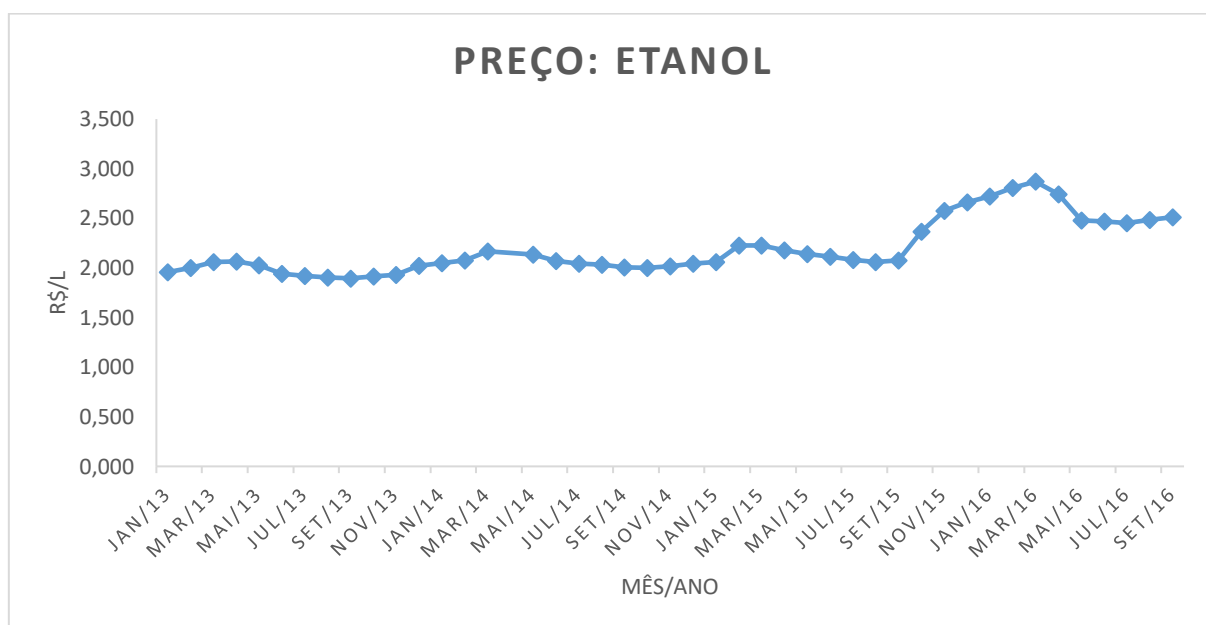


Gráfico 3 – Preço do litro do etanol desde 2013

Fonte dos dados: ANP(2016).

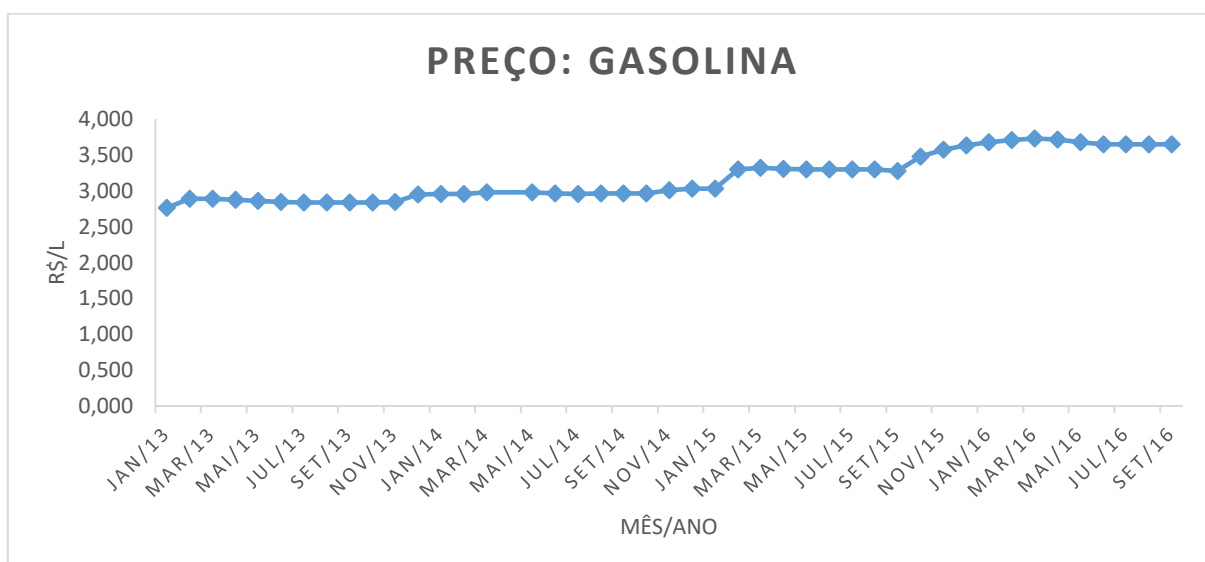


Gráfico 4 – Preço do litro da gasolina desde 2013

Fonte dos dados: ANP(2016).

No gráfico 5 tem-se a razão do preço do etanol em relação ao preço da gasolina na série histórica.

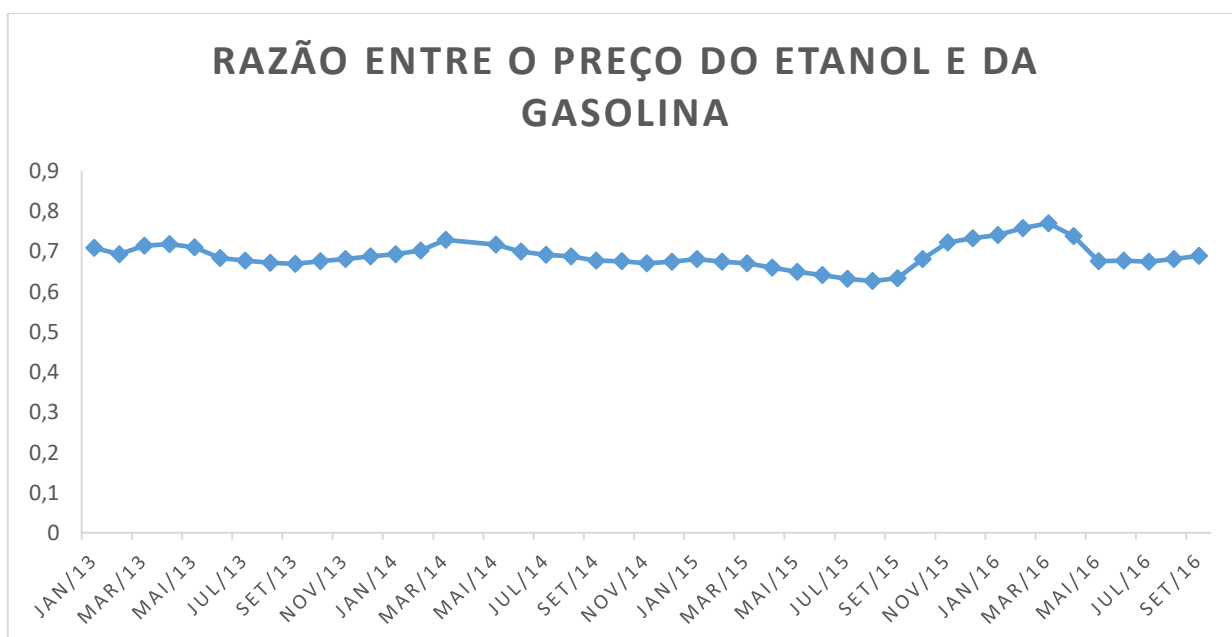


Gráfico 5 – razão entre o preço do etanol e da gasolina desde 2013

Fonte dos dados: ANP(2016).

Para o experimento de Shidore et al (2011), tem-se que o consumo do veículo convencional foi de 10,1 litros de gasolina para cada 100 km e 7,6 litros para a configuração híbrida. Já quando utilizado o E85, o consumo do veículo convencional foi de 13,8 litros para cada 100 km e 10,1 litros para a configuração híbrida. Esse

resultado mostra uma redução de 24,75% no consumo de gasolina e 26,81% no consumo de E85 quando comparados os veículos. Considerando-se os valores do litro dos combustíveis em setembro/2016, o gasto para rodar os mesmos 100 km, utilizando gasolina, passou de R\$ 36,8448 reais no convencional para R\$ 27,7248 no híbrido. Para o E85, deve-se fazer uma mistura para atingir a proporção adequada, já que tem-se o custo do E100 e da gasolina comum (E27). Para atingir-se a mistura E85, deve-se utilizar 79,45% de E100 e 20,5% de E27. Essas proporções serão utilizadas nos cálculos dos gastos com combustível. No veículo convencional, com o consumo de E85 sendo de 13,8 litros para cada 100 km tem-se um consumo de 10,9641 litros de E100 e 2,829 litros de gasolina comum. Logo, o custo com combustível foi de R\$ 37,84. Para o veículo híbrido, o consumo foi de 8,02445 litros de E100 e 2,0705 litros de gasolina comum, a um custo total de R\$ 27,6945.

Para o período mais desfavorável para o etanol (Março/2016), ou seja, quando seu preço perdeu competitividade perante a gasolina, os custos do carro convencional para a gasolina comum e o E85 ficaram em R\$ 37,673 e R\$ 42,008 respectivamente. Para o veículo híbrido, os custos ficaram em R\$ 28,348 e R\$ 30,745 respectivamente.

Para o período mais vantajoso ao uso do etanol (Agosto/2015), os custos para o veículo convencional foram de R\$ 33,2795 e R\$ 31,9185. Enquanto para o híbrido foram de R\$ 25,042 e R\$ 23,361 respectivamente.

Considerando-se um preço vantajoso ao uso do etanol em um veículo híbrido como sendo aquele em que sua utilização acarrete um custo menor ou igual ao custo da utilização da gasolina, tem-se uma vantagem no uso de E85 em 27 dos 46 meses da série histórica. Em apenas 19 meses foi mais vantajoso o uso da gasolina. Os preços e a razão entre eles são mostrados na Tabela 18, com os períodos não vantajosos destacados em vermelho.

Tabela 18 - Série histórica de preços do etanol e da gasolina comum

(continua)

Mês/Ano	Custo R\$/L Etanol (E100)	Custo R\$/L Gasolina (E27)	Razão	Mês/Ano	Custo R\$/L Etanol (E100)	Custo R\$/L Gasolina (E27)	Razão
jan/13	1,956	2,763	0,707926	dez/14	2,041	3,031	0,673375124
fev/13	2,000	2,887	0,692761	jan/15	2,061	3,032	0,67974934
mar/13	2,058	2,886	0,713098	fev/15	2,224	3,301	0,673735232
abr/13	2,064	2,876	0,717663	mar/15	2,226	3,323	0,669876618
mai/13	2,029	2,862	0,708945	abr/15	2,179	3,308	0,658706167
jun/13	1,943	2,848	0,682233	mai/15	2,141	3,299	0,648984541
jul/13	1,918	2,839	0,67559	jun/15	2,112	3,301	0,639806119

Tabela 19 - Série histórica de preços do etanol e da gasolina comum

							(conclusão)
ago/13	1,902	2,835	0,670899	jul/15	2,081	3,296	0,631371359
set/13	1,895	2,834	0,668666	ago/15	2,061	3,295	0,625493171
out/13	1,914	2,834	0,675371	set/15	2,074	3,277	0,632895941
nov/13	1,932	2,841	0,680042	out/15	2,365	3,480	0,679597701
dez/13	2,022	2,946	0,686354	nov/15	2,578	3,576	0,720917226
jan/14	2,047	2,956	0,69249	dez/15	2,659	3,633	0,731902009
fev/14	2,074	2,955	0,701861	jan/16	2,718	3,676	0,739390642
mar/14	2,168	2,980	0,727517	fev/16	2,808	3,710	0,756873315
abr/14	2,177	2,988	0,728581	mar/16	2,869	3,730	0,769168901
mai/14	2,134	2,978	0,716588	abr/16	2,741	3,717	0,737422653
jun/14	2,071	2,966	0,698247	mai/16	2,478	3,674	0,674469243
jul/14	2,042	2,957	0,690565	jun/16	2,466	3,646	0,676357652
ago/14	2,034	2,960	0,687162	jul/16	2,454	3,645	0,673251029
set/14	2,005	2,963	0,676679	ago/16	2,485	3,651	0,680635442
out/14	1,999	2,960	0,675338	set/16	2,510	3,648	0,688048246
nov/14	2,016	3,009	0,66999	out/16	2,676	3,662	0,730748225

Fonte: autoria própria.

2.5.2 Outros incentivos e custos dos veículos híbridos no Brasil

Segundo Martins (2016), apesar do imposto de importação incidente sobre veículos híbridos ter sido reduzido para até 7%, ainda incidem sobre esses modelos o PIS/COFINS, com alíquota de 13%, o ICMS, com alíquotas de 12% a 18% e o IPI, que pode chegar a até 55% do valor do veículo. Existem atualmente no Senado duas propostas que podem incentivar a compra de veículos híbridos pelo consumidor brasileiro, uma delas é o PLS 174/2014, que propõe a isenção fiscal de veículos elétricos e híbridos a etanol fabricados no Brasil, por um período de até 10 anos. A outra iniciativa é o PLC 65/2014, que obriga a instalação de pontos de recarga em vias públicas, ambientes residenciais e comerciais (SENADO, 2016).

Martins (2016) cita como exemplos para o Brasil, quatro modelos adotados no exterior, o americano, o japonês, o chinês e o europeu. Todos esses modelos incluem políticas de incentivo que incluem aporte financeiro para os consumidores, forçam o desenvolvimento da indústria interna através da importação de tecnologias além de benefícios para os proprietários de modelos elétricos e híbridos (MARTINS, 2016). Como resultado dessas políticas, o Japão passou a ter mais pontos de recarga de veículos que postos de combustível, além de vendas na casa dos 95 mil veículos *plug-in* entre 2009 e 2014. Na Noruega, além de isenções que podem reduzir em até 16 mil euros o preço do carro, os donos de veículos *plug-in* ganham toda a infra-estrutura

necessária para recarga instalada em suas propriedades (MARTINS, 2016). Outras medidas são a autorização para trafegar em faixas exclusivas para ônibus, isenção do pagamento de pedágios urbanos, estacionamento e transporte em balsas (MARTINS, 2016).

Como medidas de estímulo pontuais, em 2015 os veículos híbridos e elétricos foram isentos do rodízio municipal na cidade de São Paulo, além de receberem um desconto de 50% no Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) (SECRETARIA, 2015).

4 Resultados e Conclusões

A partir dos estudos mostrados nesse trabalho, pode-se concluir que a tecnologia híbrida já é uma realidade não somente nos mercados de países desenvolvidos mas também em países emergentes. Após terem iniciado sua existência concomitantemente aos veículos apenas com motores a combustão, os veículos elétricos e híbridos foram deixados de lado, tendo retornado ainda de maneira tímida no final do século 20 e com força no início do século 21. Mostram-se uma alternativa mais ambientalmente amigável em tempos de preocupação crescente com o meio ambiente, enquanto a sociedade já começa a experimentar os efeitos das mudanças climáticas.

Quanto a questão de economia com combustível, um veículo híbrido elétrico com um MCI a etanol pode ser tão ou mais eficiente quanto um veículo híbrido com um MCI a gasolina. Deve-se no entanto ressaltar que o resultado foi obtido através do estudo de Shidore et al, utilizando-se um motor em loop que, segundo o próprio autor, não foi o ideal para o estudo, mas o que estava disponível. Um experimento com um MCI mais apropriado seria necessário para avaliar definitivamente esses resultados, que esperaríamos fossem ainda mais promissores.

Para concluir, um veículo híbrido com motor a etanol pode ser a vir um novo *player* no mercado de veículos híbridos, trazendo consigo não só o menor consumo de combustíveis, mas também uma independência de combustíveis fósseis. Entretanto, medidas de incentivo mais efetivas devem ser tomadas pelo governo para que esse mercado se desenvolva de maneira significativa.

5 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Gerenciais**: junho 2015. 2015. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Jun2015.pdf >. Acesso em: 19 ago. 15.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº 19, DE 15.4.2015 – DOU 16.4.2015**. Disponível em: < [http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/dezembro/ranp%2036%20-%202005.xml?f=templates\\$fn=document-frameset.htm\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/dezembro/ranp%2036%20-%202005.xml?f=templates$fn=document-frameset.htm$3.0) >. Acesso em: 17 nov. 2016.

ALVES, Francisco José. Produção e Fornecimento de Vapor de Etanol para Motor de Combustão Interna Operando com Combustível Pré-Vaporizado. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

ANDERSON, Curtis Darrel; ANDERSON, Judy. **Electric and Hybrid Cars: A History**. Jefferson: McFarland, 2010.

ANUMOLU, Praveen et al. Plug-in hybrid vehicles: An overview and performance analysis. In: **Systems, Applications and Technology Conference, 2008 IEEE Long Island**. 2008, Farmingdale. IEEE, 2008. p. 1-4.

BARROS, Reynaldo. **Energia para um novo mundo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CREA-RJ, 2007. 157 ISBN 9788588204157.

BARZELAY, Michael, 1986. The Politicized Market Economy: Alcohol in Brazil's Energy Strategy. London, England: University of California Press, Ltd.

BMW. Catálogo i8. Disponível em: < <http://www.bmw.com.br/pt/all-models/bmw-i/i8/2014/drivingdynamics.html> >. Acesso em: 14 ago. 2016.

BOVEE, Katherine, et al. Well-to-wheel analysis and measurement of energy use and greenhouse gas and criteria emissions in a Plug-in Hybrid Vehicle: the EcoCAR 2 case study. In: **Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE**, p. 1-8, 2014.

BRASIL. Decreto nº 19717, de 20 de fevereiro de 1931. **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, Rio de Janeiro, RJ, 13 mar. 1931. Seção 1 p. 3736. Disponível em: < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-19717-20-fevereiro-1931-518991-publicacaooriginal-1-pe.html> >. Acesso em: 13 nov. 2016.

_____. Decreto nº 76593, de 14 de novembro de 1975. **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, Brasília, DF, 14 nov. 1975. Seção 1 p. 15257. Disponível em: < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-publicacaooriginal-1-pe.html> > Acesso em: 13 nov. 2016.

BURKE, Andrew F. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 806-820, 2007.

BURRES, Timothy A. et al. Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Power Electronics and Electric

Machinery Research Facility, 2011. Disponível em: <<http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub26762.pdf>> Acesso em: 05 ago. 2016.

CARVALHO, Marcio Augusto Sampaio de. Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2011.

CASE STUDY: Toyota Hybrid Synergy Drive. Wroclaw University of Technology. Disponível em: < http://www.ae.pwr.wroc.pl/filez/20110606092430_HEV_Toyota.pdf >. Acesso em: 04 ago. 2016.

CHAN, Ching-Chuen; BOUSCAYROL, Alain; CHEN, Keyu. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v.59, n.2, p.589-598, 2010. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5276874> >. Acesso em: 10 mar. 16.

CHAU, K. T.; CHAN, C. C.; LIU, Chunhua. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 55, n. 6, p. 2246-2257, 2008.

CHUKWU, Uwakwe C.; MAHAJAN, Satish M. V2G electric power capacity estimation and ancillary service market evaluation. In: **Power and Energy Society General Meeting**, 2011, San Diego. IEEE, 2011. p. 1-8.

DE CARVALHO, Márcio Augusto Sampaio; TORRES, Ednildo Andrade; PAU, Felipe Soto. Metodologia para o Estudo do Rendimento Termodinâmico de Motores de Combustão Interna Ciclo Otto. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2010, Campina Grande. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABCM, 2010 Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2010/PDF/CON10-1955.pdf>>. Acesso em 13 jun. 2016.

DUOBA, Michael; LOHSE-BUSCH, Henning; BOHN, Theodore. Investigating vehicle fuel economy robustness of conventional and hybrid electric vehicles. **EVS-21, January**, 2005.

EDELSTEINT, Stephen. Toyota Passes 8 Million Hybrids Sold Since 1997, Still Dominates Sector. Green Car Reports, 24 ago. 2015. Disponível em: < http://www.greencarreports.com/news/1099706_toyota-passes-8-million-hybrids-sold-since-1997-still-dominates-sector>. Acesso em: 13 abr. 2016.

FERDOWSI, Mehdi. Plug-in hybrid vehicles-a vision for the future. In: **Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE**. IEEE, 2007. p. 457-462.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D, **Electric machinery**. 6ª ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

GAN, Jinyun et al. A new surface-inset, permanent-magnet, brushless DC motor drive for electric vehicles. **Magnetics, IEEE Transactions on**, v. 36, n. 5, p. 3810-3818, 2000.

GAO, Yimin et al. Flywheel electric motor/generator characterization for hybrid vehicles. In: **Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th**. IEEE, 2003. p. 3321-3325.

GAGNER, Joshua. The Political History of Sugarcane-based Ethanol in Brazil. 2014. Disponível em: <<https://www.bemidjistate.edu/academics/departments/political-science/wp-content/uploads/sites/40/2015/05/gagner-thesis.pdf>> Acesso em: 13 nov. 2016.

GUARDABASSI, Patrícia M. Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento. [orientador: Suani Teixeira Coelho]. Interunidade em Eletrotécnica e Energia - IEE - Universidade de São Paulo, 2006, 123p. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/Dissertacao_Guardabassi.pdf > Acesso em: 12 nov. 2016.

HANDY, Galen. Electric Cars: Historical Timeline. Edison Tech Center. <<http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html> > Acesso em: 10 abr. 2016.

HENDERSHOT, James R.; MILLER, Timothy John Eastham. **Design of brushless permanent-magnet motors**. Magna Physics Pub., 1994.

HUGHES, Austin; DRURY, Bill. **Electric motors and drives: fundamentals, types and applications**. Newnes, 2013.

HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, v.16, n.2, p.63-71, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178707000768#bib1> >. Acesso em: 12 abr. 2016.

INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem – Veículos Leves**, 2016. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2016.pdf> Acesso em: 06 out. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **2012 CO2 Emissions Overview: CO2 Emissions from fuel combustion**. 2014. Disponível em: <http://www.iea.org/media/statistics/topics/emissions/CO2_Emissions_Overview.pdf> . Acesso em: 18 out. 15.

KEYES, Carl. **ELECTRIC MOTORS Energy Efficiency Reference Guide**. Canada: CEA Technologies Inc, 2007.

KHAJEPOUR, Amir; FALLAH, M. Saber; GOODARZI, Avesta. **Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control-A Mechatronic Approach**. John Wiley & Sons, 2014.

KOVARIK, William. Ethanol's first century. In: XVI International Symposium on Alcohol Fuels, 2006, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.environmentalhistory.org/billkovarik/about-bk/research/cabi/ethanol-first-century/>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

LEXUS USA NEWSROOM. 2017 Lexus CT 200h Product Information. Disponível em: < <http://pressroom.lexus.com/releases/2017-lexus-ct-200h-product-specifications.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B.. **Handbook of Batteries**, 3 ed., New York: McGraw-Hill, 2002.

LIU, Wei. **Introduction to hybrid vehicle system modeling and control**. John Wiley & Sons, 2013.

LO, Edward W. C.. Review on the Configurations of Hybrid Electric Vehicles. Power Electronics Systems and Applications. In: **3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications**, 2009, Hong Kong. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5228600> >. Acesso em: 11 mar. 16.

MAGGETTO, Lr G.; VAN MIERLO, Lr J. Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey. In: **Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (Ref. No. 2000/050), IEE Seminar**. 2000, Durham. IET, 2000. p. 1/1-111.

MARTINS, Raphael. Há dois caminhos para o carro elétrico vingar no Brasil. **Exame**, 9 jun. 2016. Seção Brasil. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/brasil/ha-dois-caminhos-para-o-carro-eletrico-vingar-no-brasil/>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

MENEZES, Cynara. Criadores do Próalcool criticam a eficiência dos atuais motores flex. Biodieselbr, 20 abr. 2009. Disponível em: < <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/criadores-proalcool-criticam-eficiencia-atuais-motores-flex-20-04-09.htm#comments> >. Acesso em: 10 jun. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília. 2014. Disponível em: < http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023_ConsultaPublica.pdf >. Acesso em: 18 ago. 2015.

MITSUBISHI UK. Explore PHEV Outlander. Disponível em: < <http://www.mitsubishi-cars.co.uk/outlander/explore-phev.aspx#driving-phev> >. Acesso em: 12 ago. 2016.

MITSUBISHI MOTORS. Outlander PHEV. Disponível em: < http://www.mitsubishi-motors.com/en/showroom/phev/catalog/pdf/EU16PHEV_Brochure_Eng_web.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2016.

MORA, Jesús Fraile. **Máquinas eléctricas**, 6 ed., McGraw-Hill España, 2000.

OWEN, Keith; COLEY, Trevor. Automotive fuels reference book. 1995.

PAI, Srinath et al. Study of impact of ethanol blends on SI engine performance and emission. In **Research & Technology in the Coming Decades (CRT 2013), National Conference on Challenges**. IET, 2013. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6851602> >. Acesso em: 21 ago. 2016.

REDAÇÃO. Motores com tecnologia total flex. Notícias da oficina, 2016. Disponível em: <<http://www.noticiasdaoficinavw.com.br/v2/2015/02/capitulo-2-o-motor-total-flex-suas-caracteristicas-e-o-gerenciamento-eletronico/>>. Acesso em 11 jun. 2016.

SECRETARIA Executiva de Comunicação. Veículos elétricos e híbridos são isentos do rodízio municipal. São Paulo, 14 set. 2015. Disponível em: <<http://capital.sp.gov.br/portal/noticia/6018#ad-image-0>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

SENADO analisa incentivos ao uso de carros elétricos no Brasil. Agência Senado, Brasília, 27 out. 2016. Disponível em: <<http://www12.senado.leg.br/noticias/audios/2016/10/senado-analisa-incentivos-ao-uso-de-carros-eletricos-no-brasil>>. Acesso em: 13 nov. 2016.

SHIDORE, Neeraj et al. Evaluation of ethanol blends for PHEVs using engine-in-the-loop. In: **Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE**. IEEE, 2011. p. 1-8.

TOYOTA BRASIL. Catálogo Toyota Prius. Disponível em: <http://www.toyota.com.br/wp-content/uploads/2016/06/Catalogo_Prius_web_v03.pdf> Acesso em: 06 ago. 2016.

TOYOTA. 2016 - 2017 Toyota Prius Ni-MH. <http://toyotanews.pressroom.toyota.com/images/Prius_Ni_MH_F58ED7BDAE759330FC766AB40BE8F1DF905153C0_low.jpg>. Acesso em: 06 ago. 2016.

_____. 2016 - 2017 Toyota Prius HV System. <http://toyotanews.pressroom.toyota.com/images/Prius_HVsystem_1B2822E773698F210154E3BD364F1EA5404DEFC8_low.jpg>. Acesso em: 08 out. 2016.

TOYOTA USA NEWSROOM. Prime Mover: Toyota Maxes Out Tech and Style in the World's Best-Selling Hybrid to Create the 2017 Prius Prime, 2016. Disponível em: <<http://pressroom.toyota.com/releases/prime-mover-toyota-creates-2017-prius-prime.htm>>. Acesso em: 08 out. 2016.

TRIGG, Tali, et al. Global EV outlook: understanding the electric vehicle landscape to 2020. **International Energy Agency**, p. 1-40, 2013. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook_2013.pdf>. Acesso em: 18 out. 15.

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Electricity Data Browser**. Disponível em: <<http://www.eia.gov/electricity/data/browser/#/topic/0?agg=2,0,1&fuel=g7g&geo=g&sec=008&freq=A&start=2001&end=2014&ctype=linechart<ype=pin&columnvalues=0&rtype=s&pin=&rse=0&motype=0>>. Acesso em: 18 set. 2015.

WAKEFIELD, Ernest Henry. **History of the electric automobile battery-only powered cars**. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc., 1994.

WALLNER, Thomas; SHIDORE, Neeraj; ICKES, Andrew. Impact of ethanol and butanol as oxygenates on SIDI engine efficiency and emissions using steady-state and

transient test procedures. In: **16th Directions in Engine Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference**. 2010.

WESTBROOK, Michael Hereward. **The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars**. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc., 2001.

WIRASINGHA, Sanjaka G.; SCHOFIELD, Nigel; EMADI, Ali. Plug-in hybrid electric vehicle developments in the US: Trends, barriers, and economic feasibility. In: **Vehicle Power and Propulsion Conference**, Harbin, 2008. IEEE, 2008. p. 1-8.