



SUSTENTABILIDADE AUTOMOBILÍSTICA: comparação entre sistemas de acionamentos dos automóveis atuais utilizando o método AHP

LINIKER LIMA DE ARAÚJO CORCETTI

novembro de 2019

SUSTENTABILIDADE AUTOMOBILÍSTICA: COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE ACIONAMENTOS DOS AUTOMÓVEIS ATUAIS UTILIZANDO O MÉTODO AHP

Liniker Lima de Araújo Corcetti
1171750

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

SUSTENTABILIDADE AUTOMOBILÍSTICA: COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE ACIONAMENTOS DOS AUTOMÓVEIS ATUAIS UTILIZANDO O MÉTODO AHP

Liniker Lima de Araújo Corcetti
1171750

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, sob modelo de dupla titulação em parceria com o Centro Universitário do Sul de Minas – Unis-MG realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutora Ana Margarida Araújo Barros Fonseca

Professor Associado, Universidade Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais Débora Araújo e Salvino Corcetti por todo o carinho e por se preocuparem com que eu sempre tivesse a melhor educação possível. Por todo o apoio, esforço, dedicação e confiança em mais um reflexo desta preocupação, e assim possibilitando a minha mudança para a cidade do Porto, e o ingresso em uma instituição de ensino fora do meu país natal.

Aos meus familiares e amigos, que sempre me apoiaram nesta caminhada.

Ao Marco Túlio Corchetti, primo e colega de casa, com quem eu pude dividir alegrias e frustrações durante a minha estadia no Porto, e sempre esteve disposto a ajudar, ouvir e aconselhar com sabedoria.

A Camila Giusti Tisott que foi parte importante para minha felicidade nos meus últimos meses de vivência em Portugal, e foi também importante para que esse trabalho fosse finalizado, ajudando com a elaboração da ideia, direcionamentos sobre quais caminhos poderiam ser tomados, e correções.

A Iracema Rezende, tia, e matemática que ajudou no processo criativo e fundamentação das ferramentas utilizadas

Ao Weverton Florêncio, amigo e colega de faculdade, que ajudou nas tomadas de decisão e aplicação de métodos novos para mim.

Ao Doutor Francisco José Gomes da Silva por toda sua atenção, compreensão, paciência e ajuda para que este trabalho fosse realizado.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto e colegas.

E ao Centro Universitário do Sul de Minas.

PALAVRAS CHAVE

Indústria automobilística, Automóveis, Motor de Combustão Interna, Motor Elétrico, Híbridos-elétricos, Célula de combustível, Sustentabilidade, Meio Ambiente, AHP, *Analytic Hierarchy Process*

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar um estudo sobre as principais tecnologias de motorização de veículos que são usuais atualmente, sendo elas, os modelos com motores de combustão interna, modelos elétricos, híbridos-elétricos, e modelos com células de combustível, independente da difusão da tecnologia. Os objetivos deste trabalho são fazer um breve histórico de cada modelo, mostrando características, tecnologias e princípio de funcionamento; analisar como os tipos de acionamentos modificam o projeto dos automóveis; compará-los de acordo com a fonte energética em questões como o desempenho e; mostrar os impactos ambientais causados pela quantidade de poluentes emitidos por cada modelo, assim como as possíveis melhorias na qualidade de vida dos usuários devido aos avanços tecnológicos apresentados.

Utilizando meios de pesquisa direcionados sobre automobilismo como livros, revistas, periódicos, normas, fichas técnicas em sites de montadoras para retirada de conceitos, foi possível extrair material suficiente para esta pesquisa analítica.

Os sistemas estudados e discutidos nesse trabalho possibilitam que análises sejam feitas sobre qual a tecnologia mais viável no futuro, visando principalmente eliminar a dependência de combustíveis à base de petróleo, e reduzir a quantidade de gases que são emitidos para a atmosfera.

Para fazer esta análise, foi criada uma escala que categoriza os modelos selecionados através de um índice geral de sustentabilidade, criado usando a ferramenta de gestão *Analytic Hierarchy Process*.

KEYWORDS

Automobile industry, Automobiles, Internal Combustion Engine, Electric Motor, Electric-hybrid, Fuel Cell, Sustainability, Environment, AHP, Analytic Hierarchy Process

ABSTRACT

The present work aims to present a study about the main automobile powertrain technologies which are usual today, being then, models that use internal combustion engines, electrical models, electrical-hybrid, and fuel cell models, independent of the diffusion of the technology. The goals of this paper are to make a brief history of each model, showing aspects, technology and operation principles; to analyze how the types of actuation modifies the cars project; to compare according to the energy source on issues as performance and efficiency and; show the environmental impacts caused by the amount of pollutants emitted by each model to be studied, as well as the possible improvements in the users' life quality due technological advances presented.

Using automobiles target research as books, magazines, periodicals, norms, technical files in automakers websites, among others, to get concepts, it was possible extract enough material to this analytical research.

The systems studied and discussed in this work allows analyses about which technology could be better used on the future, mainly aiming to eliminate dependence of oil-based fuels and reduce quantity of gases that are emitted to the atmosphere.

To do the analyzes, a scale was created to categorize the selected models through a sustainability general index, created using a management tool known as Analytic Hierarchy Process.

LISTA DE SÍMBOLOS, UNIDADES E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4x4	Quatro Por Quatro / Tração Nas Quatro Rodas
AC	<i>Alternating Current</i>
ACAP	Associação Automóvel De Portugal
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i>
APREN	Associação de Energias Renováveis
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Índice de Consistência
COP21	<i>21st Conference of Parties</i>
CR	Taxa de Consistência
CSD	Controlador De Sinal Digital
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DMFC	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
EU	União Europeia
EV	<i>Electric Vehicle</i>
FC	<i>Fuel Cell</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
GEE	Gases Do Efeito Estuda
Is	Índice de Sustentabilidade
KERS	<i>Kinect Energy Recovery System</i>
MAW	<i>Michelin Active Wheel</i>
MCFC	<i>Molten Carbonite Fuel Cell</i>
MCI	Motor De Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
MIEV	<i>Mitsubishi In-wheel Motor Electric Vehicle</i>
Min-Max	Mínimo-Máximo
NEV	<i>Neighborhood Electric Vehicle</i>
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
PHEV	<i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i>
RI	Índice de Consistência Aleatório
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
SUV	<i>Super Utility Vehicle</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>

VE	Veículo Elétrico
VHE	Veículo Híbrido Elétrico

Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
bar	Bar
cv	Cavalo vapor
g	Grama
g/km	Grama por quilómetro
J	Joule
kg	Quilograma
kg/100 km	Quilograma por cem quilómetros
km	Quilómetro
km/h	Quilómetros por hora
kW	Quilo-Watt
kWh	Quilo-Watt-Hora
kWh/100 km	Quilo-Watt-Hora por cem quilómetros
l/100km	Litros por cem quilómetros
m/s	Metros por segundo
Nm	Newton metro
rpm	Rotação por segundo
Wh	Watt-Hora

Lista de Símbolos

Aut	Autonomia
Bin	Binário
Carg	Capacidade de carga
CEC	Consumo Específico de Combustível
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono / Gás carbónico
D	Diâmetro
e(vol)	Eficiência volumétrica
Eaut	Consumo de veículo elétrico (autoestrada)
eb	Eficiência de bombeamento
ECO ₂	Emissões de gás carbónico
Eurb	Consumo de veículo elétrico (urbano)
Gaut	Consumo de veículo a gasolina (autoestrada)
Gurb	Consumo de veículo a gasolina (urbano)
H ₂	Hidrogénio gasoso
H ₂ aut	Consumo de veículo a hidrogénio (autoestrada)
H ₂ urb	Consumo de veículo a hidrogénio (urbano)

HCs	Hidrocarbonetos
\dot{m}_f	Vazão mássica
n	Rotação
η_g	Relação de transmissão da caixa de engrenagens
NIN	Rotação de entrada
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de nitrogénio
N _{OUT}	Rotação de saída
NO _x	Óxidos de nitrogénio
O ₂	Oxigénio gasoso
P	Potência útil de saída
PE	Potência entregue ao eixo de manivelas
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PP	Potência perdida por atrito
PT	Potência total mecânica
QHV	Calor teórico do combustível
r	Relação
r_0	Relação de transmissão final
s	Curso
$s(\text{part})$	Emissão específica de partículas
SI	Sistema internacional
T _p	Torque gerado na saída do motor
T _r	Torque transmitido
V _{max}	Velocidade máxima
V _t	Cilindrada total
W	Peso próprio
WC	Trabalho produzido por ciclo
η_a	Rendimento adiabático
η_c	Rendimento da combustão
η_g	Rendimento global do motor
η_l	Rendimento inerente
η_m	Rendimento mecânico
η_p	Rendimento relativo
η_t	Rendimento teórico
η_T	Rendimento total
λ	Autovetor
λ_{max}	Autovalor

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Alkaline fuel cell</i>	Célula de combustível alcalina.
<i>Analytic Hierarchy Process</i>	Processo de análise hierárquica
Ânodo	Eléctrodo positivo.
<i>Battery</i>	Bateria.
<i>Battery electric vehicle</i>	Veículo elétrico a baterias.
Cátodo	Eléctrodo negativo.
Ciclo Diesel	Ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna Diesel.
Ciclo Otto	Ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna Otto.
<i>Continuously variable transmission</i>	Transmissão variável contínua.
<i>Direct methanol fuel cell</i>	Célula de combustível por metanol direto.
<i>Drive train</i>	Todo o <i>power train</i> sem o motor.
<i>Electric motor</i>	Motor Eléctrico.
<i>Electric vehicle</i>	Veículo elétrico.
<i>Electrical link</i>	Ligação eléctrica.
<i>eRoad</i>	Projeto de infraestrutura rodoviária capaz de gerar carregamento eléctrico para VEs.
<i>Fuel cell</i>	Célula de combustível.
<i>Fuel cell electric vehicle</i>	Veículos com células de combustível.
<i>Fuel tank</i>	Tanque de combustível.
<i>Generator</i>	Gerador.
<i>Hybrid electric vehicle</i>	Veículo híbrido eléctrico.
<i>Hydraulic link</i>	Ligação hidráulica.
<i>IC engine</i>	Motor de combustão interna.
<i>Joint venture</i>	Empreendimento conjunto.
<i>Kinect energy recovery system</i>	Sistema de recuperação de energia cinética.

<i>Mechanical link</i>	Ligação mecânica.
<i>Molten carbonate fuel cell</i>	Célula de combustível de carbonato fundido.
<i>Neighborhood electric vehicle</i>	Veículo elétrico citadino.
<i>New European Driving Cycle</i>	Novo ciclo de condução europeu.
<i>Phosphoric acid fuel cell</i>	Célula de combustível de ácido fosfórico.
<i>Plug-in electric vehicle</i>	Veículo híbrido elétrico com capacidade de carregamento externo.
<i>Power assist</i>	Assistência de energia, para quando motores trabalham em simultâneo.
<i>Power converter</i>	Conversor de energia.
<i>Power train</i>	Conjunto de componentes composto pelo motor, embraiagem ou conversor de torque, transmissão, e transmissão final: diferencial; eixo de transmissão de movimento; e as rodas motrizes.
<i>Proton exchange membrane fuel cell</i>	Célula de combustível com membrana trocadora de prótons.
<i>Solid oxide fuel cell</i>	Célula de combustível de óxido sólido.
<i>Start and Stop</i>	Sistema de desligamento e acionamento automático do motor para paragens curtas no trânsito.
<i>Super utility vehicle</i>	Veículo utilitário desportivo.
<i>Transmission</i>	Transmissão.
<i>Ultra-high speed flywheel</i>	Volante mecânico que trabalha com a energia cinética aproveitada do movimento do automóvel em alta rotação.
<i>Vehicle to Grid</i>	Tecnologia que permite a geração de energia via painéis fotovoltaicos veiculares e a injeção desta energia na rede de distribuição elétrica.
<i>Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure</i>	Procedimento mundial de testes de veículos ligeiros.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXO MÁSSICO E ENERGÉTICO EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA [6].	9
FIGURA 2 - COMPONENTES ESTRUTURAIS DE UM MOTOR [8].	10
FIGURA 3 - PISTÃO [10].	12
FIGURA 4 - BIELA [11].	12
FIGURA 5 - CAMBOTA [12].	13
FIGURA 6 - VOLANTE DO MOTOR [13].	14
FIGURA 7 - QUATRO TEMPOS DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR COM IGNIÇÃO POR CENTELHA. ADAPTADA DE [3].	14
FIGURA 8 - TEMPO DE ATUAÇÃO POR CILINDRO EM UM CICLO COMPLETO [6].	15
FIGURA 9 - DOIS TEMPOS DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR COM IGNIÇÃO POR CENTELHA [6].	20
FIGURA 10 - DISPOSIÇÃO DOS CILINDROS EM MOTORES [7].	21
FIGURA 11 - SISTEMA DE COMANDO DE VÁLVULAS [6].	22
FIGURA 12 - FUNCIONAMENTO DO MOTOR WANKEL [6].	25
FIGURA 13 - PEÇAS DE UM MOTOR WANKEL COM DOIS ROTORES [18].	26
FIGURA 14 - MOTOR WANKEL DE DOIS ROTORES. ADAPTADA DE [19].	27
FIGURA 15 - ESQUEMA CONCEITUAL DE <i>POWER TRAIN</i> . ADAPTADA DE [3].	28
FIGURA 16 - MOTOR ELÉTRICO [32].	34
FIGURA 17 - <i>MICHELIN ACTIVE WHEEL (MAW)</i> [35].	38
FIGURA 18 - <i>MICHELIN ACTIVE WHEEL</i> DETALHADA. ADAPTADA DE [4].	39
FIGURA 19 - <i>mitsubishi in-wheel motor electric vehicle (MIEV)</i> [27].	40
FIGURA 20 - PROJETO DO <i>LANCER EVOLUTION</i> COM MIEV [27].	41
FIGURA 21 - MIEV, EM VISTA EXPLODIDA [38].	42
FIGURA 22 - ECORNER DA SIEMENS VDO [4].	43
FIGURA 23 - MONTAGEM DE UMA PILHA DE DANIELL [40].	44
FIGURA 24 - BATERIAS DE LÍTIO-FERRO-FOSFATO (A123 12V) [41].	46
FIGURA 25 - ULTRA CONDENSADORES [43].	47
FIGURA 26 - <i>KINETIC ENERGY RECOVERY SYSTEM</i> DA VOLVO [44].	49
FIGURA 27 - COMPONENTES DO KERS [45].	50
FIGURA 28 - ESQUEMA DE <i>POWER TRAIN</i> ELÉTRICO. ADAPTADO DE [3].	51
FIGURA 29 - CONFIGURAÇÕES DE MODELOS ELÉTRICOS ADAPTADO DE [3].	52
FIGURA 30 - ESQUEMA CONCEITUAL DE UM SISTEMA DE ACIONAMENTO HÍBRIDO. ADAPTADO DE [3].	58
FIGURA 31 - ESQUEMA DE UM SISTEMA HÍBRIDO EM SÉRIE. ADAPTADA DE [3].	60
FIGURA 32 - ESQUEMA DE UM SISTEMA HÍBRIDO EM PARALELO. ADAPTADA DE [3].	61
FIGURA 33 - ESQUEMA DE SISTEMA HÍBRIDO MISTO (SÉRIE-PARALELO). ADAPTADA DE [3].	62
FIGURA 34 - MODELO DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DA NISSAN, E SUA CONFIGURAÇÃO [62].	63
FIGURA 35 - VISTA DO SISTEMA DO MODELO COM CÉLULA DE COMBUSTÍVEL (HONDA FCX CLARITY). ADAPTADA DE [63].	64
FIGURA 36 - ESQUEMA DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL [65].	65

FIGURA 37 - MODELO ESQUEMÁTICO DE CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL. ADAPTADA DE [3].	70
FIGURA 38 - ETAPAS PARA CRIAR O INDICADOR DE SUSTENTABILIDADE [85].	79
FIGURA 39 - HIERARQUIA DO AHP [AUTOR].	89
FIGURA 40 - HIERARQUIA COM OS RESPETIVOS VALORES [AUTOR].	91
FIGURA 41 - VALORES DE IS POR MODELO [AUTOR]	97
FIGURA 42 - MÉDIA DOS ÍNDICES DE SUSTENTABILIDADE POR TIPO DE ACIONAMENTO [AUTOR].	98
FIGURA 43 - GRÁFICO DO MERCADO DE CARROS PORTUGUÊS EM 2018 [113].	105

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - ESTUDOS SOBRE A INJEÇÃO DE ÁGUA NA MISTURA DO COMBUSTÍVEL [AUTOR].	29
TABELA 2 - ESTUDOS SOBRE MOTORES COM TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL [AUTOR].	30
TABELA 3 - ESTUDOS SOBRE DESATIVAÇÃO DOS CILINDROS DOS MOTORES [AUTOR].	31
TABELA 4 - ESTUDOS SOBRE PAINÉIS SOLARES NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA [AUTOR].	53
TABELA 5 - ESTUDOS SOBRE PADS DE CARREGAMENTO PARA CARREGAMENTO SEM FIO [AUTOR].	54
TABELA 6 - ESTUDOS SOBRE ULTRA CARREGADORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS [AUTOR].	55
TABELA 7 - ESTUDOS SOBRE BATERIAS DE NANO CARBONO E DUO CARBONO [AUTOR].	56
TABELA 8 - ESTUDOS SOBRE USO DE ETANOL EM SOFC [AUTOR].	72
TABELA 9 - INDICADORES SELECIONADOS [AUTOR].	80
TABELA 10 - ESCALA FUNDAMENTAL DE NÚMEROS ABSOLUTOS [87].	81
TABELA 11 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO EMPARELHADA DO AHP [85].	82
TABELA 12 - ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA (RI) [86].	83
TABELA 13 - ESCALA EM CORES PARA CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE [AUTOR].	84
TABELA 14 - VALORES DOS MODELOS A GASOLINA. ELABORADO COM DADOS DE [90-93].	85
TABELA 15 - VALORES DOS MODELOS ELÉTRICOS. ELABORADO COM DADOS DE [94-98].	86
TABELA 16 - VALORES DOS MODELOS HÍBRIDOS. ELABORADO COM DADOS DE [99-102].	87
TABELA 17 - VALORES DOS MODELOS A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL. ELABORADO COM DADOS DE [103-106].	88
TABELA 18 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS [AUTOR].	89
TABELA 19 - MATRIZ DOS SUBCRITÉRIOS DE MOTOR [AUTOR].	89
TABELA 20 - MATRIZ DOS SUBCRITÉRIOS DE ENERGIZAÇÃO [AUTOR].	90
TABELA 21 - MATRIZ DOS SUBCRITÉRIOS DE ENERGIZAÇÃO [AUTOR].	90
TABELA 22 - MATRIZ DOS SUBCRITÉRIOS DE CONSUMO [AUTOR].	90
TABELA 23 - VALORES DE COEFICIENTES POR INDICADOR [AUTOR].	91
TABELA 24 - VALORES NORMALIZADOS DOS MODELOS A GASOLINA [AUTOR].	92
TABELA 25 - VALORES NORMALIZADOS DOS MODELOS ELÉTRICOS [AUTOR].	93
TABELA 26 - VALORES NORMALIZADOS DOS MODELOS HÍBRIDOS [AUTOR].	94
TABELA 27 - VALORES NORMALIZADOS DOS MODELOS A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL [AUTOR].	95
TABELA 28 - VALORES E CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE ACORDO COM IS [AUTOR].	96
TABELA 29 - VALORES E CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM O TIPO DE ACIONAMENTO [AUTOR].	99

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Justificativa	4
1.3	Abordagem	4
1.4	Objetivos	5
1.5	Metodologia	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Veículos com motores de combustão interna	9
2.1.1	Motores alternativos.....	10
2.1.1.1	Estrutura	10
2.1.1.2	Sistema de transformação energética	11
2.1.1.2.1	Pistão.....	11
2.1.1.2.2	Biela.....	12
2.1.1.2.3	Cambota.....	13
2.1.1.2.4	Volante do motor	13
2.1.1.3	Princípios de operação.....	14
2.1.1.4	Parâmetros de operação	16
2.1.1.4.1	Valores de classificação dos motores.....	16
2.1.1.4.2	Rendimento mecânico	16
2.1.1.4.3	Consumo específico de combustível e rendimento do combustível	17
2.1.1.4.4	Outros rendimentos consideráveis	17
2.1.1.4.5	Emissões de gases poluentes	18
2.1.1.5	Classificação de acordo com a ignição.....	19
2.1.1.6	Classificação de acordo com o número de tempos de operação por ciclo.....	19
2.1.1.7	Outras classificações [6, 7].....	20
2.1.1.7.1	Sistema de alimentação de combustível.....	20
2.1.1.7.2	Disposição dos elementos internos	21
2.1.1.7.3	Sistema de refrigeração	21
2.1.1.7.4	Acionamento das válvulas.....	22
2.1.1.7.5	Alimentação de ar	22
2.1.1.7.6	Relação diâmetro/curso do pistão	23
2.1.1.7.7	Rotação	23

2.1.1.7.8	Potência específica.....	23
2.1.2	Motores rotativos.....	24
2.1.2.1	Motor Wankel.....	24
2.1.3	Configurações do acionamento.....	27
2.1.4	Novidades a cerca de melhorias sustentáveis nos modelos com MCI.....	28
2.2	Veículos elétricos	32
2.2.1	Tipos de veículos elétricos.....	33
2.2.1.1	Veículos puramente elétricos	33
2.2.1.2	Veículo parcialmente elétrico	33
2.2.1.2.1	Veículo híbrido elétrico	33
2.2.1.2.2	Veículo elétrico com célula de combustível.....	34
2.2.2	Motores elétricos	34
2.2.2.1	Acionamento por motores de corrente contínua	35
2.2.2.2	Acionamento por motores de indução	35
2.2.2.3	Acionamento por motores CC de ímãs permanentes sem escovas.....	35
2.2.2.4	Acionamento por motores de relutância comutados.....	36
2.2.2.5	Modelos de motores dentro da jante.....	37
2.2.2.5.1	Michelin Active Wheel	37
2.2.2.5.2	Mitsubishi In-wheel Motor Electric Vehicle	39
2.2.2.5.3	Siemens VDO eCorner	42
2.2.3	Baterias.....	43
2.2.3.1	Baterias de ácido de chumbo.....	44
2.2.3.2	Baterias à base de Níquel	45
2.2.3.2.1	Baterias de hidreto metálico de Níquel (NIMH).....	45
2.2.3.2.2	Baterias Níquel-Zinco	45
2.2.3.2.3	Baterias Níquel-Cádmio	45
2.2.3.3	Baterias à base de Lítio	45
2.2.3.3.1	Baterias de íons de Lítio	45
2.2.3.3.2	Baterias Lítio-Ferro-Fosfato (LiFePO ₄).....	46
2.2.4	Ultra condensadores	47
2.2.4.1	Características.....	47
2.2.5	Travões regenerativos	48
2.2.6	Ultra-high speed flywheel	49
2.2.7	Configurações dos veículos elétricos.....	50
2.2.8	Novidades a cerca de melhorias sustentáveis nos modelos elétrico	52
2.3	Veículos híbridos elétricos	56
2.3.1	Conceito de <i>drive train</i> nos híbridos elétricos.....	57
2.3.2	Graus de hibridização	59
2.3.2.1	Micro híbrido	59
2.3.2.2	Médio híbrido	59
2.3.2.3	Híbrido completo	59
2.3.2.4	Híbrido plug-in	59

2.3.3	Configurações de veículos híbridos elétricos	60
2.3.3.1	Configuração híbrido série.....	60
2.3.3.2	Configuração híbrido paralelo	61
2.3.3.3	Configuração mista	62
2.4	Veículos a células de combustível.....	63
2.4.1	Célula de combustível	65
2.4.2	Hidrogénio.....	66
2.4.3	Eletrólise.....	67
2.4.4	Abastecimento	67
2.4.5	Armazenamento.....	67
2.4.5.1	Hidrogénio comprimido.....	67
2.4.5.2	Hidrogénio líquido criogénico.....	68
2.4.5.3	Hidretos metálicos	68
2.4.6	Configurações de veículos a células de combustível.....	69
2.4.6.1	Estratégia de controlo.....	69
2.4.7	Novidades a cerca de melhorias sustentáveis de modelos com células de combustível.....	71
2.5	Sustentabilidade.....	72
2.5.1	O tripé da sustentabilidade	73
2.5.2	ISO 14000	73
2.5.3	Importância da sustentabilidade na indústria automóvel	74
3	DESENVOLVIMENTO.....	79
3.1	Proposta de desenvolvimento de um índice de sustentabilidade	79
3.2	Etapa 1 - Seleção dos indicadores de sustentabilidade	80
3.3	Etapa 2 - Determinação dos pesos dos indicadores	81
3.4	Etapa 3 - Normalização dos indicadores	83
3.5	Etapa 4 - Construção do índice	84
3.6	Etapa 5 - Criação da escala de classificação.....	84
3.7	Levantamento de dados dos modelos escolhidos	84
3.8	Cálculo dos índices de sustentabilidade por modelo.....	88
3.8.1	Cálculo dos coeficientes	88
3.8.2	Normalização dos valores	92
3.8.3	Cálculo do índice de sustentabilidade por modelo e classificação.....	95
3.9	Análise dos valores obtidos.....	96

4	CONCLUSÕES.....	103
4.1	Análise do mercado e perspectivas para o futuro	103
4.2	Conclusões finais	106
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	111
5.1	Livros, artigos, normas, catálogos, notícias e páginas da internet	111

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Justificativa

1.3 Abordagem

1.4 Objetivos

1.5 Metodologia

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A Indústria Automobilística atual vem sofrendo mudanças devido à criação de novas tecnologias de acionamentos para veículos motorizados. Esse relatório contém uma análise sobre a diferenciação entre automóveis de acordo com os seus diferentes tipos de acionamentos e a sua sustentabilidade. Aqui serão mostrados os modelos que utilizam motores de combustão interna, modelos híbridos elétricos, simplesmente elétricos e, modelos que usam células de combustível. Serão abordadas características construtivas e de desempenho de cada elemento. Será mostrado como cada tipo de veículo se comporta devido à sua configuração, e as diferenças em cada modelo, fazendo com que seja possível perceber as variações construtivas e sustentáveis.

Comparando os acionamentos dos automóveis atuais, poderemos apontar a melhor tecnologia dos nossos meios de transporte, analisando questões como *performance*, rendimento, transformação energética, e sustentabilidade, sendo traduzida através das emissões de poluentes? Analisando os projetos e tecnologias automóveis, será possível: mostrar como funciona cada um dos tipos de acionamentos e como eles influenciam nos projetos construtivos dos carros; avaliar questões como o desempenho, fonte de energia utilizada, e a quantidade de poluentes que são emitidos após a conversão energética; chegar a uma conclusão sobre qual o melhor modelo a ser utilizado no futuro, a médio e longo prazo; demonstrar quais os sistemas que possuem as melhores características de sustentabilidade.

Analisando dentro da indústria automobilística, as tecnologias mais atuais de acionamentos automotivos (motores elétricos - ME), sistemas híbridos e a células de combustível), será possível comparar com os modelos que usam motores de combustão interna, que é uma tecnologia mais antiga e também a mais usual para esse propósito, mostrando os princípios de funcionamento de cada um, bem como suas características de sustentabilidade. Também será analisado como cada tipo de acionamento afeta no projeto do automóvel, como questões construtivas, e outros sistemas de um carro. Pretende-se comparar segundo a sua fonte energética, desempenho, *performance*, e mostrar os impactos ambientais causados, associado à quantidade de emissão de poluentes emitidos por cada modelo; pretende-se analisar as possíveis melhorias na qualidade de vida da população devido ao avanço tecnológico, e o conforto que seria proporcionado.

1.2 Justificativa

Este trabalho foi entendido como útil no sentido de listar as características dos modelos de automóveis de acordo com o seu sistema de acionamento, comparando-os e mostrando as peculiaridades de cada tipo, como as diferentes fontes energéticas utilizadas, e evidenciando suas vantagens, como a redução na emissão de poluentes. Este trabalho mostra ainda as novas tecnologias e a evolução dos automóveis em escala mundial, referindo ainda aspetos sociais, económicos e ambientais.

A população mundial cresce a uma velocidade muito grande – segundo dados das ONU (Organização das Nações Unidas) [1], em 2017, a população mundial ultrapassou 7,6 bilhões de pessoas – e junto com a população cresce o consumo energético. Uma das principais matrizes energéticas, mundialmente falando, são a dos combustíveis fósseis, pela razão de serem mais baratos, portanto, o seu consumo é altíssimo. Porém, devido a uma crise económica nos anos 70 do século passado, o preço do petróleo disparou. Desde aí, tem-se verificado uma procura exaustiva por fontes energéticas alternativas [2].

Acredita-se que o desenvolvimento dos automóveis com motores de combustão interna é um dos maiores feitos da tecnologia moderna. Entretanto, com a indústria automóvel desenvolvida, o grande número de automóveis em uso pelo mundo ainda causa sérios problemas para a sociedade e para a vida [3].

O uso de combustíveis fósseis ultrapassa a questão económica – uma vez que hoje se tem fontes (como a elétrica, por exemplo) que é mais barata – e beneficia fortemente a questão ambiental, onde esses combustíveis são os maiores responsáveis pela emissão de gases com efeito de estufa, deterioram a qualidade do ar, acentuam o aquecimento global, podendo ocasionar outros fenómenos e invariabilidades climáticas através do globo terrestre [2, 3, 4].

A diminuição dos recursos petrolíferos está a tornar-se uma ameaça aos seres humanos, uma vez que, mundialmente, os combustíveis fósseis são responsáveis por 80% da produção de energia. Nos Estados Unidos, por exemplo, 29% da energia utilizada no país é destinada ao setor de transportes, e desse montante, 92% é proveniente de combustíveis fósseis de acordo com a *U.S. Energy Information Administration* [5]. Uma solução muito viável para este problema é a utilização de energias renováveis que, de forma sustentável e limpa, pode ser aplicada nos meios de transporte.

1.3 Abordagem

Atualmente as normas e regulamentos sobre emissões de poluentes e consumo de combustíveis cada vez mais rigorosos estão estimulando o interesse no desenvolvimento de um transporte que seja sustentável, seguro, e de alta eficiência. Isto tem sido reconhecido e contribuí para o investimento no resgate e na criação de

novas tecnologias que já nos estão locomovendo, e se tornarão no futuro a solução para o problema do transporte terrestre sustentável.

Neste trabalho serão abordadas algumas dessas tecnologias, sendo tratados os sistemas de transmissão elétrica de veículos, híbrido-elétrico e de células de combustíveis alimentadas a hidrogênio, além dos motores de combustão interna.

1.4 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são fazer um breve histórico de cada modelo, mostrar características, tecnologias e princípio de funcionamento; analisar como os tipos de acionamentos modifica o projeto dos automóveis; compará-los de acordo com a fonte energética em questões como *performance* e rendimento e; mostrar os impactos ambientais causados pela quantidade de poluentes emitidos por cada modelo, assim como as possíveis melhorias na qualidade de vida dos usuários devido aos avanços tecnológicos apresentados. Com a informação anterior, pretende-se construir um modelo de avaliação de sustentabilidade relativo à motorização de veículos, o qual permita uma avaliação relativamente expedita da sustentabilidade de cada modelo automóvel, através de um índice e uma escala propostos.

1.5 Metodologia

Utilizando meios de pesquisa direcionados sobre automobilismo como livros, revistas, periódicos, normas, e fichas técnicas em *sites* de empresas de montagem automóvel para retirada de conceitos e dados, será possível extrair material suficiente para a parte conceptual da pesquisa.

Posteriormente, com a utilização da ferramenta AHP, *Analytic Hierarchy Process*, e outras ferramentas matemáticas, será possível a criação de um modelo de análise, para que se obtenham os parâmetros quantitativos referentes ao nível de sustentabilidade de cada tipo de veículo pesquisado.

No final, o modelo matemático criado possibilitará que sejam feitas análises sobre qual a tecnologia mais viável para utilização no futuro, visando principalmente eliminar a dependência de combustíveis à base de petróleo, e reduzir a quantidade de gases que são emitidos para a atmosfera.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Veículos com motores de combustão interna

2.2 Veículos elétricos

2.3 Veículos híbridos elétricos

2.4 Veículos a célula de combustível

2.5 Sustentabilidade

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Veículos com motores de combustão interna

Dispositivos que transformam calor (energia térmica) em energia mecânica útil (trabalho), são chamados máquinas térmicas. Essa energia térmica pode ser proveniente de diferentes fontes energéticas como a energia química, por exemplo, e essa é libertada e transformada em trabalho através da combustão, por isso, o nome combustível [6, 7].

A energia libertada pelo combustível através da combustão é transferida ao “fluido ativo”, ou “fluido motor”. No caso das máquinas térmicas, o fluido motor é formado pela mistura ar + combustível, e é responsável por transmitir a energia aos elementos mecânicos móveis do motor. Esse fluido pode evoluir de forma pulsante, em câmaras de volume variável – por isso máquinas volumétricas – ou de forma contínua, sem a variação volumétrica, com a utilização de sua energia cinética – nesse caso tem-se máquinas dinâmicas – e é libertado no final do ciclo, sob a forma de gases queimados [3, 6, 7].

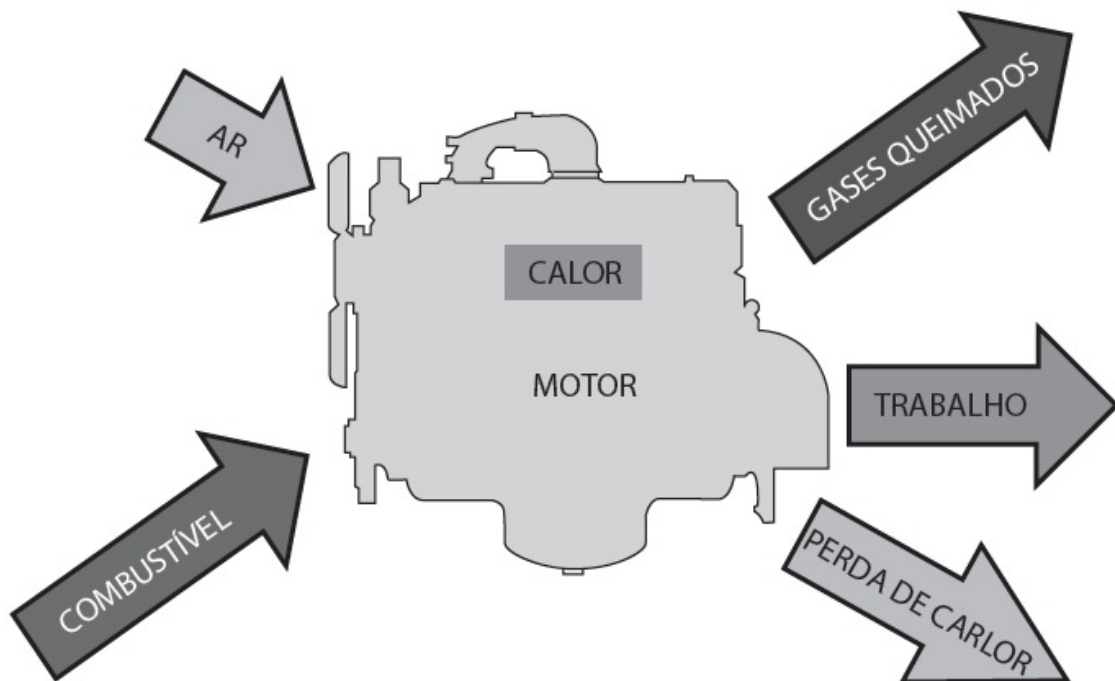


Figura 1 - Fluxo mássico e energético em um motor de combustão interna [6].

Motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas do tipo volumétrico. Foram inventadas no século XIX e foi uma das invenções que mais impacto causou na população e na qualidade das suas vidas. Essas máquinas são amplamente utilizadas para locomoção de veículos, como automóveis, motos e caminhões, e também aviões, locomotivas e navios. Porém, atualmente, os aviões, navios, e as locomotivas, tiveram os MCI substituídos por turbinas a gás, motores nucleares, e elétricos, respectivamente [7].

Embora hoje seja discutido o facto de os motores de combustão interna serem um dos maiores responsáveis pela poluição atmosférica e pela acentuada redução das reservas petrolíferas, o seu uso ainda é amplamente difundido, principalmente no setor dos transportes [3, 7]. É por isso que aqui será tratado esse tipo de máquina térmica, para que sejam entendidos os seus conceitos, funcionamento e a sua ampla utilização na indústria automóvel.

2.1.1 Motores alternativos

2.1.1.1 Estrutura

Os motores de combustão interna alternativos são compostos por três grandes partes que formam a estrutura do motor (Figura 2). A estrutura deve ter rigidez suficiente para suportar as elevadas pressões, temperaturas e velocidade das explosões a que estará sujeita. As três partes são chamadas de cabeça do motor ou cabeçote, bloco de cilindros e cárter [6, 7].

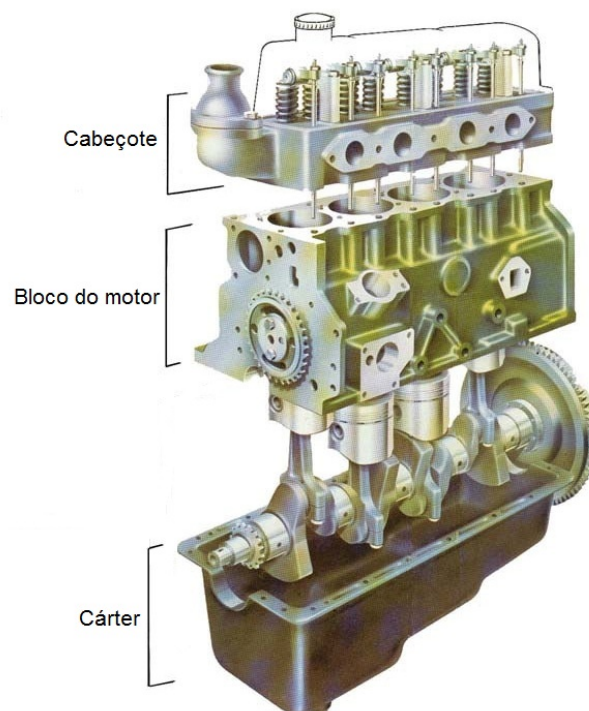


Figura 2 - Componentes estruturais de um motor [8].

A cabeça do motor é a parte superior, onde se encontram diversos componentes mecânicos móveis (como eixos de comando de válvulas, as válvulas de admissão e de escape) e fixos (como dutos de admissão e de escape de gases), além de alguns componentes elétricos (como as velas e alguns cabos) [6, 7].

O bloco é a maior peça e também a maior parte estrutural do motor. No bloco do motor existem cavidades cilíndricas chamadas de camisas. É ali que se encontram a maioria dos componentes que realizam o trabalho no motor, como os pistões e as bielas; a cambota, ou eixo árvore de manivelas, outro componente que realiza trabalho, pode ser visto abaixo das camisas [6, 7].

O cárter é o componente estrutural inferior, ali se concentra o reservatório de óleo do motor e uma boa parte dos componentes de lubrificação, como a bomba e o filtro de óleo. Ele também é responsável pelo arrefecimento do óleo [6, 7].

2.1.1.2 Sistema de transformação energética

O sistema de transformação energética dentro de um motor de combustão interna alternativo é definido como um sistema responsável por transformar a energia térmica proveniente da combustão do combustível em energia mecânica-rotacional. Esse sistema é composto pelos componentes chamados pistão, biela e cambota, e são eles os responsáveis por esta transformação energética [7]. Será tratado também do volante do motor, responsável por transmitir essa energia rotacional para o resto do *power train* do automóvel.

2.1.1.2.1 Pistão

Os pistões de um motor são as partes que sofrem os esforços dentro de um motor. São eles que admitem diretamente as explosões da mistura combustível + ar que é injetada na câmara de combustão. Estes componentes têm que reagir a altas pressões e temperaturas da combustão, e a velocidades elevadas de operação (atingindo 25 m/s), além de serem responsáveis por transmitir a força resultante da explosão do combustível para a biela, e assim garantir o funcionamento do motor [7, 9].

As funções principais dos pistões são: servir de parede móvel da câmara de combustão; garantir – em conjunto com os segmentos – que os gases da queima da mistura ar-combustível não vazem para a parte inferior do cilindro (abaixo do próprio pistão); aceitar a pressão da explosão da mistura ar mais combustível e transmitir essa força para o sistema biela-cambota; e, por último, servir de orientação para que a biela siga o seu curso corretamente [7, 9].

Usualmente, os pistões (Figura 3) têm acoplado às suas laterais três anéis circulares, chamados de segmentos. O segmento superior e o central são anéis de compressão, que têm como serviço garantir a estanqueidade dos gases na câmara de combustão; o segmento inferior é o anel de óleo, responsável pela raspagem e lubrificação do cilindro e do pistão [7, 9].



Figura 3 - Pistão [10].

2.1.1.2.2 Biela

As bielas (Figura 4) são componentes que unem os pistões à cambota. São responsáveis por transmitir o movimento do pistão ao eixo e transformá-lo de movimento alternativo em movimento rotativo.

A estrutura de uma biela é composta por três partes, cabeça, corpo e pé. A cabeça é ligada à cambota, enquanto o pé é ligado ao pistão [7].



Figura 4 - Biela [11].

2.1.1.2.3 Cambota

A cambota (Figura 5), veio de manivelas, ou ainda eixo virabrequim, é a segunda parte do sistema responsável por transformar o movimento alternativo dos pistões em movimento rotativo do eixo do motor. A força rotativa gerada no eixo é transmitida para o resto do sistema numa das suas extremidades, onde é acoplado o volante do motor [7].

A sua forma consiste num veio composto por várias manivelas. Por ser um veio segmentado, faz com que estejam presentes partes fixas, chamadas de apoios, partes móveis, chamadas de moentes e os contrapesos. As partes fixas são encaixadas no bloco do motor, as partes móveis atuam através do esforço das bielas e são responsáveis pelo movimento rotacional do veio e, por último, os contrapesos fazem o balanceamento, a fim de reduzir as vibrações. Também estão presentes orifícios de lubrificação para reduzir o atrito e o desgaste dos encaixes entre apoios e blocos e, moentes e bielas [7, 9].



Figura 5 - Cambota [12].

2.1.1.2.4 Volante do motor

O volante do motor (Figura 6) é um componente de vital importância, que é acoplado na extremidade de uma cambota. É responsável por transmitir o movimento do veio de manivelas para o restante sistema de potência (a transmissão, o eixo diferencial e as rodas) do veículo. Além disso, o volante do motor também é responsável por servir como balanceamento à cambota e manter a força cinética atuante nos intervalos em que não há explosão de combustível em nenhum dos cilindros [9].



Figura 6 - Volante do motor [13].

2.1.1.3 Princípios de operação

Sobre o princípio de operação dos motores de combustão interna a quatro tempos com ignição por centelha, é sabido que assenta essencialmente nos processos sofridos pelo fluido ativo. Estes processos são realizados de forma cíclica para a obtenção de trabalho mecânico no motor. Neste caso, o pistão percorre quatro cursos dentro do cilindro, o que corresponde a duas voltas completas da cambota (Figura 7) [6].

A combustão da mistura ar-combustível formada no interior do coletor de admissão e introduzida no cilindro produz calor, de modo que a temperatura e a pressão dentro do cilindro aumenta rapidamente. Desse modo, o pistão é forçado a se movimentar para baixo e a biela transfere o movimento linear do pistão para a cambota, que transforma esse movimento em força rotativa [3].

Um motor de quatro tempos por ignição por centelha tem quatro processos distintos, correspondentes as quatro explosões em cada um dos pistões (Figura 7).

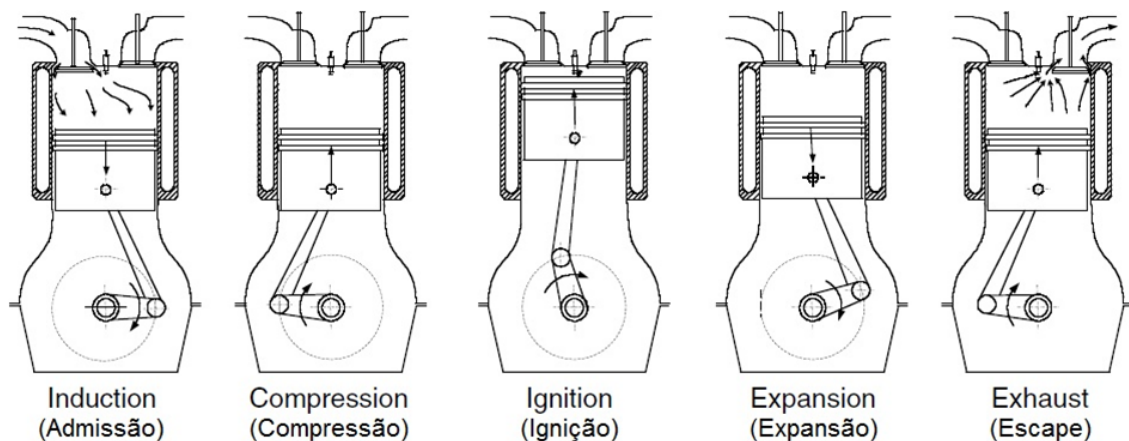


Figura 7 - Quatro tempos de operação de um motor com ignição por centelha. Adaptada de [3].

1º tempo (admissão): a válvula de admissão é aberta, enquanto a de escape é fechada; o pistão percorre todo o cilindro até ao ponto máximo inferior, criando uma sucção que causa a entrada da mistura ar-combustível que é formada no coletor de admissão.

2º tempo (compressão): ambas as válvulas de admissão e escape se encontram fechadas, e o pistão começa a subir do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS) comprimindo a mistura, e quando ele se encontra no PMS, a vela é acionada, produzindo uma faísca e inflamando a mistura ar-combustível.

3º tempo (expansão): após a mistura ser incendiada e a explosão acontecer, uma pressão muito grande no cilindro fará com que o pistão se desloque do PMS para o PMI e os gases da queima sofrem uma expansão de volume; é nesse tempo de operação que o pistão exerce o maior trabalho útil. Aqui, as duas válvulas, admissão e escape, encontram-se fechadas.

4º tempo (escape): a válvula de escape se abre, enquanto o pistão está se movendo para cima, do PMI para o PMS, e expulsando os gases residuais da queima da mistura. No final do curso, a válvula de escape fecha-se e o ciclo reinicia-se. Contudo, um pouco dos gases não consegue escapar pelo coletor de escape e ficam retidos no cilindro, os quais serão diluídos na próxima mistura admitida.

É importante dizer também que quando um ciclo se completa, o motor executou os quatro tempos, ou seja, a cambota realizou duas voltas completas, e o pistão quatro cursos, duas vezes subindo e duas vezes descendo (Figura 8) [6].

	0°	180°	360°	540°	720°
Número de cilindros	1	Expansão	Escape	Admissão	Compressão
	2	Escape	Admissão	Compressão	Expansão
	3	Compressão	Expansão	Escape	Admissão
	4	Admissão	Compressão	Expansão	Escape

Ciclos do motor

Figura 8 - Tempo de atuação por cilindro em um ciclo completo [6].

2.1.1.4 Parâmetros de operação

2.1.1.4.1 Valores de classificação dos motores

Para este tipo de classificação dos motores tem-se essencialmente em consideração os parâmetros mais comuns para a *performance* de motores, que são [3]:

- a) potência máxima: significa a máxima potência que o motor é capaz de desenvolver em um curto espaço de tempo de operação;
- b) potência nominal: significa a máxima potência que o motor é capaz de desenvolver em operação contínua;
- c) velocidade nominal: é a velocidade de rotação da cambota, à qual a potência nominal é desenvolvida.

Porém, para aplicação em veículos, a *performance* do motor é melhor definida como:

- a) a máxima potência, ou máximo torque, disponível em cada velocidade, dentro de uma faixa útil de operação do motor;
- b) a faixa de velocidade e a potência em que a operação do motor é satisfatória.

2.1.1.4.2 Rendimento mecânico

Sobre o rendimento mecânico, pode-se dizer que nem toda a potência produzida nos cilindros está disponível para ser aproveitada pela cambota. Parte dela é usada para o funcionamento de acessórios do motor, e compensar o atrito dentro do motor [3]. Num modelo de motor real, as maiores perdas são causadas pelo atrito mecânico entre as peças móveis e fixas, e o atrito hidráulico, proveniente do bombeamento dos fluídos [7].

O cálculo da potência total mecânica (P_{tm}) relaciona a potência entregue ao veio de manivelas (P_e), e a potência perdida por atrito (P_p). Pode ser calculada por:

$$P_{tm} = P_e + P_p \quad 2.1$$

O cálculo da potência perdida devido ao atrito gerado no motor é difícil de ser feito com precisão e, na prática, uma abordagem mais comum para se chegar a esse resultado é operar o motor num dinamômetro e medir a potência fornecida pelo mesmo. O rendimento mecânico pode ser calculado pela relação da potência entregue e a potência total.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_{tm}} = 1 - \frac{P_p}{P_{tm}} \quad 2.2$$

2.1.1.4.3 Consumo específico de combustível e rendimento do combustível

Em testes do motor, o consumo de combustível é medido como taxa de fluxo – fluxo mássico por unidade de tempo, que é dada como \dot{m}_f . Um parâmetro útil é o consumo específico de combustível (CEC), que é a taxa de fluxo do combustível pela potência útil de saída (P). Isto mede o quão eficiente é um motor, usando o abastecimento de combustível para produzir trabalho. O CEC do motor pode ser calculado por:

$$CEC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad 2.3$$

O consumo específico de combustível é comumente medido em unidades do sistema internacional (SI) dado pela quantidade de massa de combustível consumido, em gramas (g), em relação à potência de saída do motor por hora, unitário em quilowatt-hora (kWh). São desejáveis valores baixos de CEC, o que significa que o motor gasta pouco combustível para gerar maior quantidade de energia [3].

O rendimento da combustão pode ser dado pela relação entre o que realmente é libertado pelo combustível na combustão durante um ciclo, ou o trabalho produzido por ciclo (W_c), e o poder calorífico teórico do combustível (QHV). A perda no rendimento mostra o quanto a combustão é incompleta [3, 7].

$$\eta_c = \frac{\text{calor fornecido pela combustão}}{\text{massa} * \text{poder calorífico do combustível}} = \frac{W_c}{\dot{m}_f * Q(HV)} \quad 2.4$$

2.1.1.4.4 Outros rendimentos consideráveis

Há outros rendimentos que são importantes para o cálculo do rendimento geral de um motor, a fim de se chegar a um resultado mais preciso [3, 7].

Rendimento adiabático: é medido o calor perdido para as extremidades do sistema como as paredes dos cilindros, a superfície do pistão, e o calor que realmente é aproveitado para aumentar a pressão do gás e realizar trabalho.

$$\eta_a = \frac{\text{calor aproveitado}}{\text{calor fornecido pela combustão}} \quad 2.5$$

Rendimento teórico: dá-nos a relação entre calor aproveitado no fluido e o trabalho que teoricamente será possível produzir.

$$\eta_t = \frac{\text{trabalho do ciclo teórico}}{\text{calor aproveitado}} \quad 2.6$$

Rendimento relativo às propriedades dos fluidos: num ciclo termodinâmico teórico, é considerável que as propriedades dos fluidos não variam, porém, num ciclo real, tanto no ar admitido dentro do motor quanto nos gases de escape, as propriedades variam de acordo com a temperatura, e isso faz com que haja perda de potência.

$$\eta_p = \frac{\text{trabalho considerando as propriedade reais dos fluidos}}{\text{trabalho do ciclo teórico}} \quad 2.7$$

Rendimento inerente: o trabalho do ciclo essencial é inferior ao do ciclo teórico com o cálculo das propriedades pois existe a passagem do ciclo teórico para o ciclo real, o qual apresenta outras perdas, como a perda de calor na expansão dos gases e a não espontaneidade na combustão.

$$\eta_l = \frac{\text{trabalho do ciclo inerente}}{\text{trabalho no ciclo real}} \quad 2.8$$

Eficiência de bombeamento: as perdas por bombeamento são importantes em motores em que a carga é controlada pela restrição de ar.

$$eb = 1 - \frac{\text{Perdas no bombeamento}}{\text{trabalho do ciclo inerente}} \quad 2.9$$

Rendimento total: refere-se ao rendimento total do motor englobando todos os rendimentos e eficiências. Pode ser visto também como a relação entre o trabalho na saída do motor e a energia de entrada (dada pelo combustível).

$$\eta^T = \eta_m * \eta_c * \eta_a * \eta_t * \eta_p * \eta_l * eb = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad 2.10$$

Eficiência volumétrica: leva-se em consideração a cilindrada de um motor, que nada mais é que o volume de mistura ar-combustível que pode ser admitido pelos cilindros em cada ciclo de operação. O volume de um único cilindro é chamado de cilindrada unitária. Esta eficiência se dá pela relação entre o volume de mistura que entra no motor e a cilindrada total.

$$e(vol) = \frac{\text{volume de ar que entra por ciclo}}{\text{cilindrada total}} \quad 2.11$$

2.1.1.4.5 Emissões de gases poluentes

Os níveis de emissões de óxidos de azoto – tanto óxido nítrico (NO) quanto dióxido de azoto (NO₂), que geralmente são fundidos e vistos como NO_x –, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HCs), e particulados, são importantes características de operação do motor. A concentração de emissão gasosa no escape do motor é usualmente medida em partes por milhão. Emissões específicas podem ser calculadas pela razão entre o fluxo mássico de poluente e a potência de saída do motor [3].

$$s(NO_x) = \frac{\dot{m}(NO_x)}{P} \quad 2.12$$

$$s(CO) = \frac{\dot{m}(CO)}{P}, \quad 2.13$$

$$s(HC) = \frac{\dot{m}(HC)}{P} \quad 2.14$$

$$s(part) = \frac{\dot{m}(particula)}{P} \quad 2.15$$

2.1.1.5 *Classificação de acordo com a ignição*

Há classificações para os motores alternativos em duas categorias, dependendo do modo de ignição do combustível [6].

Motores de ignição por faísca (Ciclo Otto): nos motores de Ciclo Otto, a mistura ar-combustível é admitida já na dosagem correta no cilindro, ou é formada já no interior do cilindro pelo bico injetor (nesse caso, a válvula admite só ar), então é comprimida pelo pistão e inflamada por uma faísca que acontece entre os elétrodos da vela.

Motores de ignição espontânea (Ciclo Diesel): nesses motores quando a válvula de admissão é aberta, acontece somente a entrada de ar. Então, o pistão sobe em direção ao ponto morto superior, comprimindo o ar presente, e ao chegar próximo deste ponto, o bico injetor injeta o combustível pulverizado na cabeça do pistão; devido à compressão do ar, há aumento de temperatura e da pressão, e isso é suficiente para fazer o combustível inflamar.

2.1.1.6 *Classificação de acordo com o número de tempos de operação por ciclo*

Os motores alternativos são divididos também em tempos de operação por ciclo. O ciclo refere-se à sequência de processos sofridos pelo fluido de trabalho. O tempo de operação pode ser entendido como o curso que o pistão executa. Quanto ao número de tempos, os motores alternativos podem ser divididos em dois tipos [6].

Motores a quatro tempos, de ignição por faísca: esse tipo foi apresentado no item 2.1.3, mostrando ainda os seus tempos de operação.

Motores a dois tempos de ignição por faísca (Figura 9): esse tipo de motor completa um ciclo de trabalho com apenas dois cursos do pistão, ou uma volta completa da cambota. Todos os processos apresentados no motor a quatro tempos, são realizados neste modelo da mesma forma, porém alguns processos podem sobrepor-se no mesmo curso do pistão [3, 6, 7].

1º tempo: após a combustão do combustível que se encontra na câmara de combustão, o pistão recua do PMS para o PMI. Esse movimento comprime o volume que se encontra no cárter (uma mistura de ar, combustível e óleo lubrificante); no momento em que o pistão se encontra no PMI, o canal de admissão é fechado, e nada mais é admitido ao cárter, esse movimento causa uma diferença de pressão, e faz esse volume subir para a câmara de combustão por um canal. O preenchimento da câmara de combustão com a mistura ainda auxilia a expulsar os gases da queima.

2º tempo: o pistão começa a mover-se agora em movimento ascendente, realizando então três operações: primeiro fecha os canais de escape e de conexão, entre cárter e câmara de combustão, em seguida deixa o canal de admissão aberto, para que uma nova porção de mistura possa ser admitida e começar a ser comprimida, e por último o pistão comprime o volume da

mistura que está na câmara de combustão, até que a vela seja acionada e o combustível inflamado. A partir daí o ciclo será reiniciado.

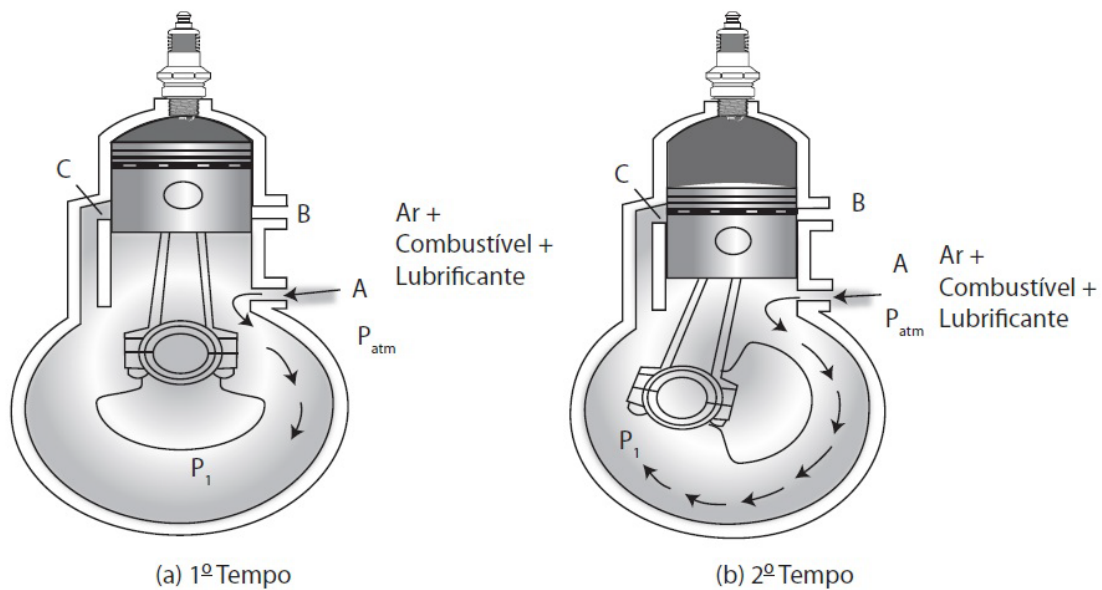


Figura 9 - Dois tempos de operação de um motor com ignição por centelha [6].

Legenda: A – Canal de admissão; B – Canal de escape; C – Ponte.

2.1.1.7 Outras classificações [6, 7]

Podem ser consideradas algumas outras classificações, as quais são igualmente relevantes no que toca a motores alternativos.

2.1.1.7.1 Sistema de alimentação de combustível

Os motores a gasolina (Ciclo Otto) podem ser alimentados por uso de carburadores ou por uso de bicos injetores; este ainda pode ser por injeção de forma indireta ou direta.

Os carburadores são usados quando o sistema não necessita de altas potências, nem precisa de um rigor muito grande quanto à quantidade de gases emitidos. Esse é um dos motivos pelo qual esse sistema não tem mais aplicabilidade na indústria automóvel moderna.

A injeção de combustível é mais precisa, garantindo um melhor controlo na alimentação de combustível. Pode acontecer tanto no coletor de admissão, antes da válvula de admissão, como diretamente no cilindro, na câmara de combustão.

2.1.1.7.2 Disposição dos elementos internos

Esta classificação está relacionada com o posicionamento dos elementos móveis dentro de um motor, ou seja, os pistões, bielas, cambota, entre outros. Está diretamente relacionado também com a dimensão e geometria de um motor.

A Figura 10 mostra algumas configurações e como os elementos são dispostos internamente.

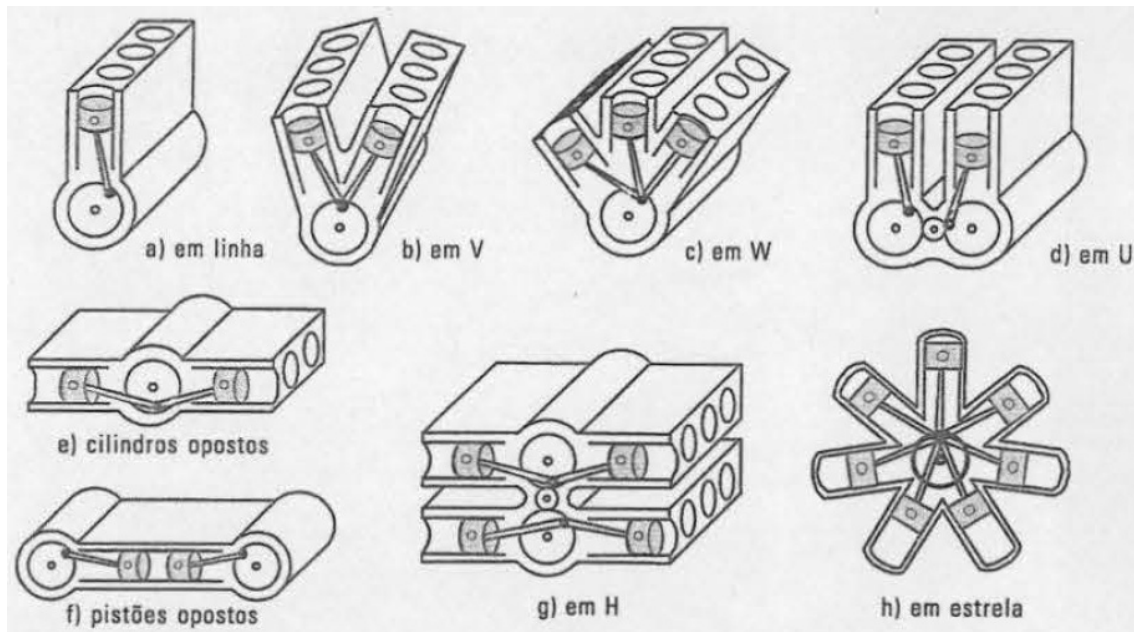


Figura 10 - Disposição dos cilindros em motores [7].

2.1.1.7.3 Sistema de refrigeração

Somando o calor da queima de combustível dentro dos cilindros com o calor do atrito gerado resultante do trabalho desenvolvido, torna-se necessário um sistema de refrigeração para reduzir a temperatura dos componentes do motor. O arrefecimento desses componentes pode ser feito com ar atmosférico, geralmente em motores menores, ou com água em motores menores.

O sistema de refrigeração com ar apresenta a vantagem de ser muito simples, pois na maioria das vezes é composto apenas por alhetas. Porém, apresenta a desvantagem de ser pouco eficiente e homogênea. O sistema com água apresenta a vantagem de ser mais eficiente, além de reduzir o ruído do motor. Porém, exige uma complexidade muito maior e contém muitos componentes como o radiador, ventilador, bomba de água, válvula termostática, entre outros.

2.1.1.7.4 Acionamento das válvulas

O acionamento das válvulas (Figura 11) normalmente é feito pelos eixos de comando de válvulas, também chamados de árvores de cames, e isso acaba gerando outra classificação sobre o posicionamento desses eixos no sistema.

O primeiro sistema típico é composto por tuchos, hastes e balanceiros (balanceiros). Nesse sistema, os eixos ficam na parte inferior do bloco que acionam os tuchos, e o movimento é transmitido até as válvulas. A desvantagem desse tipo de sistema é o ajuste, o que pode causar muitas folgas e comprometer a abertura e fecho das válvulas, e assim, o desempenho.

O segundo sistema típico é bem mais simples, pois o eixo comando de válvula age diretamente sobre as válvulas, removendo os outros componentes (tuchos, hastes e balanceiros).

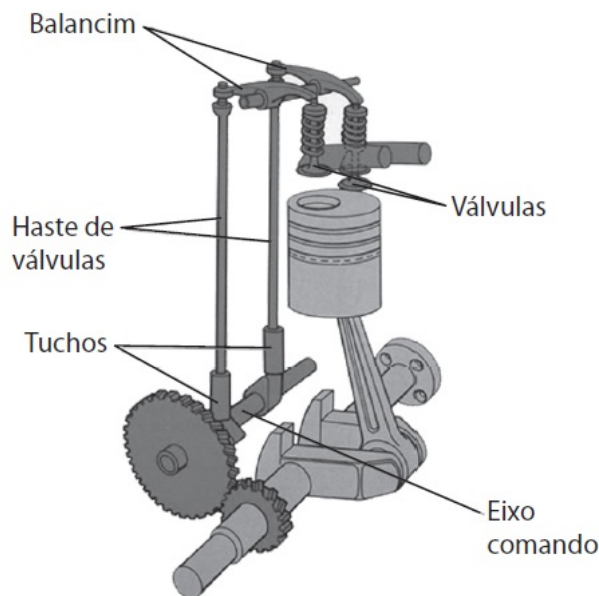


Figura 11 - Sistema de comando de válvulas [6].

2.1.1.7.5 Alimentação de ar

A *performance* de um motor está diretamente relacionada com a quantidade de ar que entra nos cilindros, pois o ar é a maior parte do fluido ativo que realiza trabalho, e quanto maior a quantidade de ar, maior a quantidade de combustível admitida.

O fluxo de ar que vai para o interior dos cilindros ocorre devido à diferença de pressão que é criada dentro do cilindro quando o pistão desce do PMS para o PMI, no tempo da admissão, quando a válvula de admissão se encontra aberta. Essa diferença de pressão cria uma sucção dentro do cilindro e no coletor de admissão, e isso permite a

entrada de ar para dentro do sistema. Nesses sistemas, a pressão de entrada do ar no coletor é limitada a ser no máximo a pressão atmosférica, pela ausência de um mecanismo que eleve a pressão na admissão, por isso é naturalmente denominado motor aspirado.

Com a finalidade de aumentar essa diferença de pressão, e assim a quantidade de ar e de combustível que é admitido, surgiram os motores sobrealimentados, onde existem mecanismos que elevam a pressão no coletor de admissão acima da pressão atmosférica. Um destes mecanismos é o turbo compressor, que usa os gases do escape para realizar trabalho numa turbina; um eixo transfere esse trabalho para um compressor, e esse é o responsável por aumentar a pressão no coletor de admissão.

2.1.1.7.6 Relação diâmetro/curso do pistão

Com a classificação pela relação diâmetro e curso ($r = D/s$) do pistão tem-se:

- a) Motor quadrado: tem lugar quando $r = 1$, portanto, $D = s$. Esses motores se mostram eficientes em qualquer faixa operacional de rotação.
- b) Motor subquadrado: tem lugar quando $r < 1$, portanto, $D < s$. Esse tipo de motor apresenta torque e potência mesmo em baixas rotações.
- c) Motor superquadrado: tem lugar quando $r > 1$, portanto $D > s$. Motores com essa configuração são característicos de veículos desportivos, que desenvolvem maiores torques e potência em altas rotações.

2.1.1.7.7 Rotação

- a) Rápidos, quando: $n > 1500$ rpm.
- b) Médios: $600 < n < 1500$ rpm.
- c) Lentos, quando: $n < 600$ rpm.

2.1.1.7.8 Potência específica

Com exigências mais rigorosas sobre a emissão de poluentes, a utilização de motores tipo Diesel em automóveis de turismo na Europa tem-se tornado antieconômica, fazendo com que o mercado europeu retome a utilização de motores do ciclo Otto. No entanto, esses motores apresentam atualmente maior potência específica.

A potência específica pode ser calculada por:

$$Pe(\text{específica}) = \frac{Pe}{Vt} \quad 2.16$$

Onde: $Pe(\text{específica})$ = Potência efetiva específica;

Pe = Potência efetiva;

Vt = Cilindrada total;

Pode ser observado nesses motores o aumento da potência e do torque sem aumentar a cilindrada total, devido à sobrealimentação; redução da cilindrada total, mantendo a mesma potência; redução do número de cilindros.

De qualquer modo, o objetivo principal é a redução do consumo de combustível e, assim, também a redução na emissão de poluentes. Isso se dá pela redução nas perdas por bombeamento, devido ao menor volume de combustível admitido nos pistões, e da maior pressão na câmara de combustão; pela redução da transferência de calor devido à redução na área da superfície interna; redução das perdas por atrito pela redução no tamanho das partes móveis.

Este último ponto é fundamental, pois a redução no tamanho das partes móveis é mais eficiente quando a energia específica não representa aumento na rotação do motor, mas sim o aumento no torque em toda a sua faixa de rotação. Isso é possível devido à melhoria na eficiência volumétrica. As estratégias adotadas para otimização e melhoria da eficiência volumétrica passam pela utilização de quatro válvulas por cilindro, eixo de comando de válvulas variável na admissão e exaustão dos gases, e sobrealimentação.

2.1.2 Motores rotativos

Alguns autores classificam as turbinas a gás também como motores rotativos, porém, aqui trataremos apenas dos motores tipo Wankel.

2.1.2.1 Motor Wankel

O motor do tipo Wankel (que assumiu o nome do seu inventor) foi o único motor que apresentou sucesso de operação sem utilizar um sistema biela-manivela, apesar de várias outras tentativas terem ocorrido. Vários construtores já produziram modelos de carros equipados com motores Wankel, como a NSU, a francesa Citroën, e a japonesa Suzuki [3, 6]. A última a abandonar o modelo foi a Mazda, em 2012, quando descontinuou a produção do seu modelo desportivo RX-8. A montadora confirmou o retorno do motor em um novo modelo RX-7, marcado para o ano de 2017, ano que marcou o 50º aniversário do primeiro motor rotativo produzido pela empresa [14, 15]. Porém, este retorno não se tornou real, e agora a marca japonesa promete trazer o motor rotativo de volta num dos seus modelos híbridos elétricos, até ao final do ano de 2020 [16, 17].

Este motor, que também recebe o nome de pistão rotativo, gera potência pela compressão, explosão, e expansão da mistura ar-combustível em um ciclo de quatro tempos, da mesma maneira que um motor de combustão interna alternativo convencional. O *design* mecânico completamente diferente desse motor, permite a todas as partes móveis ter rotação contínua, ao invés de movimento alternativo [3].

O motor rotativo é descrito como sendo constituído por um rotor de formato aproximadamente triangular, e este é colocado em rotação por um eixo excêntrico no interior de um estator de formato epitrocóide. Quando a engrenagem gira em torno

do seu próprio eixo, movimenta o rotor, que se move excêntrica, provocando deslocamentos laterais [3, 6, 7].

É importante ter a consciência que os quatro tempos de um ciclo acontecem nas três faces do rotor, e simultaneamente, e não apenas em uma. Porém, a visualização em apenas uma das faces, facilita o entendimento inicial.

A admissão é feita na câmara de combustão, entre o rotor e o estator; a quantidade de ar aumenta, enquanto a janela de admissão se mantiver aberta. Em seguida, a janela de admissão é fechada pelo próprio rotor, e o volume contido na câmara é comprimido e reduz. A fase de compressão dura até que o espaço seja mínimo e o volume de mistura ar-combustível esteja praticamente todo na cavidade presente nas faces do rotor; nesse ponto, o combustível é explodido pelas velas. O tempo de expansão começa logo após a combustão do combustível que se encontrava comprimido na câmara de combustão, em que o volume dos gases queimados aumenta; esse tempo termina no instante em que a janela de escape é aberta. No momento em que a janela de escape é aberta, começa o tempo de escape, que termina até o rotor expulsar o gás queimado e fechar a janela de escape.

A Figura 12 mostra o movimento do rotor e os quatro estágios de um ciclo de trabalho.

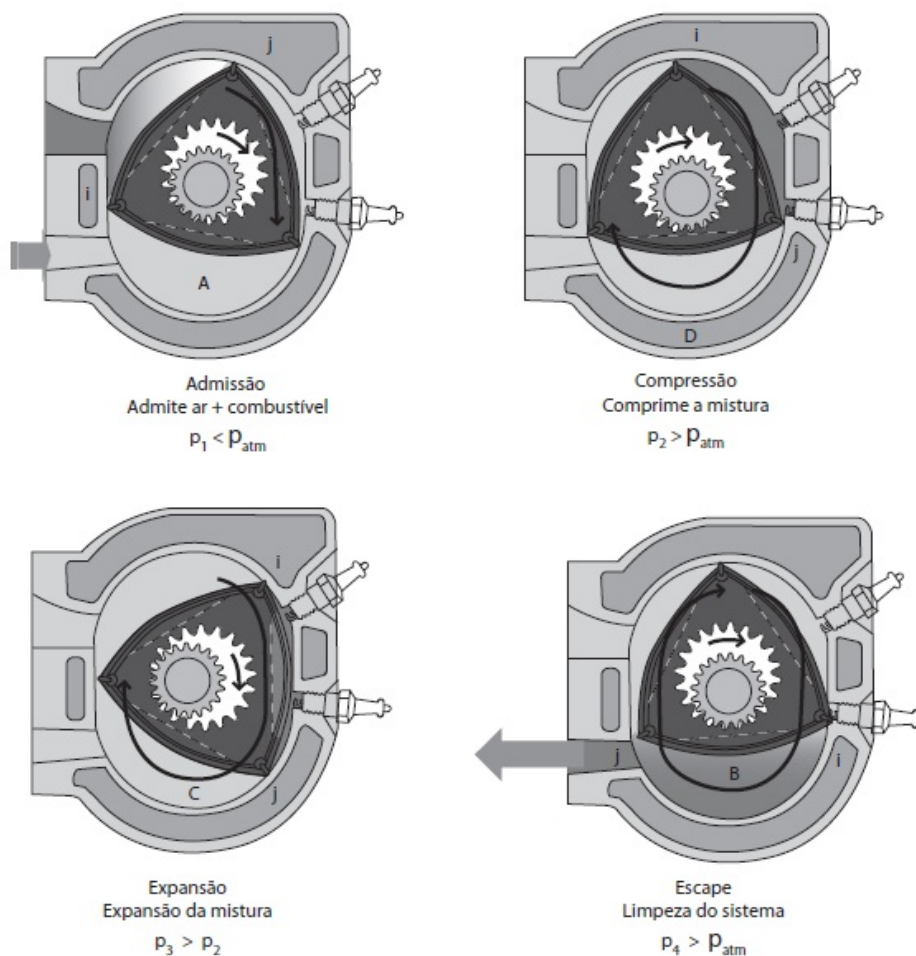


Figura 12 - Funcionamento do motor Wankel [6].

A partir de agora, fica mais fácil entender que todos as faces do rotor estão a realizar um tempo do ciclo, porém, há um desfasamento do processo.

É notável que por conta da relação das engrenagens, uma das faces só completará uma volta após três voltas da engrenagem. Deste modo, cada face só realizará trabalho positivo a cada três voltas do eixo. Porém, como a cada volta do rotor as três faces realizam trabalho positivo, pode-se concluir que o eixo do motor realiza trabalho positivo a cada volta completa.

Este modelo de motor é uma boa alternativa, comparando-o com o motor alternativo, pois apresenta algumas vantagens consideráveis [3, 6, 7]:

- a) suavidade operacional e ausência de vibrações;
- b) a sua elevação de rotação é instantânea, pela razão anterior, e porque as peças móveis têm baixa inércia;
- c) apresentam altíssima potência (geralmente chega a entregar o dobro de potência relativamente aos motores alternativos da mesma cilindrada);
- d) elevada velocidade de funcionamento e baixo volume e peso, dando uma ótima relação peso/potência (Figura 13).



Figura 13 - Peças de um motor Wankel com dois rotores [18].

Porém, esse motor também apresenta algumas desvantagens significativas:

- a) desgaste muito rápido das lâminas de vedação nos vértices do rotor, tornando difícil a vedação da câmara de combustão;

- b) necessidade de óleo lubrificante misturado no combustível, o que tornaria a mistura ar-combustível-lubrificante, assim como nos motores alternativos de dois tempos;
- c) diferença de temperatura entre os lados do rotor é grande, causando deformação da pista do estator sobre a qual o rotor gira.

Para que seja conseguida ainda mais potência com um motor Wankel, uma solução é usar mais rotores em série (Figuras 13 e 14). Desse modo, seria possível um motor com dois rotores, duas engrenagens de acionamento do rotor, dois estatores, porém ainda seria usado um único eixo.

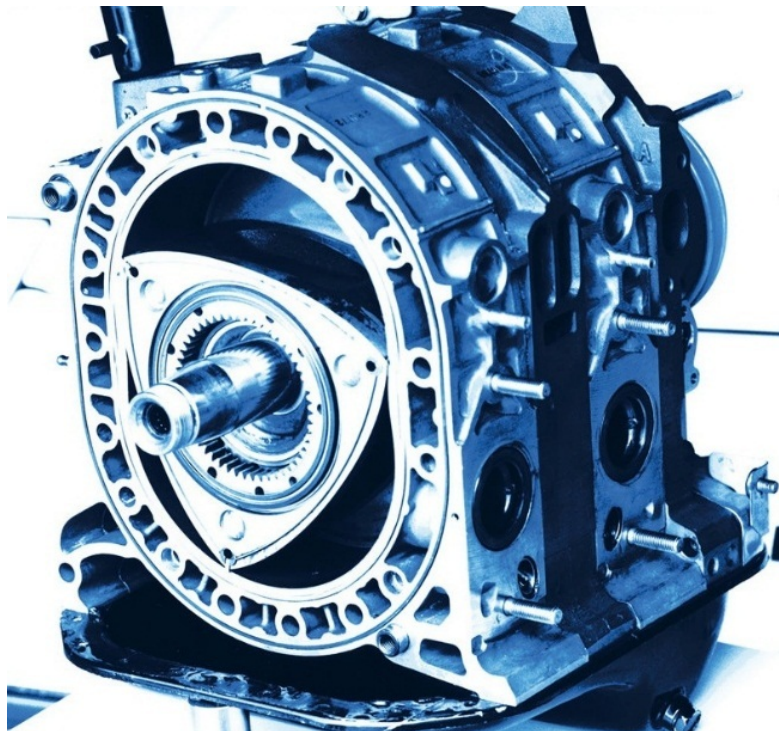


Figura 14 - Motor Wankel de dois rotores. Adaptada de [19].

2.1.3 Configurações do acionamento

A configuração de acionamento de um automóvel é basicamente composta por um conjunto de componentes que são: o motor (a fonte de energia do carro); a embraiagem quando se tem transmissão manual, ou um conversor de torque, quando se tem transmissão automática; a transmissão – também chamada de caixa de engrenagens –; e a transmissão final; o diferencial; o eixo de transmissão de movimento; e as rodas motrizes. Este conjunto todo é chamado *power train* (Figura 15) [3].

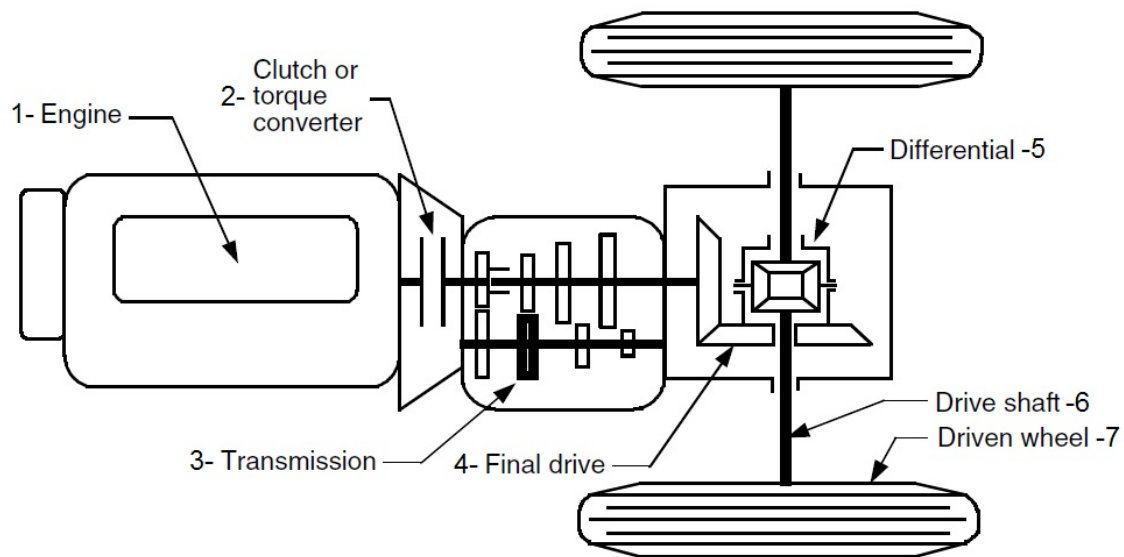


Figura 15 - Esquema conceitual de *power train*. Adaptada de [3].

Legenda: 1- Motor; 2- Embraiagem ou conversor de torque; 3- Transmissão (caixa de engrenagens); 4- Transmissão final; 5- Diferencial; 6- Eixo transmissor; 7- Rodas motrizes.

A transmissão de torque e movimento de velocidade rotativa do motor é realizada por todos esses componentes na mesma ordem descrita, até que seja entregue às rodas motrizes. A transmissão, usada em transmissões manuais, acopla e desacopla a caixa de engrenagens ao motor. O conversor de torque, em transmissões automáticas, é um aparelho hidrodinâmico que funciona como a embraiagem, com uma relação de transmissão continuamente variável. A caixa de engrenagens fornece algumas relações de transmissão do eixo de entrada para o eixo de saída, para o perfil de torque-velocidade do motor corresponder às exigências da carga. A transmissão final é normalmente um par de engrenagens que fornece uma redução adicional de velocidade e distribui o torque a cada roda pelo diferencial [3].

O torque transmitido (T_t) pelo motor e entregue às rodas pode ser expresso como:

$$T_t = n_g * r_0 * \eta_g * T_p \quad 2.17$$

Onde n_g é a relação de transmissão da caixa de engrenagens definido como $n_g = N_{IN} / N_{OUT}$ (sendo N_{IN} a rotação de entrada, e N_{OUT} a rotação de saída), r_0 é a relação de transmissão da relação final, η_g é o rendimento global do motor até as rodas, e T_p é o torque gerado na saída do motor.

2.1.4 Novidades a cerca de melhorias sustentáveis nos modelos com MCI

Este subcapítulo visa apresentar algumas das mais novas tecnologias e mais novos conceitos que são atualmente empregadas, ou que estão a ser estudados para serem

utilizados e adequados em um MCI, para redução no consumo de combustíveis, redução de emissões de gases poluentes, e aumento da potência e binário.

Injeção de água na mistura do combustível

A injeção de água na mistura ar-combustível é estudada para reduzir a quantidade de emissões de GEE durante a queima, e proporcionar melhor desempenho do motor quanto à potência, torque e eficiência volumétrica devido ao resfriamento das câmaras de combustão dos motores e melhoria na eficiência da queima do combustível.

Tabela 1 - Estudos sobre a Injeção de água na mistura do combustível [autor].

Autor	Descrição
[20]	<p>O motor opera com taxas de compressão maiores e combustão estequiométrica a alta carga, resultando em uma redução no consumo específico de combustível.</p> <p>O objetivo final é resfriar a mistura ar-combustível para reduzir a temperatura dos gases não queimados durante a combustão (expandindo os limites de batida do motor) e cumprir o limite máximo de temperatura de entrada da turbina, permitindo assim o uso de soluções que proporcionam o aumento da eficiência do motor.</p>
[21]	<p>É uma maneira eficiente de melhorar o desempenho de um MCI, por reduzir a temperatura resultante.</p> <p>Com a queda de temperatura resultante, melhora a densidade da mistura, conseqüentemente a potência entregue pelo motor aumenta. Conduz para um esforço mecânico menor requerido pelo curso de compressão.</p> <p>Considerando as emissões de GEE, a injeção de água diminui a quantidade de óxidos de nitrogênio (NO_x), porém a injeção de água na mistura é um adversário para a tecnologia de recirculação de gases do escape (EGR), e aumenta a produção de hidrocarbonetos não queimados, devido ao processo de resfriamento da superfície interior do cilindro. A produção de monóxido de carbono não se altera significativamente.</p>
[22]	<p>A expansão do vapor junto da combustão do hidrogênio liberado pela dissociação das moléculas de água resulta na geração de mais potência de saída</p> <p>Por suprimir a detonação, a potência de saída do motor é aumentada entre 3.8% a 14%, quando o combustível base contém entre 5%–15% de água.</p> <p>A quantidade de NO₂ e CO reduz com a adição de água, porém causa um aumento de aproximadamente 20% nas</p>

emissões de hidrocarbonetos nos gases do escape.
 Reduz a carga máxima de consumo de gasolina entre 15% a 25%. O desempenho do motor aumenta entre 25% e 30%, e o torque máximo aumenta entre 10% e 14%.

Motores com taxa de compressão variável

O primeiro MCI com taxa de compressão variável foi desenvolvido pela Infiniti, divisão da Nissan, e promete operar otimizando a eficiência dos motores de combustão interna e para aumentar a eficiência em todos os regimes.

Tabela 2 - Estudos sobre motores com taxa de compressão variável [autor].

Autor	Descrição
[23]	<p>Através de um eixo excêntrico como atuador, a compressão pode ser variada modificando a ligação entre a biela e a cambota. Com a capacidade de girar até 70°, o atuador modifica a altura do ponto morto superior variando a taxa entre 10:1 - 15:1*.</p> <p>Nestes desenvolvimentos a taxa de compressão variável é utilizada para ajustar o volume da câmara de combustão para a mistura ar-combustível que é introduzida na câmara. Assim, quando ele tem baixa quantidade de mistura, altas taxas de compressão são adotadas proporcionando maior eficiência energética. Quando se tem quantidades elevadas de mistura, a taxa de compressão é menor e mais baixa.</p> <p>*De acordo com o fabricante a variação da taxa de compressão se encontra entre 8:1 e 14:1 [24].</p>
[25]	<p>O motor VC-Turbo adota a primeira tecnologia de variação de taxa de compressão do mundo usando mecanismos de ligação.</p> <p>Essa tecnologia faz um motor de 4 cilindros com avanços sem precedentes que apresenta desempenho de um motor de 6 cilindros com eficiência térmica de alto nível ao mesmo tempo.</p> <p>Por causa deste efeito, o obstáculo físico no caminho de altas taxas de compressão pode ser superado e longo curso implementado geometricamente.</p>
[26]	<p>O motor VC-Turbo pode variar a taxa de compressão de 14:1 para obter alta eficiência térmica, até 8:1 para entregar um binário elevado. Isso permite que o motor proporcione várias características inteligentemente e autonomamente baseado na demanda do motorista.</p> <p>Por causa da variação da taxa de compressão, a combustão</p>

pode ser adaptada para atender os requisitos de várias condições de operação. Como resultado eficiência térmica e saída podem ser melhoradas. Além disso as emissões podem ser reduzidas configurando taxas de compressão baixas durante operação a frio.

A Nissan adota um mecanismo *multi-link* que permite, além de mudar a taxa de compressão, reduzir as vibrações e fricção do motor.

O desempenho do motor atingiu níveis extraordinários na entrega de potência, binário e economia de combustível.

Desativação de cilindros

A desativação de cilindros de um MCI é mais uma tecnologia que visa a redução do consumo de combustível, por limitar a injeção de combustível nos cilindros quando não se faz necessário. Aqui será apresentada com mais destaque uma tecnologia conhecida como *Dynamic Skip Fire* (DSF) por [27] e [28]. Já [29] e [30] referem-se a suas devidas patentes.

Tabela 3 - Estudos sobre desativação dos cilindros dos motores [autor].

Autor	Descrição
[27]	<p>A desativação dos cilindros reduz as perdas no bombeamento por desativar os cilindros durante todos os ciclos, baseado nas solicitações de binário.</p> <p>Um dos maiores benefícios do DSF é a larga capacidade de criar padrões de funcionamento dos cilindros para minimizar os modos de ressonância.</p> <p>A tecnologia é capaz de reduzir as perdas no bombeamento enquanto a estabilidade na explosão do combustível em MCI acionados por centelha. Apresenta ganhos na economia de combustível em aproximadamente 18%, além de aumentar a capacidade de suavizar ruídos e vibrações.</p> <p>A operação da DSF mostra uma melhora direta na estabilidade da combustão, pois aumenta a massa de ar nos cilindros ativos, e melhora a taxa de queima da mistura, que assim, aumenta a eficiência térmica. DSF também reduz a emissão de CO, CO₂, HD e, em algumas condições, NO_x.</p>
[28]	<p>A operação de cada cilindro pode ser otimizada para uma melhor eficiência térmica, sujeito a possíveis restrições, tais como a relação da mistura ar-combustível, pressões de pico e temperaturas altas.</p> <p>Melhoria na economia de combustível através da remoção das perdas de bombeamento e otimização da combustão.</p>

	Com as válvulas de admissão e escape (ou ambas) desativadas, cilindros inativos são impedidos de bombear ar pelo motor. O DSF é capaz de alcançar economias de combustível impressionantes sem comprometer a experiência de dirigir.
[29]	Sob certas circunstâncias, um ou mais cilindros podem ser desativados para diminuir o consumo de combustível, como quando o motor consegue produzir uma quantidade de força solicitada enquanto um ou mais cilindros estão desativados. A desativação dos cilindros pode incluir a desativação das válvulas e desabilitar o abastecimento do cilindro.
[30]	Durante uma demanda de condução leve do veículo, um grupo de cilindros pode ser desativado para conservar combustível. Se a demanda do condutor aumentar, o mesmo grupo de cilindros pode ser reativado para atender à nova demanda solicitada pelo motorista.

2.2 Veículos elétricos

Apesar de parecer uma tecnologia nova, os carros elétricos são mais antigos do que muitos imaginam. Essa invenção possui mais de 100 anos, onde, na passagem do século XIX para o século XX, a maioria dos veículos eram elétricos. A sua fiabilidade e limpeza tornavam estes veículos na melhor opção à época, uma vez que os seus níveis de ruído e a ausência de vibrações nos automóveis tornavam essa opção muito mais vantajosa, principalmente por ser uma época caracterizada pela quase inexistência de vias de qualidade, onde a autonomia não era uma preocupação [31].

Porém, autonomia passou a ter a sua parcela de importância, assim como a sua velocidade máxima, e ambas eram baixíssimas. Logo, os modelos com motores a combustão interna passaram a ser mais confiáveis e o seu preço reduzido permitiu o uso de forma mais generalizada, fazendo com que os modelos elétricos fossem deixados de lado por quase um século [4].

Entretanto, os veículos elétricos têm muitas vantagens sobre os modelos equipados com motor de combustão interna (MCI), algumas já citadas, como a ausência de ruídos e vibrações, além da ausência de emissões, a alta eficiência – já que motores elétricos podem chegar a ter um rendimento de mais de 95% (segundo dados de fabricantes) [32], e independência do petróleo.

Analisando os veículos com MCI e os modelos elétricos, podemos notar algumas diferenças, tais como o uso de tanques de combustível contra o uso de baterias, e o próprio acionamento: MCI contra ME. Veículos elétricos ainda podem usar células de

combustíveis, usar ultra condensadores, e sistemas regenerativos, como os de freios e os *flywheels* (aqui usa-se o termo em inglês que mostra o quão nova é a tecnologia que ainda não permite uma tradução consensual) [3].

Aqui serão mostradas essas diferenças entre os modelos, a metodologia dos elementos de transmissão de força e, principalmente, os sistemas-chave, como por exemplo, o sistema de motorização e de armazenamento/conservação de energia.

2.2.1 Tipos de veículos elétricos

Atualmente, existem vários tipos de veículos que podem ser classificados entre veículos elétricos e parcialmente elétricos. Os parcialmente elétricos serão divididos entre híbridos elétricos, e elétricos com células de combustível; esses dois serão apenas mencionados neste capítulo, uma vez que serão discutidos a fundo num capítulo posterior.

2.2.1.1 Veículos puramente elétricos

Os veículos elétricos são categorizados em três classes [2, 3], sendo elas:

- a) EV – *Electric Vehicle* (Veículo elétrico – VE): consiste basicamente na substituição de um motor de combustão interna por um motor elétrico. Recebe a energia que gasta de uma fonte exterior, como as locomotivas de metro;
- b) NEV – *Neighbourhood Electric Vehicle* (Veículo elétrico de vizinhança): veículo elétrico a baterias, com autonomia muito baixa, que foi projetado para atingir velocidades baixas. Tem esse nome pela sua velocidade máxima ser de cerca de apenas 48 km/h. Sistema usado em carros de golfe, por exemplo.
- c) BEV – *Battery Electric Vehicle* (Veículo elétrico a baterias): funciona exclusivamente com a energia contida nas baterias a bordo do automóvel. As baterias podem ser recarregadas por uma ligação na rede, e também recebem energia através da travagem regenerativa.

2.2.1.2 Veículo parcialmente elétrico

2.2.1.2.1 Veículo híbrido elétrico

Um veículo híbrido elétrico é um veículo que possui duas fontes de energia como forma de proporcionar o movimento. Geralmente, é usada uma fonte elétrica (baterias e motores), como primeira opção, e como segunda opção um motor de combustão interna [2, 3].

Os veículos híbridos podem ser diferenciados em duas grandes categorias, sendo:

- a) HEV – *Hybrid electric vehicle* (Veículo híbrido elétrico – VHE): esse que constitui dois motores como fonte de tração, um elétrico e um MCI;

b) PHEV – *Plug-in hybrid electric vehicle* (Veículo híbrido elétrico com carregamento externo): tipo de veículo híbrido, em que as baterias podem ser recarregadas por uma fonte exterior, como tomadas residenciais.

2.2.1.2.2 *Veículo elétrico com célula de combustível*

Um *Fuel Cell Electric Vehicle* (veículos com células de combustível – FCEV) são, por definição, veículos híbridos de série, em que as células são baterias não recarregáveis que transformam a energia química contida no combustível em energia elétrica para o acionamento do motor [4].

2.2.2 Motores elétricos

Um motor elétrico (Figura 16) é um equipamento que é alimentado por energia elétrica, a qual é transformada em energia mecânica cinética. Isto quer dizer que num motor, a presença de corrente elétrica (seja ela contínua ou alternada) garante o movimento rotacional de um eixo.

De acordo com a fonte de alimentação a ser utilizada, os motores podem ser classificados entre motores de corrente alternada ou de corrente contínua. Os motores de corrente contínua (CC, ou ainda DC, do inglês *direct current*) são conhecidos pela precisão no controlo da velocidade, e os motores de corrente alternada (CA, ou AC, do inglês *alternating current*), que são usados para a maioria das aplicações, principalmente industriais [33].

Motores elétricos convertem 75% da energia química armazenada nas baterias, e têm rendimentos que passam dos 95% [32], enquanto os motores de combustão interna não conseguem converter mais do que 20% da energia armazenada no combustível, e têm rendimento abaixo dos 40%. Este tipo de motorização entrega altos torques na saída, e mantém uma potência constante durante um largo intervalo de operação. Para além disso, são eficientes a qualquer velocidade, e não consome energia quando em repouso, além de apresentarem um arranque macio; assim, tornou-se o modo de motorização mais eficiente, devido a essas excelentes propriedades [2].



Figura 16 - Motor elétrico [32].

2.2.2.1 Acionamento por motores de corrente contínua

O acionamento com motores de corrente contínua (CC) tem sido amplamente usado em aplicações que requerem velocidade ajustável, boa regulação de velocidade, e partida, travagem e reversão frequentes. Várias transmissões de motores de CC têm sido amplamente utilizadas em diferentes aplicações de tração elétrica, devido à sua maturidade tecnológica e simplicidade de controlo.

O princípio de operação de um motor CC é direto. Quando um fio carregando corrente elétrica é colocado num campo magnético, uma força magnética atuando no fio é produzida. A força é perpendicular ao fio e ao campo magnético. A força magnética é proporcional ao comprimento do fio, à magnitude da corrente elétrica, e à densidade do campo magnético. Quando o fio é moldado numa bobina, as forças magnéticas atuando dos dois lados produz um torque [3].

2.2.2.2 Acionamento por motores de indução

O motor de indução é o tipo de motor mais usado na indústria, pois a maioria dos sistemas de alimentação de energia elétrica trabalha com corrente alternada. É muito mais simples quando comparado com o motor de corrente contínua, e isso é traduzido em baixo custo, mínima manutenção e máxima eficácia. Se a seleção de corrente for adequada, pode assegurar um bom fator de potência, com rendimento elevado para cargas médias e elevadas [33].

O acionamento com motor e sem comutador também oferece vantagens relativamente ao acionamento com motores comutados de CC convencionais, para a propulsão elétrica dos veículos elétricos e híbridos elétricos. Até ao presente, são a tecnologia mais amadurecida entre os acionamentos com motores não comutados. Comparado com o motor CC, o motor de indução de corrente alternada tem vantagens adicionais, tais como um peso menor, assim como menor volume e custo, assim como alta eficiência. Essas vantagens são importantes para aplicação em VE e VHE [3].

Existem dois tipos de motores de indução, o com rotor gaiola de esquilo, que é o mais robusto, não necessitando de escovas ou de comutadores, o que evita problemas de desgaste e, conseqüentemente, de manutenção; e o com rotor bobinado, o qual tem um enrolamento composto por três bobinas que se assemelha ao estator do motor. Por conta do alto custo, necessidade de manutenção, e falta de robustez destes, os motores com rotor gaiola de esquilo são mais atrativos para a propulsão elétrica dos veículos elétricos e dos híbridos elétricos [3, 22].

2.2.2.3 Acionamento por motores CC de ímãs permanentes sem escovas

Sobre o acionamento por motores de ímãs permanentes sem escovas, pode ser potencialmente projetado com alta densidade de potência, alta velocidade, e eficiência de operação. Estas vantagens são atrativas para a aplicação em VE e VHE; da

família de motores de ímãs permanentes, o acionamento por motores sem escovas é o candidato mais promissor para veículos elétricos e híbridos [33]. As maiores vantagens desse modelo de motor são:

- a) alta eficiência: são os mais eficientes de todos os motores elétricos, devido ao uso de ímãs permanentes para excitação, que não consomem energia, além de não possuir comutador ou escovas, o que significa menos perdas por fricção;
- b) compactação: a introdução recente de ímãs de alta densidade energética (ímãs de metais raros, como o nióbio, neodímio, samário, etc.) têm permitido alcançar uma alta densidade de fluxo nestes motores. Isto fez com que fosse possível alcançar altos valores de torque, o que permite projetar um motor menor e leve;
- c) fácil de controlar a velocidade: pode ser controlado como o motor de CC;
- d) fácil arrefecimento: não há corrente circulando no rotor, portanto ele não aquece;
- e) baixa manutenção, vida útil extensa e confiabilidade;
- f) baixíssima emissão de ruídos: não há ruído associado com a comutação, porque esta é eletrônica e não mecânica.

Porém, os acionamentos com motores de ímãs permanentes também apresentam algumas desvantagens como:

- a) custo: ímãs de metais raros são muito mais caros que os demais ímãs;
- b) alcance limitado de potência constante: um alcance alto de potência constante é crucial para atingir alta eficiência nos veículos;
- c) segurança: muitos ímãs de metal raro são perigosos durante a construção do motor, pois costumam atrair objetos;
- d) desmagnetização dos ímãs: ímãs podem ser desmagnetizados por grandes forças magneto-motriz opostas e altas temperaturas;
- e) capacidade de alta velocidade: os motores de ímãs permanentes montados na superfície, não podem alcançar altas velocidades por causa da resistência mecânica limitada do conjunto, entre o jugo do rotor e os ímãs;
- f) falha no inversor: por causa dos ímãs no rotor, esse tipo de motor apresenta maior risco em caso de falha por curto circuito no inversor.

2.2.2.4 Acionamento por motores de relutância comutados

O acionamento por motores de relutância comutados é considerado um modelo atrativo para acionamentos de motores com variação de velocidade, devido ao baixo custo, estrutura robusta, tipologia do conversor confiável, alta eficiência sobre uma grande faixa de velocidade, e simplicidade no controle [3, 22].

Os motores de relutância comutados têm uma estrutura simples, robusta e de baixo custo. Não têm ímãs permanentes, nem enrolamentos no rotor. A estrutura não só reduz o custo, mas também oferece capacidade de operação em altas velocidades. Diferente dos motores de indução e de ímãs permanentes, os motores de relutância são capazes de operar em alta velocidade, sem a preocupação com falhas mecânicas que resultam de um alto nível de força centrífuga. Acresce que o inversor destes motores tem uma tipologia confiável. Os enrolamentos do estator são conectados em série com os interruptores inferiores e superiores do inversor. Esta tipologia pode prevenir a falha por curto circuito que existe em inversores de motores de indução e ímãs permanentes. Os acionamentos com motores de relutância apresentam simplicidade de controlo e alta eficiência numa ampla escala operacional de velocidades [3, 22].

O sistema de acionamento com motor de relutância comutado consiste basicamente do motor, um inversor de potência, sensores de posição, de voltagem e, de corrente, circuito de controlo como um controlador de sinal digital (CSD) e seus periféricos. Assim, através de um controlo apropriado, pode ser alcançada uma alta *performance* nos sistemas de acionamento com motor de relutância comutado [3].

2.2.2.5 Modelos de motores dentro da jante

Atualmente, foram desenvolvidos alguns modelos de montagem onde o motor que atua na tração do automóvel se encontra dentro da jante, o que substitui o tipo de montagem convencional, quando o motor ia no lugar de um motor de combustão interna. Desse modo, economiza-se espaço que anteriormente era ocupado pelo motor e transmissão, e cada jante passa a poder ser operada individualmente [4].

2.2.2.5.1 Michelin Active Wheel

A roda motorizada *Michelin Active Wheel* (MAW) (Figura 17) integra o pneu, o sistema de freios, o motor do veículo e a suspensão elétrica, permitindo ao veículo um *design* simplificado, maior leveza, e assim menor exigência energética. Ela também fornece uma resposta eficaz aos problemas de transporte, tanto na questão energética como na redução de emissões de gases do efeito estufa, uma vez que não produz poluição [34].



Figura 17 - Michelin Active Wheel (MAW) [35].

O *Michelin Active Wheel* (Figura 18) é essencialmente uma jante comum que abriga um par de motores elétricos. Um serve para transmitir força e fazer a jante girar, enquanto o outro motor atua como um sistema de suspensão ativa para melhorar o conforto, estabilidade e dirigibilidade. O sistema é desenvolvido para automóveis elétricos movidos por baterias ou células de combustível. A tecnologia permite que o veículo equipado com esse sistema não necessite da utilização de caixa de velocidades, embraiagem, eixos de transmissão, junta universal, ou barra estabilizadora.

Dependendo da quantidade de potência ou uso desejado, um veículo pode ser equipado com quatro MAW para uma configuração com tração nas quatro rodas (4x4). O sistema também permite que o torque exercido seja controlado eletronicamente por cada jante individualmente.

Para a suspensão, um motor controla o atuador conectado a um sistema de amortecimento com vários níveis de firmeza. Este sistema único dispõe de tempo extremamente rápido na resposta, apenas três milésimos de segundo, e todos os movimentos de impulso e rotativos são corrigidos automaticamente.

Um benefício final da tecnologia MAW é a vantagem da segurança, uma vez que não é necessário que o motor fique na frente do veículo. Esse espaço pode ser inteiramente dedicado à absorção de impactos [36].

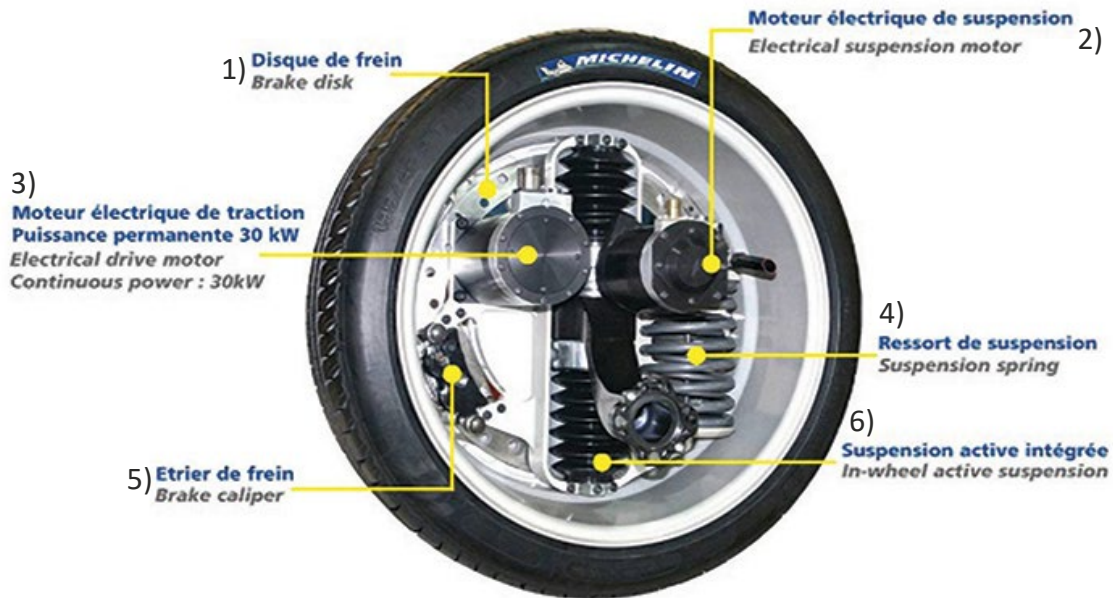


Figura 18 - Michelin Active Wheel detalhada. Adaptada de [4].

Legenda: 1) Disco de travão; 2) Motor de suspensão elétrica; 3) Motor de acionamento elétrico. Força contínua: 30 kW; 4) Mola da suspensão; 5) Pinça do travão; 6) Suspensão ativa na jante.

2.2.2.5.2 Mitsubishi In-wheel Motor Electric Vehicle

O Mitsubishi In-wheel Motor Electric Vehicle (MIEV) (Figura 19) compreende duas tecnologias essenciais, baterias de íão de lítio, e o motor elétrico que é colocado dentro da jante. São construídos usando um rotor e um estator de motor elétrico, um suporte de rotor e de estator, e um inversor diretamente atrás dos freios. Aqui, a diferença em comparação com a roda MAW, é a falta do conjunto de suspensão [26, 27].



Figura 19 - Mitsubishi In-wheel Motor Electric Vehicle (MIEV) [27].

Construído por causa das vantagens oferecidas por esta tecnologia, o conceito do MIEV é atualmente a principal força motriz em desenvolvimento pela Mitsubishi para VEs. A companhia também espera que esse modelo possa ser utilizado nos modelos VHE e FCEV [27].

A empresa lançou um modelo Lancer Evolution de teste (Figura 20), de alta *performance*, tração nas quatro rodas com tecnologia MIEV. Para isto, foi necessária a remoção do MCI, tanque de combustível, transmissão, eixo diferencial, e todos os outros componentes de um sistema 4x4; assim, os novos modelos de motores dentro da jante foram instalados em todas as quatro rodas, e ainda um sistema de baterias de íons de lítio foi colocado abaixo do soalho, entre a frente e a traseira do automóvel, no espaço desocupado pelos componentes do sistema 4x4 [27].

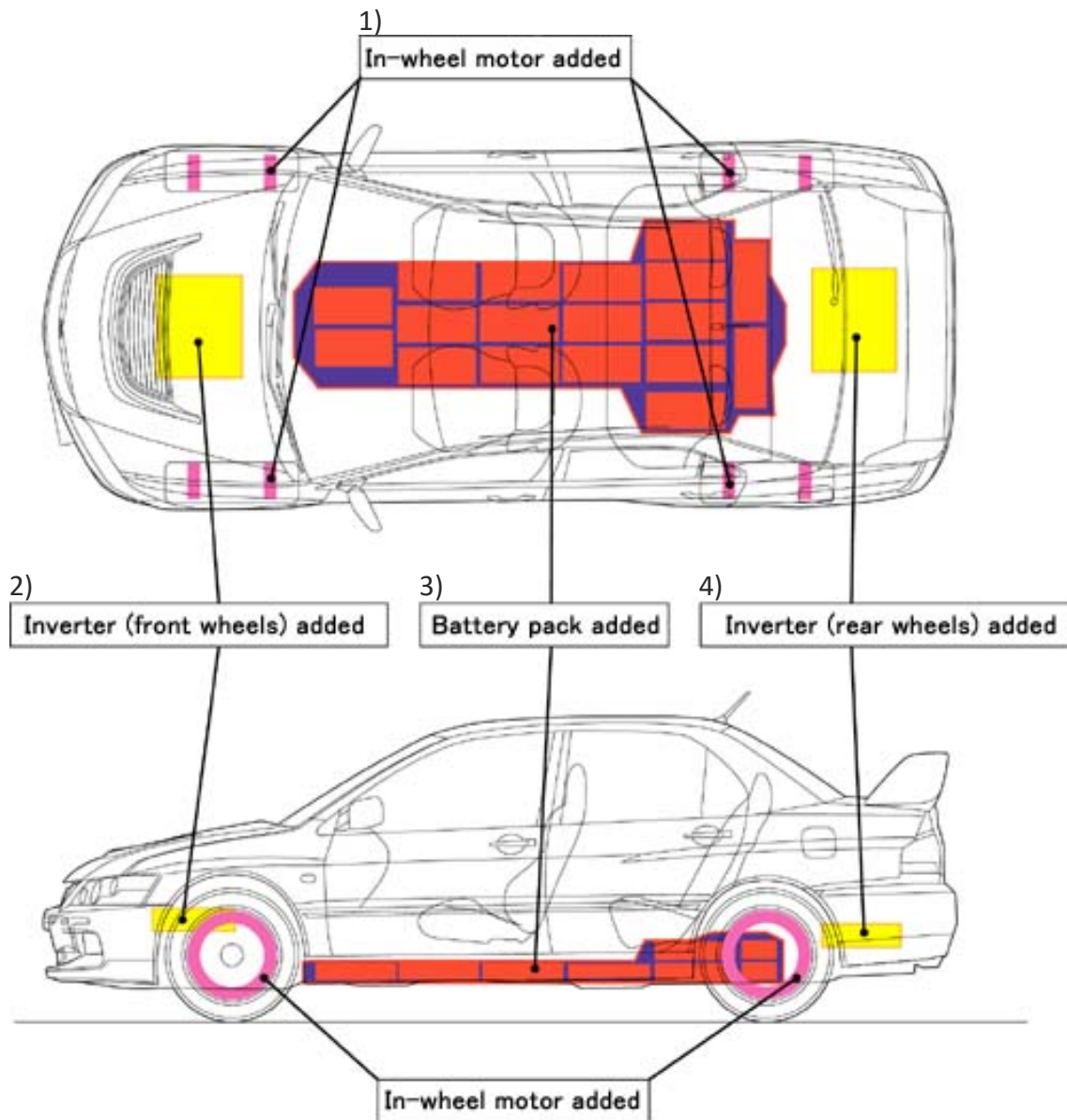


Figura 20 - Projeto do *Lancer Evolution* com MIEV [27].

Legenda: 1) Motor na jante adicionado; 2) Motor de suspensão elétrica; 3) Motor de acionamento elétrico. Força contínua: 30 kW; 4) Mola da suspensão.

Os maiores benefícios deste arranjo são os seguintes (Figura 21):

- a) o projeto faz com que o aumento da potência e do torque seja facilitado e torna o redutor de velocidade desnecessário, o que reduz as perdas de energia, e o aumento de peso não suspenso;
- b) a eliminação do redutor de velocidade faz com que o motor se encaixe dentro da jante com mais facilidade;
- c) o formato construtivo cria espaço no centro do motor para a montagem do travão e outros componentes.

Colocar o motor dentro ou atrás das jantes, oferece algumas outras vantagens, como liberdade de *design* do interior do automóvel; facilidade no armazenamento das baterias, módulos extras para ser equipados, o que ofereceria um aumento na potência e autonomia comparativamente aos VE anteriores [37].

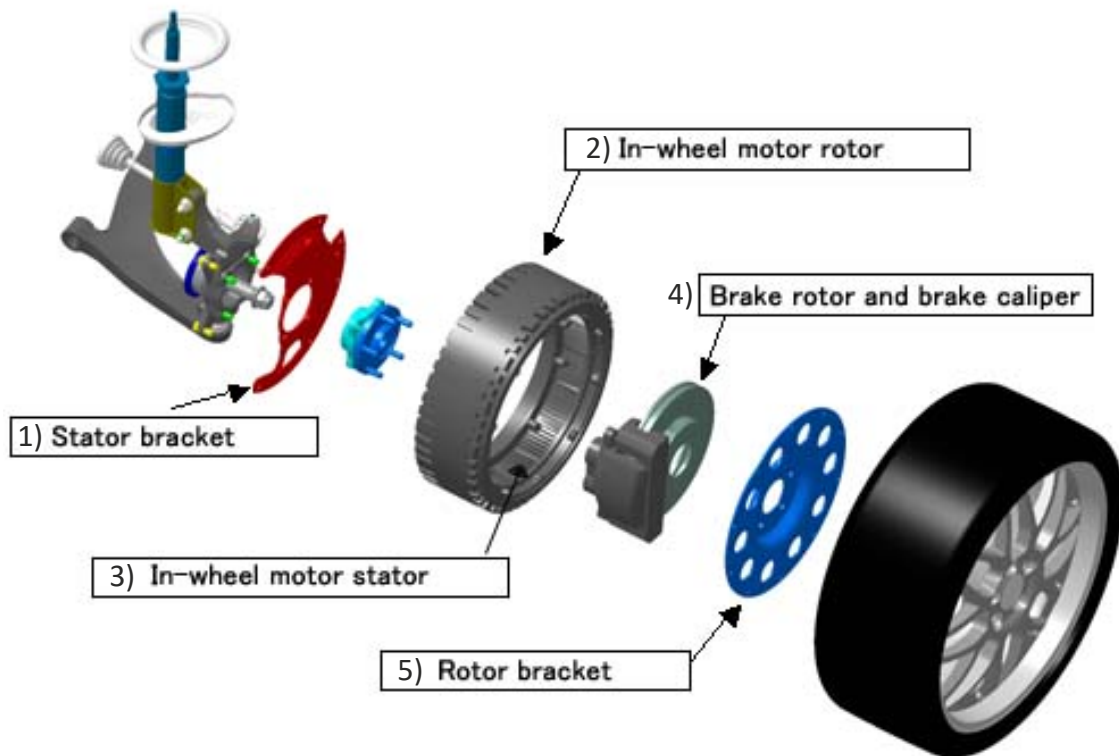


Figura 21 - MIEV, em vista explodida [38].

Legenda: 1) Suporte do estator; 2) Rotor do motor na jante; 3) Estator do motor na jante; 4) Travão do rotor e pinça do travão; 5) Suporte do rotor.

2.2.2.5.3 Siemens VDO eCorner

A Siemens VDO também tem um projeto de motores elétricos dentro de jantes em curso, com o mesmo propósito de integrar o sistema de transmissão, o motor elétrico, o sistema de amortecimento de impactos e os freios diretamente dentro da roda, como é o caso do equipamento da Michelin.

Esse conceito chama-se eCorner (Figura 22), e é visto pela Siemens VDO como sendo a base para veículos ecológicos dentro de alguns anos, pois virá para substituir a suspensão da roda convencional com amortecedores hidráulicos, a direção mecânica, tubos hidráulicos e acima de tudo, os motores de combustão interna.

Para os carros, esse equipamento traduz-se numa melhoria da autonomia do combustível – que neste caso é energia elétrica, contra combustíveis fósseis –, mais segurança e maior conveniência. Outras vantagens são apontadas, assim como nas *Michelin Active Wheels*, e nas MIEV da Mitsubishi [39].

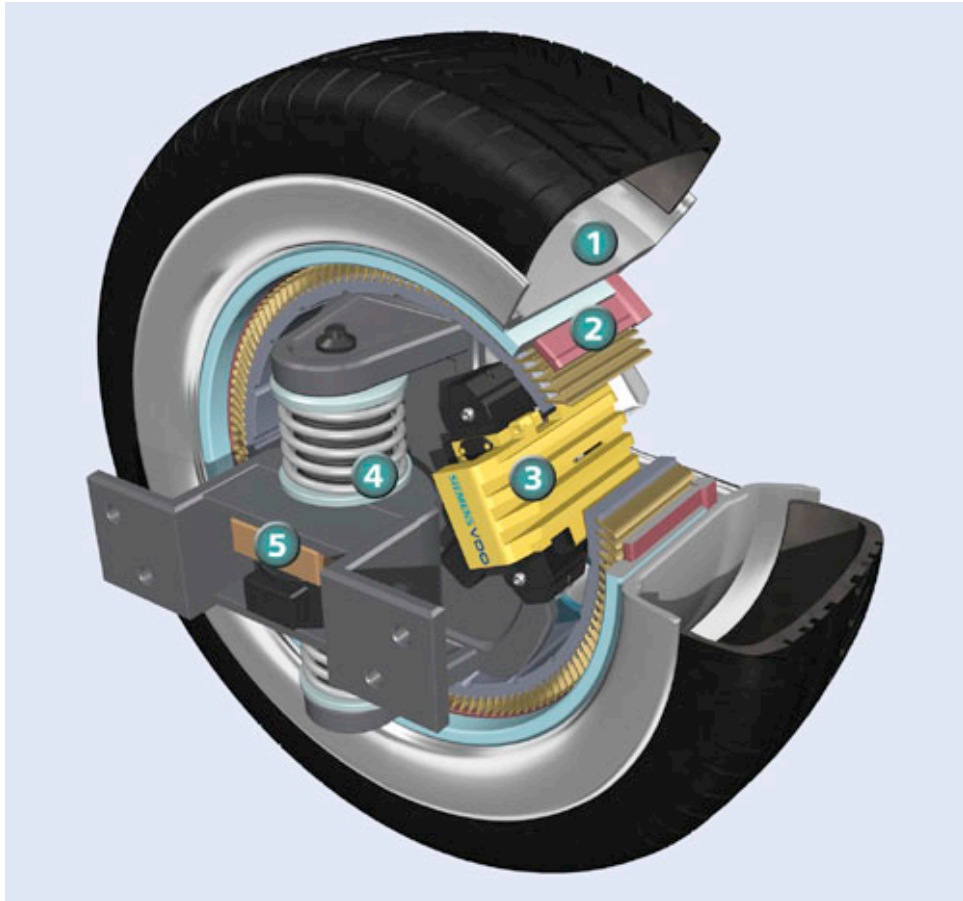


Figura 22 - eCorner da Siemens VDO [4].

Legenda: 1) Jante e pneu convencional; 2) Motor dentro da jante, rotor, estator e suporte do rotor; 3) Disco de freio e pinças EWB; 4) Sistema de amortecimento; 5) Unidade de direção.

2.2.3 Baterias

Baterias são dispositivos eletroquímicos que armazenam energia de forma química. A utilidade das baterias advém dessa energia química poder ser transformada em energia elétrica, e esta transformação ser essencial para o uso das baterias em veículos elétricos e nos híbridos elétricos.

Uma bateria é um conjunto de células eletroquímicas compostas por um eletrólito, e dois elétrodos, um positivo – cátodo –, e um negativo – ânodo (Figura 23). A energia elétrica é produzida através da reação química que ocorre no interior da bateria. No ânodo ocorre a oxidação, libertando moléculas do elétrodo mais eletrão, os eletrões

percorrem o semicondutor, indo do ânodo para o cátodo, enquanto no cátodo ocorre a redução, aglomerando moléculas da solução no eletrodo; esse fluxo de elétron do eletrodo negativo para o positivo, gera uma corrente contínua de baixa tensão.

Existem diversos tipos de baterias, cada uma com elementos diferentes, o que influencia na eficiência de armazenamento. A maior vantagem é o seu tempo de resposta, a desvantagem é o custo de produção e dificuldade de reciclagem [2, 3].

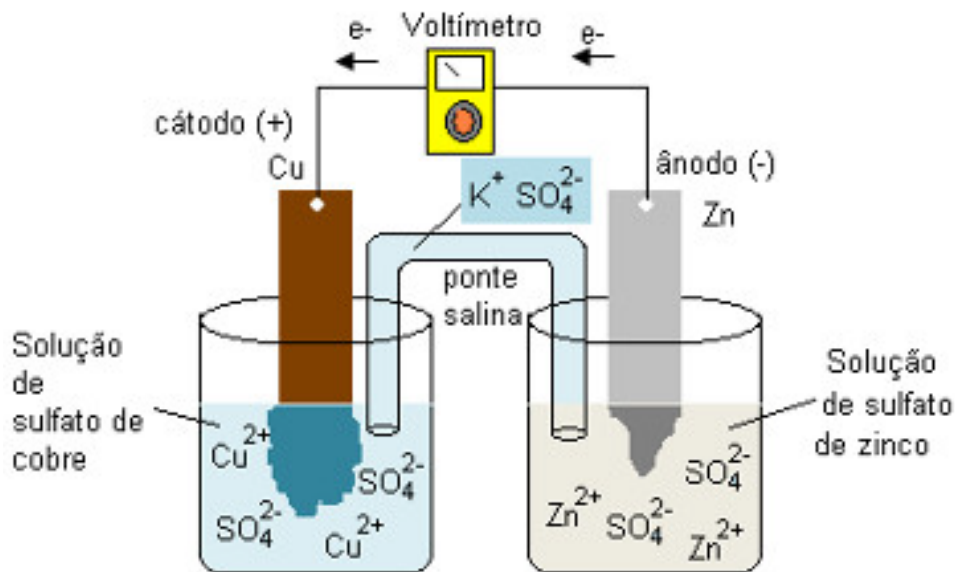
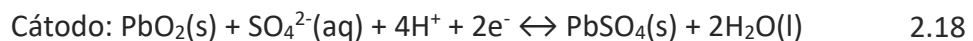


Figura 23 - Montagem de uma pilha de Daniell [40].

2.2.3.1 Baterias de ácido de chumbo

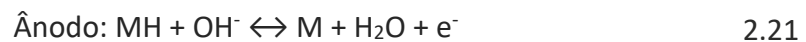
Por se tratar de uma tecnologia com mais de 50 anos, é produzida em grande escala e tem o seu uso bastante difundido, o que faz com que o seu custo seja reduzido. Não é indicado para descargas de energia que ultrapassem 20% da sua capacidade, e a sua densidade energética é baixa. Os seus eletrodos são fabricados em chumbo no negativo, e óxido de chumbo no positivo, e usa como eletrólito uma solução de ácido sulfúrico. Apresenta rendimento de carga e descarga de 50% - 92% respectivamente [2, 3].



2.2.3.2 Baterias à base de Níquel

2.2.3.2.1 Baterias de hidreto metálico de Níquel (NIMH)

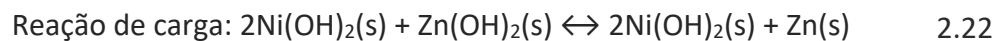
Estas baterias usam como eletrólito uma solução alcalina. O eletrodo negativo é fabricado com uma liga de vanádio, titânio, níquel, entre outros, enquanto o ânodo é fabricado em hidróxido de níquel. Tem a vantagem de não serem poluentes e tem o dobro de densidade energética das baterias de chumbo. Seu rendimento na carga chega aos 66% [2, 3].



Onde, M: liga absorvente de hidrogênio; MH: hidreto de metal.

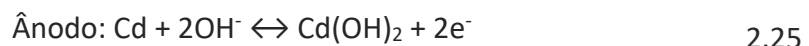
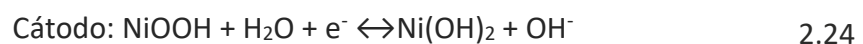
2.2.3.2.2 Baterias Níquel-Zinco

Bateria de níquel-zinco (Ni-Zn) apresentam grande densidade de potência e energia; os materiais usados têm baixo custo; apresentam longos ciclos de vida útil e são recicláveis. Tem bom desempenho em altas temperaturas e são capazes de fornecer a mesma quantidade de energia que uma bateria NiMH, porém, com 40% de seu peso original. São mais seguras que as baterias de íons de lítio, por não conter materiais inflamáveis [2, 3].



2.2.3.2.3 Baterias Níquel-Cádmio

Baterias de níquel-cádmio têm durabilidade acentuada e podem ser completamente descarregadas sem sofrerem danos. Não armazenam eficazmente muita carga por sua densidade energética ser baixa, mas a densidade de potência é elevada, o que significa dizer que podem ser carregadas e libertar energia com velocidade adequada, quando exigido. As desvantagens dessas baterias são a utilização de cádmio, que é tóxico, e apresentar efeito de memória. O rendimento de carga e descarga fica entre 70% - 90% [2, 3].

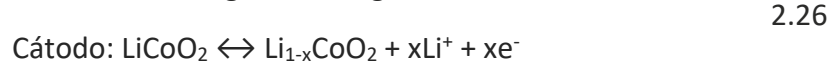


2.2.3.3 Baterias à base de Lítio

2.2.3.3.1 Baterias de íons de Lítio

São baterias que apresentam grande densidade energética, bom desempenho a altas temperaturas, e são recicláveis. O cátodo é feito em óxido de cobalto, o ânodo em

carbono e o eletrólito usado é um sal de lítio. Estas baterias têm vida útil longa, pois opera com alto número de ciclos, e também por ter elevada energia e potência específica. Apresenta rendimento de carga e descarga de 80% a 90% [2, 3].



2.2.3.3.2 Baterias Lítio-Ferro-Fosfato (LiFePO₄)

Estas baterias à base de lítio (Figura 24) são uma tecnologia mais recente, um novo tipo de baterias de íões de lítio. Apresentam características muito boas para aplicação em veículos elétricos. Como características, apresentam capacidade elevada, possibilidade de entrega de potências elevadas, e tem alta densidade energética, e boa estabilidade térmica e química, mostrando segurança durante a operação, assim como baixo custo de produção; apresenta também boas características ambientais, uma vez que os impactos ambientais causados são reduzidos, e podem ser recicladas. Estas baterias têm baixas perdas de capacidade e crescimento de impedância ou longo do tempo, permitindo aos sistemas contornar parcialmente a fraca potência de fim da vida e requisitos de energia com um pacote mínimo de superdimensionamento [2, 30].

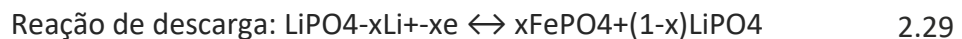
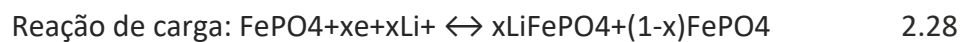


Figura 24 - Baterias de lítio-ferro-fosfato (A123 12V) [41].

2.2.4 Ultra condensadores

Os ultra condensadores (Figura 25), *ultra capacitors*, ou ainda super condensadores, são definidos como uma outra forma de armazenamento de energia, mas, enquanto as baterias armazenam energia elétrica de forma química, para depois fazer transformação, os condensadores armazenam energia elétrica diretamente. A sua capacidade de armazenamento ainda é muito baixa e o seu custo elevado, porém são essenciais quando se é necessária rapidez na resposta energética, sem sofrer deterioração ao longo do tempo de uso.

Em conjunto com as baterias, permite potências elevadas de descarga (por exemplo quando é necessário um arranque), e de carga (como na travagem regenerativa), sem a redução na vida útil das baterias, pois os condensadores absorvem e fornecem os picos elétricos, que danificam as baterias [4].

Para se ter ideia do seu funcionamento, num sistema regenerativo, a energia é capturada e reutilizada posteriormente. A energia capturada vem do sistema de freios regenerativos do veículo, e é subseqüentemente usada na aceleração, ou para suportar a carga de acessórios do automóvel. Estes fenômenos são curtos em duração, durando alguns segundos ou até pouco minutos, mas libertam muita energia. Os ultra condensadores constituem uma solução ideal como dispositivos de armazenamento de energia para estas aplicações. Com a sua alta capacidade energética, os ultra condensadores são mais eficientes em retomar e armazenar energia, especialmente quando se trata de descargas rápidas [42].



Figura 25 - Ultra condensadores [43].

2.2.4.1 Características

Um ultra condensador é caracterizado pela potência específica muito superior, mas energia específica muito menor, em comparação com as baterias. A sua energia específica fica na casa de alguns poucos watt-hora por quilograma. Contudo, a sua potência específica pode atingir acima de 3 kW/kg, que é muito maior que qualquer

tipo de bateria. Devido à sua baixa densidade de energia específica e da dependência de voltagem no estado de carga, fica difícil o uso de condensadores de forma isolada para armazenar energia em veículos elétricos e híbridos elétricos. Mas, mesmo assim, existem vantagens que podem ser resultado do uso de condensadores como uma fonte de energia auxiliar. Energia específica e requisitos específicos de potência podem ser dissociados, proporcionando assim uma oportunidade de criar uma bateria que é otimizada para a energia específica e ciclo de vida, com pouca atenção prestada à potência específica. Devido ao efeito de nivelamento de carga do ultra condensador, a alta corrente de descarga da bateria e a alta corrente de carga para a bateria do freio regenerativo são minimizadas, para que a energia disponível, resistência e vida útil da bateria possam ser aumentadas [3].

2.2.5 Travões regenerativos

Uma das características mais importantes dos veículos elétricos e híbridos elétricos é a habilidade de recuperar uma quantidade significativa de energia de travagem. Os motores elétricos nos VE e VHE podem ser controlados para operar como gerador, para converter energia cinética ou potencial da massa do veículo em energia elétrica que pode ser armazenada e reutilizada.

O desempenho dos freios de um veículo são sem dúvida um dos fatores mais importantes que afetam a segurança do veículo. Um sistema de frenagem bem projetado deve sempre atender a dois fatores. Primeiro, em travagem de emergência, deve-se deixar o veículo em repouso, percorrendo a menor distância possível, exigindo que o sistema de freios seja capaz de fornecer torque de travagem em todas as rodas. Segundo, deve manter o controlo sobre a direção do automóvel, exigindo que a força de travagem seja distribuída em todas as rodas de igual forma.

Geralmente, o torque de travagem exigido é muito maior que o torque que um motor elétrico pode produzir. Em veículos elétricos, os sistemas de travagem mecânicos de fricção devem coexistir com os travões elétricos regenerativos.

Uma quantidade significativa de energia é consumida pela travagem. Travar um carro de 1500 kg à velocidade de 100 km/h até ficar parado consome em média 160 Wh de energia em algumas dezenas de metros. Levando em consideração apenas a resistência ao atrito com o solo e o efeito aerodinâmico, sem travagem, essa quantidade de energia deixaria o carro movimentar-se 2 km até parar [3].

Com os travões regenerativos, o sistema que impulsiona o veículo faz a maior parte da travagem, então quando o condutor aciona o pedal dos travões num VE ou VHE, o sistema de travagem coloca o motor elétrico do carro em modo reverso e este atua como um gerador, desacelerando as rodas ao gerar uma força no sentido contrário do movimento. Dessa maneira, o motor quando atua como um gerador, é capaz de produzir corrente elétrica para recarregar as baterias [9].

2.2.6 Ultra-high speed flywheel

A Volvo desenvolveu um sistema de *flywheel* chamado KERS - *Kinetic Energy Recovery System* (Sistema de Recuperação de Energia Cinética) (Figuras 26 e 27). Esse sistema é montado acoplado ao eixo traseiro do veículo e funciona da seguinte forma: durante a travagem, enquanto o carro é desacelerado, a ação do freio faz com que o *flywheel* gire acima das 60.000 rpm. Enquanto isso, o motor que é montado na frente é desligado. A energia cinética armazenada no *flywheel* girando, pode então ser aplicada por uma transmissão especial em direção à aceleração, quando o carro se volta a mover. A potência de acionamento é impulsionada e a aceleração melhorada, ajudando a reduzir o consumo de combustível em 25% [33, 34].



Figura 26 - *Kinetic Energy Recovery System* da Volvo [44].

O *flywheel* pode funcionar acoplado também a um gerador, transformando a energia cinética acumulada em energia elétrica para recarregar as baterias de veículos elétricos e híbridos elétricos.

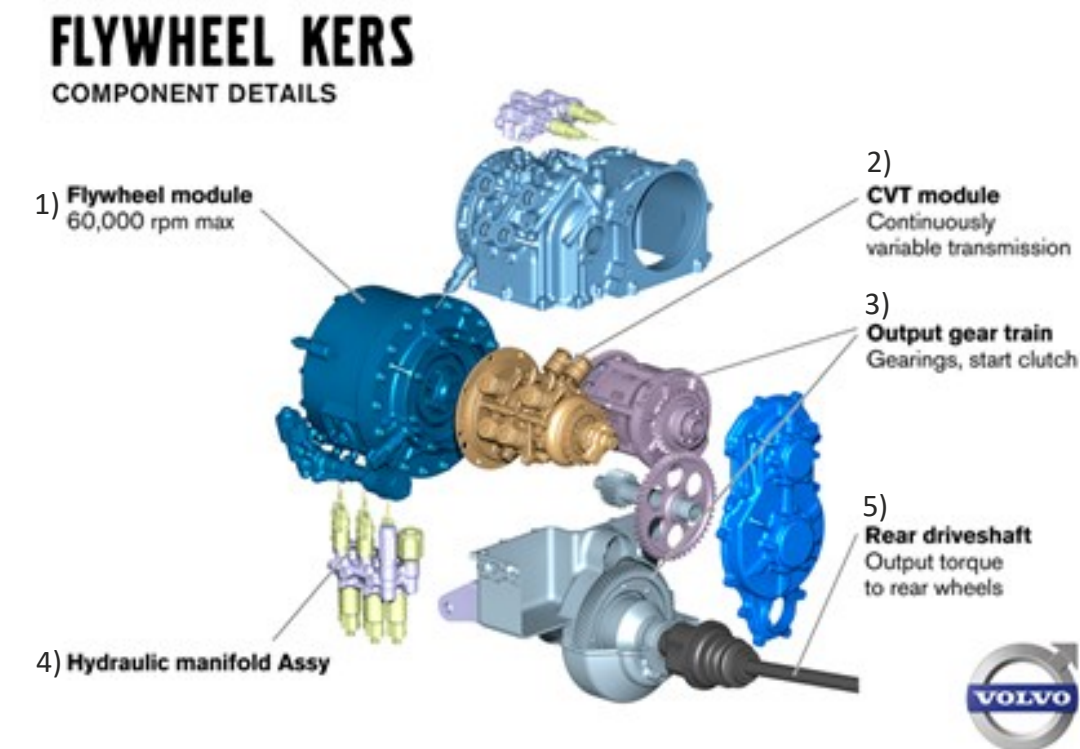


Figura 27 - Componentes do KERS [45].

Legenda: 1) Módulo *flywheel*, máximo 60.000 rpm; 2) Módulo CVT, transmissão variável contínua; 3) Engrenagem de saída, arranque da embraiagem; 4) Conjunto de coletores hidráulicos; 5) Eixo de transmissão traseiro, torque de saída para as rodas traseiras.

2.2.7 Configurações dos veículos elétricos

Anteriormente, os veículos elétricos foram convertidos principalmente a partir dos carros com motor de combustão interna, trocando os MCI e os tanques de combustível por motor elétrico e baterias, enquanto se mantinham todos os outros componentes. Desvantagens como peso, menor flexibilidade e degradação do desempenho, causaram o desuso desse tipo de configuração [3].

No lugar dos antigos modelos elétricos, os mais modernos são construídos baseados num corpo e estrutura original. Todas as mudanças que foram feitas satisfizeram as exigências de estruturas únicas dos veículos elétricos, fazendo uso da grande flexibilidade da propulsão elétrica.

Um sistema de transmissão elétrico moderno (Figura 28) consiste em três subsistemas principais: o motor elétrico propulsor, a fonte de energia, e auxiliares. O subsistema de propulsão elétrica é composto por um controlador do veículo, conversor eletrônico de potência, motor elétrico, transmissão mecânica, e as rodas motoras. O subsistema de

fonte de energia envolve a fonte de energia, a unidade de administração energética, e a unidade de reabastecimento de energia.

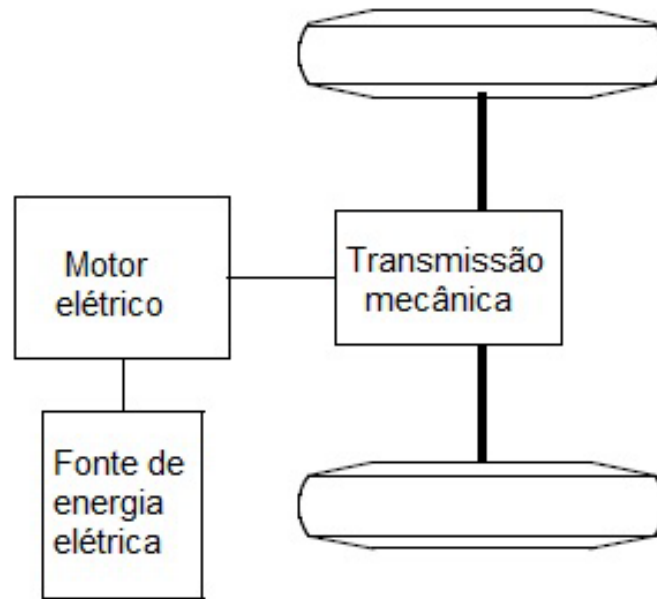


Figura 28 - Esquema de *power train* elétrico. Adaptado de [3].

O subsistema auxiliar consiste na unidade de direção, unidade de controlo climático, e unidade de alimentação auxiliar [3].

A seguir é explicada a imagem apresentada na Figura 29.

- (1.) Na primeira configuração, a propulsão elétrica substituiu o MCI de um sistema de transmissão tradicional. Consiste num ME, embraiagem, caixa de engrenagens e diferencial.
- (2.) Com um motor elétrico que tem potência constante numa grande faixa de velocidades, uma engrenagem fixa pode substituir a transmissão multivelocidades e reduz a necessidade da embraiagem.
- (3.) Similar ao sistema de transmissão do modelo (2.), o motor, a engrenagem fixa e o diferencial, podem ser integrados numa única montagem, porém, agora junto ao eixo, enquanto as suas duas extremidades são acopladas em ambas as rodas.
- (4.) Nesse modelo, o diferencial é excluído e são usados dois motores propulsores. Cada motor opera a roda do seu lado, e operam em velocidades diferentes como quando o carro faz uma curva, por exemplo.
- (5.) Para simplificar ainda mais o sistema de transmissão, os motores de tração podem ser colocados dentro das rodas. Um conjunto de engrenagens planetárias finas podem ser usadas para reduzir a velocidade e aumentar o torque do motor.

(6.) Para abandonar completamente qualquer engrenagem entre o motor elétrico e as rodas motoras, o rotor externo de um motor elétrico de baixa velocidade na unidade de tração nas rodas, pode ser diretamente conectado à roda motora, como por exemplo os sistemas de motor dentro da roda da Michelin, Mitsubishi, e Siemens VDO.

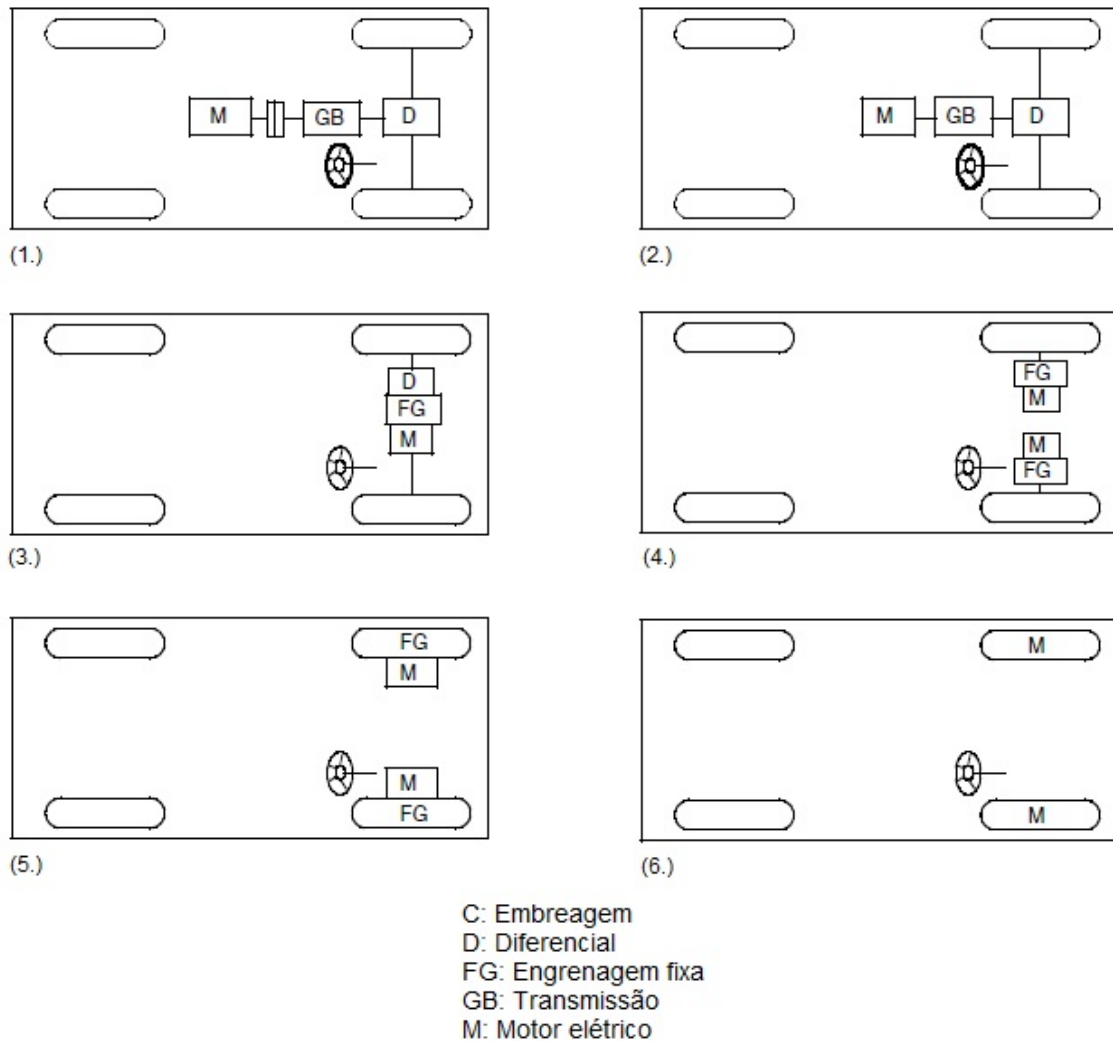


Figura 29 - Configurações de modelos elétricos Adaptado de [3].

2.2.8 Novidades a cerca de melhorias sustentáveis nos modelos elétrico

Este subcapítulo visa apresentar algumas dos mais novos estudos que são atualmente visados como conceitos para serem adaptados e utilizados em VE, para redução no consumo de combustíveis, redução de emissões de gases poluentes, e aumento da autonomia.

Painéis solares

A tecnologia dos painéis solares vem se desenvolvendo rapidamente e um estudo sobre a sua utilização na indústria automobilística tem sido amplamente discutida por se tratar de uma forma de geração de energia limpa, de fácil acesso e gratuita.

Tabela 4 - Estudos sobre painéis solares na indústria automobilística [autor].

Autor	Descrição
[46]	O principal princípio promovido por veículos solares é a possibilidade de gerar energia sem prejudicar o Meio Ambiente.
[47]	<p>A integração de painéis fotovoltaicos em veículos elétricos e híbridos está se tornando mais viável devido ao aumento da eletrificação da frota de carros, ao avanço da tecnologia dos painéis, do aumento do custo dos combustíveis e a diminuição dos preços dos painéis.</p> <p>Veículos híbridos solares podem representar uma solução valiosa para enfrentar tanto a economia de energia quanto problemas ambientais.</p> <p>Benefícios significativos em relação a consumo de combustível e emissões podem ser obtidos com o uso intermitente do automóvel a potência média limitada, compatível com o uso típico em condições urbanas.</p>
[48]	<p>Energia solar poderia ser aplicada, em princípio, em carro híbridos elétricos e nos puramente elétricos. A relevância da contribuição solar é relativa à possibilidade de acumular energia solar durante períodos em que o veículo estiver estacionado.</p> <p>A presença de painéis fotovoltaicos em um PHEV pode aumentar o desenvolvimento da tecnologia <i>Vehicle to Grid</i> (V2G). Com esta tecnologia o veículo plug-in além de receber energia quando estacionado, pode também fornecer energia à rede de distribuição, o que se torna benéfico quando o número de carros conectados à rede for grande.</p>
[49]	<p>As vantagens potenciais da energia solar passam por ser de graça, abundante e por ser distribuída uniformemente, mais do que outras fontes como combustíveis fósseis, urânio, eólica e hídrica.</p> <p>Veículos solares podem conceber um recurso valioso para enfrentar tanto os problemas ambientais quanto a economia de energia.</p>

Pads de carregamento

Os *pads* de carregamento são carregadores sem fio com tecnologia que transmite energia elétrica através de campos eletromagnéticos e tem como principais características a eficiência na transmissão, a possibilidade de transmissão com considerável desalinhamento entre carro e carregador, e o carregamento sem a necessidade de conexão cabeada entre automóvel e carregador. Atualmente a BMW é uma marca que já anuncia o seu *pad* residencial comercialmente [50]. Porém essa tecnologia apresenta muitas outras possibilidades de aplicações além das residenciais.

Tabela 5 - Estudos sobre *pads* de carregamento para carregamento sem fio [autor].

Autor	Descrição
[51]	<p>A tecnologia de carregamento sem fio tem o potencial de resolver a limitação da infraestrutura dos veículos elétricos. Vantagens do carregamento sem fio inclui sua segurança e conveniência de recarregar enquanto o veículo estiver em repouso ou em movimento.</p> <p>Permite o carregamento automatizado do veículo que pode ser conseguido de três maneiras diferentes: o carregamento estático que apresenta como benefício a eliminação do risco de choque elétrico, e a conveniência de ser instalado em garagens e vagas de estacionamentos; o carregamento semi-dinâmico que possibilita o carregamento do veículo quando parado por pequenos períodos, como em semáforos e; o carregamento dinâmico que recarrega as baterias do veículo continuamente enquanto está em movimento, através de faixas de carga na estrada.</p> <p>A carregamento sem fio aumenta a autonomia do VE e reduz o uso de baterias, conseqüentemente, reduz o peso total do sistema. Do ponto de vista sustentável, o carregamento sem fio é muito mais seguro, confiável, tem menor impacto ambiental e mais benefícios de segurança do que o carregamento cabeado.</p>
[52]	<p>A nível de energia na casa dos kilowatts, a distância de transferência de energia aumenta de vários milímetros para várias centenas de milímetros com uma eficiência que supera os 90%. As vantagens fazem o carregamento sem fio muito atrativo para VE, seja para carregamento de forma estática ou dinâmica.</p>
[53]	<p>É uma abordagem que fornece um meio para resolver o problema de carregamento e oferece ao consumidor uma alternativa perfeita e conveniente para recarregar condutivamente. Ainda fornece um isolamento elétrico e</p>

reduz o custo, o peso e o volume de carregamento a bordo.

[54]

A ideia por trás da infraestrutura de uma *eRoad* é focar não só nas baterias, mas também na infraestrutura que permite fornecer energia elétrica dinamicamente. VE podem ser energizados continuamente enquanto se movem ao longo da *eRoad*, percorrendo assim maiores distância com uma capacidade de baterias menor.

Uma integração da infraestrutura da *eRoad* dentro da atual rede de transporte pode ser uma solução promissora para promover a popularidade dos VE e alavancar a sustentabilidade no setor de transporte rodoviário.

A *eRoad* é definida como uma infraestrutura de transporte que permite entregar energia elétrica para carregar um VE eficientemente enquanto estiver parado ou em movimento, usando sistemas específicos de carregamento condutivo e sem contato, podendo servir como uma estrada comum para veículos de forma geral, e ainda entregar energia elétrica aos VE.

Ultra carregadores

Uma medida estudada para melhorar o desempenho dos Veículo Elétricos passa pelo melhoramento dos carregadores para que se tornem mais eficientes e rápidos, possibilitando o aumento da autonomia com um curto período de carregamento, que é praticável no dia-a-dia de motoristas que utilizam o carro em grande parte do tempo e fazem apenas pequenas pausas durante os trajetos.

Tabela 6 - Estudos sobre ultra carregadores para veículos elétricos [autor].

Autor	Descrição
[55]	<p>A tecnologia das baterias avança continuamente, assim, recargas estarão disponíveis com rapidez e a simplicidade de uma parada para reabastecimento nos dias de hoje.</p> <p>Tecnologias de estações de carregamento ultrarrápidas permitem um carregamento equivalente a uma parada de reabastecimento para VE, alimentando com corrente contínua nos conjuntos de baterias em níveis de voltagem variáveis na faixa entre 50 a 700 V_{dc} para satisfazer os diferentes tipos de veículos e baterias. Isso permite que o automóvel seja carregado no menor tempo possível. Combinado com as últimas tecnologias de bateria, o carregamento ultrarrápido poderia permitir uma recarga completa em menos de cinco minutos.</p>

- [56] O carregador rápido tem a capacidade de equilíbrio da energia em corrente contínua e permite a eliminação de circuitos de balanceamento adicionais e de transformadores de alta frequência, tornando assim melhor a eficiência geral do sistema.
- O carregador rápido demonstrou um desempenho excelente em alcançar o gerenciamento abrangente de equilíbrio da energia em corrente contínua, além da sua função de carregamento rápido de VE.

Baterias de duo carbono

Atualmente uma grande preocupação relativo aos VE é com as baterias, mais especificamente com sua capacidade de armazenamento de energia e o peso, que acaba agregando a todo o conjunto. As propostas das baterias de duo carbono são relativas a esses problemas, redução de peso, e aumento da densidade energética do conjunto.

Tabela 7 - Estudos sobre baterias de nano carbono e duo carbono [autor].

Autor	Descrição
[57]	<p>As baterias de duplo grafite e duplo íon mostra vantagens em termo de baixo custo, boa segurança, e afabilidade com o Meio Ambiente. Além disso, a alta tensão de trabalho, sobretudo acima dos 4.5 V, das baterias de duplo-íon causada pelo alto potencial de intercalação de ânion é também benéfico para se ter alta densidade energética. Este modelo de baterias também apresenta um bom desempenho cíclico, com decaimento de capacidade insignificante após cem ciclos.</p> <p>É notável que a tensão de descarga média de uma bateria de duplo carbono e base de íon de potássio pode atingir até 4.5 V a 1 C, muito mais altos que uma bateria comercial de íon de lítio e baterias de íon de potássio.</p>
[58]	<p>O aumento da concentração de eletrólitos pode fazer com que a bateria de duplo carbono se torne uma bateria altamente interessante, que representa uma alternativa às baterias de íon de lítio, devido ao alto potencial de operação, mais de 4 V.</p>

2.3 Veículos híbridos elétricos

Os veículos puramente elétricos têm a sua energia armazenada exclusivamente nas baterias, e com isso ficam limitados em termos de autonomia, sendo o seu

reabastecimento lento e demorado. Para eliminar essa falha, criou-se o conceito do veículo híbrido-elétrico. Híbrido significa que nesse tipo de veículo há uma fonte de energia mista, não se limitando apenas às baterias, e contando com a energia produzida por um motor de combustão interna. Em alguns modelos, ainda é possível substituir o motor de combustão por uma célula de combustível, que é outra maneira de transformar energia química em energia elétrica [4].

Os veículos com MCI proporcionam boa *performance* e longa faixa operacional, devido às vantagens da utilização dos combustíveis fósseis, e por estes terem uma alta densidade energética. Contudo, os veículos convencionais com MCI apresentam a desvantagem da baixa economia de combustível e a poluição ambiental. Veículos elétricos acionados por baterias, por outro lado, possuem algumas vantagens sobre os veículos a motores de combustão, como a eficiência energética e a ausência de emissão de poluentes para a atmosfera, mas a *performance*, especialmente a capacidade operacional, é pequena [3].

Os carros híbridos-elétricos têm como objetivo unir todas as características positivas em apenas um automóvel, e eliminar o máximo possível as suas desvantagens, pois essa combinação permite a diminuição no tamanho do motor de combustão interna, mantendo o requisito de potência máxima, recuperar a energia durante a desaceleração e a travagem, otimizar a distribuição de energia pelos sistemas de acionamento primário, eliminar as perdas quando o sistema se encontra estático, com o sistema *start and stop*, por exemplo, e eliminar perdas na embraiagem, acoplando o motor na transmissão somente quando as velocidades forem compatíveis [2].

2.3.1 Conceito de *drive train* nos híbridos elétricos

O *drive train* de um carro pode ser descrito como todo o *power train*, porém, sem o motor. Desta forma, o *drive train* pode ser designado por sistema de transmissão para facilitar o entendimento, apesar de não ter uma tradução consensual, assim como o termo *power train*.

Qualquer automóvel necessita de um *power train* para desenvolver energia suficiente para atender à procura de *performance*, carregar energia suficiente para permitir que possa ser conduzido por um determinado intervalo de tempo, demonstrar alta eficiência, e emitir o mínimo de poluentes ambientais [3].

Um veículo deve ter mais de uma fonte de energia e mais de um conversor de energia, como um sistema motor com MCI a gasolina ou a *diesel*, um sistema de motor elétrico com célula de combustível, ou ainda um sistema de motor elétrico com bateria química. Um veículo que tiver pelo menos duas fontes de energia e conversor de energia, poderá ser designado como veículo híbrido [3, 35, 36].

Um carro híbrido (Figura 30) normalmente possui apenas dois *power trains*, pois a utilização de mais de dois acarretaria uma complicação desnecessária ao sistema.

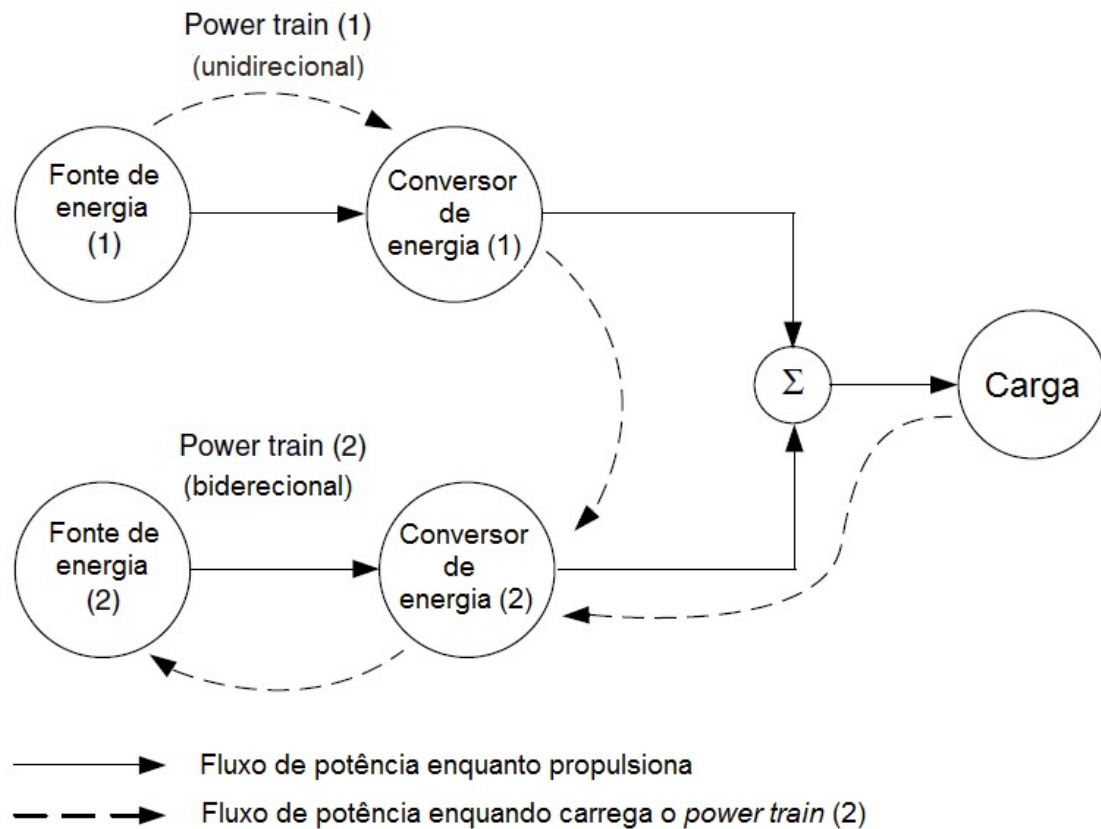


Figura 30 - Esquema conceitual de um sistema de acionamento híbrido. Adaptado de [3].

Pelo propósito de recuperar parte da energia de travagem que é dissipada na forma de calor nos carros com MCI, o sistema de transmissão híbrido normalmente tem uma fonte de energia e um conversor bidirecional. O outro pode ser ou bidirecional ou unidirecional, o que significa dizer, pode ser recarregável, ou não.

O modelo híbrido de sistema de tração fornece a energia solicitada por um *power train* adaptado. Há vários padrões disponíveis para combinar os fluxos de potência com vista a satisfazer as necessidades da carga. Assumindo uma hibridização com um MCI como sendo o *power train* (1) e o *power train* (2), sendo um sistema elétrico com bateria química, podemos ter os seguintes padrões [3]:

- a) o *power train* 1 sozinho, entrega potência para a carga;
- b) o *power train* 2 sozinho, entrega potência para a carga;
- c) os dois *power trains* entregam potência à carga simultaneamente;
- d) o *power train* obtém energia da carga (freios regenerativos);
- e) o *power train* 2 obtém energia do *power train* 1;
- f) o *power train* 2 obtém energia do *power train* 1 e da carga ao mesmo tempo;

- g) o *power train 1* entrega potência para a carga e para o *power train 2* ao mesmo tempo;
- h) o *power train 1* entrega energia para o *power train 2*, e o *power train 2*, entrega potência à carga.
- i) o *power train 1* entrega potência à carga, e a carga entrega energia ao *power train 2*.

2.3.2 Graus de hibridização

Existe alguns tipos de veículos híbridos, sendo que a sua classificação varia com o grau de hibridização que estes atingem [2].

2.3.2.1 Micro híbrido

Esses modelos são equipados com um motor elétrico de baixa potência, que é utilizado apenas para desenvolver a função *start and stop*, função essa que desliga o motor do carro quando este se encontra parado, por exemplo, quando é necessária uma paragem num semáforo. Este tipo de configuração permite que as baterias sejam recarregadas quando há travagem do veículo. Permite também uma economia de até 10% de combustível [2].

2.3.2.2 Médio híbrido

Esse tipo de hibridização aproveita as funcionalidades dos micro híbridos, e junta-as ao motor elétrico auxiliar na impulsão do veículo, permitindo que o motor principal, o MCI, tenha um tamanho reduzido; porém, o veículo não é capaz de se mover exclusivamente por ação do motor elétrico. Este modelo é capaz de atingir uma economia de combustível na ordem de 27% [2].

2.3.2.3 Híbrido completo

Esse tipo de veículo pode ser acionado tanto pelo MCI, como pelo sistema elétrico, ou numa combinação dos dois acionamentos. Uma bateria grande de alta capacidade consegue, por si só, proporcionar a alimentação do sistema elétrico de motorização. Estes modelos têm duas vias de condução da energia separadas, o que permite maior flexibilidade na operação do sistema de transmissão, quando converte energia mecânica em energia elétrica [59].

2.3.2.4 Híbrido plug-in

São também designados por híbridos recarregáveis. Nestes modelos, estão presentes módulos de baterias de elevada densidade energética, que podem ser recarregados por uma fonte externa, e não exclusivamente pela conversão de energia do carro. Essa configuração permite que o veículo funcione exclusivamente com o motor elétrico por

mais tempo do que todos as outras configurações de híbridos, conseguindo-se assim uma maior economia de combustível [60].

2.3.3 Configurações de veículos híbridos elétricos

A configuração de veículos híbridos é livremente definida como a conexão existente entre os componentes que definem as rotas de fluxo de energia. Tradicionalmente, os veículos híbridos elétricos eram classificados em dois tipos básicos, os tipos série e os tipos paralelo. Porém, algumas novas configurações não poderiam ser classificadas em nenhum desses grupos. Atualmente, a classificação dos híbridos é feita em quatro categorias, o tipo série, o tipo paralelo, o série-paralelo (ou misto, como será adotado), e o tipo complexo (que não será abordado por ser pouco comum no mercado) [2, 3].

2.3.3.1 Configuração híbrido série

Um sistema de transmissão híbrido em série (Figura 31) é um sistema de transmissão onde duas fontes de energia alimentam um único motor elétrico que propulsiona o veículo. São considerados essencialmente veículos elétricos pelo facto de a propulsão ser feita pelo motor elétrico, enquanto o MCI funciona apenas como gerador, que pode fornecer energia diretamente ao motor ou recarregar as baterias [2, 3].

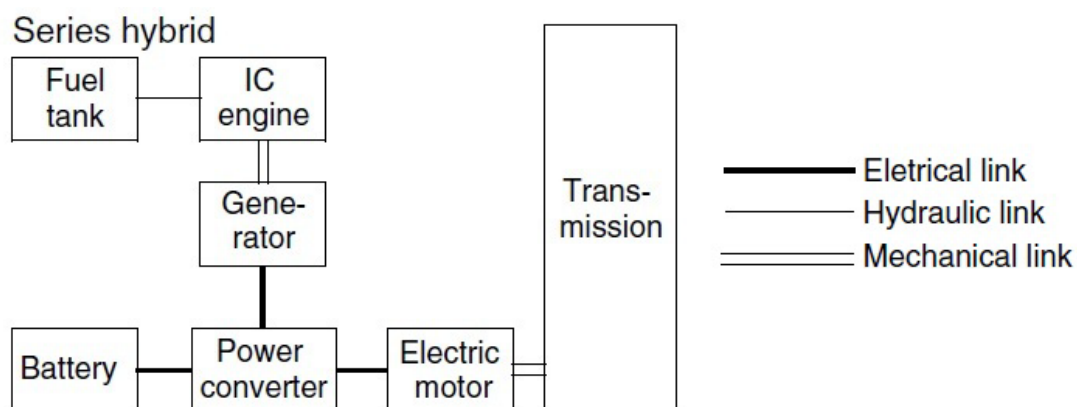


Figura 31 - Esquema de um sistema híbrido em série. Adaptada de [3].

Legenda: Híbrido série. *Fuel tank*: tanque de combustível. *IC engine*: MCI. *Generator*: gerador. *Battery*: bateria. *Power converter*: conversor de energia. *Electric motor*: motor elétrico. *Transmission*: transmissão. *Electrical link*: ligação elétrica. *Hydraulic link*: ligação hidráulica. *Mechanical link*: ligação mecânica.

O sistema híbrido série tem os seguintes modos de operação, sendo que cada um apresenta uma característica única.

- a) puro elétrico: o motor é desligado e o carro funciona somente através das baterias;

b) puro motorizado: a tração do motor vem exclusivamente do MCI, passando pelo gerador. As baterias não fornecem e não extraem qualquer energia do sistema de transmissão. O sistema elétrico serve apenas como uma transmissão elétrica do motor para as rodas.

c) híbrido: a força de tração é absorvida do MCI-gerador e também das baterias.

d) motor tracionando e baterias recarregando: o motor-gerador fornece energia tanto para recarregar as baterias, como para impulsionar o veículo.

e) freio regenerativo: o motor-gerador é desativado e o motor elétrico opera como um gerador. A energia gerada é usada para recarregar as baterias.

f) recarga de bateria: o motor de tração (elétrico) não recebe energia e o MCI-gerador é usado para recarregar as baterias.

g) recarga de bateria híbrido: tanto o motor-gerador como o motor de tração operam como gerador para recarregar as baterias.

2.3.3.2 Configuração híbrido paralelo

Um sistema de transmissão híbrido paralelo (Figura 32) é um sistema no qual o motor de combustão fornece a energia mecanicamente para as rodas, como num carro alimentado unicamente por um MCI, tendo igualmente acoplado um motor elétrico na transmissão do *power train*. Desse modo, o veículo pode funcionar suportado apenas no MCI, através do motor elétrico, ou através da combinação dos dois, permitindo tornar melhor a distribuição de energia e tirar maior rendimento do sistema [2, 3].

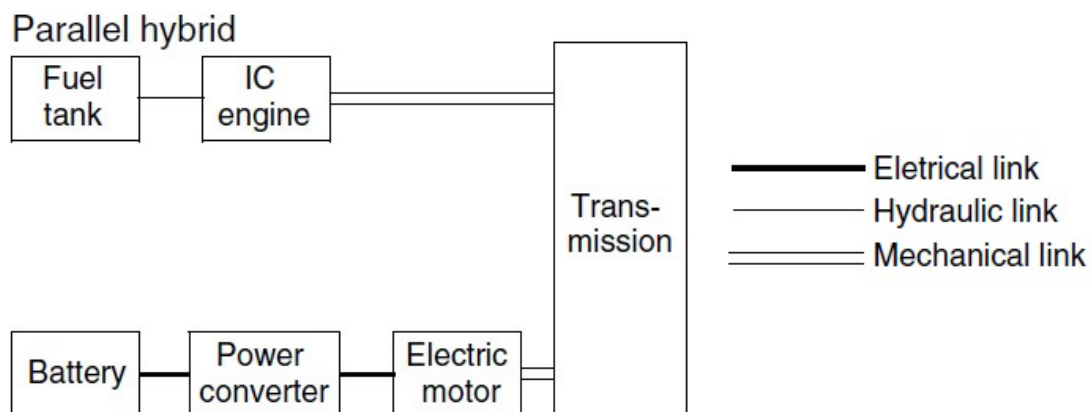


Figura 32 - Esquema de um sistema híbrido em paralelo. Adaptada de [3].

Legenda: Híbrido paralelo. *Fuel tank*: tanque de combustível. *IC engine*: MCI. *Battery*: bateria. *Power converter*: conversor de energia. *Electric motor*: motor elétrico. *Transmission*: transmissão. *Electrical link*: ligação elétrica. *Hydraulic link*: ligação hidráulica. *Mechanical link*: ligação mecânica.

O sistema híbrido paralelo tem alguns modos de operação, os quais possuem características próprias de operação.

- a) *power assist*: quando os dois motores estão a trabalhar simultaneamente;
- b) freio regenerativo: as baterias são recarregadas usando a energia que provém da travagem do veículo;
- c) motor em tração e baterias em recarga: o MCI, através da transmissão, fornece energia, tanto para recarregar as baterias, quanto para impulsionar o veículo;
- d) zero emissões: essa configuração funciona quando o veículo opera exclusivamente com o motor elétrico, utilizando a energia que está armazenada nas baterias;
- e) convencional: aparece quando apenas o MCI funciona, porém, nenhuma energia é direcionada para a recarga das baterias.

2.3.3.3 Configuração mista

Esta configuração, que também pode ser chamada de híbrido série-paralelo (Figura 33), é assim descrita pois pode operar como um híbrido série ou paralelo, aproveitando assim as características positivas de cada tipo. Possui ainda um sistema de transmissão planetária que permite alterar o modo de funcionamento do sistema híbrido a qualquer momento.

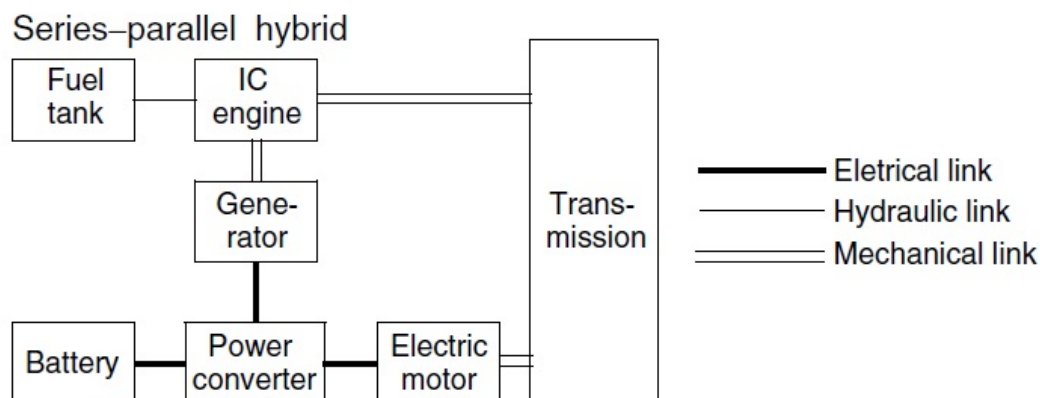


Figura 33 - Esquema de sistema híbrido misto (série-paralelo). Adaptada de [3].

Legenda: Híbrido série-paralelo. *Fuel tank*: tanque de combustível. *IC engine*: MCI. *Generator*: gerador. *Battery*: bateria. *Power converter*: conversor de energia. *Electric motor*: motor elétrico. *Transmission*: transmissão. *Electrical link*: ligação elétrica. *Hydraulic link*: ligação hidráulica. *Mechanical link*: ligação mecânica.

A configuração do híbrido série está presente quando o automóvel opera a velocidades mais baixas. Quando as velocidades são mais elevadas, funciona como um híbrido paralelo. Pelo facto de combinar as duas configurações, o híbrido misto tem um melhor desempenho que qualquer outro sistema [2].

Nessa configuração, os modos de operação distintos também aparecem e, por ser um modo combinado, os seus diversos modos de operação são uma combinação de vários modos de operação descritos anteriormente nas configurações do tipo série e paralelo. Essa configuração permite cinco modos de operação distintos [3]:

- a) convencional: o automóvel funciona apenas com o MCI;
- b) zero emissões: funciona quando o veículo opera exclusivamente com o motor elétrico, utilizando a energia que está armazenada nas baterias, e não existe interação do MCI ou do gerador;
- c) freio regenerativo: as baterias são recarregadas usando a energia que seria desperdiçada na travagem do veículo;
- d) MCI em operação: o motor funciona transmitindo energia mecânica para o veículo e para o gerador, que por sua vez recarrega as baterias.
- e) *power assist*: nesse modo, os dois motores trabalham em simultâneo para impulsionar o veículo.

2.4 Veículos a células de combustível

Células de combustível são equipamentos que transformam energia química contida em um combustível (no meio automotivo, é usado o hidrogénio) em energia elétrica e água através de um processo eletroquímico (Figura 34). Este processo, realizado pelas células de combustível (FC, do inglês *fuel cell*), não realiza qualquer combustão e o seu único produto não utilizável no sistema é a água. É um equipamento que possui alta eficiência e apresenta ausência de ruído [61].

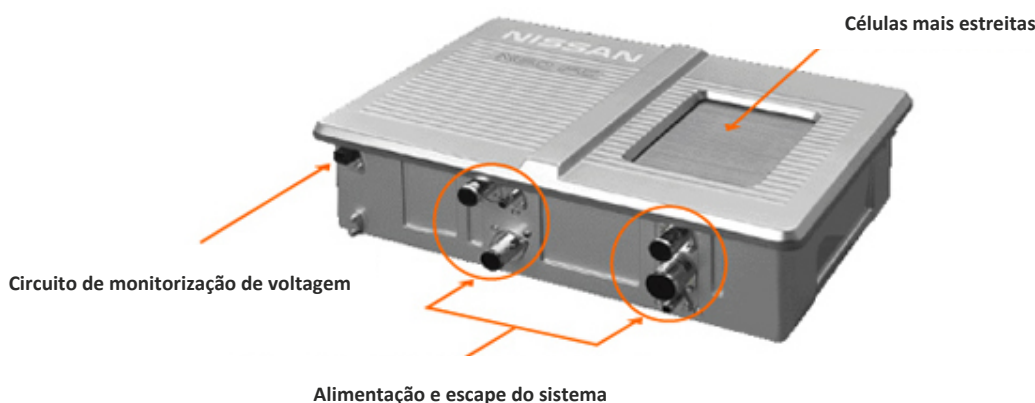


Figura 34 - Modelo de célula de combustível da Nissan, e sua configuração [62].

Os veículos movidos a FC (Figura 35) são, por definição, veículos híbridos série, mas onde as células são como baterias não recarregáveis, que transformam a energia química contida no hidrogénio em energia elétrica para acionamento do motor.

Utiliza-se o hidrogénio por ser esse o elemento mais abundante, pois 75% da massa elementar do universo é composta por esse elemento, pela sua alta densidade energética, por ser obtido facilmente, e pelo produto final ser apenas água [4].

Comparado com os veículos com MCI, as células apresentam vantagens pela alta eficiência energética, e por não gerar gases poluentes, já que pratica a conversão direta da energia livre presente no combustível sem a necessidade de sofrer combustão [3]. A eficiência energética do processo pode ser até três vezes maior que a de um veículo equivalente com MCI [4]. Porém, apesar destas vantagens, algumas desvantagens ou problemas que impedem o uso dessa tecnologia ainda são muito discutidas, como o preço ainda muito alto desta tecnologia; o processo de produção de hidrogénio, que necessita de outra fonte de energia, mais a necessidade de uma estrutura de distribuição; a sua confiabilidade ainda não é agradável, pelo facto de a membrana das células ser facilmente contaminável, e as altas pressões às quais o hidrogénio precisa ser comprimido para poder ocupar mais espaço nos reservatórios, gerando assim maior autonomia dos veículos [3, 4].

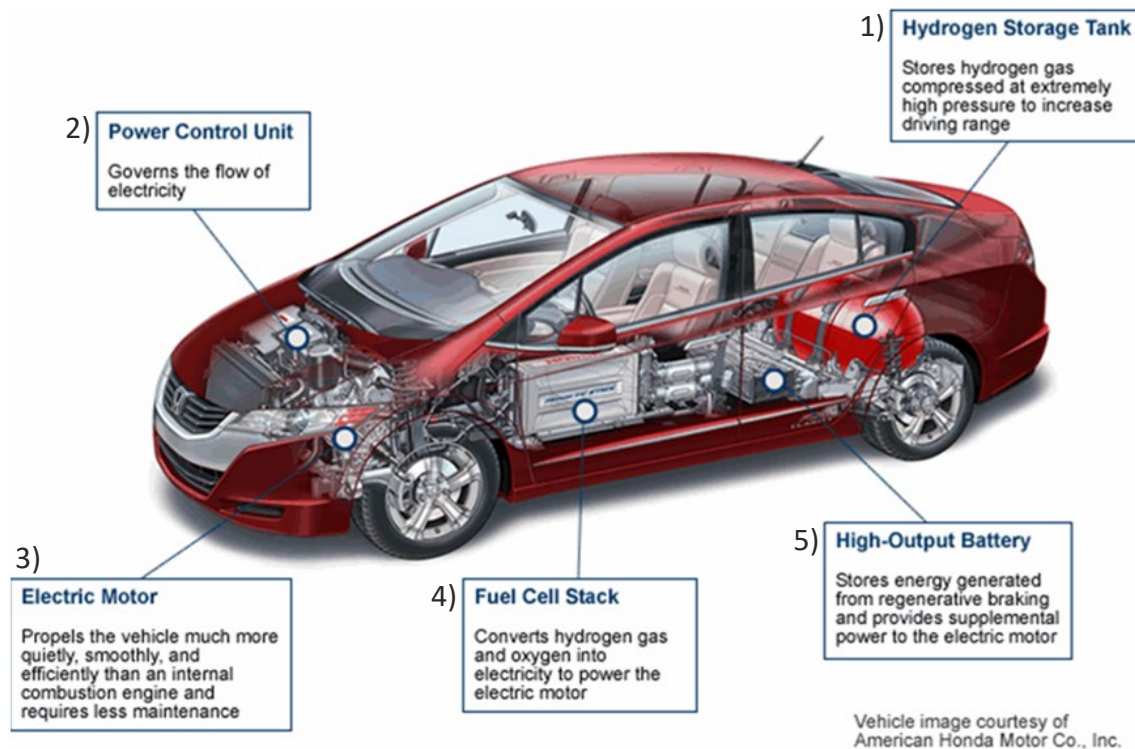


Figura 35 - Vista do sistema do modelo com célula de combustível (Honda FCX Clarity). Adaptada de [63].

Na Figura 35, traduzindo os quadros, podemos ver que é mostrado em:

- 1) tanque de armazenamento de hidrogénio: armazena hidrogénio sob a forma de gás comprimido a pressões muito altas, para aumentar a autonomia.
- 2) unidade de controlo de potência: governa o fluxo de eletricidade para o destino certo.
- 3) motor elétrico: propuliona o veículo de forma muito mais silenciosa, suave e eficiente que um MCI e requer menos manutenção.
- 4) conjunto de células de combustível: converte o hidrogénio e oxigénio em eletricidade para alimentar o motor elétrico.
- 5) bateria de alto rendimento: armazena energia gerada pelo travão regenerativo e fornece força suplementar para o motor elétrico.

2.4.1 Célula de combustível

Uma célula de combustível é uma célula galvânica – eletroquímica – onde um combustível é convertido diretamente em energia elétrica (Figura 36). O agente redutor (combustível) e o agente oxidante, são continuamente fornecidos, diferentemente das baterias, de forma separada para os dois elétrodos da célula onde sofrem a reação. É necessário um eletrólito para conduzir os iões de um elétrodo para outro. O combustível é fornecido ao ânodo, ou elétrodo positivo, onde os eletrões são lançados do combustível para o catalisador. Os eletrões fluem através de um circuito externo para o cátodo, ou elétrodo negativo, devido à diferença de potencial entre estes dois elétrodos, onde em combinação com os iões positivos e o oxigénio, reagem. Os produtos dessa reação são a corrente elétrica, água e calor [2-4].

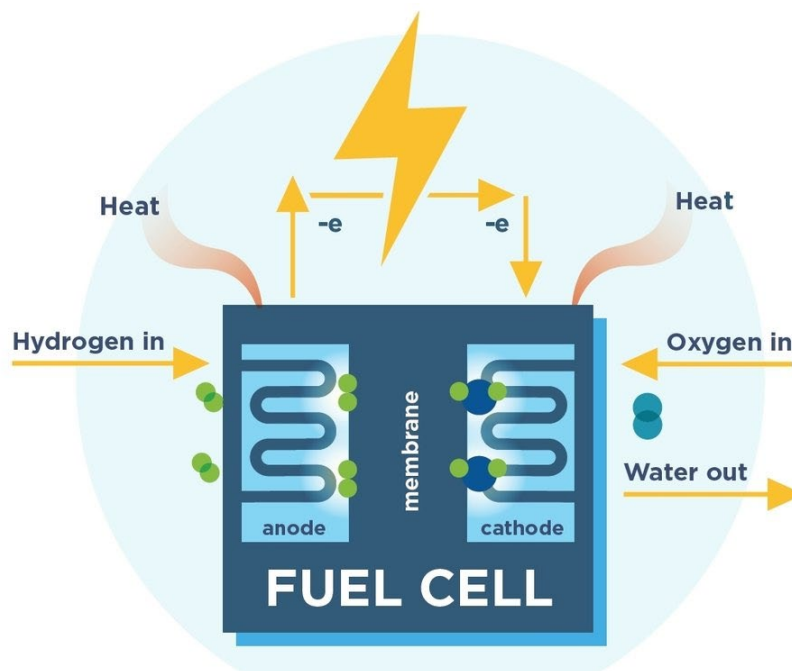
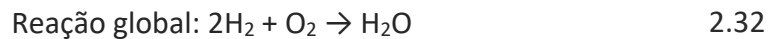
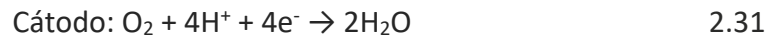


Figura 36 - Esquema de célula de combustível [65].

As reações no polo positivo, polo negativo, e reação global que acontece numa célula de combustível são as seguintes [64]:



As células de combustível são classificadas de acordo com o tipo de eletrólito que é usado nas células de combustível [2]:

a) PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (célula de combustível com membrana de troca de prótons): utiliza uma membrana feita de polímero especial como eletrólito, e possui elevada densidade de potência. É o modelo mais difundido e utilizado na indústria automóvel;

b) DMFC – *Direct Methanol Fuel Cell* (célula de combustível por metanol direto): é o tipo que não utiliza hidrogénio como combustível e sim o metanol, que é misturado como vapor, e essa mistura é alimentada diretamente ao ânodo da célula;

c) AFC – *Alkaline Fuel Cell* (célula de combustível alcalina): esse tipo usa uma solução aquosa de hidróxido de potássio como eletrólito;

d) PAFC – *Phosphoric Acid Fuel Cell* (célula de combustível de ácido fosfórico): utiliza o ácido fosfórico como eletrólito. Mostra ser a tecnologia mais avançada das células de combustível. Utiliza catalisador de platina, o que interfere substancialmente no seu custo;

e) SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell* (célula de combustível de óxido sólido): essas podem funcionar com combustíveis dos mais variados, porque são capazes de processar o hidrogénio contido neles. Essas células usam material cerâmico, sólido como eletrólito, e não poroso;

f) MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell* (célula de combustível de carbonato fundido): essas células funcionam a temperaturas elevadíssimas, acima dos 650°C, não sendo necessária a utilização de metais caros. O eletrólito usado é composto por carbono fundido.

Atualmente, as células de combustível possuem um bom desempenho na produção de energia, apresentando altas potências específicas; potência de 90 kW em células produzidas pela Toyota, e 100 kW numa célula utilizada no Honda Clarity FCV [4].

2.4.2 Hidrogénio

O hidrogénio é de vital importância para atividades diversas, como as industriais e ciclos naturais; serve para a produção de semicondutores e é utilizado na indústria petroquímica. Atualmente, as empresas estão investindo na sua utilização como

combustível pelo seu alto teor energético. O hidrogénio pode ser obtido de várias formas, e a nível industrial, a sua produção é feita a partir do gás natural com eficiência em torno de 80%, ou do metano. Pode ser obtido também através de outros processos como os biorreatores de microalgas e a eletrólise [2, 66].

2.4.3 Eletrólise

Eletrólise é um processo que permite a separação de elementos químicos quando se induz uma corrente elétrica forçadamente, a fim de realizar uma reação química que não ocorreria espontaneamente, em condições normais. Para se produzir o hidrogénio, é utilizada uma solução aquosa; esta é decomposta em hidrogénio gasoso ($2H_2$) e oxigénio (O_2). Este processo de produção de hidrogénio, apesar de não ser o mais eficiente, é interessante, pois durante o seu processo a única fonte de energia utilizada é a energia elétrica, que é uma fonte de energia limpa, desde que a fonte de energia seja renovável; isso tornaria o hidrogénio uma fonte de combustível totalmente limpa, ainda mais se considerarmos que o único subproduto não utilizável no processo é a água [2, 3].

2.4.4 Abastecimento

O abastecimento de combustível para células de combustível que se encontram dentro dos carros, é o maior desafio para a sua aplicação. O hidrogénio é o combustível ideal para o acionamento de veículos com FC, conseqüentemente, a maior preocupação para isso torna-se a produção e o armazenamento de hidrogénio, pois é um gás que ocupa um grande volume, o que dificulta o seu transporte, tendo ainda alta inflamabilidade e baixo ponto de liquefação. Geralmente, há duas maneiras de abastecer uma célula de combustível. Um método é a produção em grandes estações e o armazenamento do hidrogénio puro a bordo do veículo, a outra é produzir a bordo a partir de um transportador de hidrogénio e abastecer diretamente [2, 3].

2.4.5 Armazenamento

Há três métodos de armazenamento de hidrogénio a bordo do veículo. Há o método de compressão num reservatório à temperatura ambiente, líquido criogenado a baixas temperaturas, e o método por hidretos de metais [3]. Cada um apresenta vantagens e desvantagens.

2.4.5.1 Hidrogénio comprimido

O hidrogénio comprimido é encontrado armazenado em cilindros ou tanques a pressões equivalentes a 350 bar e 700 bar. Este método é considerado como de armazenamento direto e é usado quando são pretendidas pequenas quantidades de gás. Por ser um método que ocupa muito espaço, é utilizado quando essa questão não é um problema, ou quando a procura não é muito elevada. O custo de compressão é aproximadamente 1,43% do valor energético total contido no hidrogénio, para cada 100 Bar de pressão. Uma das vantagens deste tipo de armazenamento é a simplicidade

e o facto de não apresentar perdas energéticas depois que a compressão é feita [2, 4]. Este é o modo de armazenar hidrogénio a bordo dos veículos que é mais utilizado atualmente.

2.4.5.2 Hidrogénio líquido criogénico

A segunda alternativa para o armazenamento de hidrogénio no próprio veículo é liquefazer o gás a temperaturas criogénicas; para esse elemento, a temperatura chega a $-259,2^{\circ}\text{C}$. O armazenamento feito desta forma ocupa menor volume no estado líquido que no gasoso, o que faz com que se possa armazenar mais hidrogénio líquido no mesmo espaço, porém é afetado pelo mesmo problema de densidade que afeta o hidrogénio comprimido; a baixa densidade resulta numa quantidade de energia de 8.52×10^6 J por litro de hidrogénio líquido [2, 3].

Armazenar o hidrogénio líquido a bordo de um veículo é um desafio por diversos fatores. É utilizada muita energia para liquefazer este gás e para o manter a valores de temperatura tão baixos, apresentando uma eficiência de 60%. Em estado líquido, o hidrogénio apresenta menor perigo do que quando gás comprimido, pois se existir uma fuga do reservatório, o combustível aquece rapidamente e evapora. Torna-se necessário, como medida de segurança, isolar a superfície do reservatório de armazenamento, para que não ocorram queimaduras por frio, caso haja contacto do usuário com o tanque [2, 3].

2.4.5.3 Hidretos metálicos

Um sistema que também é encontrado para armazenamento de hidrogénio é através de hidretos metálicos, que é baseado no fenómeno em que alguns metais são capazes de absorver o hidrogénio em forma gasosa, sob condições de alta pressão e temperatura moderada [3, 67]. Esses metais podem ser o ferro, titânio, manganês, níquel, lítio, e algumas ligas desses metais. Hidretos de metais são capazes de libertar hidrogénio somente quando exigido [3, 67].

Teoricamente, metais e ligas metálicas armazenam hidrogénio a uma densidade maior que hidrogénio puro. Na prática, o armazenamento de hidrogénio depende da área da superfície do material no qual as moléculas de hidrogénio são absorvidas. Uma grande área de superfície por unidade de peso de material pode ser obtida por módulos porosos finos, constituídos por pó moído em baixa granulometria de metais ou ligas. De forma resumida, os metais absorvem o hidrogénio como uma esponja e o libertam em forma gasosa quando aquecido a alta temperatura e baixa pressão [3, 67, 68].

Hidretos de metais alcalinos são alternativas possíveis para a absorção de hidretos metálicos. Esses hidretos reagem violentamente com a água, para libertarem hidrogénio e um hidróxido, como por exemplo [3]:



Esse método de armazenamento de hidrogénio tem como principais vantagens o facto de o elemento passar a fazer parte da estrutura química do metal, e assim não são necessárias altas pressões ou baixas temperaturas (como o estado criogénico) para se tornar funcional. Este método é considerado atualmente a forma mais segura para o armazenamento de hidrogénio [67, 68]

A maior desvantagem é a necessidade de carregar no mesmo veículo um hidreto altamente reativo e uma solução de hidróxido corrosiva. A densidade de armazenamento em comparação com outros métodos de armazenamento de hidrogénio é normal, porém modesta em comparação com a gasolina. A produção e reciclagem desses hidretos ainda são um desafio [3, 67, 68].

2.4.6 Configurações de veículos a células de combustível

Um veículo com sistema de transmissão a células de combustível conta com os seguintes elementos para sua construção: um sistema de célula de combustível que funciona como unidade primária de energia, uma fonte de energia de pico, para atender a elevadas exigências de energia quando necessário, motor elétrico e o seu correspondente controlador, controlador do veículo, e uma interface eletrónica entre o sistema de células de combustível e a fonte de energia de pico. Esta configuração (Figura 37) é necessária devido à conversão direta de energia livre presente no combustível, em energia elétrica não proveniente de combustão [3].

2.4.6.1 Estratégia de controlo

A estratégia de controlo, que é pré-ajustada no controlador do veículo, controla a energia que flui entre o sistema de células de combustível, a fonte de pico, e o sistema de transmissão [3]. A estratégia de controlo deve assegurar que:

- a) a potência de saída do motor elétrico atende sempre a energia solicitada;
- b) o nível de energia na fonte de energia de pico é sempre mantido dentro da região ideal;
- c) o sistema de células de combustível opera dentro da zona de operação ideal.

O condutor dá o comando de tração ou de travagem através do pedal do acelerador ou do travão, respetivamente, o qual é representado por um comando de potência que é esperado que o motor produza. Assim, em modo de tração, a energia elétrica que entra no motor pode ser expressa pela razão do poder de comando e a eficiência do motor elétrico. Entretanto, na travagem, o motor funciona como um gerador, e a potência elétrica de saída do motor pode ser diferente do comando de potência vindo do pedal de travão, caso a energia de travagem necessária não possa ser totalmente fornecida pelo travão regenerativo [3].

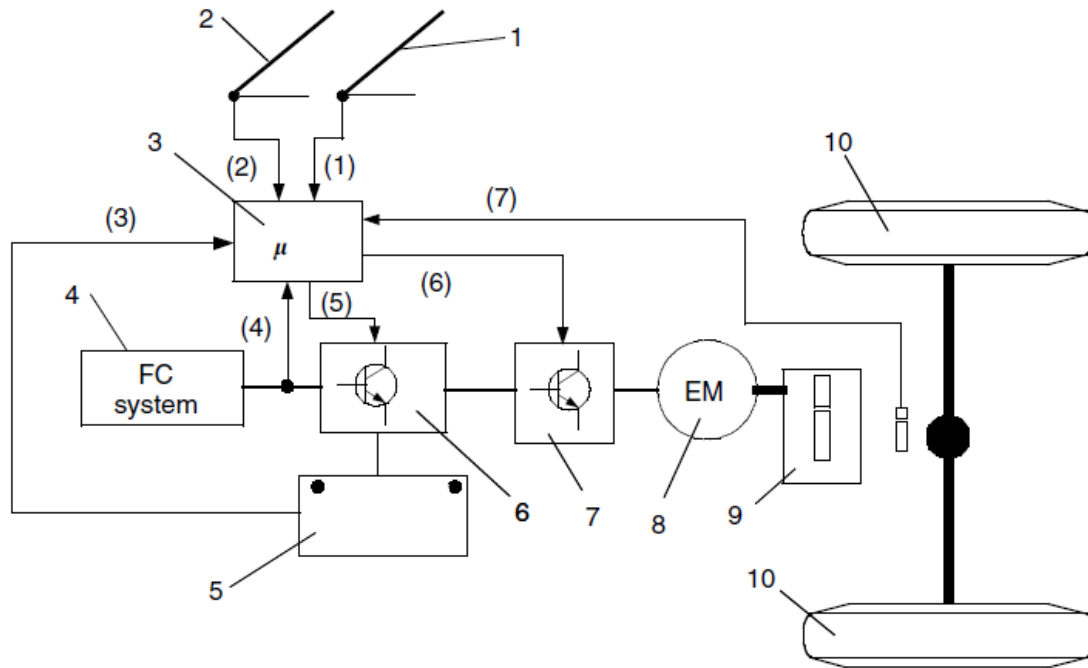


Figura 37 - Modelo esquemático de construção de um sistema de célula de combustível. Adaptada de [3].

Legenda

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. pedal do acelerador; | 10. rodas; |
| 2. pedal do travão; | (1) sinal de comando de tração; |
| 3. controlador do veículo; | (2) sinal de comando de travagem; |
| 4. sistema de célula de combustível; | (3) sinal da fonte de energia de pico; |
| 5. fonte de energia de pico; | (4) sinal de energia da célula de combustível; |
| 6. interface eletrónica; | (5) sinal de controlo da interface eletrónica; |
| 7. controlador do motor; | (6) sinal do motor de controlo; |
| 8. motor de tração; | (7) velocidade; |
| 9. transmissão; | <i>FC system</i> = sistema da célula de combustível. |

De acordo com o comando de potência do motor e outras informações do veículo, tais como nível de energia na fonte de energia de pico, e a mínima energia de operação do sistema de células de combustível (abaixo da qual a eficiência da célula de combustível irá decair significativamente), o sistema de célula de combustível e a fonte de pico são controladas para produzir a energia necessária [3]. Os vários modos de operação deste sistema de transmissão e correspondente estratégia de controlo de potência são descritas seguidamente.

a) enquanto parado: nem o sistema de célula de combustível nem a fonte de pico fornece potência para o sistema de transmissão. O sistema de célula pode operar, permanecendo inativo;

b) modo de travagem: o sistema de célula de combustível opera inativo, e a fonte de pico absorve a energia do travão regenerativo, de acordo com as características de operação do sistema de freio;

c) Modo de tração:

a. se a potência de entrada do motor comandado é maior que a potência nominal do sistema de células de combustível, a tração híbrida é utilizada, no qual o sistema de células opera com a sua potência nominal, e a potência restante solicitada é fornecida pela fonte de pico;

b. se a potência de entrada do motor comandado é menor que a potência mínima predeterminada pelo sistema de células de combustível, e a fonte de pico necessita de carregamento, o sistema de células de combustível opera com a potência nominal (parte da qual vai para o sistema de transmissão e a outra parte vai para a fonte de pico). De outra forma, se a fonte não necessitar de carregamento, a célula de combustível opera inativa e a fonte de pico opera o veículo de forma isolada;

c. se a potência de carga é maior que a potência mínima predeterminada, e menor que a nominal da célula de combustível, e se a fonte de pico não precisar de carregamento, o sistema de células de combustível aciona o automóvel sozinho. Agora, se a fonte necessitar de carregamento, o sistema de células opera com a potência nominal, e parte da energia vai para o sistema de transmissão, para acionamento do veículo, e outra parte para recarregar a fonte de pico.

2.4.7 Novidades a cerca de melhorias sustentáveis de modelos com células de combustível

Este subcapítulo visa apresentar um novo conceitos que estão a ser estudados para serem utilizados em veículos que empregam célula de combustível, para redução no consumo de combustíveis e redução de emissões de gases poluentes.

Uso de etanol em SOFC

Aqui se apresenta um novo conceito para uso de célula de combustível em automóveis, sendo que é utilizado um diferente modelo de FC relativo ao usado quando combustível é o hidrogénio. Aqui se apresenta algumas vantagens para o uso da SOFC abastecida com combustível de matriz renovável, o etanol.

Tabela 8 - Estudos sobre uso de etanol em SOFC [autor].

Autor	Descrição
[69]	<p>Entre as células de combustível, SOFCs são potencialmente a tecnologia mais eficiente para converter energia química em energia elétrica, e assim poderia ter um grande impacto reduzindo o consumo de combustível e as emissões de CO₂. E bio etanol é eficientemente produzido a partir de biomassa renovável e é uma fonte de energia economicamente viável para produção em larga escala, gerando baixas emissões e trazendo impacto positivo para a Economia e para o Meio Ambiente.</p>
[70]	<p>Considerando os riscos do armazenamento e transporte do hidrogênio, o uso do bio etanol representa uma importante alternativa rumo à viabilidade técnica e econômica das SOFCs, além de ser uma estratégia para geração de energia aliada à sustentabilidade.</p> <p>O uso de etanol em SOFC associa duas vantagens principais: a origem renovável e sustentável do etanol e a produção de energia elétrica com elevada eficiência da SOFC.</p> <p>Devido à operação em altas temperaturas deste modelo de FC (500-1000°C), o etanol pode ser reformado a hidrogênio na própria célula. Esta técnica é conhecida como SOFC com reforma interna, onde o calor da operação das células é aproveitado para reformar o combustível, apresentando ganho global de eficiência.</p> <p>É um importante dispositivo para a geração limpa de energia podendo, a médio ou longo prazo, complementar a matriz energética mundial.</p>

2.5 Sustentabilidade

A sustentabilidade tem por base dois conceitos muito importantes que ajudam na compreensão do termo. O primeiro é a gestão ambiental, que pode ser definida como um sistema empresarial de gestão que visa a prática e métodos administrativos para a redução, tanto quanto possível, do impacto ambiental das suas atividades económicas. Uma boa gestão ambiental empresarial preza-se pelo uso dos recursos naturais de forma coerente, aplicação de métodos para a manutenção da biodiversidade, adoção de sistemas de reciclagem de resíduos e aproveitamento de recursos, criação de produtos que não provoquem demasiado e irreversível impacto ambiental, uso de sistemas que assegurem não poluir o meio ambiente e, preparação e treinamento da equipa de colaboradores, para que conheçam e perpetuem o sistema de

sustentabilidade da empresa [71]. O segundo conceito que se aplica é o de desenvolvimento sustentável. Este termo pode ser compreendido como desenvolvimento que garanta as necessidades tidas no presente, sem que as necessidades das gerações futuras fiquem comprometidas. O conceito apresenta uma conotação altamente positiva, uma vez que o Banco Mundial, a UNESCO, e outras entidades internacionais de elevada importância, aderiram como símbolo de uma nova filosofia de progresso que combina eficiência econômica, justiça social, e prudência ambiental [72], formando o que atualmente é conhecido como tripé da sustentabilidade.

No uso da expressão desenvolvimento sustentável, o termo sustentável está ligado a um sentido particular de ecologia; refere-se aos ecossistemas naturais e à sua manutenção. Para a construção de sistemas sustentáveis, é preciso que sejam levados em consideração os princípios extraídos dos avanços mais recentes nos paradigmas e nas teorias científicas, visto que a atual insustentabilidade resulta de um conhecimento anterior, ultrapassado e inadequado à convivência saudável com o meio ambiente. Desta forma, o processo de investigação científica e as suas teorias, constituem como tarefa básica e princípio definir a nova visão de mundo, que é necessária ter para a realização do desenvolvimento sustentável [72, 73].

2.5.1 O tripé da sustentabilidade

O tripé da sustentabilidade são três âmbitos inseparáveis, a economia, o social e o ambiental. Esses são fatores onde empresas que se devem pautar pela gestão dos seus negócios e a tomada de decisão são baseados na ética e na transparência dos negócios, e esta ética acontece quando as decisões tomadas pela corporação respeitam direitos, valores e interesses relacionados com os impactos causados pelas suas ações, tanto na sociedade, como no meio ambiente, ou mesmo no futuro da empresa [74, 75].

2.5.2 ISO 14000

As normas que constituem a família ISO 14000, são um conjunto de normas voltadas para a gestão ambiental de empresas, independente do nível, tamanho, ou área ocupada pela companhia. Estas normas foram criadas com o principal objetivo de criar um sistema de gestão ambiental e, dessa forma, diminuir os malefícios produzidos ao meio ambiente [76]. A família de normas ISO 14000 fornece ferramentas práticas para companhias e organizações de todos os tipos, para gerir as suas responsabilidades ambientais [77].

Em geral, as normas da família ISO 14000 têm como principal objetivo minimizar os danos causados ao meio ambiente, fazendo com que a empresa crie um sistema de gestão ambiental e trabalhe sob o signo da melhoria contínua dentro deste sistema, estando sintonizada com todas as políticas e leis ambientais [76].

O pilar desta família, a ISO 14001:2015, é utilizada em 171 países, e conta com mais de 300 mil certificações [78], sendo que muitas delas envolvem empresas do setor automóvel.

2.5.3 Importância da sustentabilidade na indústria automóvel

No ano de 2015, aconteceu em Paris, França, o evento COP21, a vigésima primeira edição da *Conference of Parties* – Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, que visava rever as implementações das Convenções. Pretendeu-se que a COP21 permitisse alcançar um acordo juridicamente vinculativo e universal sobre o clima, com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C [79].

O texto final do acordo estipulado, determina que os países desenvolvidos deverão investir um total de 100 biliões de dólares por ano, no que respeita ao financiamento de políticas para melhoria do ambiente, em medidas de combate às mudanças climáticas, e em auxílio dos países subdesenvolvidos [80].

A União Europeia comprometeu-se a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE), como o gás metano e o CO₂, em pelo menos 40% até 2030, relativamente aos índices de 1990 [81]. No caso de Portugal, comprometeu-se em reduzir os gases que contribuem para o efeito estufa em 30% a 40% até ao ano de 2030. A meta para cumprir de imediato é descarbonizar profundamente a economia e pautar-se por deixar de lado o uso de combustíveis fósseis na produção de energia [82].

Já no que se refere à indústria automóvel, os países membros da União Europeia (UE) chegaram a acordo para a redução entre 30% e 35% para as emissões geradas pelas viaturas novas e camiões [81].

A CLEPA, *European Association of Automotive Suppliers*, comunicou que a luta contra as mudanças climáticas e a melhoria na qualidade do ar, são objetivos importantes para a indústria automóvel europeia, e que está a desenvolver uma ampla variedade de tecnologias para maiores reduções na emissão de CO₂, assim como para a obtenção de uma maior eficiência energética [83]. Através de seu presidente, Paul Schockmel, a CLEPA anunciou igualmente que os fornecedores europeus da indústria automóvel continuarão a investir esforços no sentido de alcançar novos limiares tecnológicos que possibilitem continuar a combinar a redução nas emissões de CO₂ com os benefícios do consumidor na economia de combustível. A digitalização dos transportes apoiará a utilização de veículos conectados e automatizados, que contribuirão para combater as alterações climáticas [83].

O sector dos transportes é atualmente um dos maiores responsáveis pelo crescimento das emissões de poluentes na atmosfera; compõe um dos sectores com maior consumo energético entre os outros sectores e depende fortemente de fontes de energia não renováveis [84], como é o caso dos MCI. O sector de transportes representa em Portugal cerca de 36% do consumo energético de todo o país, sendo que o modo de transporte rodoviário é responsável por 23,5% do total de emissões de GEE (Gases com Efeito de Estufa), onde o automóvel é o meio de transporte com

menor eficiência, ou seja, o meio de transporte que consome mais energia por passageiro por quilômetro percorrido [84].

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Proposta de desenvolvimento de um índice de sustentabilidade
- 3.2 Etapa 1 - Seleção dos indicadores de sustentabilidade
 - 3.3 Etapa 2 - Determinação dos pesos dos indicadores
 - 3.4 Etapa 3 - Normalização dos indicadores
 - 3.5 Etapa 4 - Construção do índice
 - 3.6 Etapa 5 - Criação da escala de classificação
 - 3.7 Levantamento de dados dos modelos escolhidos
- 3.8 Cálculo dos índices de sustentabilidade por modelo
 - 3.9 Análise dos valores obtidos

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Proposta de desenvolvimento de um índice de sustentabilidade

A proposta desta dissertação é desenvolver um índice geral que consiga analisar quais os veículos que são mais sustentáveis dentro de um conceito prático. A análise prioriza fatores no âmbito ambiental do tripé da sustentabilidade, porém afeta de forma direta e indireta os âmbitos sociais e económicos.

Utilizando as características mais relevantes dos automóveis, como: potência, binário, consumo de combustível, emissões de CO₂, entre outros demais; será possível calcular valores individuais para modelos selecionados para o estudo. Posteriormente, os modelos serão categorizados numa escala com variação entre zero (0) e um (1), sendo zero o menos sustentável e um o mais sustentável.

Após um estudo realizado, chegou-se à conclusão que a fórmula matemática mais adequada a ser utilizada para definir o Índice de Sustentabilidade (Is) seria uma soma ponderada entre os coeficientes relacionados a cada característica do veículo e o valor da característica em si. Assim, o resultado final seria algo como:

$$Is = q_1A_1 + q_2A_2 + q_3A_3 + \dots + q_iA_i \quad 3.11$$

Os passos a serem seguidos para a criação de todo o modelo podem ser vistos na imagem que ilustra a estrutura do trabalho, composta por cinco etapas [85].

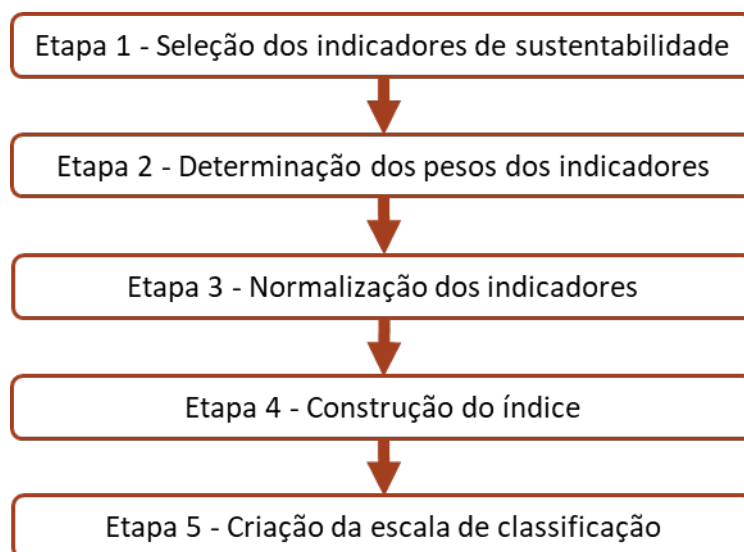


Figura 38 - Etapas para criar o indicador de sustentabilidade [85].

3.2 Etapa 1 - Seleção dos indicadores de sustentabilidade

Os indicadores selecionados foram escolhidos de acordo com a maior relevância em relação à *performance* do veículo.

Tabela 9 - Indicadores selecionados [autor].

Indicadores	A_i	Unidade
Potência	P^- (quanto menor melhor)	Cv
Binário	Bin^- (quanto menor melhor)	Nm
Emissões de CO ₂	ECO_2^- (quanto menor melhor)	g/km
Consumo de gasolina (urbano)	G_{urb}^- (quanto menor melhor)	l/100km
Consumo de gasolina (autoestrada)	G_{aut}^- (quanto menor melhor)	l/100km
Consumo elétrico (urbano)	E_{urb}^- (quanto menor melhor)	kWh/100km
Consumo de elétrico (autoestrada)	E_{aut}^- (quanto menor melhor)	kWh/100km
Consumo de H ₂ (urbano)	H_{2urb}^- (quanto menor melhor)	kg/100km
Consumo de H ₂ (autoestrada)	H_{2aut}^- (quanto menor melhor)	kg/100km
Velocidade máxima	V_{max}^- (quanto menor melhor)	km/h
Peso próprio	W^- (quanto menor melhor)	kg
Capacidade de carga	$Carg^-$ (quanto menor melhor)	kg
Autonomia	Aut^+ (quanto maior melhor)	km

Dado existirem diferentes sistemas de acionamento dos modelos, foram tidos em consideração os consumos característicos a cada matriz energética, usados pelos diferentes tipos de acionamentos.

3.3 Etapa 2 - Determinação dos pesos dos indicadores

Os pesos dos indicadores, que aqui serão chamados de coeficientes (q_i), podem ser calculados através de modelos estatísticos ou de métodos participativos e análises conjuntas [85]. No caso deste estudo, o método utilizado foi o *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

O AHP é uma técnica que auxilia pessoas responsáveis por tomar decisões a solucionar problemas complexos, organizando diversas variáveis e critérios, como as suas ideias, experiências, conhecimento e julgamento dentro de uma estrutura de hierarquia, conduzindo o processo através de uma sequência de comparações emparelhadas (dois a dois) [85, 86].

Este método tem sido utilizado para incorporar considerações quantitativas e qualitativas da percepção humana, fazendo com que isto seja uma das principais vantagens deste método, pois a ferramenta consegue transformar comparações, que muitas vezes são feitas de forma empírica, em valores numéricos.

Para tomar uma decisão de forma organizada e gerar prioridades, é necessário decompor a decisão, observando as seguintes etapas: 1. Definir o problema e determinar o tipo de conhecimento procurado; 2. Estruturar a decisão hierárquica do topo com o objetivo, e só então estabelecer os critérios, e auscultar desde os níveis intermediários, até aos níveis mais baixos; 3. Construir um conjunto de matrizes para possibilitar a comparação dois a dois; 4. Usar as prioridades obtidas nas comparações, para ponderar as prioridades no nível mais baixo. Fazer isso para todos os elementos. Depois, para cada elemento no nível abaixo, deve-se adicionar os valores ponderados e obter a prioridade global. Repetir o procedimento para se obter as prioridades até o nível mais baixo da hierarquia [87].

Para fazer as comparações, é necessária uma escala de números que indique o quanto um elemento é mais importante, ou mais dominante que outro elemento, com respeito ao critério ou prioridade que são comparados.

Tabela 10 - Escala fundamental de números absolutos [87].

Escala	Avaliação numérica
Igual importância	1
Fraco ou leve	2
Importância moderada	3
Moderado a forte	4
Importância forte	5
Forte a muito forte	6
Muito forte	7
Muito forte a extremo	8
Importância extrema	9

Prioriza-se o uso dos valores ímpares, para maior diferenciação entre as medições [89].

Tabela 11 - Matriz de comparação emparelhada do AHP [85].

	A	B	C	D
A	1	X_{12}	$1/X_{13}$	X_{14}
B	$1/X_{12}$	1	X_{23}	$1/X_{24}$
C	X_{13}	$1/X_{23}$	1	$1/X_{34}$
D	$1/X_{14}$	X_{24}	X_{34}	1

Os valores recíprocos são preenchidos com os valores inversos ao da análise original.

Após feitas as comparações emparelhadas e definidas as devidas importâncias, é necessário normalizar a matriz comparativa. Para a normalização ser feita, basta dividir cada valor da matriz pelo total da sua respectiva coluna [86, 87].

Para se determinar os pesos de cada critério, calcula-se o vetor de prioridades, ou autovetor (λ). O autovetor define a contribuição que cada critério terá na meta estabelecida através da média aritmética dos valores normalizados de cada critério [86, 87].

Com o vetor de prioridades calculado, o próximo passo do processo é verificar a consistência dos dados encontrados. O objetivo desta operação é ter a certeza de que as tomadas de decisão foram coerentes e não se gerou inconsistência na atribuição de importâncias na matriz. Por exemplo, se for dito que $A > B$ e $B > C$, seria incoerente dizer que $C > A$, gerando assim uma inconsistência [86].

O Índice de Consistência tem como base o autovalor (λ_{max}) da matriz de comparação. Este valor é calculado através do somatório do produto entre os peso definidos, valores do autovetor, e o total das suas respectivas colunas na matriz de comparação original [85, 86]. Assim, determina-se o Índice de Consistência (CI) por:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad 3.2$$

sendo n o tamanho da matriz comparativa.

Com o Índice de Consistência, calcula-se a Taxa de Consistência (CR), determinada por:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad 3.3$$

O valor de RI (Índice de Consistência Aleatório) é fixo, e foi determinado por Saaty conforme a tabela abaixo.

Tabela 12 - Índices de consistência aleatória (RI) [86].

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Entretanto, se $CR < 0,1$, isso significa que as comparações da matriz não apresentam inconsistência, sendo assim, as avaliações são válidas. Caso $CR \geq 0,1$, as comparações devem ser refeitas e, conseqüentemente, todos os cálculos de consistência.

3.4 Etapa 3 - Normalização dos indicadores

A normalização torna-se necessária quando os indicadores se apresentam em diferentes unidades. Foi utilizada a normalização através do método Min-Max, para que todos os valores dos indicadores ficassem contidos entre zero (0) e um (1).

De acordo com o método, quando é necessário maximizar os valores, quando os indicadores geram impacto positivo no índice de sustentabilidade, utiliza-se a seguinte fórmula matemática [85]:

$$A'_{i,j}^+ = \frac{A_{i,j}^+ - A_{i,j}^{+MIN}}{A_{i,j}^{+MAX} - A_{i,j}^{+MIN}} \quad 3.4$$

Onde: $A'_{i,j}^+$ é o indicador com impacto positivo i sobre a dimensão de sustentabilidade j com valores normalizados;

$A_{i,j}^+$ é o valor original do indicador com impacto positivo i sobre a dimensão de sustentabilidade j .

$A_{i,j}^{+MIN}$ é o menor valor do indicador com impacto positivo i sobre a dimensão de sustentabilidade j .

$A_{i,j}^{+MAX}$ é o maior valor do indicador com impacto positivo i sobre a dimensão de sustentabilidade j .

Já quando se torna necessário minimizar os valores, quando os indicadores geram impacto negativo no índice de sustentabilidade, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$A'_{i,j}^- = 1 + \frac{A_{i,j}^{-MIN} - A_{i,j}^-}{A_{i,j}^{-MAX} - A_{i,j}^{-MIN}} \quad 3.5$$

Onde: $A'_{i,j}^-$ é o indicador com impacto negativo i sobre a dimensão de sustentabilidade j com valores normalizados;

$A_{i,j}^-$ é o valor original do indicador com impacto negativo i sobre a dimensão de sustentabilidade j .

$A_{i,j}^{-MIN}$ é o menor valor do indicador com impacto negativo i sobre a dimensão de sustentabilidade j .

$A_{i,j}^{-MAX}$ é o maior valor do indicador com impacto negativo i sobre a dimensão de sustentabilidade j .

3.5 Etapa 4 - Construção do índice

Após o cálculo dos coeficientes através das matrizes, e a normalização dos indicadores, será possível montar a fórmula matemática para se chegar aos valores finais do Índice de Sustentabilidade. O cálculo final se deu por:

$$I_s = q_1P + q_2Bin + q_3ECO_2 + q_4G_{urb} + q_5G_{aut} + q_6E_{urb} + q_7E_{aut} + q_8H_{2urb} + q_9H_{2aut} + q_{10}V_{max} + q_{11}W + q_{12}Carg + q_{13}Aut \quad 3.6$$

3.6 Etapa 5 - Criação da escala de classificação

Para classificar os valores calculados dos índices e identificá-los como “mais sustentável” e “menos sustentável” foi criada uma escala com cinco categorias diferentes, sendo: muito bom (azul), bom (verde), razoável (amarelo), ruim (laranja), muito ruim (vermelho), com os valores variando a cada dois décimos (0,2), numa escala entre zero e um.

Tabela 13 - Escala em cores para classificação do índice de sustentabilidade [autor].

Escala de classificação dos modelos	
Muito bom	$1 \leq I_s \leq 0,8$
Bom	$0,8 < I_s \leq 0,6$
Razoável	$0,6 < I_s \leq 0,4$
Ruim	$0,4 < I_s \leq 0,2$
Muito ruim	$0,2 < I_s \leq 0$

3.7 Levantamento de dados dos modelos escolhidos

Com toda a estrutura já desenvolvida, pode-se agora aplicar o estudo, selecionar os modelos a serem analisados e levantar os dados necessários para fornecer os cálculos.

Para fazer o levantamento de dados, foram selecionados dezasseis modelos de diferentes marcas e categorias, de acordo com a classificação da Associação do Comércio Automóvel de Portugal (ACAP) (tais como inferior, superior, luxo, e SUV – *Super Utility Vehicle*) [88] e diferentes tipos de acionamento (MCI, elétrico puro, híbrido, e células de combustível).

Os valores de consumo de combustível, emissões de CO₂, e consumo de energia para *power trains* alternativos, salvo algumas poucas exceções, foram retirados seguindo a nova referência WLTP (*Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*) que atualmente vigora, e afirma trazer valores mais reais, comparados aos antigos testes NEDC (*New European Driving Cycle*) [89].

As tabelas seguintes apresentam os valores de cada característica dos modelos.

Tabela 14 - Valores dos modelos a gasolina. Elaborado com dados de [90-93].

Modelo	Seat Ibiza Reference 2019 1.0 MPI	Volkswagen Golf Stream 2019 1.0 TSI	Jaguar XF Berlina 2019 25t 2.0 Turbo	Porsche Cayenne 2019
Potência máxima (cv)	80	115	250	340
Binário (Nm/rpm)	95	200	365	450
Emissões de CO ₂ (g/km)	112	128	186	210
Consumo gasolina (urbano) (l/100 km)	6,1	5,5	11,9	11,4
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100 km)	4,3	4,9	7,0	7,9
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100 km)	-	-	-	-
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100 km)	-	-	-	-
Consumo H ₂ (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-
Velocidade máxima (km/h)	169	198	244	245
Peso próprio (kg)	1099	1245	1704	2060
Capacidade de carga (kg)	421	515	556	845
Autonomia (km)	800	877	822	815

Tabela 15 - Valores dos modelos elétricos. Elaborado com dados de [94-98].

Modelo	Smart EQ Forfour 2019	Renault ZOE R90 2019	BMW i3s 2019	Nissan Leaf Acenta 2019	Mercedes Benz EQC 400 4MATIC 2019
Potência máxima (cv)	82	92	183	149	409
Binário (Nm/rpm)	160	220	270	320	765
Emissões de CO ₂ (g/km)	0	0	0	0	0
Consumo gasolina (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100 km)	13,2	0,168	16,2	0,206	22,2
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100 km)	14,0	0,168	16,5	0,206	19,7
Consumo H ₂ (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Velocidade máxima (km/h)	130	135	160	144	180
Peso próprio (kg)	1200	1480	1340	1557	2495
Capacidade de carga (kg)	360	425	425	435	500
Autonomia (km)	155	300	260	389	471

Tabela 16 - Valores dos modelos híbridos. Elaborado com dados de [99-102].

Modelo	Volkswagen Golf GTE 2019	BMW 530e iPerformance Berlina 2019	Porsche Cayenne E- Hybrid 2019	BMW i8 Coupé 2019
Potência máxima (cv)	204	252	462	374
Binário (Nm/rpm)	350	290	700	320
Emissões de CO ₂ (g/km)	36	46	78	42
Consumo gasolina (urbano) (l/100 km)	1,8	2,4	3,4	1,8
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100 km)	1,6	2,0	3,2	1,8
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100 km)	12,0	14,1	20,9	14,0
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100 km)	11,4	13,1	20,6	14,0
Consumo H ₂ (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-
Velocidade máxima (km/h)	222	140	253	250
Peso próprio (kg)	1615	1770	2370	1610
Capacidade de carga (kg)	399	410	735	385
Autonomia (km)	883	46	815	440

Tabela 17 - Valores dos modelos a célula de combustível. Elaborado com dados de [103-106].

Modelo	Honda Clarity Fuel Cell 2019	Toyota Mirai Fuel Cell EV 2019	Mercedes-Benz GLC F-Cell
Potência máxima (cv)	176	155	211
Binário (Nm/rpm)	300	335	365
Emissões de CO ₂ (g/km)	0	0	0
Consumo gasolina (urbano) (l/100 km)	-	-	-
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100 km)	-	-	13,7
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100 km)	-	-	13,7
Consumo H ₂ (urbano) (l/100 km)	0,13	0,14	0,34
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100 km)	0,14	0,14	0,34
Velocidade máxima (km/h)	165	175	160
Peso próprio (kg)	1875	1848	1735
Capacidade de carga (kg)	334	362	550
Autonomia (km)	579	502	430

3.8 Cálculo dos índices de sustentabilidade por modelo

Com todos os dados recolhidos, fórmula estruturadas e métodos de cálculo dos coeficientes definidos, tornou-se possível fazer todos os cálculos para conceder aos modelos um valor para o Índice de Sustentabilidade (Is).

3.8.1 Cálculo dos coeficientes

Para o cálculo dos coeficientes, o primeiro passo é definir a estrutura da hierarquia.

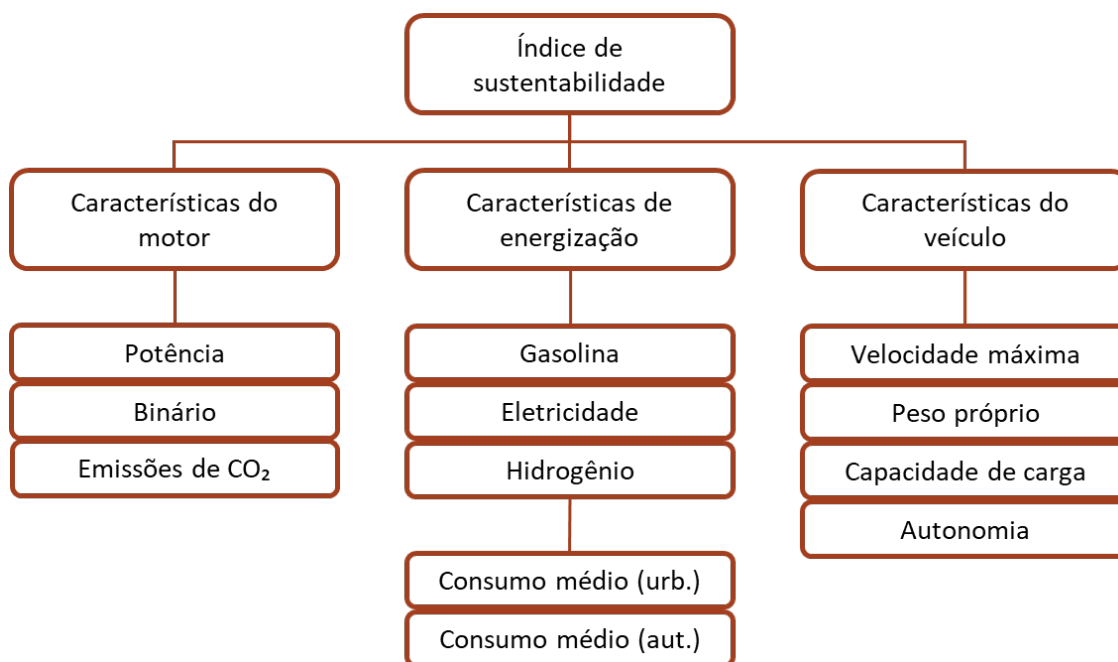


Figura 39 - Hierarquia do AHP [autor].

Com a hierarquia totalmente definida, torna-se possível construir as matrizes de comparação dos critérios principais (de primeiro nível), e dos subcritérios. Os cálculos foram desenvolvidos em folha de cálculo do MS Excel®, juntamente com os valores de λ_{\max} , IC e RC.

Tabela 18 - Matriz de comparação dos critérios [autor].

	Características do motor	Características de energização	Características do veículo	λ
Características do motor	1,00	2,00	5,00	0,5813
Características de energização	0,50	1,00	3,00	0,3092
Características do veículo	0,20	0,33	1,00	0,1096
RC				0,0042

Tabela 19 - Matriz dos subcritérios de motor [autor].

	Potência	Binário	Emissões de CO ₂	λ
Potência	1,00	2,00	0,14	0,1374
Binário	0,50	1,00	0,13	0,0828
Emissões de CO ₂	7,00	8,00	1,00	0,7798
RC				0,0577

Tabela 20 - Matriz dos subcritérios de energização [autor].

	Gasolina	Eletricidade	Hidrogénio	λ
Gasolina	1,00	0,13	0,20	0,0683
Eletricidade	8,00	1,00	3,00	0,6571
Hidrogénio	5,00	0,33	1,00	0,2746
RC			0,0580	

Tabela 21 - Matriz dos subcritérios de energização [autor].

	Velocidade máxima	Peso próprio	Capacidade de carga	Autonomia	λ
Velocidade máxima	1,00	4,00	6,00	3,00	0,5395
Peso próprio	0,25	1,00	2,00	0,33	0,1218
Capacidade de carga	0,17	0,50	1,00	0,25	0,0714
Autonomia	0,33	3,00	4,00	1,00	0,2673
RC				0,0490	

Tabela 22 - Matriz dos subcritérios de consumo [autor].

	Consumo urbano	Consumo autoestrada	λ
Consumo urbano	1,00	0,50	0,3333
Consumo autoestrada	2,00	1,00	0,6667

Com todos os pesos calculados em todos os nível, pode-se definir os coeficientes através da multiplicação dos pesos entre os níveis, sempre respeitando a hierarquia.

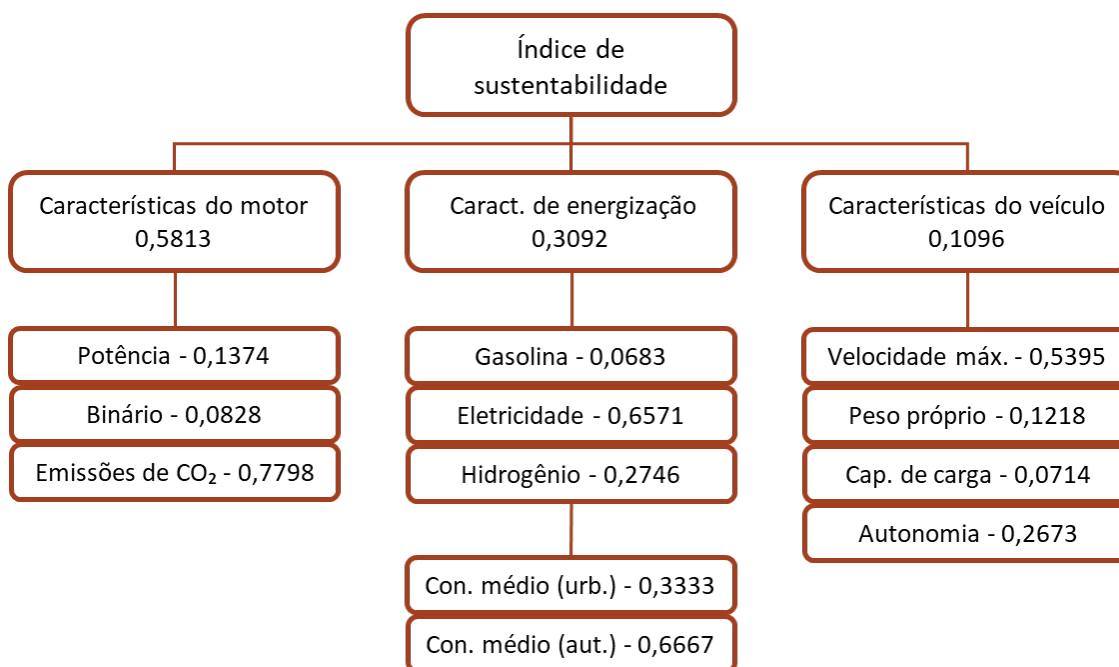


Figura 40 - Hierarquia com os respectivos valores [autor].

Realizando todos os cálculos entre níveis para definir os coeficientes, define os valores como:

Tabela 23 - Valores de coeficientes por indicador [autor].

Indicador	Coeficiente	Valores
P	q_1	0,0799
Bin	q_2	0,0481
ECO ₂	q_3	0,4533
G _{urb}	q_4	0,0070
G _{aut}	q_5	0,0141
E _{urb}	q_6	0,0677
E _{aut}	q_7	0,1354
H _{2urb}	q_8	0,0283
H _{2aut}	q_9	0,0566
V _{Max}	q_{10}	0,0591
W	q_{11}	0,0133
Carg	q_{12}	0,0078
Aut ⁺	q_{13}	0,0293

Tendo todos os pesos dos coeficientes dentro da hierarquia, para a próxima etapa ir-se-á normalizar os valores dos indicadores.

3.8.2 Normalização dos valores

Para normalizar os dados levantados de cada modelo – uma vez que são dados em diferentes unidades – os cálculos seguiram as fórmulas previamente apresentadas em 3.4 e 3.5. Os cálculos desse procedimento também se desenvolveram em folha de cálculo MS Excel®.

Tabela 24 - Valores normalizados dos modelos a gasolina [autor].

Modelo	Seat Ibiza Reference 2019 1.0 MPI	VW Golf Stream 2019 1.0 TSI	Jaguar XF Berlina 2019 25t 2.0 Turbo	Porsche Cayenne 2019
Potência máxima (cv)	1,0000	0,9084	0,5550	0,3194
Binário (Nm/rpm)	1,0000	0,8433	0,5970	0,4701
Emissões de CO ₂ (g/km)	0,4667	0,3905	0,1143	0,0000
Consumo gasolina (urbano) (l/100 km)	0,5743	0,6337	0,0000	0,0495
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100 km)	0,5714	0,4762	0,1429	0,0000
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100 km)	-	-	-	-
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100 km)	-	-	-	-
Consumo H ₂ (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-
Velocidade máxima (km/h)	0,6829	0,4472	0,0732	0,0650
Peso próprio (kg)	1,0000	0,8954	0,5666	0,3116
Capacidade de carga (kg)	0,8297	0,6458	0,5656	0,0000
Autonomia (km)	0,9008	0,9928	0,9271	0,9188

Tabela 25 - Valores normalizados dos modelos elétricos [autor].

Modelo	Smart EQ Forfour 2019	Renault ZOE R90 2019	BMW i3s 2019	Nissan Leaf Acenta 2019	Mercedes Benz EQC 400 4MATIC 2019
Potência máxima (cv)	0,9948	0,9686	0,7304	0,8194	0,1387
Binário (Nm/rpm)	0,9030	0,8134	0,7388	0,6642	0,0000
Emissões de CO ₂ (g/km)	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Consumo gasolina (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100 km)	0,4085	1,0000	0,2723	0,9983	0,0000
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100 km)	0,3230	1,0000	0,2007	0,9981	0,0440
Consumo H ₂ (urbano) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100 km)	-	-	-	-	-
Velocidade máxima (km/h)	1,0000	0,9593	0,7561	0,8862	0,5935
Peso próprio (kg)	0,9277	0,7271	0,8274	0,6719	0,0000
Capacidade de carga (kg)	0,9491	0,8219	0,8219	0,8023	0,6751
Autonomia (km)	0,1302	0,3035	0,2557	0,4098	0,5078

Tabela 26 - Valores normalizados dos modelos híbridos [autor].

Modelo	VW Golf GTE 2019	BMW 530e iPerformance Berlina 2019	Porsche Cayenne E- Hybrid 2019	BMW i8 Coupé 2019
Potência máxima (cv)	0,6754	0,5497	0,0000	0,2304
Binário (Nm/rpm)	0,6194	0,7090	0,0970	0,6642
Emissões de CO ₂ (g/km)	0,8286	0,7810	0,6286	0,8000
Consumo gasolina (urbano) (l/100km)	1,0000	0,9406	0,8416	1,0000
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100km)	1,0000	0,9365	0,7460	0,9683
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100km)	0,4630	0,3676	0,0590	0,3722
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100km)	0,4503	0,3671	0,0000	0,3230
Consumo H ₂ (urbano) (l/100km)	-	-	-	-
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100km)	-	-	-	-
Velocidade máxima (km/h)	0,2520	0,9187	0,0000	0,0244
Peso próprio (kg)	0,6304	0,5193	0,0895	0,6340
Capacidade de carga (kg)	0,8728	0,8513	0,2153	0,9002
Autonomia (km)	1,0000	0,0000	0,9188	0,4707

Tabela 27 - Valores normalizados dos modelos a célula de combustível [autor].

Modelo	Honda Clarity Fuel Cell 2019	Toyota Mirai Fuel Cell EV 2019	Mercedes-Benz GLC F-Cell
Potência máxima (cv)	0,7487	0,8037	0,6571
Binário (Nm/rpm)	0,6940	0,6418	0,5970
Emissões de CO ₂ (g/km)	1,0000	1,0000	1,0000
Consumo gasolina (urbano) (l/100km)	-	-	-
Consumo gasolina (autoestrada) (l/100km)	-	-	-
Consumo elétrico (urbano) (kWh/100km)	-	-	0,3858
Consumo elétrico (autoestrada) (kWh/100km)	-	-	0,3377
Consumo H ₂ (urbano) (l/100km)	1,0000	0,9524	0,0000
Consumo H ₂ (autoestrada) (l/100km)	1,0000	1,0000	0,0000
Velocidade máxima (km/h)	0,7154	0,6341	0,7561
Peso próprio (kg)	0,4441	0,4635	0,5444
Capacidade de carga (kg)	1,0000	0,9452	0,5773
Autonomia (km)	0,6368	0,5448	0,4588

3.8.3 Cálculo do índice de sustentabilidade por modelo e classificação

Agora que todos os valores dos coeficientes estão desenvolvidos, e os valores dos indicadores estão normalizados, torna-se possível a aplicação da fórmula 3.6 para o cálculo do Índice de Sustentabilidade, o que dá origem aos seguintes índices:

Tabela 28 - Valores e classificação dos modelos de acordo com Is [autor].

Matriz energética	Modelo	Is	Classificação
Gasolina	Seat Ibiza Reference 2019 1.0 MPI	0,4382	Amarelo
	VW Golf Stream 2019 1.0 TSI	0,3738	Laranja
	Jaguar XF Berlina 2019 25t 2.0 Turbo	0,1703	Vermelho
	Porsche Cayenne 2019	0,0834	Vermelho
Eletricidade	Smart EQ Forfour 2019	0,7303	Verde
	Renault Zoe R90 2019	0,8547	Azul
	BMW i3s 2019	0,6624	Verde
	Nissan Leaf Acenta 2019	0,8331	Azul
	Mercedes Benz EQC 400 4MATIC 2019	0,5256	Amarelo
Híbrido	VW Golf GTE 2019	0,6322	Verde
	BMW 530e iPerformance Berlina 2019	0,5943	Amarelo
	Porsche Cayenne E-Hybrid 2019	0,3398	Laranja
	BMW i8 Coupé 2019	0,5333	Amarelo
Fuel Cell	Honda Clarity Fuel Cell 2019	0,7061	Verde
	Toyota Mirai Fuel Cell EV 2019	0,6989	Verde
	Mercedes-Benz GLC F-Cell	0,6763	Verde

3.9 Análise dos valores obtidos

Após realizados todos os cálculos e classificados os valores obtidos de acordo com a escala criada, torna-se agora necessário analisar e interpretar os que esses valores transmitem e, para isso, foram gerados dois gráficos para ilustrar esta análise.

Na Figura 41, é possível identificar que os modelos com motores de combustão interna com motorização a gasolina, são os que obtiveram os menores índices, sendo que dois deles foram os que obtiveram os piores valores no geral e ficaram na escala vermelha da classificação.

É possível ver também que de entre os cinco piores valores, quatro deles foram dos modelos com MCI a gasolina. O modelo que fica entre os veículos providos de MCI é um modelo que, apesar de ser híbrido, mantém um MCI de alta potência.

Considerando agora os modelos de melhor índice, pode ser visto que os três com os melhores índices são elétricos, sendo que dois deles atingiram a classificação de nível azul. Vale a pena mencionar que os modelos com células de combustível obtiveram valores positivos, uma vez que todos os três modelos selecionados ficaram entre os seis melhores modelos, sendo que todos ficaram com classificação verde.

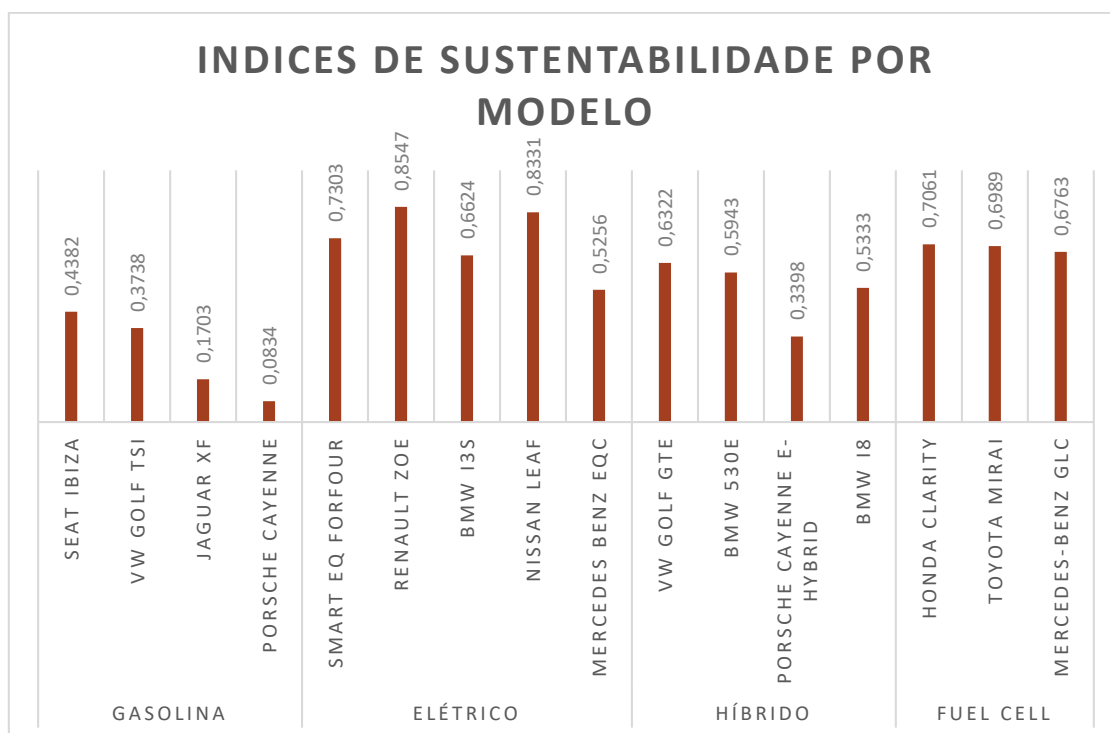


Figura 41 - Valores de Is por modelo [Autor]

De salientar o Is obtido pelo BMW 530e iPerformance Berlina 2019, pois o valor apresentado de autonomia relativa a esse modelo foi a autonomia com o uso exclusivo do modo elétrico, uma vez que um valor de autonomia utilizando os sistemas de acionamento em conjunto não foi conseguido. Com um valor de autonomia total, o Is do modelo subiria um nível na classificação, saindo do nível amarelo para o nível verde.

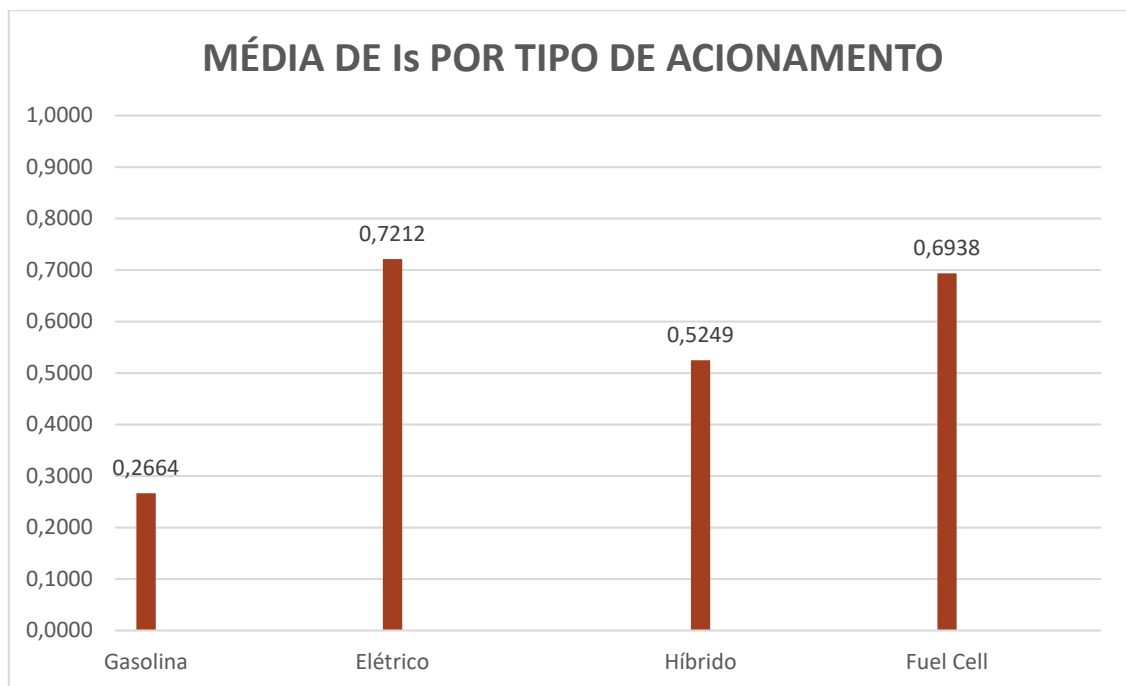


Figura 42 - Média dos Índices de Sustentabilidade por tipo de acionamento [autor].

O gráfico da Figura 42 foi obtido através da média dos valores dos Índices separados por tipo de acionamento, e com esses valores encontrados pode-se tirar mais conclusões significativas.

O primeiro ponto a ser levado em consideração é que os modelos equipados com MCI a gasolina são os menos sustentáveis, pelo seu elevado consumo de combustível e altíssimos índices de emissões de CO₂. Se se analisar o índice médio obtido, a classificação ficaria no nível laranja, porém muito próxima de valores necessários para ser classificado no nível vermelho.

O segundo ponto é que os modelos híbridos atingem bons níveis relativos ao Índice de Sustentabilidade, principalmente se comparados com os modelos equipados com MCI, já que o consumo de combustível e emissões de poluentes são muito reduzidos. Porém, a classificação não se situa tão próxima do nível verde, ficando quase a meio do nível amarelo, ou seja, quase na posição central de toda a escala, o que acaba por representar um Índice não tão bom.

Como terceiro ponto pode-se concluir que os modelos puramente elétricos e com células de combustível obtiveram os maiores índices, de forma geral, por não apresentarem quaisquer valores para emissões de CO₂. Outro fator a ser destacado relativamente ao elevado Is atingido por esses modelos, principalmente os elétricos, são os maiores valores apresentados de autonomia, referente à melhoria da tecnologia de armazenamento de energia por parte das baterias. Assim, ambos os acionamentos conseguiram atingir pelo menos classificação de nível verde.

Abaixo apresenta-se uma tabela com a classificação dos valores por tipo de acionamento.

Tabela 29 - Valores e classificação de acordo com o tipo de acionamento [autor].

Matriz energética	Is	Classificação
Gasolina	0,2664	
Eletricidade	0,7212	
Híbrido	0,5249	
Fuel Cell	0,6938	

CONCLUSÕES

4.1 Análise do mercado e perspectivas para o futuro

4.2 Conclusões finais

4 CONCLUSÕES

4.1 Análise do mercado e perspectivas para o futuro

É perceptível que a conceptualização de novos modelos de automóveis com acionamentos que diferem do motor de combustão interno se deu por duas questões principais: a primeira está relacionada com a quantidade de gases poluentes que é emitida através destas máquinas, em segundo pelo motivo que os combustíveis fósseis são uma fonte não renovável e, portanto, uma fonte de energia que terá tendência a esgotar-se. Então, são necessários métodos de locomoção alternativos que possam chegar ao mercado de forma viável, facilitando o acesso à população em geral.

Atualmente, as montadoras mais tradicionais, como Mercedes-Benz, BMW, Jaguar, Jaguar e Chevrolet, assim como algumas com menos história, como a Tesla e Faraday Future, especializadas em veículos puramente elétricos, têm investido firmemente no desenvolvimento de tecnologias de acionamento que minimizem o uso de combustíveis fósseis, ou o excluam por completo.

Analisando os modelos selecionados, pode-se ver que aqueles que usam como acionamento somente motores elétricos ou que têm o auxílio de células de combustível, são modelos isentos de emissão de gases causadores do efeito de estufa. Porém, antes de afirmar que estes são os melhores modelos para serem utilizados imediatamente, há fatores que devemos levar em consideração.

A maturidade da tecnologia é o primeiro fator. Motores elétricos, células de combustível e baterias, são tecnologias conhecidas já há muito tempo, contudo, nesse contexto, existem problemas de capacidade de armazenamento das baterias atuais. Obviamente a tecnologia está sendo melhorada, e a sua capacidade de armazenamento aumentada – a densidade energética das baterias de lítio estão a aumentar essa característica em índices que variam entre 5-8% [107] – e isto é um fator que influencia diretamente a autonomia dos automóveis movidos de forma exclusivamente elétrica.

Mas não é só isto. Pode ser visto que muito está sendo feito para que a tecnologia seja melhorada. Baterias com capacidade cada vez maior estão sendo desenvolvidas, como exposto pelo fabricante A123 [41]. E a evolução é notável se analisarmos dois modelos do mesmo carro com acionamento puramente elétrico de anos diferentes. O Nissan Leaf do ano de 2010 foi anunciado com autonomia de 160 km [108], já o mesmo modelo da marca do ano de 2019 apresenta autonomia de 389 km [97].

O mercado, os fabricantes e o público reagem de forma positiva, e desta forma a tecnologia ganha força para se desenvolver e crescer cada vez mais.

Os fabricantes investem cada vez mais na tecnologia. Em janeiro de 2018, a Ford anunciou que iria dobrar os seus investimentos no desenvolvimento e produção de carros elétricos, chegando à casa dos 11 milhões de dólares americanos até ao ano de 2022, e lançar 40 modelos híbridos e puramente elétricos até essa data. Em 2017, a Volvo comunicou que a partir deste ano de 2019, todos os novos modelos a serem produzidos serão elétricos, tornando-a assim a primeira a estipular uma data a abandonar os motores de combustão [109]. Para além do desenvolvimento dos próprios veículos, existem notícias animadoras para o setor, tais como: “Grupo BMW, Daimler AG, Ford e Grupo Volkswagen, com Audi e Porsche, planeiam *“joint venture”* em rede de recarga ultrarrápida de alta potência para carros elétricos nas principais rodovias da Europa” [110], e também quando a Nissan, através do seu diretor geral, António Melica, anuncia que investirá dois milhões de euros para que sejam instalados 100 pontos de carga rápida somente em Portugal até ao ano de 2020 [111]. E em relação aos automóveis com células de combustível, a falta de postos para reabastecimento contribui para o atraso na difusão deste modelo de acionamento. Entretanto, a indústria já se movimenta para investir e fornecer uma rede de reabastecimento de hidrogénio [112].

O mercado local mostra uma agradável reação às novas tecnologias. Só em 2018 os portugueses compraram mais carros elétricos do que em todos os sete anos anteriores. Além do crescimento do número de vendas, cuja variação positiva é de 168,7% nos modelos elétricos, houve uma redução de 10,8% nas vendas de carros a gasóleo, que agora ocupam uma menor parte do mercado português de forma geral, como mostrado no gráfico da Figura 43 [113].

A nível mundial, é possível ver números positivos, pois a frota de automóveis elétricos apresentou um crescimento significativo no primeiro semestre de 2018. Até este período, o número de carros elétricos chegou a 3,2 milhões de unidades no início do ano de 2018, tendo aumento cerca de 55% em relação ao mesmo período do ano de 2017 [109].

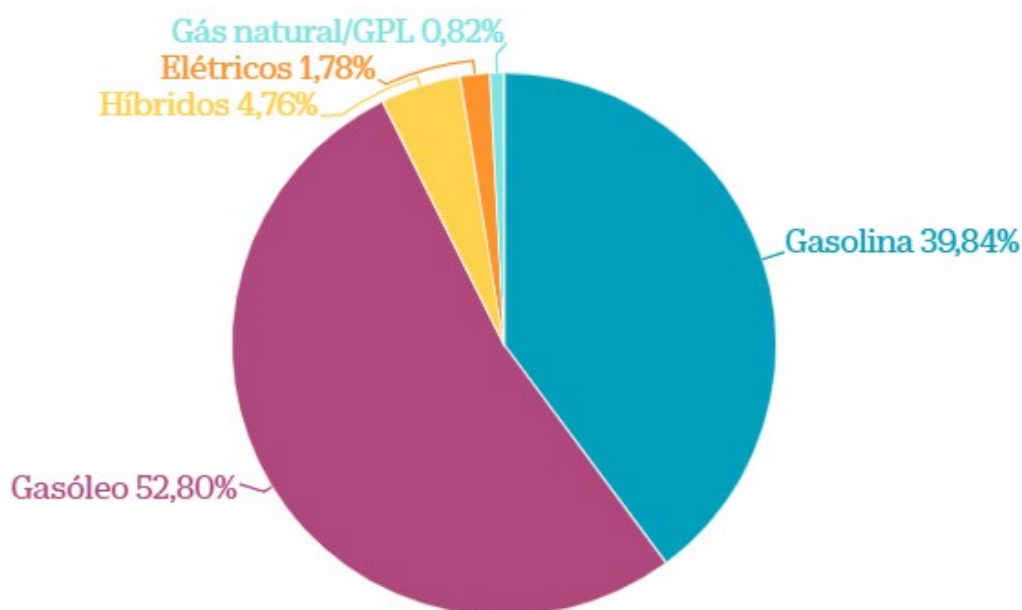


Figura 43 - Gráfico do mercado de carros português em 2018 [113].

Vemos a reação do público, que de certa forma traduz a vontade do mercado. Os clientes sentem-se satisfeitos com a nova tecnologia elétrica, podendo isso resultar de qualquer um dos seguintes critérios: a redução de ruído dos automóveis, a isenção na emissão de GEE, a menor complexidade na manutenção, o menor gasto com o combustível, uma vez que o gasto com eletricidade pode chegar a ser seis vezes mais baixo que com a gasolina e 4,5 vezes mais económico comparativamente ao gasóleo [114], ou com o facto de muitos países oferecerem estes veículos com redução ou isenção total dos impostos na compra.

Por último, mas não menos importante, devem ser levados em consideração os métodos de produção de energia elétrica.

Atualmente, tem-se investido cada vez mais na produção de energia elétrica limpa, livre de emissões de GEE e outros resíduos, através de hidroelétricas, parques eólicos, geotérmicas e energia solar, tendo sido reduzido o uso de centrais termoelétricas. Em Portugal, a EDP anunciou que 55% de toda energia distribuída teve fonte renovável no último trimestre do ano de 2018 [115]. A APREN (Associação de Energias Renováveis), mostra que no primeiro quadrimestre de 2019 a eletricidade produzida através de fontes renováveis em Portugal Continental representa quase 60% [116]. E, de volta a 2018, a distribuidora Redes Energéticas Nacionais (REN) afirmou que a produção de energia elétrica do mês de março, através de fontes limpas, chegou a 4.812 GWh, ultrapassando a procura nacional total de 4.647 GWh [117].

4.2 Conclusões finais

Após todos os estudos apresentados, é possível analisar quais os melhores sistemas a serem utilizados no presente e no futuro.

Se levarmos em consideração que o objetivo principal deste trabalho é apontar o melhor modelo para ajudar a reduzir a quantidade de emissões de gases poluente, então é possível referir que os automóveis que funcionam exclusivamente com motor de combustão interna serão totalmente substituídos em breve. Este é o modelo que emite mais gases poluentes entre os apresentados, mas ainda apresenta o maior número de usuários na atualidade. É o modo de transporte menos eficaz e mais poluente entre todos os demais, o que pode agravar a redução nas reservas de combustíveis à base de petróleo rapidamente, que são uma fonte esgotável de energia.

Os modelos híbridos mostram-se uma ótima solução para o presente, pois conseguem juntar as vantagens dos automóveis com MCI e elétricos. Aqui temos a alta densidade energética presente nos combustíveis, mas também a possibilidade de ter um veículo que funcione eletricamente por mais tempo, reduzindo o montante de gás que é emitido pelos motores de combustão. Porém, como o objetivo é reduzir totalmente as emissões, estes modelos são uma boa alternativa, mas temporária, até que os modelos elétricos consigam ser melhor desenvolvidos e deixar os seus problemas energéticos para trás.

Os modelos puramente elétricos mostram ser a melhor alternativa para um futuro próximo, porque este modelo de acionamento não promove emissões de poluentes e a sua fonte energética é consideravelmente mais barata que os combustíveis emissores de gases poluentes. Segundo, por usar uma tecnologia mais econômica e mais segura, que aproveita muito melhor a sua fonte de energia, alcançando rendimento duas ou até três vezes superior ao dos veículos movidos através de MCI. Uma outra vantagem é que passa a ser possível o recarregamento residencial. O único problema aqui é o ponto de desenvolvimento dos modelos elétricos, pois ainda apresentam autonomia relativamente baixa, em comparação com os modelos híbridos e com os movidos a MCI, pouca capacidade de armazenamento de energia e muito tempo de carregamento para os modelos *plug-in*. Enquanto um automóvel elétrico demora horas a carregar, um tanque de combustível é cheio em menos de 5 minutos.

Células de combustível mostram ser uma ótima alternativa para a produção de energia elétrica, quando os consumos são relativamente modestos como no automóvel. Apresentam densidade energética relativamente alta, boa potência específica, principalmente quando o combustível utilizado é o hidrogénio, e com a melhoria da tecnologia, a sua *performance* tende a ser cada vez melhor. O maior problema desses modelos é que, como o conceito ainda é muito recente, o uso fica limitado por diversos fatores. Primeiro pela produção de hidrogénio, que é muito difícil e usa outra fonte de energia, que na maioria das vezes não é uma fonte renovável. Segundo, pelo armazenamento e transporte do hidrogénio, que ainda é difícil e oferece riscos, como

alta pressão no armazenamento, quando comprimido. Terceiro, pela falta de postos de abastecimento de hidrogénio para suprir a necessidade da procura de uma frota de carros como a atualmente existente. Quando estes entraves forem ultrapassados, torna-se uma excelente alternativa, no futuro, em conjunto com os veículos elétricos, já que como resíduo temos apenas água, que pode ser reaproveitada dentro do próprio veículo.

Após analisar todos os modelos, e contextualizar com o cenário económico-político atual, pode-se dizer que a abordagem adotada pelos governos e fabricantes, é de transição tecnológica. Os carros com motores de combustão interna, seja a gasolina ou gasóleo, apesar de serem os detentores da maior fatia do mercado, eventualmente vão deixar de existir (governos e montadoras europeias já definiram datas em que finalizarão a produção de veículos com motores de combustão interna). O momento é de transição para o uso de energia elétrica como forma de acionamento. Os modelos híbridos surgem como alternativa para o mercado, minimizando alguns dos problemas apresentados pelos veículos elétricos, não podendo ser excluídos por completo enquanto a tecnologia de elétricos amadurece, para que nos permita ter maior autonomia e carregadores mais rápidos, e uma rede de abastecimento mais eficaz para atender a toda a procura.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Livros, artigos, normas, catálogos, notícias e páginas da internet

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Livros, artigos, normas, catálogos, notícias e páginas da internet

- [1] GUEVANE, Eleutério. População mundial atingiu 7,6 bilhões de habitantes. In: DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. ONU News. 2017. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2017/06/1589091-populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes>>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [2] ROCHA, Nuno Miguel Martins da. Análise técnica e económica-financeira de um sistema de abastecimento de veículos zero emissões integrando um sistema fotovoltaico. 2012. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto, 2012.
- [3] EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; GAY, Sebastien E.; EMADI, Ali. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, Theory and Design. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [4] MARTINS, Jorge; BRITO, Francisco. Carros elétricos. 1. ed. Porto: Publindústria, 2011.
- [5] U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Energy use for transportation. In: USE OF ENERGY IN THE UNITED STATES EXPLAINED. U.S. Energy Information Administration. 2018. Disponível em: <https://www.eia.gov/Energyexplained/?page=us_energy_transportation>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [6] BRUNETTI, Franco. Motores de combustão interna, 3. ed. São Paulo: Blucher, 2013, v.1.
- [7] MARTINS, Jorge. Motores de combustão interna. 2. ed. Porto: Publindústria, 2006.
- [8] BASILIO, Rafael. Como funciona um motor de um carro? In: A visão de um engenheiro apaixonado por carros, 2011. Disponível em: <<https://f1visaotecnica.wordpress.com/2011/01/05/como-funciona-um-motor-de-um-carro/>>. Acesso em: 29 janeiro 2019.
- [9] CORCETTI, Liniker Lima de Araújo. Indústria automobilística: comparando sistemas de acionamentos dos automóveis atuais. Beau Bassin: Novas Edições Acadêmicas. 2018.
- [10] FEDERAL-MOGUL. EcoTough® coated piston. In: PRODUCTS. Federal Mogul. 2019. Disponível em: <<http://www.federalmogul.com/en-US/OE/Products/Pages/Product-Details.aspx?CategoryId=40&SubCategoryId=200&ProductId=217>>. Acesso em: 29 janeiro 2019.
- [11] SAENZ. Connecting rods. In: Products. Saenz. 2019. Disponível em: <<http://www.saenzgroup.net/product-connecting-rods>>. Acesso em: 29 janeiro 2019.
- [12] SEAT. Cambota. In: Glossário. Seat. 2019. Disponível em: <<https://www.seat.pt/glossario/letras/c/cambota.html>>. Acesso em: 29 janeiro 2019.

- [13] EATON. Volante do Motor. In: VOLANTE DO MOTOR. Eaton. 2019. Disponível em: <http://www.eaton.com.br/EatonBR/ProductsSolutions/Vehicle/ProductsServices/Embreaengens/PCT_488230>. Acesso em: 29 janeiro 2019.
- [14] GNATICOV, Cristian. Mazda's new turbo rotary engine reportedly coming in 2017. In: CONCEPTS. Carscoops. 2015. Disponível em: <<http://www.carscoops.com/2015/11/mazdas-new-turbo-rotary-engine.html>>. Acesso em: 29 janeiro 2019.
- [15] TISSHAW, Mark. Mazda RX-Vision rotary-engined sports car concept revealed. In: CAR NEWS. Autocar. 2015. Disponível em: <<http://www.autocar.co.uk/car-news/motor-shows-tokyo-motor-show/mazda-rx-vision-rotary-engined-sports-car-concept-revealed>>. Acesso em: 29 janeiro 2019.
- [16] MOSEMAN, Andrew. Second Spin: The Mazda Rotary Engine Will Return. In: CARS TECHNOLOGY. Popular Mechanics. 2018. Disponível em: <<https://www.popularmechanics.com/cars/car-technology/a23564181/mazda-rotary-engine-return-range-extender/>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [17] SILVESTRO, Brian. The Mazda Rotary Engine Is Finally Coming Back. In: NEW CARS. Road & Track. 2018. Disponível em: <<https://www.roadandtrack.com/new-cars/future-cars/a23563167/mazda-rotary-engine-revived/>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [18] CARUSO, Ricardo. Técnica: motor Wankel e a teoria da rotatividade. In: BLOG DO CARUSO. Auto e técnica. 2014. Disponível em: <<http://autoetecnica.band.uol.com.br/index.php/tecnica-motor-wankel-e-a-teoria-da-rotatividade/>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [19] RAZÃO AUTOMÓVEL. "The King of Spin": a história dos motores Wankel na Mazda. In: AUTOPÉDIA. Razão Automóvel. 2015. Disponível em: <<http://www.razaoautomovel.com/2015/11/the-king-of-spin-retrocedemos-ao-primordios-do-motor-wankel>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [20] FALFARI, Stefania; BIANCHI, Gian Marco; CAZZOLI, Giulio; FORTE, Claudio; NEGRO, Sergio. Basics on Water Injection Process for Gasoline Engines. Energy Procedia, v. 148, p. 50-57, 2018.
- [21] VAUDREY, Alexandre. Thermodynamics of indirect water injection in internal combustion engines: theoretical assessment of the fresh mixture cooling effect. 2017.
- [22] BABU, A. R.; RAO, G. A. P.; PRASAD, T. H. Direct injection of water mist in an intake manifold spark ignition engine. International Journal of Automotive & Mechanical Engineering, v. 11, 2015.
- [23] LOPES, Gustavo Santos; FERREIRA, Janito Vaqueiro. ANÁLISE TERMODINÂMICA, CINEMÁTICA E DINÂMICA DE UM MOTOR COM TAXA DE COMPRESSÃO VARIÁVEL. Blucher Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 275-287, 2014.
- [24] INFINITI, The world's first production-ready variable compression ratio engine. In: VC-TURBO ENGINE. Infiniti. 2016. Disponível em: <<https://www.infiniti.ca/en/future-vehicles/vc-turbo-engine.html>>. Acesso em: 03 julho 2019.
- [25] MIZUNO, H. Nissan gasoline engine strategy for higher thermal efficiency. Combustion Engines, v. 56, 2017.

- [26] KOJIMA, Shuji; KIGA, Shinichi; MOTOKI, Katsuya; TAKAHASHI, Eiji; MATSUOKA, Kazuya. Development of a new 2L gasoline VC-Turbo engine with the world's first variable compression ratio technology. SAE Technical Paper, 2018.
- [27] EISAZADEH-FAR, Kian; YOUNKINS, Matthew. Fuel economy gains through dynamic-skip-fire in spark ignition engines. SAE Technical Paper, 2016.
- [28] WILCUTTS, Mark; SWITKES, Joshua; SHOST, Mark; TRIPATHI, Adya. Design and benefits of dynamic skip fire strategies for cylinder deactivated engines. SAE International Journal of Engines, v. 6, n. 1, p. 278-288, 2013.
- [29] BRENNAN, Daniel G.; NAIK, Sanjeev M. System and method for controlling spark timing when cylinders of an engine are deactivated to reduce noise and vibration. U.S. Patent n. 9,719,439, 1 ago. 2017.
- [30] RICHARDS, Adam J.; ROLLINGER, John Eric. System and method to activate and deactivate engine cylinders. U.S. Patent Application n. 10/077,726, 18 set. 2018.
- [31] CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 13, 2010, Rio de Janeiro, Biblioteca digital do BNDES, 2010, BNDES Setorial 32, p. 267-310.
- [32] GRUPO WEG – Unidade de Motores (Jaraguá do Sul, SC). W22 – Motor Elétrico Trifásico: catálogo técnico, mercado brasileiro. Santa Catarina, 2016. p. 33-41.
- [33] FRANCHI, C. M. Acionamentos Elétricos. 3. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.
- [34] MICHELIN. Michelin présente deux innovations pour les véhicules de demain. Faits marquants 2009, Clermont-Ferrand, p. 5, dezembro 2009.
- [35] LOVEDAY, Eric. Michelin's Active Wheel electric motor system begins trials in Renault Kangoo. In: ELECTRIC CARS. Green Car Reports. 2009. Disponível em: <http://www.greencarreports.com/news/1022134_michelins-active-wheel-electric-motor-system-begins-trials-in-renault-kangoos>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [36] VIJAYENTHIRAN, Viknesh. Michelin's Active Wheel technology in detail. In: NEWS, GADGETS. Motor Authority. 2008. Disponível em: <http://www.motorauthority.com/news/1030025_michelins-active-wheel-technology-in-detail>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [37] HARROP, Dr. Peter. In-Wheel motor for electric vehicles gaining market acceptance. In: EDITORIAL/OPINION. EV World. 2011. Disponível em: <<http://evworld.com/news.cfm?newsid=25224>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [38] MITSUBISHI MOTORS CORPORATION. Mitsubishi Motors to enter Lancer Evolution MIEV in Shikoku EV Rally 2005 - All-wheel drive using new type of in-wheel motor. In: CORPORATE. Mitsubishi. Disponível em: <<https://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/pressrelease/corporate/detail1321.html>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [39] HAHLON, M. Siemens VDO visualises the electric wheel hub motor. In: AUTOMOTIVE. New Atlas. 2006. Disponível em: <<http://newatlas.com/go/5996/>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.

- [40] FOGAÇA, J. R. V. Pilha de Daniell. In: ELETROQUÍMICA. Mundo Educação. 2016. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/pilha-daniell.htm>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [41] A123 SYSTEMS. 12V starter battery: ultraphosphate™ technology. In: TECHNOLOGY. A123 Systems. Disponível em: <http://www.a123systems.com/wp-content/uploads/12V-Starter-Battery-Flier_2016_Gen-3.pdf>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [42] MAXWELL TECHNOLOGY. Regenerative energy recovery. In: SOLUTIONS. Maxwell Technology. Disponível em: <<https://www.maxwell.com/solutions/transportation/auto/regenerative-braking-energy-recovery>>. Acesso em 30 janeiro 2019.
- [43] MAXWELL TECHNOLOGY. Cells. In: PRODUCTS. Maxwell Technology. Disponível em: <<https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/cells>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [44] VOLVO. Volvo Cars tests of flywheel technology confirm fuel savings of up to 25 per cent. In: PRESS RELEASE. Volvo. 2013. Disponível em: <<https://www.media.volvocars.com/us/en-us/media/pressreleases/48800>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [45] VOLVO. Volvo Car Corporation test flywheel technology – cuts fuel consumption with up to 20 percent. In: PRESS RELEASES. Volvo. 2011. Disponível em: <<https://www.media.volvocars.com/us/en-us/media/pressreleases/38273>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [46] CAMARGO, F. V. de; FRAGASSA, C.; PAVLOVIC, A.; MARTIGNANI, M. Analysis of the suspension design evolution in solar cars. FME Transactions, v. 45, n. 3, p. 394-404, 2017.
- [47] RIZZO, Gianfranco; ARSIE, Ivan; SORRENTINO, Marco. Solar energy for cars: perspectives, opportunities and problems. In: GTAA Meeting. 2010. p. 1-6.
- [48] RIZZO, Gianfranco. Automotive applications of solar energy. IFAC Proceedings Volumes, v. 43, n. 7, p. 174-185, 2010.
- [49] RIZZO, Gianfranco; ARSIE, Ivan; SORRENTINO, Marco. Hybrid solar vehicles. In: Solar Collectors and Panels, Theory and Applications. IntechOpen, 2010.
- [50] BMW. BMW wireless charger. In: SISTEMAS DE CARREGAMENTO BMW. BMW. Disponível em: <<https://www.bmw.com.br/pt/topics/fascination-bmw/visionary-mobility/carregamento.html#>>. Acesso em: 08 julho 2019.
- [51] AHMAD, Aqueel; ALAM, Mohammad Saad; CHABAAN, Rakan. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. IEEE Transactions on Transportation Electrification, v. 4, n. 1, p. 38-63, 2017.
- [52] LI, Siqi; MI, Chunting Chris. Wireless power transfer for electric vehicle applications. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, v. 3, n. 1, p. 4-17, 2014.
- [53] MUSAVI, Fariborz; EBERLE, Wilson. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. IET Power Electronics, v. 7, n. 1, p. 60-66, 2014.
- [54] CHEN, Feng; TAYLOR, Nathaniel; KRINGOS, Nicole. Electrification of roads: Opportunities and challenges. Applied Energy, v. 150, p. 109-119, 2015.

- [55] AGGELER, D.; CANALES, F.; ZELAYA-DE LA PARRA, H.; COCCIA, A.; BUTCHER, N.; APELDOORN, O. Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids. In: 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). IEEE, 2010. p. 1-8.
- [56] TAN, Longcheng; WU, Bin; RIVERA, Sebastian; YARAMASU, Venkata. Comprehensive DC power balance management in high-power three-level DC–DC converter for electric vehicle fast charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 31, n. 1, p. 89-100, 2015.
- [57] JI, Bifa; ZHANG, Fan; WU, Nanzhong; TANG, Yongbing. A Dual-Carbon Battery Based on Potassium-Ion Electrolyte. *Advanced Energy Materials*, v. 7, n. 20, p. 1700920, 2017.
- [58] MIYOSHI, Seiji; NAGANO, Hiroki; FUKUDA, Taro; KURIHARA, Takuya; WATANABE, Motonori; IDA, Shintaro; ISHIHARA, Tatsumi. Dual-carbon battery using high concentration LiPF₆ in dimethyl carbonate (DMC) electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 163, n. 7, p. A1206-A1213, 2016.
- [59] TOYOTA. 2018 Prius Surprisingly versatile. In: PRIUS. Toyota. 2019. Disponível em: <<http://www.toyota.com/prius/>>. Acesso em: 30 janeiro 2019.
- [60] CHEVROLET. Volt. In: Vehicles. Chevrolet. 2019. Disponível em: <<https://www.chevrolet.com/electric/volt-plug-in-hybrid>>. Acesso em 30 janeiro 2019.
- [61] CEMIG. Célula de Combustível. In: ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS. Cemig. 2019. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Paginas/celula_a_combustivel.aspx>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [62] NISSAN. In-house Fuel Cell Stack. In: FUTURE TECHNOLOGY. Nissan. 2019. Disponível em: <<https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/ifcs.html>>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [63] BRIGUGLIO, Nicola; ANDALORO, Laura; FERRARO, Marco; ANTONUCCI, Vincenzo. Fuel cell hybrid electric vehicles. In: *Electric Vehicles-The Benefits and Barriers*. IntechOpen, 2011.
- [64] ELECTROCELL. Como funciona a célula a combustível? In: O QUE É A CC?. Grupo Electrocell. 2019. Disponível em: <http://www.electrocell.com.br/oqueeacc_pt.htm>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [65] FCHEA. Fuel Cell Basics. In: FUEL CELLS & HYDROGEN. Fuel Cell and Hydrogen Energy Association. 2019. Disponível em: <<http://www.fchea.org/fuelcells/>>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [66] PEDROLO, Caroline. Hidrogênio. In: ELEMENTOS QUÍMICOS. InfoEscola. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/elementos-quimicos/hidrogenio/>>. Acesso em: 31 janeiro 2019.
- [67] NETO, Emilio Hoffman Gomes. Armazenamento de Hidrogênio. In: CEPE. Câmara de Comercio do Brasil. 2014. Disponível em: <<http://www.camarabrasil.org/site/pt/cepe/artigos/634-armazenamento-de-hidrogenio.html>>. Acesso em: 31 janeiro 2019.

- [68] STIER, William; CAMARGO, Luiz Gabriel; ÓSKARSSON, Finnbogi; JÓNSSON, Hannes. Hydrogen storage in magnesium based alloys. Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem, v. 50, n. 1, p. 15, 2005.
- [69] STEIL, M. C.; NOBREGA, S. D.; GEORGES, S.; GELIN, P.; UHLENBRUCK, S.; FONSECA, F. C. Durable direct ethanol anode-supported solid oxide fuel cell. Applied energy, v. 199, p. 180-186, 2017.
- [70] FIUZA, Raigenis da Paz, SILVA, Marcos Aurélio da, PONTES, Luiz Antônio Magalhães, TEIXEIRA, Leonardo Sena Gomes, BOAVENTURA, Jaime Soares. A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. Quím. Nova, São Paulo , v. 35, n. 8, p. 1635-1643, 2012.
- [71] VALDEZ, Glaucia; SILVA, Rodrigo Gestão ambiental e responsabilidade social: um estudo das ações realizadas nas montadoras de veículos sediadas no Brasil. Revista Magistro, v. 1, n. 13, 2016.
- [72] CAVALCANTI, Clóvis. Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável. Cortez; Fundação Joaquim Nabuco, 1995.
- [73] SEVERO, Eliana Andréa. Inovação e sustentabilidade ambiental nas empresas do arranjo produtivo local metalmeccânico automotivo da Serra Gaúcha. 2013. Caxias do Sul.
- [74] PEREIRA, Adriane Alice. O tripé da sustentabilidade: pequenas empresas mostram que ser responsável com o meio ambiente, com a sociedade e com o próprio negócio é simples, barato e urgente. LOCUS. 38-41. Setembro de 2007.
- [75] ARAÚJO, Geraldino; BUENO, Mirian; SOUSA, Adriana; MENDONÇA, Paulo Sérgio. Sustentabilidade empresarial: conceito e indicadores. Congresso Virtual Brasileiro de Administração. 2006. Campo Grande.
- [76] NORMAS TÉCNICAS. Série ISO 14000. In: ISO. Normas Técnicas. Disponível em: <<https://www.normastecnicas.com/iso/serie-iso-14000/>>. Acesso em: 09 fevereiro 2019.
- [77] ISO. ISO 14000 family - Environmental management. In: POPULAR STANDARDS. ISO. Disponível em: <<https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>>. Acesso em: 09 fevereiro 2019.
- [78] SANTOS, Jorge Marques dos. ISO 14001: a norma ambiental mais bem sucedida do mundo. Espaço Q. Caparica. Edição 117. Janeiro 2016.
- [79] SUSTAINBLE INNOVATION FORUM 2015. COP - What's it all about? In: ABOUT. Sustainable Innovation Forum 2015. 2015. Disponível em: <<http://www.cop21paris.org/about/cop21/>>. Acesso em 10 fevereiro 2019.
- [80] ONU. Acordo global sobre mudança do clima é adotado em Paris. In: COP21. ONUBR. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/cop21/>>. Acesso em: 10 fevereiro 2019.
- [81] LUSA. Europa aceita reduzir emissões poluentes dos novos automóveis em 35%. In: AUTOMÓVEL. Jornal de Negócios. 2018. Disponível em: <<https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/automovel/detalhe/europa-aceita-reduzir-emissoes-poluentes-dos-novos-automoveis-em-35>>. Acesso em: 10 fevereiro 2019.

- [82] REPÚBLICA PORTUGUESA. Cimeira de Paris sobre alterações climáticas marca «o início do fim da utilização dos combustíveis fósseis como fonte de energia». In: NOTÍCIAS. 2015. Disponível em: <<https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/noticia?i=20151218-mamb-ar-cop21>>. Acesso em: 10 fevereiro 2019.
- [83] CLEPA. COP 21 for All. In: PRESS RELEASE. CLEPA – European Association of Automotive Suppliers. 2015. Disponível em: <https://clepa.eu/wp-content/uploads/2015/12/20151130_PR_COP21.pdf>. Acesso em: 10 fevereiro 2019.
- [84] ADENE. Mobilidade. In: MOBILIDADE. Adene. 2019. Disponível em: <<https://www.adene.pt/mobilidade/>>. Acesso em: 10 fevereiro 2019.
- [85] SALVADO, Miguel; AZEVEDO, Susana; MATIAS, João; FERREIRA, Luís. Proposal of a sustainability index for the automotive industry. Sustainability. 7.2. 2015. 2113-2144.
- [86] VARGAS, Ricardo. Utilizando a programação multicritério (ahp) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. In: PMI Global Congress. 2010.
- [87] SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.
- [88] KBB. Por que estão os carros divididos em segmentos? In: NOTÍCIAS. SIC Volante. 2018. Disponível em: <<https://volantesic.pt/detalhes-noticia/carros-divididos-segmentos/?ID=726>>. Acesso em: 01 fevereiro 2019.
- [89] WLTP FACTS. What is wltip and how does it work? In: WHAT IS WLTP AND HOW DOES IT WORK? WLTP Facts. 2019. Disponível em: <http://wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/?gclid=CjwKCAiA4t_iBRApEiwAn-vt-4EgpsqcDiSxb8wD7hMEJrlwLYc-Aza_acXeYG0x-XPeBBMu80Y_CRoCDTgQAvD_BwE>. Disponível em: 01 fevereiro 2019.
- [90] SEAT. Novo Seat Ibiza. In: CONFIGURADOR. Seat. 2019. Disponível em: <https://configurador.seat.pt/seat-cc/desktop-desktop-001_DEFAULT-pt-normal.view?msk=2>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [91] VOLKSWAGEN. O Golf. In: CONFIGURADOR. Volkswagen. 2019. Disponível em: <<https://www.volkswagen.pt/app/configurador/vw-pt/pt/golf/30315/30426/stream?page=engine>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [92] JAGUAR XF BERLINA E XF SPORTBRAKE. In: CONFIGURE O SEU. Jaguar. 2019. Disponível em: <https://www.jaguarportugal.pt/Images/Jaguar-XF--1X260200000WPTPT01P_tcm640-668073.pdf?_ga=2.46572003.518631448.1558540256-1242785668.1558540256&_gac=1.54788441.1558540256.CjwKCAjw5pPnBRBJEiwAULZKvuprTdZ-4tZqBjQbrriSvq9IPTrYWaXbuzkmpHo723j9K8nKu0RtuBoCel8QAvD_BwE>. Acesso: 22 maio 2019.
- [93] PORSCHE. Modelos Cayenne. In: DOWNLOAD DE CATÁLOGOS. Porsche. 2019. Disponível em: <<https://www.porsche.com/portugal/models/cayenne/cayenne-models/cayenne-s/>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [94] SMART. Mais espaço para a mobilidade elétrica. In: DADOS TÉCNICOS. Smart. 2019. Disponível em: <<https://www.smart.com/pt/pt/index/smart-eq-forfour-453/technical-data.html#engine2>>. Acesso em: 22 maio 2019.

- [95] RENAULT. Novo Renault ZOE. In: CATÁLOGOS RENAULT. Renault. 2019. Disponível em: <<http://info.rnportugal.com/catalogos-renault/PDF/Catalogo-Renault-ZOE-ZE-40.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [96] BMW. Inspirado pelo futuro. Construído para o presente. In: DADOS TÉCNICOS. BMW. 2019. Disponível em: <<https://www.bmw.pt/pt/all-models/bmw-i/i3/2017/dados-tecnicos.html#tab-0>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [97] NISSAN. Novo Nissan Leaf. In: CONFIGURAR. Nissan. 2019. Disponível em: <<https://configurador.nissan.pt/novo-leaf>>. Acesso em 22 maio 2019.
- [98] MERCEDES-BENZ. The New EQC. In: Vehicles. Mercedes-Benz. 2019. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/vehicles/eqc-2019/>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [99] VOLKSWAGEN. O Golf GTE. In: CATÁLOGO GOLF GTE. Volkswagen. 2019. Disponível em: <https://viewer.ipaper.io/siva-s-a/volkswagen/catalogos/golf-gte/catalogo-volkswagen-golf-gte-2018/?page=1#>. Acesso em 22 maio 2019.
- [100] BMW. Radicalmente elétrico: BMW 530e híbrido plug-in. In: BMW Série 5 Berlina. BMW. 2019. Disponível em: <<https://www.bmw.pt/pt/all-models/5-series/sedan/2016/iperformance.html>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [101] PORSCHE. Modelos Cayenne. In: CAYENNE E-HYBRID. Porsche. 2019. Disponível em: <<https://www.porsche.com/portugal/models/cayenne/cayenne-models/cayenne-e-hybrid/>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [102] BMW. BMW i8 Coupé. In: DADOS TÉCNICOS. BMW. 2019. Disponível em: <<https://www.bmw.pt/pt/all-models/bmw-i/i8-coupe/2017/dados-tecnicos.html#tab-0>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [103] HONDA. 2018 Honda Clarity Fuel Cell. In: SPECIFICATIONS. Honda. 2019. Disponível em: <<https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell/specs-features-trim-comparison>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [104] TOYOTA. 2019 Toyota Mirai Fuel Cell Electric Vehicle. In: MIRAI. Toyota. 2019. Disponível em: <<https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [105] MERCEDES-BENZ. The Mercedes-Benz GLC F-Cell. In: VEHICLES. Mercedes-Benz. 2019. Disponível em: <https://www.mbusa.com/mercedes/future/model/model-Mercedes_Benz_GLC_F_Cell#module=future-gallery&submodule=future-gallery-0&gallery=UNIQUE-GALLERY-ID|0|0>. Acesso em: 22 maio 2019.
- [106] DAIMLER. The eco-balance of the Mercedes-Benz GLC F-CELL. In: MEDIA. Daimler. 2019. Disponível em: <<https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-eco-balance-of-the-Mercedes-Benz-GLC-F-CELL.xhtml?oid=42955635>>. Acesso em: 23 maio 2019.
- [107] ZEEV. Razões pelas quais o mercado de veículos elétricos vai acelerar. In: NOTÍCIAS. ZEEV. 2017. Disponível em: <<https://www.zeev.pt/razoes-pelas-quais-o-mercado-de-veiculos-electricos-vai-acelerar/>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.

- [108] PORTAL ENERGIA. Carro elétrico Nissan LEAF preços e autonomia. In: NOVAS TECNOLOGIAS. Portal Energia. 2010. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/carro-electrico-nissan-leaf-precos-e-autonomia/>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [109] IZO, Alexandre. Frota mundial de carros elétricos cresce 55% no primeiro semestre de 2018. In: NOTÍCIAS. Autoesporte. 2018. Disponível em: <<https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2018/08/frota-mundial-de-carros-eletricos-cresce-55-em-um-ano.html>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [110] FORD. Grupo BMW, Daimler AG, Ford e Grupo Volkswagen, com Audi e Porsche, planejam “joint venture” em rede de recarga ultrarrápida de alta potência para carros elétricos nas principais rodovias da Europa. In: NOTÍCIAS. Ford. 2016. Disponível em: <<https://media.ford.com/content/fordmedia/fsa/br/pt/news/2016/11/29/grupo-bmw--daimler-ag--ford-e-grupo-volkswagen--com-audi-e-porsc.html>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [111] MOURA, Carlos. Nissan investe em 100 postos de carga rápida em Portugal. In: AUTOMÓVEIS. Veículos Elétricos. 2019. Disponível em: <<http://revistaveiculoseletricos.pt/2019/02/07/nissan-investe-em-100-postos-de-carga-rapida-em-portugal/>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [112] LAVRADOR, Alfredo. Eléctricos sem limitações. Hidrogénio (finalmente) em Portugal. In: AUTO. Observador. 2018. Disponível em: <<https://observador.pt/2018/09/26/electricos-sem-limitacoes-hidrogenio-finalmente-em-portugal/>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [113] NUNES, D. F. Venderam-se mais carros elétricos este ano do que nos últimos sete. In: MERCADO AUTOMÓVEL. Dinheiro Vivo. 2018. Disponível em: <<https://www.dinheirovivo.pt/empresas/vendas-de-carros-a-gasoleo-cairam-quase-11-ate-novembro/>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [114] SILVA, Bárbara. Carro elétrico tem consumo seis vezes mais barato que a gasolina. In: MOBILIDADE ELÉTRICA. Dinheiro Vivo. 2018. Disponível em: <<https://www.dinheirovivo.pt/economia/carro-eletrico-tem-consumo-seis-vezes-mais-barato-que-a-gasolina/>>. Acesso em: 11 fevereiro 2019.
- [115] EDP. Origens da Eletricidade. In: ORIGEM DA ENERGIA. EDP. 2018. Disponível em: <<https://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>>. Acesso em: 25 maio 2019.
- [116] APREN. Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental (abril de 2019). In: ENERGIAS RENOVÁVEIS. APREN. 2019. Disponível em: <<https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>>. Acesso em: 25 maio 2019.
- [117] VORRATH, Sophie. Portugal alcança matriz elétrica totalmente renovável em março e suspende subsídios para fósseis. In: INTERNACIONAL. 2018. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/internacional/portugal-matriz-eletrica-totalmente-renovavel-marco-suspende-subsidios-fosseis-100418>>. Acesso em: 25 maio 2019.