

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROJETO DE GRADUAÇÃO**



**ESTUDO DE MOTORES DE FLUXO AXIAL APLICADOS  
AOS SISTEMAS DE TRACÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

**SARA ZAMBALDI FILGUEIRA PRATA**

**VITÓRIA – ES**

**MARÇO/2022**

**SARA ZAMBALDI FILGUEIRA PRATA**

**ESTUDO DE MOTORES DE FLUXO AXIAL APLICADOS  
AOS SISTEMAS DE TRACÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Sara Zambaldi Filgueira Prata**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

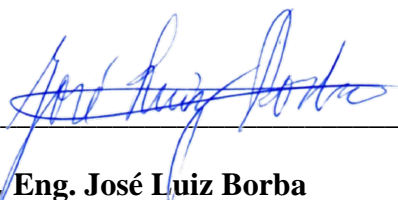
**VITÓRIA – ES**

**MARÇO/2022**

**SARA ZAMBALDI FILGUEIRA PRATA**

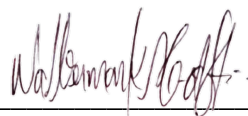
**ESTUDO DE MOTORES DE FLUXO AXIAL APLICADOS  
AOS SISTEMAS DE TRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Prof. Eng. José Luiz Borba**

**Orientador**



**Prof. Dr. Walbermark Marques dos  
Santos**

**Examinador**



**Eng. Leonardo de Castro Ferreira**

**Examinador**



**Sara Zambaldi Filgueira Prata**

**Vitória -ES. 25 de março de 2022**

## **Declarações**

Várias Marcas Registradas aparecem no decorrer deste trabalho.

Mais do que simplesmente listar esses nomes e informar quem possui seus direitos de exploração, ou ainda imprimir os logotipos delas, o autor declara estar utilizando tais nomes apenas para fins editoriais, em benefício exclusivo do dono da Marca Registrada, sem intenção de infringir as regras de sua utilização.

## Resumo

Neste trabalho é apresentado a introdução de estudos de motores de fluxo axial para aplicação em sistemas de tração de veículos elétricos com o objetivo de apresentação do projeto que será desenvolvido na disciplina Projeto de Graduação II. Nele, são abordados a necessidade de diminuição de emissão dos gases de efeito estufa mostrando que o setor de transporte é o setor que mais contribui para as emissões. Portanto, visando diminuir a emissão de gases no setor de transporte, é mostrado a importância de utilização de veículos elétricos.

Como os veículos elétricos têm muitos desafios em melhorar a sua performance, este trabalho visa a economia de energia e melhor desenvolvimento estudando os motores de fluxo axial na tração dos veículos elétricos. Para este trabalho não serão necessárias alocações de recursos visto que é um estudo e depende somente de materiais online.

Trata-se de um trabalho escrito para motivar o aprofundamento do assunto e o estabelecimento de uma base de conhecimento que permita o entendimento das questões fundamentais dos veículos elétricos alimentados por baterias. O texto também serve para concatenar as ideias por parte daqueles que já estudaram os assuntos abordados de forma isolada.

Palavra-chave: Veículos elétricos, motores elétricos de tração, motores radiais, motores axiais, baterias

## Abstract

This work presents the introduction of studies of axial flow motors for application in electric vehicle traction systems with the objective of presenting the project that will be developed in the course Graduation Project II. It addresses the need to reduce greenhouse gas emissions, showing that the transport sector is the sector that most contributes to emissions. Therefore, in order to reduce the emission of gases in the transport sector, the importance of using electric vehicles is shown.

As electric vehicles have many challenges in improving their performance, this work aims at energy savings and better development by studying axial flow motors in the traction of electric vehicles. There will be no need for resource allocations for this work as it is a study and depends only on online materials.

It is a work written to motivate the deepening of the subject and the establishment of a knowledge base that allows the understanding of the fundamental questions of electric vehicles powered by batteries. The text also serves to concatenate the ideas of those who have already studied the subjects addressed in isolation.

Keywords: Electric vehicles, electric traction motors, radial motors, axial motors, batteries

## **Dedicatória**

A todos que sonharam e ainda sonham junto  
comigo em busca de dias cada vez melhores.

## Agradecimentos

À Deus, o primeiro que preciso agradecer, pois Ele colocou em minha vida muitas pessoas em forma de presentes: através deles, me deu amor, carinho, alegria, ânimo, fé, força, sustento e esperança, uma mistura de sentimentos que contribuíram para que eu pudesse estar aqui hoje realizando um grande sonho de me tornar uma engenheira.

Ao meu marido Lucas Prata e à minha mãe Odisséa Zambaldi, de forma especial, que estão todos os dias ao meu lado e não medem esforços para me ajudar a carregar a carga do dia a dia e me sustentaram em tudo (e olha que tudo é muita coisa): meus guerreiros, nunca me cansarei de ser grata e cuidar de vocês para retribuir tudo o que são para mim.

Aos amigos e familiares, tanto os que estão presentes quanto aqueles que já se foram e deixaram saudades eternas. Foram muitos que contribuíram não só com o relacionamento interpessoal, mas também com o sustento financeiro.

Aos professores que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, em especial ao Professor José Luiz Borba que juntamente com sua esposa Juraci, pois "ao lado de um grande homem, sempre tem uma grande mulher", foram essenciais para o desenvolver desse trabalho, sempre me atenderam de forma carinhosa e paciente, me incentivando todas as vezes que falavam comigo (e foram muitas vezes).

Toda honra e toda glória a Deus, que me proporcionou TUDO através de pessoas tão incríveis em minha jornada.



## **Epígrafe**

**“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”**

**Cora Coralina**

**“Os mestres sábios, aqueles que ensinaram muitas pessoas a fazer o que é certo, brilharão como as estrelas do céu, com um brilho que nunca se apagará.”**

**Bíblia Sagrada**

## Lista de figuras

Figura 2.1 - Futuro brilhante.....	7
Figura 2.2 - Tipos de VE's .....	8
Figura 2.3 - Diagrama de blocos simplificado de um VEB.....	10
Figura 2.4 - Diagrama de blocos do sistema de controle do motor em malha fechada .....	12
Figura 2.5 - Curvas de conjugado e potência .....	13
Figura 2.6 - Variação da tensão entregue ao motor em função da largura do pulso .....	14
Figura 2.7 - Senoide produzida por PWM.....	15
Figura 2.8 - Geração das três senoides .....	15
Figura 2.9 - Esquema de funcionamento da ponte H para controladores de motores de CC	16
Figura 2.10 - Acionamento de um MI trifásico com inversor utilizando IGBT .....	16
Figura 2.11 - Formas de onda das tensões de fase no motor de indução trifásico.....	17
Figura 2.12 - Curvas de Esforço de Tração x Velocidade de um VCI de quatro marchas.....	18
Figura 2.13 - Acoplamento de motor axial com rotor duplo no eixo do veículo .....	19
Figura 2.14 - Acoplamento de motor axial diretamente na roda do veículo .....	19
Figura 2.15 - Disposição do chassi .....	21
Figura 2.16 - Configuração física das baterias íons de lítion .....	23
Figura 2.17 - Diagrama de Sankey do fluxo de energia de um VEB .....	26
Figura 3.1 - Motor elétrico.....	28
Figura 3.2 - Motor de campo radial .....	29
Figura 3.3 - Motor de campo axial .....	29
Figura 3.4 - Motor linear .....	29
Figura 3.5 - Classificação dos motores elétricos .....	30
Figura 3.6 - Diagrama de blocos com os tipos de motores aplicados aos VEB's .....	31
Figura 3.7 - Estator de um MCC de 4 polos .....	31
Figura 3.8 - Estator de um MCC com 4 polos e 4 interpolos .....	32
Figura 3.9 - Escovas e porta-escovas.....	33
Figura 3.10 - Armadura .....	33
Figura 3.11 - Lâmina, pacote laminado e montagem das bobinas da armadura.....	34
Figura 3.12 - Comutador detalhado .....	35
Figura 3.13 - Ligação dos circuitos de campo e de armadura .....	36
Figura 3.14 - Conjugado x Velocidade.....	37

---

Figura 3.15 - MCC em em corte .....	38
Figura 3.16 - Sentido de rotação .....	38
Figura 3.17 - Esquemáticos do motor durante a frenagem elétrica .....	39
Figura 3.18 - Estator e rotor de um motor CA assíncrono de indução .....	40
Figura 3.19 - Alimentação dos três enrolamentos do motor.....	41
Figura 3.20 - Curva conjugado-velocidade .....	44
Figura 3.21 - Estator do motor de indução .....	45
Figura 3.22 - Rotor gaiola de esquilo .....	45
Figura 3.23 - Variação da velocidade com potência constante .....	46
Figura 3.24 - Variação da velocidade com fluxo constante.....	46
Figura 3.25 - Regiões das curvas conjugado velocidade.....	47
Figura 26 - Sentido de rotação MI.....	48
Figura 3.27 - Circuito de freio regenerativa .....	48
Figura 3.28 - Motor de polos salientes .....	49
Figura 3.29 - Motor de polos lisos.....	50
Figura 3.30 - Comparativo de volume entre um MI e um motor de ímãs permanentes.....	50
Figura 3.31 - Motores de ímãs permanentes de fluxo radial .....	51
Figura 3.32 - Motor PMSM de fluxo radial do Honda IMA .....	52
Figura 3.33 - Motores de ímãs permanentes de fluxo axial.....	52
Figura 3.34 - Mapa de eficiência da unidade, incluindo perdas na eletrônica de potência ....	53
Figura 3.35 - Motores de ímãs permanentes fluxo axial de dupla face .....	53
Figura 3.36 - Motores de ímãs permanentes de fluxo transverso .....	54
Figura 3.37 - Motor de fluxo axial da Yasa Motors .....	54
Figura 3.38 - Motor de fluxo axial da KLD.....	54
Figura 3.39 - Forma de onda da $f_{cem}$ e da corrente no motor.....	55
Figura 3.40 - Forma de onda da $f_{cem}$ e da corrente no motor.....	56
Figura 3.41 - Seção Transversal do MRVT 6x4.....	56
Figura 3.42 - Motor SRM da Nidec.....	57
Figura 3.43 - Motor elétrico arrefecido a água .....	58
Figura 4.1 - Topologias do circuito magnético de um motor de fluxo axial .....	60
Figura 4.2 - Direção do fluxo magnético no motor .....	61
Figura 4.3 - Disco de Faraday ou motor homopolar.....	64
Figura 4.4 - Motor de fluxo axial.....	64
Figura 4.5 - Motor com um estator e dois rotores .....	65

---

Figura 4.6 - Armadura .....	65
Figura 4.7 - Vista lateral da laminação do núcleo da armadura .....	65
Figura 4.8 - Motor de armadura de disco .....	66
Figura 4.9 - Motor de armadura de disco com anel de retorno de fluxo .....	67
Figura 4.10 - Forma de bobina romboidal para motor com estator sem ferro .....	67
Figura 4.11 - Seção transversal do motor de ímã permanente de campo axial de dois estágios com enrolamento do estator refrigerado a água sem ferro .....	68
Figura 4.12 - Arranjo do circuito magnético .....	68
Figura 4.13 - Motor Torus experimental de 2,5 kW .....	69
Figura 4.14 - Seção transversal de um motor Torus .....	69
Figura 4.15 - Estator toroidal com enrolamento de 11 fases .....	70
Figura 4.16 - Rotor interno de seis polos para o motor experimental de 2.5 kW .....	70
Figura 4.17 - Principais caminhos do fluxo .....	71
Figura 4.18 - Cancelamento da circulação do fluxo magnético pelo arranjo diametralmente oposto dos enrolamentos .....	71
Figura 5.1 - Linhas de força que formam o campo magnético .....	73
Figura 5.2 - Ímãs que se atraem .....	73
Figura 5.3 - Ímãs que se repelem .....	73
Figura 5.4 - Ímãs Moleculares .....	74
Figura 5.5 - Exemplo de um processo de imantação .....	75
Figura 5.6 - Formas regulares dos ímãs permanentes de alnico .....	76
Figura 5.7 - Formas regulares dos ímãs permanentes de ferrite .....	76
Figura 5.8 - Formas regulares dos ímãs permanentes de samário .....	77
Figura 5.9 - Formas regulares dos ímãs permanentes de neodímio .....	77
Figura 5.10 - Veículos elétricos que utilizam ímãs de Neodímio Ferro Boro NdFeB no motor .....	78

---

## Lista de quadros

Quadro 1.1 - Capacidade instalada em 2019 no Brasil por fonte geradora.....	3
Quadro 2.1 - Resultado da pesquisa realizada pela Bloomberg Electric Vehicle Outlook.....	8
Quadro 2.2 - Características dos tipos de veículos elétricos .....	9
Quadro 2.3 - Exemplos de motores na roda .....	20
Quadro 2.4 - Avaliação das baterias de Li-íon.....	25
Quadro 2.5 - Rendimento de motores e controladores.....	27
Quadro 3.1 - Vantagens e desvantagens do MIT com relação ao MCC .....	42

---

## Lista de siglas e abreviaturas

GEE	Gases Efeito Estuda
VE	Veículos Elétricos
MCI	Motor a Combustão Interna
CC	Corrente Contínua
CA ou AC	Corrente Alternada
MCC	Motor de Corrente Contínua
MCA	Motor de Corrente Alternada
CC ou DC	Corrente Contínua
VCI	Veículo À Combustão Interna
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNCED	<i>United Nations Conference on Environment and Development</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
COP	Conferência das Partes
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
FGV	Fundação Getúlio Vargas
MI	Motor de Indução
PMS ou BLAC	Motor síncrono de ímãs permanentes
BLDC	Motor CC sem escovas ou Motor CC Brushless
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
MSIP	Motor Síncrono de Ímã Permanente
MIT	Motor de Indução Trifásico

---

MSRVT	Motor de Síncrono de Relutância Variável Trifásico
SIN	Sistema Interligado Nacional
BEV ou VEB	Veículos Elétricos a Bateria ( <i>Battery Electric Vehicle</i> )
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
$f_{cem}$	força contra eletromotriz
PCB	<i>printed-circuit-board</i>
BLAC	Motor AC sem escovas ou <i>Brushless AC Motor</i>
SRM	Motor de Relutância Comutada ou Motor Síncrono de Relutância Variável

---

## Lista de símbolos

$I_a$	Corrente de armadura
$p$	Número de polos
$U_B$	Tensão da bateria
$U_M$	Tensão média do motor
$I_M$	Corrente média do motor
$P_M$	Potência elétrica do motor
$t_{on}$	Duração do pulso
$T$	Período
$f$	Frequência
$n_s$	Velocidade síncrona do eixo do motor
$C$	Capacidade de descarga de uma bateria
$A$	Ampère
$Ah$	Ampère-hora
$V$	Volts
$kWh/kg$	massa da bateria expressa em watts hora/quilograma
$kWh/L$	Volume da bateria expressa em watts hora/litro
$c_{eixo}$	Conjugado mecânico desenvolvido no eixo
$k_c$	Constante do motor
$\phi$	Fluxo Magnético
$I$	Corrente de Armadura
$a$	Constante do Motor
$B$	Constante do Motor
$P_{eixo}$	Potência mecânica desenvolvida no eixo
$n_{eixo}$	Velocidade do eixo do motor



$s$	Escorregamento
$n$	Velocidade síncrona do motor
$L_d$	Eixo direto
$L_q$	Eixo de quadratura
$R$	Resistência

# Sumário

1	A Questão Ambiental .....	1
2	Veículos elétricos - VE.....	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Tipos de VE.....	8
2.3	Configurações dos veículos elétricos .....	8
2.4	Estrutura do VEB .....	9
2.4.1	Motor elétrico .....	10
2.4.1.1	Tipos de motores elétricos.....	11
2.4.2	Controlador.....	12
2.4.2.1	Controle por PWM [18].....	13
2.4.2.2	Controlador de motor em CC [18].....	15
2.4.2.3	Controlador de motor em CA [18] .....	16
2.4.3	Sistema de transmissão [18] .....	17
2.4.3.1	Motores nas rodas.....	18
2.4.4	Sistemas de armazenamento de energia .....	21
2.4.4.1	Baterias .....	22
2.4.4.2	Sistema de controle e monitoração da bateria .....	25
2.4.5	Rendimento do VEB.....	26
2.4.5.1	Frenagem regenerativa .....	27
3	Motores elétricos .....	28
3.1	Introdução.....	28
3.2	Tipos de Motores Elétricos.....	28
3.3	Motores elétricos para tração de VEB's.....	30
3.3.1	Motor CC com escovas .....	31
3.3.1.1	Estator.....	31
3.3.1.1.1	Carcaça; .....	32
3.3.1.1.2	Polos de excitação; .....	32
3.3.1.1.3	Polos de comutação; .....	32
3.3.1.1.4	Porta-escovas e escovas.....	32
3.3.1.2	Rotor .....	33
3.3.1.2.1	Eixo.....	33

3.3.1.2.2	Rotor com enrolamento .....	34
3.3.1.2.3	Comutador .....	34
3.3.1.3	Motor em corrente contínua com excitação série.....	35
3.3.1.4	Conjugado no eixo do motor .....	36
3.3.1.5	Sentido de rotação do motor CC com excitação série.....	38
3.3.1.6	Frenagem elétrica do MCC .....	39
3.3.2	MCC com excitação por meio de ímãs permanentes .....	39
3.3.3	Motor CA assíncrono de indução .....	40
3.3.3.1	Velocidade Síncrona.....	42
3.3.3.2	Escorregamento .....	42
3.3.3.3	Curva conjugado-velocidade .....	43
3.3.4	Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo [18] .....	44
3.3.4.1	Estator.....	44
3.3.4.2	Rotor .....	45
3.3.4.3	Controle de velocidade do motor de indução.....	45
3.3.4.4	Sentido de rotação .....	48
3.3.4.5	Frenagem regenerativa .....	48
3.3.5	Motor Síncrono de Ímã Permanente.....	48
3.3.5.1	Motores CA síncronos de ímãs permanentes de fluxo radial [59] .....	51
3.3.5.2	Motores CA síncronos de ímãs permanentes de fluxo axial [59].....	52
3.3.5.3	Motores CA síncronos de ímãs permanentes de fluxo transversal [59] ..	54
3.3.5.4	Motor DC sem escovas.....	55
3.3.5.5	Motor AC sem escovas.....	56
3.3.6	Motor de relutância comutada .....	56
3.4	Avaliação de motores para veículos elétricos .....	57
3.5	Resfriamento dos motores elétricos segundo a norma IEC 60034.....	58
4	Motores de fluxo magnético axial .....	59
4.1	Introdução.....	59
4.2	Classificação dos motores de fluxo axial .....	59
4.3	Diferenças entre motores de fluxo axial e de fluxo radial.....	60
4.4	Utilização dos motores de fluxo axial .....	62
4.5	Rotor .....	63
4.5.1	Funcionamento .....	63
4.6	Principais configurações de motores de fluxo axial [64] .....	63

---

4.6.1	Disco de Faraday .....	63
4.6.2	Motores de placa de circuito impresso .....	64
4.6.3	Motor de indução diferencial eletromagnético de fluxo axial.....	64
4.6.4	Motores de fluxo axial com núcleo de armadura sem forma .....	65
4.6.5	Motores de indução de fluxo axial monofásicos .....	66
4.6.6	Motor DC de armadura de disco .....	66
4.6.7	Motor de ímã permanente de fluxo axial multiestágio com estator sem ferro refrigerado a água .....	67
4.6.8	Alternador de disco duplo com excitação do lado A.C.....	68
4.6.9	Motor síncrono de fluxo axial de ímã permanente interior .....	68
4.6.10	Motor Torus [64] .....	69
4.6.10.1	Operação do motor Torus .....	72
4.6.10.2	Propriedades do motor Torus .....	72
4.7	Aplicações dos motores de fluxo axial .....	72
5	Ímãs permanentes .....	73
5.1	Ímãs e teorias dos domínios magnéticos .....	73
5.2	Ímãs permanentes .....	75
5.2.1	Alnico .....	75
5.2.2	Ferrite .....	76
5.2.3	Terras Raras: Samário-Cobalto .....	76
5.2.4	Terras Raras: Neodímio-Ferro-Boro .....	77
5.2.5	Aplicação dos ímãs permanentes em veículos elétricos.....	77
6	Conclusões e considerações futuras .....	79
7	Referências bibliográficas .....	81

## 1 A Questão Ambiental

No passado não havia o “conceito ambiental” na palavra desenvolvimento, porém hoje, ao pensarmos em desenvolvimento pensamos na melhoria da qualidade de vida e deveríamos pensar na valorização do meio ambiente, pois a ele estamos diretamente ligados e dele usufruímos.

Em nossas atitudes, percebemos que produzimos muitos resíduos e que não nos preocupamos com destino final destes. Portanto este trabalho destaca os gases que são emitidos por nossos veículos e que podemos eliminá-lo do setor de transportes.

Devido ao enorme aumento dos gases emitidos pelos mais variados meios de transporte, podemos observar em uma escala:

- Local - nuvem de fumaça e poeira cobrindo os centros urbanos;
- Regional - chuvas ácidas;
- Global - aquecimento do planeta, causando o aumento do efeito estufa.

Sendo assim, vemos que somos obrigados a mudar os maus hábitos e tratar o desenvolvimento do setor de transportes como um item que necessita visar não só o crescimento tecnológico, mas também o desenvolvimento sustentável.

Estudos iniciados em 1980 por um grupo de cientistas, constataram que as emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) estavam gerando o aumento da temperatura ambiental média da Terra. Foram feitas previsões de que, caso não ocorra uma redução na emissão dos GEE, a temperatura ambiental natural média da Terra terá uma elevação em até 2 °C até o ano de 2050, com tendência de alcançar 4,6 °C no final do século (2100) [1][2].

Como consequência da descoberta do buraco da camada de ozônio e da elevação da temperatura global registrada em 1988, a emissão dos GEE se tornou um assunto que traz grandes preocupações, uma vez que acarretará, num futuro muito próximo, problemas ao clima e ao ecossistema [3][4].

No contexto da necessidade urgente da redução da emissão dos GEE, a Organização Meteorológica Mundial (*WMO - World Meteorological Organization*), juntamente com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*UNEP – United Nations Environment Programme*), organizou o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*) com o propósito de manter atualizadas as pesquisas e as divulgações de informações referentes as mudanças climáticas e as possíveis consequências negativas a biosfera causadas por elas [4].

Em 1982, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (*UNCED – United Nations Conference on Environment and Development*) realizada no Rio de Janeiro, recebendo assim o nome de Rio 92, o Brasil e mais 178 países estabeleceram o compromisso de zelar pelo desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente.

Pelo DECRETO Nº 2.652, DE 1º DE JULHO DE 1998, o Brasil promulgou a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (*UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change*), onde assume sua responsabilidade na emissão dos GEE e estabelece sua participação voluntária em cooperar com a Conferência das Partes (COP) e cumprir com as obrigações e diretrizes impostas por ela. A COP realiza reuniões mundiais anualmente para avaliar o cenário global e definir estratégias e acordos para garantir a finalidade da UNFCCC [4][5].

Em 1977, durante a 3ª COP (COP3), realizada na cidade de Kioto, no Japão, foi assinado um primeiro acordo, o Protocolo de Kioto, que estabelecia as metas e os prazos para a redução do GEE. Porém, as metas e os prazos eram direcionados aos países desenvolvidos, responsáveis pela geração da maior quantidade desses gases. Em contrapartida, os países emergentes não tinham a obrigação de aderir as metas, mas teriam de atuar de forma voluntária. Isso gerou alguns desentendimentos entre os países signatários. No decorrer da implantação do acordo houve mais desentendimentos, demonstrando que se fazia necessário um novo acordo onde a maioria dos países aceitasse as regras e as diretrizes [3].

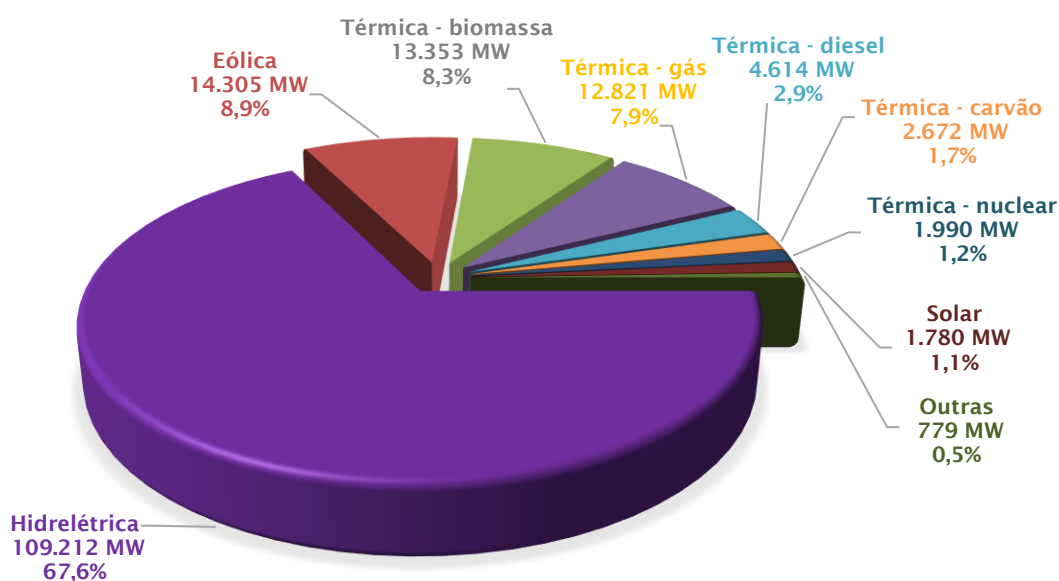
No ano de 2015, durante a 21ª COP (COP21), realizada na cidade de Paris, França, foi assinado um novo acordo, o Acordo de Paris, com uma maior aceitação por parte dos países membros. O acordo de Paris obriga a participação de todos os países signatários a organizar um plano para que a temperatura ambiental natural média da Terra alcance uma elevação máxima de 2 °C até o ano de 2100. Além disso, designou aos países com maior poder aquisitivo a financiar projetos em nações em desenvolvimento que visam o combate a mudanças climáticas com duração mínima de 5 anos [2][6].

Na COP21, o Brasil declarou que se comprometia até o ano de 2030 a reduzir as emissões dos GEE em 43% quando comparado ao ano de 2005, e a aumentar em 45% a participação das fontes renováveis em sua matriz energética [7].

Diante das circunstâncias apresentadas, será que o mundo esperará até o custo do petróleo se tornar exorbitante devido a sua escassez? E os Veículos Elétricos (VE's) podem reduzir os problemas ambientais? Sim, porém para que estes possam ser uma solução, é necessário que sua criação e utilização venham de fontes renováveis.

Sendo o Brasil um país em que 67,6 % da capacidade instalada da matriz de produção de energia elétrica estejam baseados em usinas hidrelétricas, enfrenta grandes problemas de suprimento de energia elétrica, principalmente nos períodos secos do ano e quando da ocorrência de elevados picos de carga. Portanto, além de se fazer necessária uma complementação dessa matriz, também é preciso aumentar a participação cada vez mais ativa de novas usinas eólicas, solares e de cogeração, para tornar a matriz energética brasileira mais limpa do que as fontes móveis, como os motores a combustão interna.

**Quadro 1.1 - Capacidade instalada em 2019 no Brasil por fonte geradora**



Fonte: BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2020 | ONS 2020

Conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 2020 [8], para atender a toda a demanda de energia elétrica, o Brasil atingiu a marca de 161.526 MW de potência instalada em 2019, que está dividida por fonte geradora na Quadro 1.1.

Em 2018, foram consumidos no Brasil 474.820 GWh de energia elétrica pelas quatro principais classes:

- Industrial - 37,5 %;
- Residencial - 29 %;
- Comercial - 18,7 %;
- Rural - 6,1 %.

Os sistemas isolados, não conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) [8], representaram uma parcela de 0,6% da carga consumida. Está previsto para a década de 2020, um crescimento a uma taxa média de 2,5 % ao ano do consumo de energia elétrica no Brasil.

Diante desse contexto, muitas pesquisas estão sendo realizadas mundo afora, e certamente novos desenvolvimentos deverão surgir nos próximos anos para que as fontes alternativas sustentáveis de energia passem a dominar a locomoção dos veículos terrestres, sem que haja emissão de gases tóxicos para a atmosfera.

Como uma alternativa para reduzir os impactos listados acima estão os Veículos Elétricos a Bateria (BEV ou VEB - *Battery Electric Vehicle*) que surgem como alternativa em busca de soluções mais eficientes por possuírem alto rendimento, não emitirem CO<sub>2</sub> na atmosfera durante seu uso e produzirem baixa poluição sonora [6][9]. Portanto, mudanças do domínio energético para movimentar esses veículos terrestres de transporte de cargas e passageiros têm como motivador o desenvolvimento do aspecto econômico e aspecto tecnológico dos equipamentos e sistemas que os compõe.

O veículo elétrico a bateria ganhou espaço no mercado quando as baterias começaram a reduzir seus custos de fabricação, e conseqüentemente também a redução no valor de custo final do veículo a venda. Todavia, a energia que as baterias fornecem aos veículos ainda é menor quando comparada a energia que os combustíveis fósseis fornecem, o que leva a necessidade de melhorar ainda mais os aspectos técnicos e econômicos das baterias.

A ideia de o VEB ser um meio de transporte sustentável, mesmo possuindo as limitações tecnológicas mencionadas parece distante, mas pode ser concretizada se houver ações de políticas públicas, onde o governo manifesta regras e diretrizes para utilização desses veículos. Conseqüentemente, visando a redução das poluições e principalmente dos GEE, este trabalho tem o objetivo de contribuir com um estudo da possibilidade de aumento da eficiência energética dos VE's através da aplicação de motores axial no sistema de tração.



## 2 Veículos elétricos - VE

### 2.1 Introdução

O Veículo Elétrico - VE (*Electric Vehicle - EV*) é um meio de transporte terrestre de passageiros e cargas alimentado com energia elétrica a partir de uma fonte armazenadora portátil e recarregável [6][10].

Historicamente, os VE's existem há muitos anos. Apesar de terem sumidos por algumas décadas, há registro de VE criado desde o ano de 1834 nos Estados Unidos por Thomas Davenport, que criou uma carruagem movida a motor elétrico que percorriam sobre trilhos. Entre 1832 e 1839, o escocês Robert Anderson criou uma espécie de carruagem elétrica, que dispunha de 3 ou 4 rodas, para circular em caminhos de terra batida. No entanto, não há relatos exatos que comprovem a data e a eficiência desse modelo [6][11]. Esses primeiros VE's usavam baterias elétricas não recarregáveis [11].

Um maior desenvolvimento deu-se meio século mais tarde, em meados do século XIX, após o aperfeiçoamento das baterias recarregáveis. Assim, no final do século XIX, com a produção em massa de baterias recarregáveis de chumbo-ácido, os veículos elétricos passaram a ser amplamente utilizados [11].

Na transição do século XIX para o século XX ocorreu nos Estados Unidos uma grande competição entre os Veículos a Combustão Interna (VCI's), equipados com um grande motor a gasolina com partida a manivela e propensos a muitas avarias, e os Veículos Elétricos (VE's) com bateria de armazenamento. Os VCI's venceram a disputa, devido:

- a. Maior autonomia dos carros a gasolina;
- b. Abastecimento mais rápido;
- c. Abastecimento mais barato, devido a abertura de novos poços de petróleo;
- d. Redução do custo de produção dos automóveis, devido ao sistema de produção em massa de Henry Ford;
- e. A invenção do motor de partida elétrico, em 1912, eliminou a grande desvantagem da dificuldade de dar partida no motor a combustão interna.

Alguns desses VE's sobreviveram à Grande Depressão e venceram o racionamento de gasolina durante a Segunda Guerra Mundial. Porém, a baixa velocidade e a pequena autonomia os limitaram seu uso em pequenos percursos urbanos.

Mais tarde, com a crise do petróleo em meados dos anos 1970, a necessidade de alternativas ao uso dos combustíveis fósseis convencionais, despertou novamente o interesse no desenvolvimento dos VE's.

Atualmente, em resposta as preocupações com o meio ambiente, particularmente ruído e emissões de GEE, juntamente com os desenvolvimentos das baterias e seus componentes, o interesse pelo VE com bateria foi renovado, e o mercado está apostando na sua evolução.

Todos os grandes fabricantes de VCI's, como Honda, Toyota, Nissan, Mitsubishi, General Motors, Smart, Peugeot, Citroën e Renault, entre outras, têm modelos híbridos nos seus catálogos e anunciam também modelos totalmente elétricos. A produção em pequenas séries de veículos elétricos e a sua configuração relativamente simples, tem favorecido a crescimento de construtores de pequena dimensão, alguns dedicados exclusivamente a fabricação de VE's. Os postos de abastecimento de combustíveis fósseis também estão se adaptando para abastecimento elétrico.

O VE entrou agora em seu terceiro século como um produto comercialmente disponível e, como tal, tem sido muito bem-sucedido, superando muitas outras ideias técnicas que surgiram e desapareceram. Portanto, é importante que os princípios por trás do design, das questões tecnológicas e ambientais relativas aos VE's sejam totalmente compreendidos [6].

A balança pode pender em favor dos VE's, que tem como pontos característicos a [6][9][12][13]:

**a. Sustentabilidade**

Emitem menor quantidade de poluição atmosférica e são mais silenciosos.

**b. Eficiência**

O sistema de transmissão de energia da fonte armazenadora até as rodas do VE apresenta uma perda de 15 a 20%, enquanto o sistema de transmissão mecânica da ponta do eixo do motor até as rodas do Veículo à Combustão Interna (VCI) apresenta perdas em torno de 50%.

**c. Conforto**

Pode ser abastecido com energia elétrica na própria residência do usuário.

**d. Desempenho**

Possui alto torque de arrancada e bom desenvolvimento de velocidade.

No entanto, os VE's não têm desfrutado do enorme sucesso dos VCI's em função de apresentarem desvantagens como:

- **Tempo de recarga**

O tempo de recarga mínimo é de 3 horas e máximo de 12 horas. O aceitável em caso de deslocamento de viagem é que esse tempo não fosse superior ao tempo de descanso do motorista, cerca de 30 a 60 minutos. O ideal seria que o tempo de recarga fosse igualado ao tempo de abastecimento de um VCI.

- **Estrutura para recarga:**

As estruturas de recarga de um VE ao longo das vias públicas são deficientes. O ideal seria ter postos de recarga assim como temos postos de gasolina ao longo das vias.

- **Autonomia**

O VE possui um alcance de distância percorrida muito baixa quando comparado ao VCI. Um VE com sua bateria em carga plena alcança um percurso de 160 km até 480 km, enquanto um VCI possui autonomia de 400 km a 500 km. Mas, até que haja um grande avanço na tecnologia das baterias que proporcione um aumento da sua capacidade de armazenamento, a autonomia continuará sendo o fator que mais limita o uso do VE.

Caso a estrutura de recarga e a autonomia dos veículos elétricos não evoluírem, no futuro poderemos ter situações como a mostrada na Figura 2.2, onde uma van a diesel, rebocando um gerador elétrico a gasolina, carrega a bateria de um veículo elétrico que teve “pane seca”.

**Figura 2.1 - Futuro brilhante**

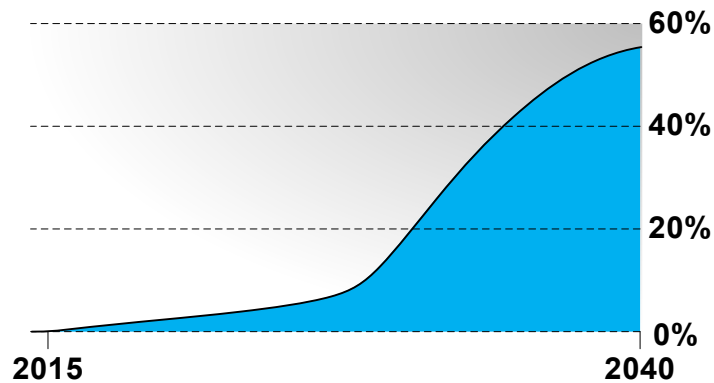


Fonte: [14]

Em função de ser:

- Uma novidade tecnológica;
- Possuir um número reduzido de fabricantes ao redor do mundo;
- Valor de aquisição maior do que o de um VCI;

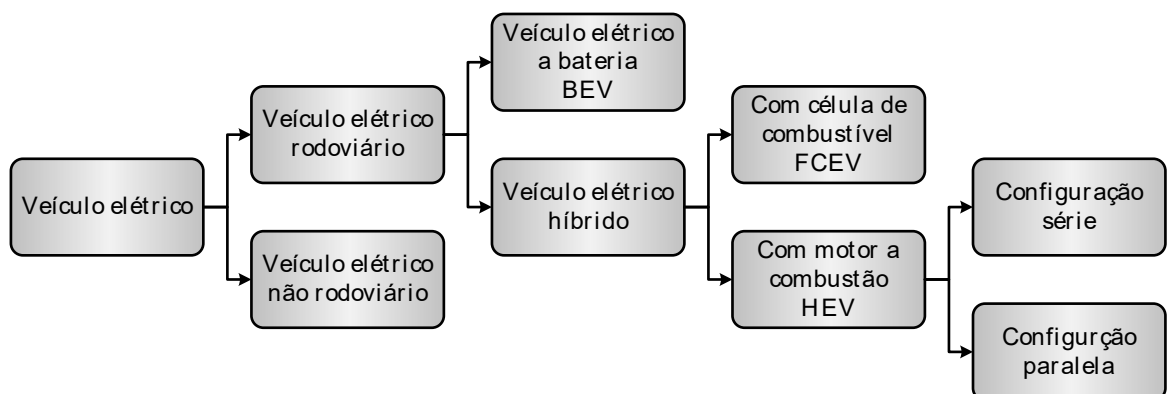
os VE's ainda representam uma pequena parte no mercado de automóveis em países em desenvolvimento como o nosso. Mas o futuro tende a ser diferente, conforme vemos na pesquisa realizada pela Bloomberg Electric Vehicle Outlook [15] em março de 2018, em 2040 as vendas mundiais de veículos elétricos chegarão a 60 milhões de unidades anuais, o equivalente a 55% do total.

**Quadro 2.1 - Resultado da pesquisa realizada pela Bloomberg Electric Vehicle Outlook**

Fonte: Bloomberg Electric Vehicle Outlook

## 2.2 Tipos de VE

Os VE's são classificados conforme a sua estrutura, como mostrado na Figura 2.2.

**Figura 2.2 - Tipos de VE's**

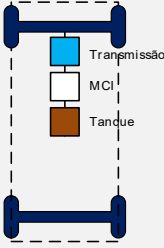
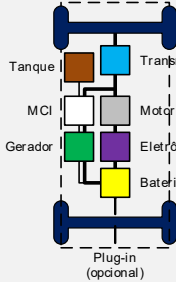
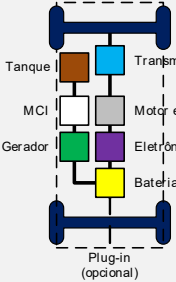
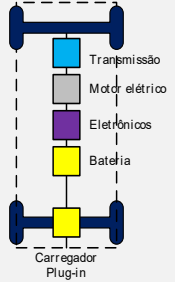
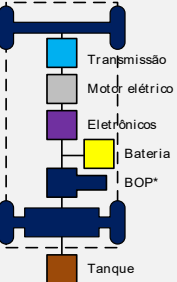
Fonte: Adaptada de [16]

## 2.3 Configurações dos veículos elétricos

O Quadro 2.2 mostra a classificação dos tipos de veículos elétricos e suas características principais.

O veículo elétrico híbrido HEV parece ser uma das melhores maneiras de reduzir o consumo de combustível dos veículos no atual cenário. Consiste em associar um motor elétrico junto ao motor térmico clássico. Neste sistema embarcado, a eficiência e o torque por unidade de massa são muito importantes. Portanto, parece ser uma boa ideia usar um motor síncrono de ímã permanente, que é reconhecida por atender a esses dois objetivos. Como o volume alocado é bastante plano, as topologias de fluxo axial são interessantes.

Quadro 2.2 - Características dos tipos de veículos elétricos

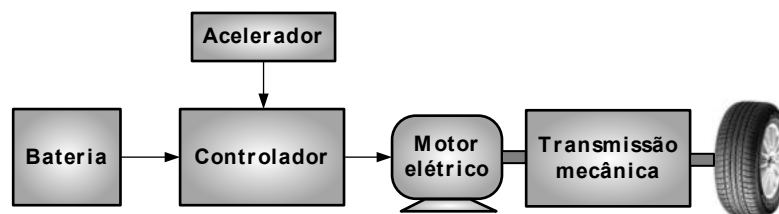
		Tipo de veículo elétrico				
	Veículo com Motor a Combustão Interna	Veículo Elétrico (plug in) híbrido	Veículo elétrico com autonomia estendida	Veículo elétrico à bateria	Veículo elétrico à célula de combustível	
	VCI	(P) HEV	(E-REV ou REX)	(VEB)	(FCEV)	
						
	<b>Característica</b>					
Motor	MCI	MCI e elétrico dispostos em paralelo; sistema plug-in opcional. Motor à combustão é o principal para mover o veículo, com auxílio de um pequeno motor elétrico.	MCI e elétrico dispostos em série. Motor elétrico é o principal para mover o veículo, com o motor à combustão interna gerando eletricidade para o elétrico	100% elétrico	Sistema de célula de combustível e motor elétrico, que propulsiona o veículo, dispostos em série.	
Autonomia	Grande autonomia proporcionada pelo combustível fóssil / biocombustível	Pouca autonomia elétrica, que é complementada pela autonomia proporcionada pelo combustível fóssil/ biocombustível	Autonomia elétrica média, complementada pela autonomia proporcionada pelo combustível fóssil/ biocombustível	Autonomia elétrica de pequena a média (comparada aos VCI)	Autonomia elétrica de média a alta	
Armazenamento	A bateria não depende de infraestrutura elétrica	Bateria recarregada através do motor à combustão interna ou por eletricidade (para híbridos plug-in)	Bateria recarregada como no híbrido. Além disso, costuma ter uma bateria com menor capacidade do que o VEB	Bateria de íons de lítio com grande capacidade; É recarregada por fonte de energia elétrica externa	Célula de combustível de hidrogênio é baseada na tecnologia PEM19 (Proton Exchange Membrane); Célula de combustível de etanol de óxido sólido (SOFC);	

Fonte: Adaptado de [6]

## 2.4 Estrutura do VEB

Num veículo elétrico a bateria (VEB) a energia elétrica armazenada na bateria é convertida em energia mecânica pelo motor elétrico de tração, que é transmitida para ser usada nas rodas do veículo, através de um sistema de transmissão mecânica.

Figura 2.3 - Diagrama de blocos simplificado de um VEB



Fonte: Próprio autor

Na Figura 2.3 podemos observar de forma resumida os componentes integrantes do VEB, o acelerador que é regulado pelo motorista, a bateria que alimenta todo o sistema, e o controlador recebe a informação de aceleração do condutor e regula o fluxo de corrente que a bateria deve fornecer ao motor que em seguida controla os parâmetros velocidade, e em alguns casos a frenagem regenerativa, que se caracteriza pela transformação de energia cinética em energia elétrica que retorna a bateria, assim promovendo sua carga.

#### 2.4.1 Motor elétrico

A propulsão do VEB é proporcionada pela energia mecânica, proveniente da energia elétrica, que faz girar o eixo do seu motor de tração através da interação dos campos magnéticos entre o sistema de excitação e do sistema induzido [18][21].

É o motor de tração quem determina as características do sistema de propulsão e do controlador, e a posição do conversor em relação a manipulação da potência.

Os motores de tração destinados a VEB devem apresentar as seguintes características [18]:

- a. **Leve:** é importante que o peso seja o menor possível a modo de ocupar menor espaço, mas em contrapartida deve-se ter a maior potência.
- b. **Resistente a impactos:** o veículo sofre muitos impactos quando em funcionamento devido as estruturas das vias onde percorre, o que pode gerar falha não somente ao motor, quanto também a estrutura veicular mecânica.
- c. **Resistente a altas temperaturas:** as altas temperaturas podem afetar o isolamento dos enrolamentos do motor (classe F ou H) [22]. Portanto a temperatura de projeto para esse tipo de aplicação deve ser considerada para uma vida útil mínima de 5 anos.
- d. **Boa usinagem:** devem ser fabricados com o mínimo de folgas radiais e axiais, portanto com tolerâncias estreitas. Isto contribuirá para que as peças não se danifiquem com as vibrações.

- e. **Alto conjugado de partida:** o arranque do motor deve ser alto na partida para que o mesmo vença a inércia do carro parado, porém é necessário que a corrente de partida não alcance altos valores.
- f. **Regulação Motora variável:** para grandes faixas de velocidade, o controle variável seguro e responder de forma rápida.
- g. **Econômico:** baixo custo de aquisição, baixo custo de manutenção e baixo custo de operação.
- h. **Permitir a frenagem elétrica:** a energia deve ser recuperada na frenagem para que seja reaproveitada pelo sistema do veículo. Vale ressaltar, que durante a propulsão, o motor de tração realiza a funcionalidade de motor, e durante a frenagem elétrica, atua como um gerador.
- i. **Estrutura Robusta:** o motor deve ser construído de forma sólida e robusta para que possa suportar qualquer influência externa sob ele.
- j. **Alto rendimento:** o motor deve obter alta taxa de energia de conversão da energia de forma que tenha maior aproveitado.

#### 2.4.1.1 Tipos de motores elétricos

Os cinco tipos de motores mais utilizados em veículos elétricos são:

- Motor de corrente contínua (CC);
- Motor de indução (MI);
- Motor síncrono de ímãs permanentes (PMS ou BLAC);
- Motor de relutância comutado (SEM);
- Motor CC sem escovas (BLDC).

Os fabricantes de motores elétricos estão visionando a industrial automotiva, então estão desenvolvendo motores para esses consumidores. Os motores que mais estão em evolução no mercado atual, são os que possuem ímãs permanentes, portanto utilizam ímãs de terras raras, materiais estes que a China possui em grande quantidade e proporciona a facilidade de os chineses desenvolverem estes motores. Apesar da China garantir publicamente que não colocaria problemas a exportação desses materiais raros para os Estados Unidos da América (EUA) [19] estão investindo altos valores em sua Agência de Projetos de Pesquisa Avançada-Energia (ARPA-E do inglês *Advanced Research Projects Agency-Energy*) no programa Alternativas de Terras Raras em Tecnologias Críticas (do inglês *Rare Earth Alternatives in Critical Technologies*) [20].

Os motores elétricos de tração utilizados na propulsão do VE podem se apresentar tanto na topologia de fluxo axial quanto na topologia de fluxo radial:

1. Topologia de Fluxo Radial:
  - a. Motor em corrente contínua
  - b. Motor de indução
  - c. Motor síncrono de ímã permanente
  - d. Motor síncrono de relutância variável

Porém os motores elétricos do tipo disco são de três tipos [23]:

2. Topologia de Fluxo Axial:
  - a. Motor síncrono de ímã permanente;
  - b. Motor CC sem escova;
  - c. Motor síncrono de relutância variável.

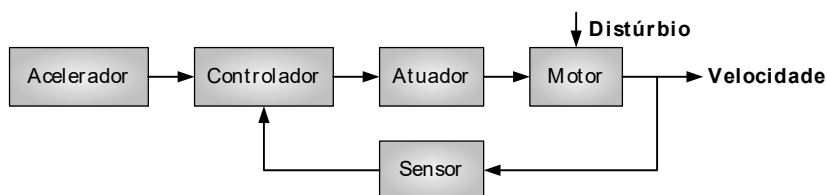
As funcionalidades dos motores são as mesmas para os ambos os tipos de topologia, porém, o que difere são os parâmetros construtivos internos.

#### 2.4.2 Controlador

Podemos observar o controlador no diagrama de bloco simplificado de um VEB e agora, podemos analisar este componente no diagrama de blocos do sistema de controle do motor em malha fechada na Figura 2.4.

Antigamente o motor de CC era controlado apenas por potenciômetros, onde o motorista ao regular a aceleração através do pedal gerava alterações na resistência do potenciômetro que por sua vez controlava o fluxo de corrente entre a bateria e o motor. Porém, as perdas joules eram muito grandes [59].

Figura 2.4 - Diagrama de blocos do sistema de controle do motor em malha fechada



Fonte: Adaptado de [59]

Analisando a saída do diagrama de blocos apresentado, temos como parâmetro de saída a velocidade que envia por feedback um sinal de retorno para o sistema de controle através do seu sensor para que o controle mantenha sempre a velocidade desejada. Como a maioria dos sistemas dinâmicos, aqui também existem os distúrbios, causados por exemplo por fatores



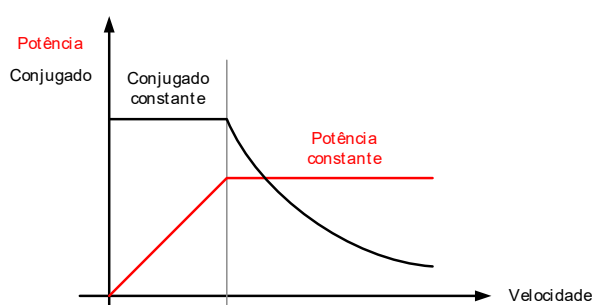
externos como subir uma ladeira, mas o sistema sempre tentará eliminar esse distúrbio para manter a velocidade que o usuário definir.

Para um VEB, o ideal é que em sua operação a força desenvolvida na tração seja constante em toda faixa de velocidade, o que requer que o motor opere com conjugado constante. Porém isso nos traz uma limitação, pois o motor de tração é incapaz de fornecer conjugado constante em toda a sua faixa de velocidade de operação. Além disso, da expressão da potência:

$$\text{Potência} = \text{força} \times \text{velocidade} \quad (1)$$

vemos que a produção de um esforço de tração constante faz com que o motor de tração solicite da bateria uma potência crescente com a velocidade. Assim, para um esforço de tração constante elevado, na faixa de velocidades altas do VEB, o motor de tração irá solicitar uma potência maior do que a bateria é capaz de fornecer. Devido a essa impossibilidade, o controlador tem o papel importante de manter constante a potência fornecida ao motor de tração. Entretanto, a operação em potência constante gera um decréscimo contínuo do conjugado quando a velocidade é aumentada [18], e assim o esforço da tração do VEB vai diminuindo conforme mostrado no gráfico da Figura 2.5.

**Figura 2.5 - Curvas de conjugado e potência**



Fonte: [18]

#### 2.4.2.1 Controle por PWM [18]

A maioria dos controladores atuais, utilizam o controle por técnica de Modulação em Largura de Pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*). Essa técnica, além de possuir a função de regular o fluxo de corrente entre a bateria e o motor realizam também a:

- Inversão de rotação do motor quando é necessário marcha ré;
- Conversão de energia de motor para gerador durante a frenagem regenerativa.

Porém, este controlador, possui algumas desvantagens ao motor que podem reduzir sua vida útil:

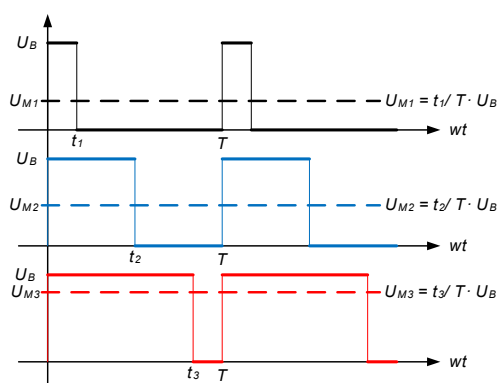
- Diminuição do rendimento;

- Aumento de sua temperatura;
- Aumento de ruído.

O funcionamento desse controlador consiste na geração de pulsos em milissegundos através de microcontroladores em baixa potência por frequência. Esses pulsos são amplificados por uma eletrônica de potência que podem conter o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

O controlador fornece a tensão  $U_M$  ao motor que é uma função de área do pulso, ou seja, a tensão da bateria  $U_B$  multiplicada pela relação entre o tempo do impulso  $t_{on}$  e o período  $T$ .

**Figura 2.6 - Variação da tensão entregue ao motor em função da largura do pulso**



Fonte: [18]

A equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$U_M = U_B \cdot \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

A corrente no motor  $I_M$ , obedece à clássica equação da potência elétrica:

$$I_M = \frac{P_M}{U_M} \quad (3)$$

Os controladores funcionam semelhantemente nos motores AC quanto nos motores CC. Porém os motores AC possuem característica de inversão do sinal de corrente e por isso recebem o nome de inversores. Esses inversores, através de um sistema PWM, conjugam a variação do tempo do pulso com o sinal para gerar uma curva aproximadamente senoidal, semelhante à da corrente alternada, conforme ilustra a Figura 2.7. A tensão alternada que chega nos motores são as larguras de pulsos geradas pelo microprocessador que podem ser variável e obedecem a um padrão senoidal.

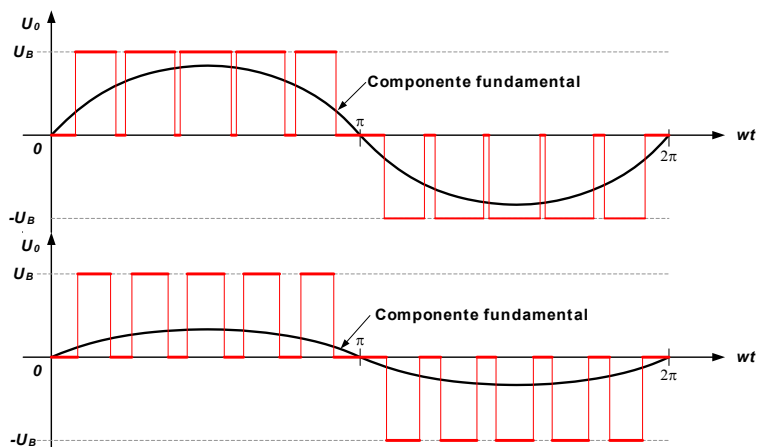
O controlador também pode variar o tempo do período ( $T$ ) por meio da alteração da frequência  $f$ , que está diretamente relacionada com a velocidade síncrona do motor  $n_s$ , como se mostra através da equação:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{60} \quad (4)$$

$n_s$   $\Rightarrow$  Velocidade síncrona do eixo do motor [rpm];

$p$   $\Rightarrow$  Número de pares de polos do motor.

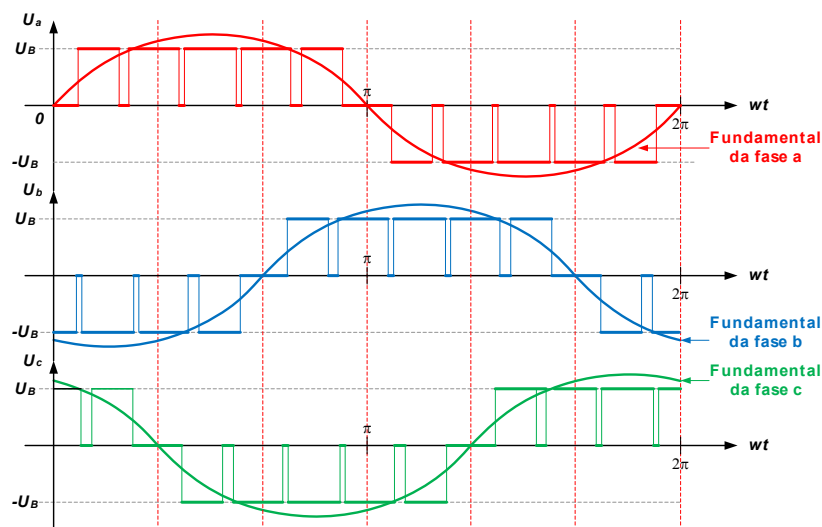
**Figura 2.7 - Senoide produzida por PWM**



Fonte: [18]

Para motores trifásicos, o respectivo inversor gera três senoides, desfasadas de  $120^\circ$  elétricos entre si, de forma a obter as três fases de alimentação.

**Figura 2.8 - Geração das três senoides**



Fonte: [18]

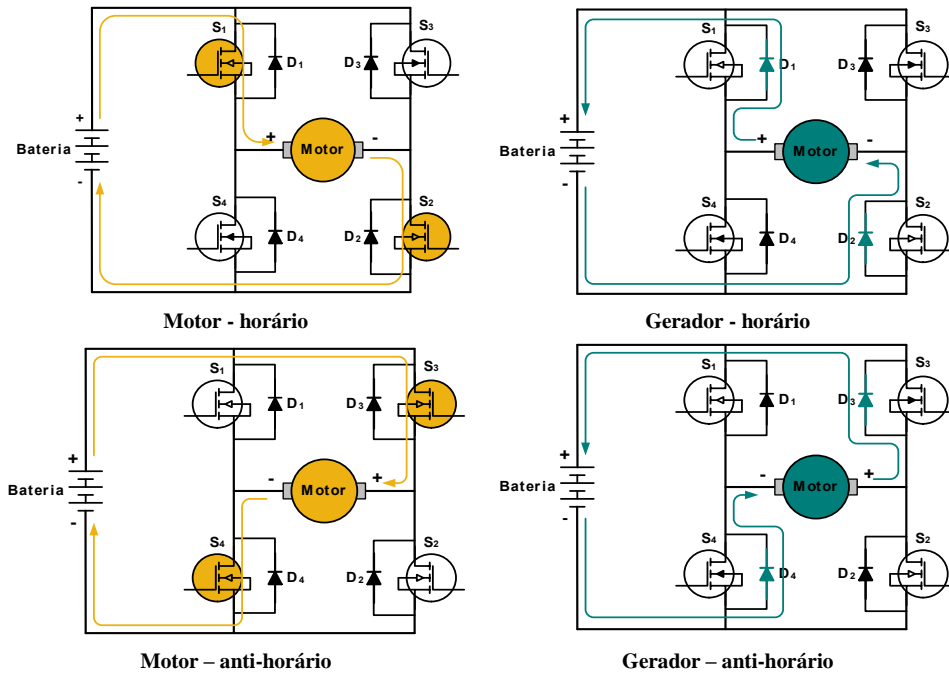
#### 2.4.2.2 Controlador de motor em CC [18]

Para o controle do motor CC ser mais completo, é necessário a utilização de um circuito Recortador (*Chopper*) em ponte H com o MOSFET, que permite alternar a polaridade e o

sentido da corrente (horário e anti-horário), o que proporciona o motor operar nos quatro quadrantes com todas as possíveis combinações de velocidade e conjugado e assim este motor também pode exercer a função de gerador conforme na Figura 2.9.

Na prática, o quadrante de funcionamento como gerador para trás (em marcha a ré), não é utilizado.

**Figura 2.9 - Esquema de funcionamento da ponte H para controladores de motores de CC**

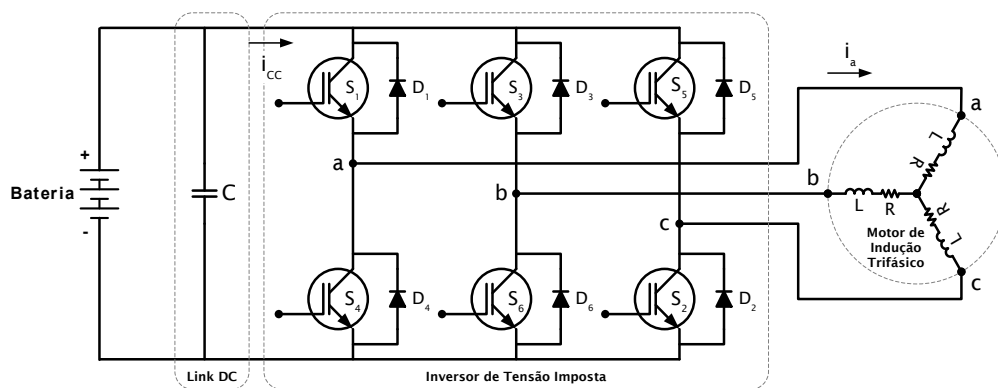


Fonte: [18]

### 2.4.2.3 Controlador de motor em CA [18]

Para controlar a velocidade do motor de indução nos quatro quadrantes é necessário alimentá-lo por frequência variável em ponte de *Graetz*, utilizando IGBT, como ilustrado na Figura 2.10.

**Figura 2.10 - Acionamento de um MI trifásico com inversor utilizando IGBT**

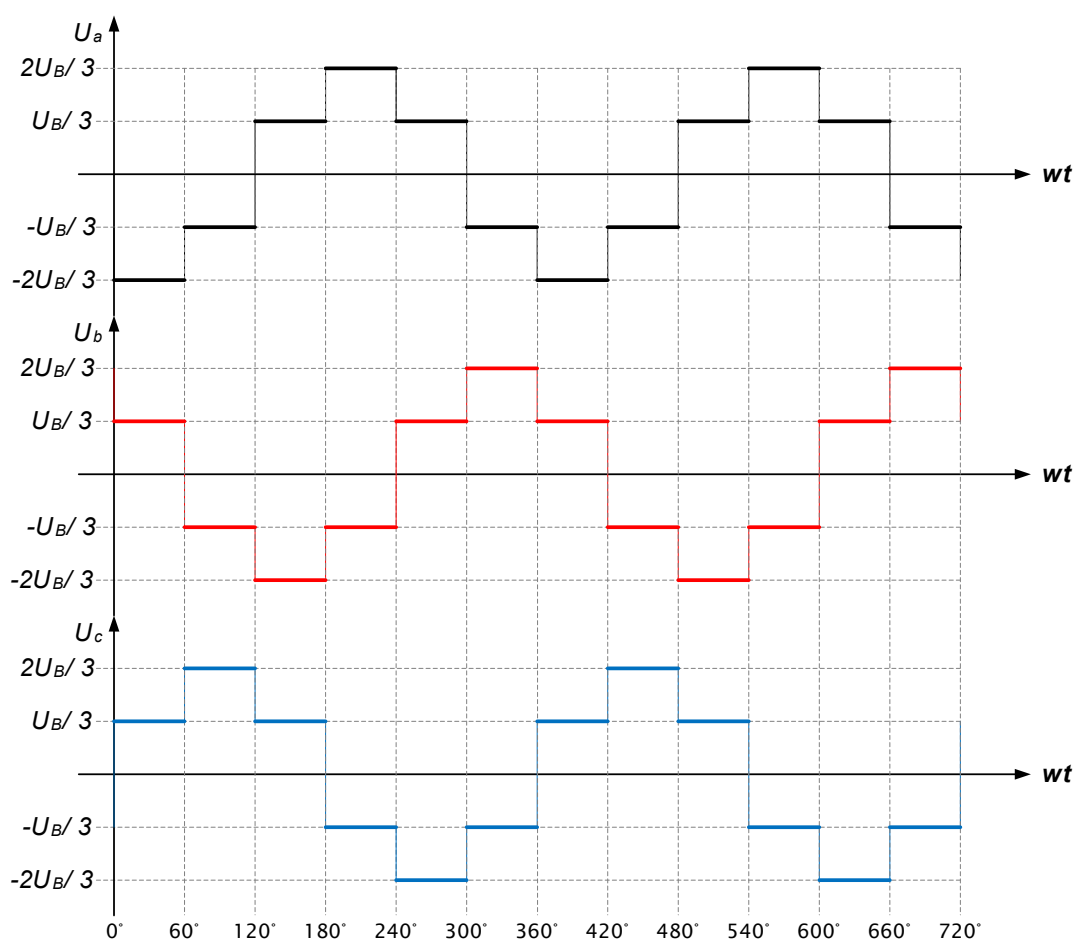


Fonte: [18]

A forma de onda do inversor é quadriculada, isto é, enquanto as tensões de linha no motor são quase quadradas, as tensões de fase no motor são em degraus gerando uma forma de onda de seis pulsos, cuja frequência pode ser variada modificando-se o período com que ocorrem os acionamentos dos IGBT's.

O sucesso dos inversores após a década de 90, permitiu o controle de velocidade nos motores de indução, diminuindo o uso dos motores CC com escovas.

**Figura 2.11 - Formas de onda das tensões de fase no motor de indução trifásico**



Fonte: [18]

### 2.4.3 Sistema de transmissão [18]

O sistema de transmissão do VEB, controla a comunicação entre o motor e as rodas, mantendo o limite de utilização do giro do motor independentemente da velocidade do veículo.

O sistema de transmissão possui um sistema mecânico com:

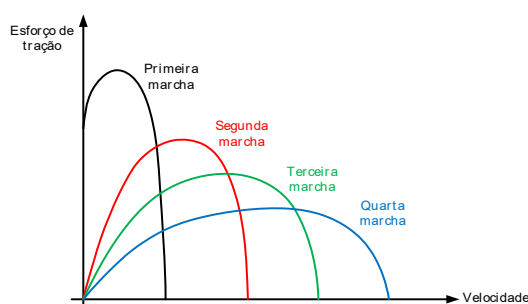
- Eixo de transmissão;
- Sistema diferencial;

- Semi eixos.

A potência fornecida às rodas de um VCI é realizada por um conjunto de engrenagens com diferentes números de dentes engrenados entre si denominado de caixa de marchas. Os dentes encaixados permitem a redução da relação entre velocidade de rotação do eixo do motor e as rodas dos veículos, mesmo que o motor a combustão interna (mci) esteja em potência total.

Para cada redução tem-se uma marcha correspondente, que produz uma curva de esforço de tração para uma dada faixa de velocidades do VCI, como podemos observar na Figura 2.12, onde são mostradas as curvas de um VCI de quatro marchas.

**Figura 2.12 - Curvas de Esforço de Tração x Velocidade de um VCI de quatro marchas**



Fonte: [18]

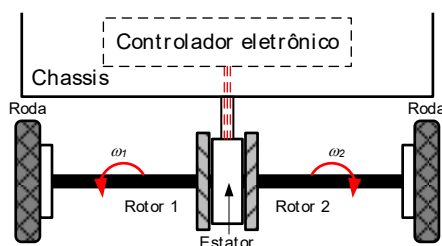
Diferentemente da transmissão de um VCI, a transmissão de um VEB pode ser considerada como tendo um número infinito de marchas.

### 2.4.3.1 Motores nas rodas

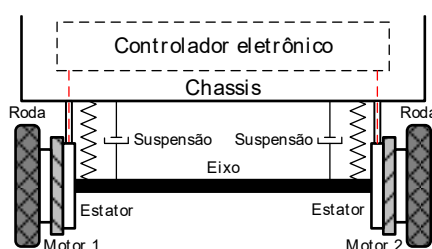
Os motores nas rodas em um veículo fornecem energia através de um trem de força (*powertrain*) elétrico compacto, já com redutor e diferencial mecânico, em substituição a um trem de força com motor a combustão interna, traz as seguintes vantagens:

- Elimina conjunto motor-câmbio, formado pelo motor a combustão e seus sistemas, lubrificação, resfriamento, combustível, admissão e escape, além da caixa de engrenagens;
- Torna o veículo mais eficiente;
- Diminui o peso do veículo;
- Torna o veículo mais compacto e mais espaçoso;
- O espaço liberado proporciona maior liberdade de design do veículo;
- Simplifica a linha de montagem dos veículos.

Nas Figura 2.13 e Figura 2.14 estão mostradas as formas de acoplamento dos motores às rodas dos veículos [37].

**Figura 2.13 - Acoplamento de motor axial com rotor duplo no eixo do veículo**

Fonte: Adaptado de [37]

**Figura 2.14 - Acoplamento de motor axial diretamente na roda do veículo**

Fonte: Adaptado de [37]

Em ambos os casos, podemos analisar que o estator é fixado no chassi do veículo e o rotor de ímãs permanentes são livres para realizar as rotações [37].

A aplicação de motores elétricos diretamente acoplados no cubo das rodas (*in-wheel motor*) ganhou o interesse dos fabricantes de veículos elétricos.

Este conceito *in-wheel motor* proporciona que o motor acione diretamente as rodas controlando o sistema de velocidade, frenagem, suspensão e em alguns casos também a direção. Toda a parte que constitui a estrutura do motor fica dentro da roda [59].

Essa tecnologia ainda possui grandes desafios, mas os benefícios que elas geram são excelentes:

- Reduz a complexidade da unidade motriz com a eliminação da unidade do diferencial mecânico e dos semieixos, o que simplifica ainda mais o sistema. A gestão correta da velocidade em cada roda é produzida por um controle eletrônico;
- Não possui engrenagens e pode nem precisar de rolamentos;
- Dimensões mais compactas;
- Reduz o ruído;
- Menores folgas;
- Menor manutenção;
- Reduz o consumo de energia das baterias por reduzir ainda mais o desperdício;
- Permite um melhor controle de tração do veículo;

- Aumentam a dirigibilidade e a segurança do veículo, pois o torque em cada roda pode ser independente, o que é vantajoso para o sistema de estabilidade do veículo;
- Torna o sistema de frenagem desnecessário, utilizando apenas a recuperação de energia para desacelerar e parar o veículo;
- Por ser mais fácil de refrigerar, utiliza refrigeração a ar.

FREITAS cita em sua tese que a desvantagem desta tecnologia é que por não possuir engrenagens (relação de transmissão de 1:1) o motor terá de possuir elevado torque de partida e informa que a solução é colocar motores em todas as rodas do veículo, assim o torque de partida solicitado a cada motor será uma fração do torque de partida do veículo e ressalta que devido à inexistência de um diferencial mecânico, o controle eletrônico deverá fazer a gestão correta da velocidade em cada roda.

FREITAS mostra um exemplo prático onde a Michelin desenvolveu o sistema conceito *Active Wheel*, que é composto por um disco, uma pinça de freio, um motor elétrico, uma suspensão ativa e uma mola de suspensão e nos informa que outras marcas também estão desenvolvendo este conceito conforme o Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Exemplos de motores na roda



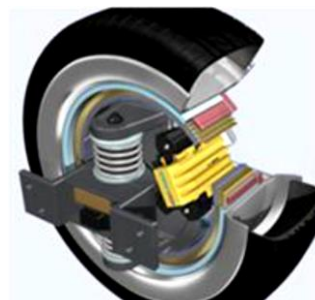
a) Honda



b) Protean



c) Michelin



d) Siemens

Fonte: Adaptado de [59]

A empresa alemã DeepDrive, apresentou um chassi com composto em sua estrutura rodas dianteiras direcionadas, uma bateria, e dois motores de ímã permanente sem escovas, totalmente selado, instalados dentro dos cubos das rodas na parte traseira [38].



**Figura 2.15 - Disposição do chassi**

Fonte: [48]

Segundo os dados técnicos da DeepDrive e o estudo realizado na referência [38] para um carro considerado de tamanho médio que possui uma bateria de 70 kWh, pode gerar uma perda de alcance o que torna um gasto extra para a aquisição de energia durante sua vida útil de cerca de 3.000 euros. O chassi da DeepDrive [38]:

- Economiza cerca de 30 kg quando comparado a arquitetura de chassi tradicional;
- Alcança 96% de eficiência;
- Economiza cerca de 20% nos custos de produção;
- Permite a utilização de baterias mais baratas;
- Mostra que na utilização de células de fosfato de lítio ou íon de sódio, é possível alcançar uma autonomia de até 600 km.

Em junho deste ano de 2021, o site Click Petróleo e Gás [39] nos traz uma reportagem mostrando a eficácia do motor nas rodas baseada em um teste realizado pela Saietta em VE's Renault Twizy. O teste foi realizado por dois carros do modelo Renault Twizy com a única diferença alterada nas estruturas desses carros sendo um possuir o motor AFT 140 e o outro não. Foram submetidos a várias situações de tráfego. A avaliação foi realizada pela empresa New Electric e concluíram que o veículo que com o motor AFT 140 teve uma extensão de alcance de 10% [39].

#### **2.4.4 Sistemas de armazenamento de energia**

Os VEB's armazenam a energia que utilizam em sua estrutura, portanto quanto maior for a densidade mássica e volumétrica do armazenamento de energia, maior será sua autonomia o que diminui a quantidade de recargas/reabastecimento.

As recargas/reabastecimento ainda possuem um tempo muito longo, então quanto mais energia o carro poder armazenar e menos gasto de energia ele obter, melhor será para o aumento da sua

autonomia. Dentre outras, a autonomia é a maior limitação que enfrentamos para a disseminação dos VEB's no mercado automóvel no mundo.

#### 2.4.4.1 Baterias

FREITAS define bateria de carros elétricos como um dispositivo composto por uma ou várias células unitárias, que convertem energia química em energia elétrica e vice-versa, e as definem em dois grupos [59]:

➤ **Primárias:**

Baterias que não podem ser recarregadas, e são utilizáveis assim que instaladas. Quando suas energias acabam, devem ser descartadas de maneira adequada e podem ser recicladas.

Aplicações: relógios, telecomandos, máquinas fotográficas, calculadoras etc.

➤ **Secundárias:**

Baterias que são recarregáveis, e a aplicação que será apresentada é na utilização em veículos elétricos. As principais especificações das baterias recarregáveis são:

- **Célula, bateria e banco de baterias:**

A bateria possui 1 célula como unidade individual, um grupo de células formam uma bateria, e um grupo de baterias formam um banco de baterias.

As conexões elétricas para gerar um banco de baterias podem ser em série ou em paralelo, depende da aplicação.

- **Autodescarga:**

É uma forma natural da bateria descarregar mesmo não sendo utilizada. A autodescarga pode ser agravada por aumento da temperatura ambiente, umidade e idade da bateria.

- **Efeito memória:**

Popularmente conhecida como “bateria viciada”, a bateria vai perdendo a capacidade de armazenamento.

- **Energia específica:**

Quantidade que uma bateria pode armazenar relacionada com a sua massa. Possui grandeza kWh/kg.

- **Densidade de energia:**

Quantidade que uma bateria pode armazenar relacionada com o seu volume. Possui grandeza kWh/L.

- **Capacidade de uma bateria:**

Capacidade que uma bateria tem de descarregar. Possui grandeza Ampère-hora (Ah) e fornece o valor de corrente que a bateria pode fornecer em 1 hora.

- **Estado de Carga (SoC do inglês *State of Charge*):**

Porcentagem da carga do valor total que resta na bateria.

- **Profundidade de descarga (DoD do inglês *Depth of Discharge*):**

Porcentagem de energia removida da bateria, quanto maior o DoD menor será o tempo de ida útil da bateria.

- **Tensão de circuito aberto (OCV do inglês *Open Circuit Voltage*):**

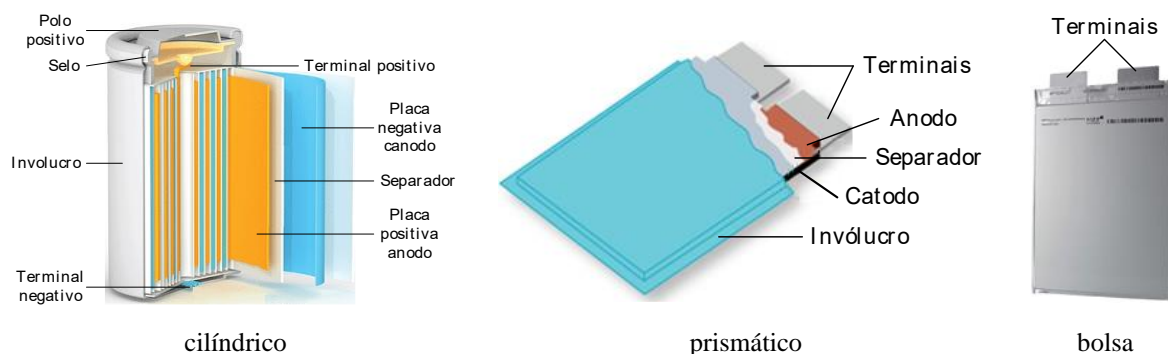
Tensão medida nos terminais da bateria em circuito aberto.

- **Vida útil:**

Forma que define o tempo de vida que uma bateria possui. Possui grandeza em números de ciclos

Referente as baterias que estão em evolução para a viabilização dos veículos elétricos temos a família de baterias de íons de lítio, que apresenta um grande número de baterias que se assemelham em algumas características, mas possuem composição químicas diferentes. A ilustração na Figura 2.16, são mostradas as configurações físicas que as baterias de íons de lítio são produzidas.

**Figura 2.16 - Configuração física das baterias íons de lítio**



Fonte: Adaptado de Battery University

As baterias comercialmente encontradas são:

- Óxido de cobalto e lítio -  $\text{LiCoO}_2$  - LCO;
- Óxido de níquel e lítio -  $\text{LiNiO}_2$  - LNO;
- Óxido de manganês e lítio -  $\text{LiMnO}_4$  - LMO;
- Fosfato de ferro e lítio -  $\text{LiFePO}_4$  - LFP;
- Óxido de níquel, manganês, cobalto e lítio -  $\text{LiNiMnCoO}_2$  - NMC;
- Óxido de níquel, cobalto, alumínio e lítio -  $\text{LiNiCoAlO}_2$  - NCA;

- Titanato de lítio -  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  - LTO;
- Eletrólito polimérico - Li-polímero.

A *Battery University*, um site educacional gratuito que oferece informações práticas sobre diversas baterias, nos mostra que a escolha da bateria deve ser avaliada quanto ao seu:

- Custo
- Ciclo de vida refletindo tempo de vida e longevidade;
- Desempenho em temperaturas quentes e frias;
- Segurança:
- Potência específica ou capacidade de fornecer alta corrente e energia ou capacidade específica relacionada ao tempo de operação.

Para auxiliar-nos nessa escolha de bateria, a Battery University nos orienta a utilizar-mos o gráfico radar hexagonal presente no Quadro 2.4

Quadro 2.4 - Avaliação das baterias de Li-íon



Análise: Quanto mais a forma se estende ao longo de um determinado eixo, melhor o desempenho ao longo daquela dimensão

Fonte: Adaptado de [51]

#### 2.4.4.2 Sistema de controle e monitoração da bateria

*Battery University* também relata a importância de as baterias serem controladas e monitoradas em todo momento, para obter suas informações do valor de tensão e a capacidade que nos mostrará conseqüentemente a autonomia do sistema, é necessário que todas as células

interligadas em série e/ou paralelo. O que nos leva a questão de segurança e operação equilibrada, pois caso o limite de tensão nas células ultrapasse o valor ideal, a tensão entre elas será desequilibrada, gerando reações exotérmicas no eletrólito e levará a diminuição da capacidade e da vida útil das baterias e nos piores casos, podem gerar explosões e a queima da bateria.

Para a viabilização segura da bateria de íons lítio foi necessária a inserção de um circuito eletrônico na célula de maneira que controlasse sua operação para eliminar os riscos como sub carga, sobrecarga, temperatura elevada, curto-circuito externo etc. Caso seja detectado algum risco a bateria, o circuito desabilita o seu funcionamento.

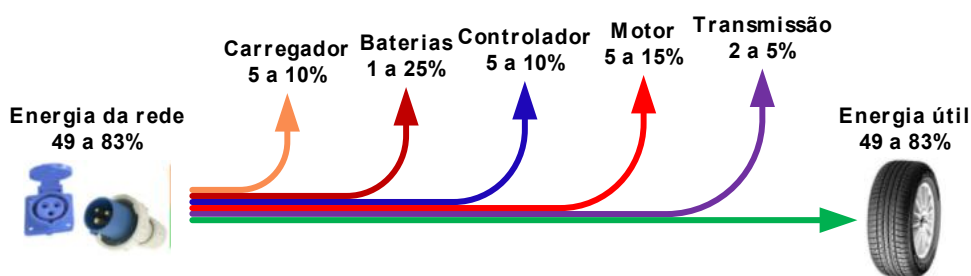
Além da solução do circuito eletrônico em cada célula, para melhorar o desempenho das baterias, é necessário um sistema eletrônico para monitorar e controlar somente a tensão e operação individual de cada célula.

Por essas situações é importante implementar o sistema de gerenciamento de bateria (BMS do inglês *Battery Management System*).

#### 2.4.5 Rendimento do VEB

Freitas nos fornece um diagrama de Sankey, conhecido também por diagrama de fluxo de energia, com os valores do rendimento de cada um dos elementos de um VEB conforme na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Diagrama de Sankey do fluxo de energia de um VEB



Fonte: Adaptado [59]

É possível analisar nesse estudo de caso presente no diagrama, os possíveis rendimentos entre a energia da rede e a energia útil utilizada. No melhor cenário um rendimento foi de 83% e para o pior cenário foi cerca de 49%, o que denota a eficiência de um VEB alta. Também podemos notar que a bateria e o motor elétrico são os elementos de maior perda no fluxo. O que afirma mais uma vez que o estudo proposto neste trabalho é de grande importância. Como este estudo tem por foco em melhorias dos motores, traz-se para análise e conhecimento da referência [42], os rendimentos de motores e controladores conforme Quadro 2.5.

Quadro 2.5 - Rendimento de motores e controladores

Tipo de motor	Rendimento [%]			Peso [kg/kWh]		Custo [US\$/kWh]
	Motor	Controlador	Motor e controlador	Motor	Motor e controlador	
Motor corrente contínua	80	98	78	4	4,5	2
Motor de indução	90	93	84	2	3	0,5
Motor síncrono de ímã permanente	97	93	90	1	2	1
Motor de relutância comutada	94	90	85	1,5	2,5	1,5

Fonte: Adaptado de [42]

### 2.4.5.1 Frenagem regenerativa

A frenagem ocorre quando o motorista pressiona o pedal do freio no veículo. Em uma frenagem tradicional, a energia cinética do veículo é transformada em energia térmica por atrito, sendo dissipada nos discos e pastilhas de freio. Em uma frenagem moderna, conhecida como frenagem regenerativa, é possível transformar a energia cinética do veículo em energia que retornam as baterias do VEB, dessa forma diz-se que a energia é reutilizável e assim gera um aumento da autonomia do veículo.

A utilização da frenagem moderna, elimina manutenções que são necessárias periodicamente na frenagem tradicional, como manutenções no sistema dos freios.

Existem outras formas de armazenamento de energia cinética, mas neste trabalho mencionaremos apenas este.

### 3 Motores elétricos

#### 3.1 Introdução

Um motor elétrico é um dispositivo de conversão de energia eletromagnética, que converte a energia elétrica entregue nos seus terminais de entrada em energia mecânica de rotação na ponta de seu eixo, baseando seu princípio de funcionamento nas interações eletromagnéticas dos campos magnéticos gerados pelas bobinas e ímãs, alojados na estrutura.

**Figura 3.1 - Motor elétrico**



Fonte: Adaptado de [18]

Os motores elétricos, chamados de “máquinas elétricas rotativas”, usados na tração de veículos elétricos, normalmente são reversíveis, isto é, podem funcionar como motor ou gerador. Geralmente são compostos por uma parte fixa (estator) e de uma parte móvel (rotor). Normalmente, os motores elétricos são projetados para possuir um pequeno espaço vazio entre o rotor e o estator, denominado de “entreferro”, que é utilizado para distribuição do fluxo magnético.

#### 3.2 Tipos de Motores Elétricos

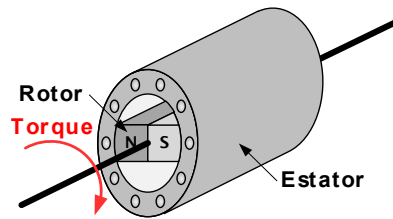
Os motores elétricos estão disponíveis e em funcionamento há quase dois séculos. Durante este período, baseados nas leis: Lei da indução de Faraday; Lei de Kirchhoff; Lei de Ampère; Lei de Biot-Savart, muitos esforços foram feitos por pesquisadores em todo o mundo para desenvolver e melhorar o projeto, a configuração e o desempenho. Atualmente, são encontrados motores elétricos com diversas topologias físicas.

Eles podem ser categorizados de acordo com a orientação do campo e a geometria do condutor como traz a referência [64]:

1. Motor de campo radial, onde o condutor é axial e o fluxo no entreferro é radial;



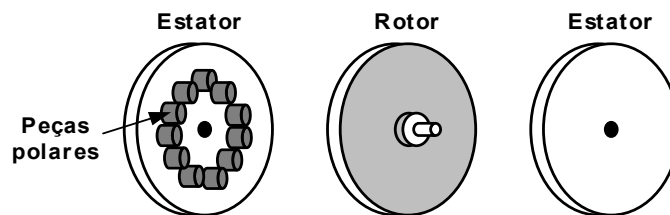
Figura 3.2 - Motor de campo radial



Fonte: Próprio autor

2. Motor de fluxo axial, onde o condutor é radial e o fluxo no entreferro é axial;

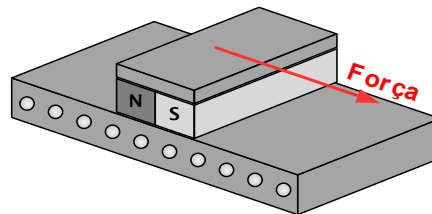
Figura 3.3 - Motor de campo axial



Fonte: Adaptado de [64]

3. Motor linear, onde o fluxo é mutuamente perpendicular e os condutores são dispostos ao longo de um caminho linear.

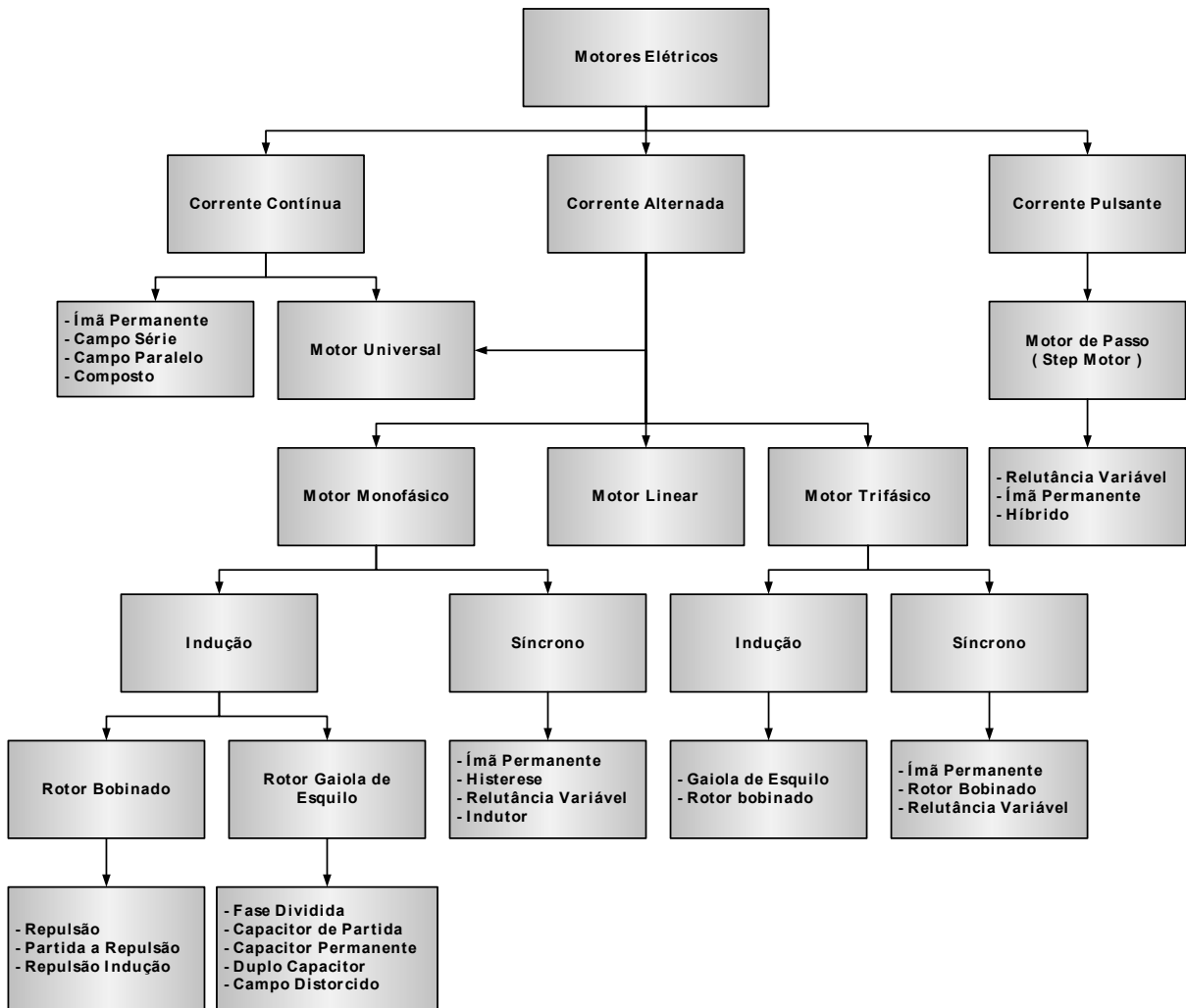
Figura 3.4 - Motor linear



Fonte: Próprio autor

De acordo com a forma de onda da corrente de alimentação, o motor elétrico pode ser classificado como de: corrente contínua, corrente alternada e corrente pulsante. Além disso, existe um tipo mais adequado de motor elétrico que atenda às necessidades de características técnicas de instalação e condições em que ele irá operar. Desse modo, tem-se a classificação dos tipos de motores elétricos quanto a tecnologia empregada disposta na Figura 3.5. Um motor elétrico deve ser especificado de maneira correta para a aplicação e desta forma, terá uma vida útil mais longa [18].

Figura 3.5 - Classificação dos motores elétricos



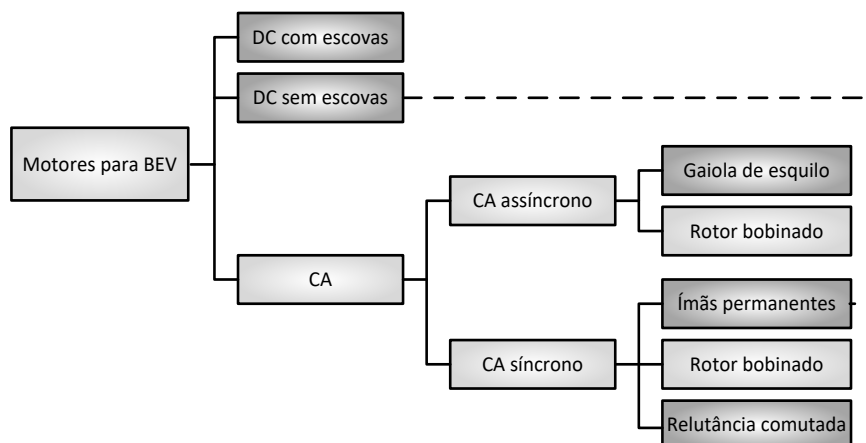
Fonte: Adaptado de [66] e WEG

### 3.3 Motores elétricos para tração de VEB's

A Figura 3.6 mostra um diagrama de blocos com os tipos de motores elétricos utilizados para tração de veículos elétricos:

- Motor em corrente contínua (MCC);
- Motor CA assíncrono de indução (MI);
- Motor CA síncrono de ímãs permanentes (PMSM);
  - Motor AC sem escovas (PMS ou BLAC);
  - Motor DC sem escovas (BLDC);
  - Motor de relutância comutado (SRM).

**Figura 3.6 - Diagrama de blocos com os tipos de motores aplicados aos VEB's**



Fonte: Adaptado de [34] e [59]

### 3.3.1 Motor CC com escovas

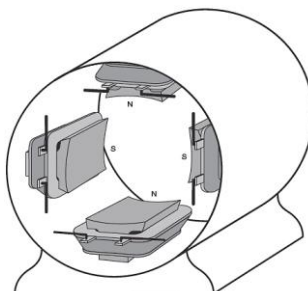
Os motores em corrente contínua com escovas (MCC) são compostos fundamentalmente de duas partes [18][24]:

- a. Estator;
- b. Rotor.

#### 3.3.1.1 Estator

O estator é a parte fixa no motor, que armazena toda a estrutura e componentes do motor em seu interior.

**Figura 3.7 - Estator de um MCC de 4 polos**



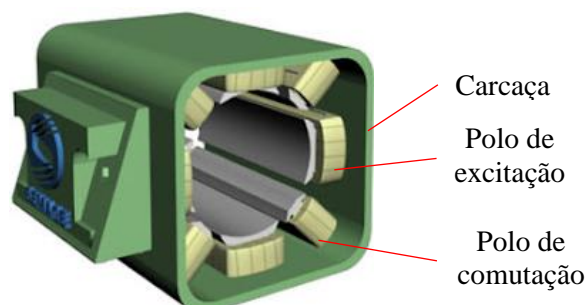
Fonte: [25]

O estator é formado por:

- Carcaça;
- Polos de excitação;
- Polos de comutação;
- Porta-escovas e escovas.

No estator estão montados os enrolamentos do circuito de campo (indutor).

**Figura 3.8 - Estator de um MCC com 4 polos e 4 interpolos**



Fonte: Adaptado de [26]

#### **3.3.1.1.1 Carcaça;**

A carcaça é uma estrutura de ferro fundido, que suporta o conjunto do motor e conduz o fluxo magnético. Seu contorno é estratégico para melhor aproveitamento de espaços conforme na Figura 3.8, o que facilita as inspeções e os eventuais reparos a serem realizados.

#### **3.3.1.1.2 Polos de excitação;**

Os polos de excitação têm por finalidade de gerar o fluxo magnético. Formam bobinas retangulares de cobre enroladas sobre um núcleo de lâminas de aço-silício denominado sapata polar.

#### **3.3.1.1.3 Polos de comutação;**

Os polos de comutação são bobinas de condutores de cobre sobre um núcleo de aço-silício que realizam a compensação do efeito da reação da armadura na região de comutação, reduzindo a possibilidade de centelhamento. São localizados entre os polos de excitação, e por isso, também conhecidos por interpolos, e percorridos pela mesma corrente da armadura.

#### **3.3.1.1.4 Porta-escovas e escovas.**

As escovas possuem em sua estrutura material condutor a base de carvão eletro-grafítico, são fisicamente pressionadas contra o coletor pelos suportes “porta-escovas”. As escovas se conectam ao comutador por pressão que as amolas exercem sobre as escovas, à medida que estas sofrem desgaste.

**Figura 3.9 - Escovas e porta-escovas**

Fonte: [18]

Os porta-escovas são fixados na carcaça pelos suportes de porta-escovas de maneira que permite que as escovas sejam pressionadas pelas molas realizem o movimento de deslizar sobre o comutador quando girado, o que permite a ligação elétrica entre a armadura e o exterior

### 3.3.1.2 Rotor

Na Figura 3.10 vemos o conjunto de um rotor ou induzido, que também é denominado de “armadura”.

**Figura 3.10 - Armadura**

Fonte: [18]

Basicamente o rotor é formado por [18]:

- Eixo;
- Rotor com enrolamento;
- Comutador.

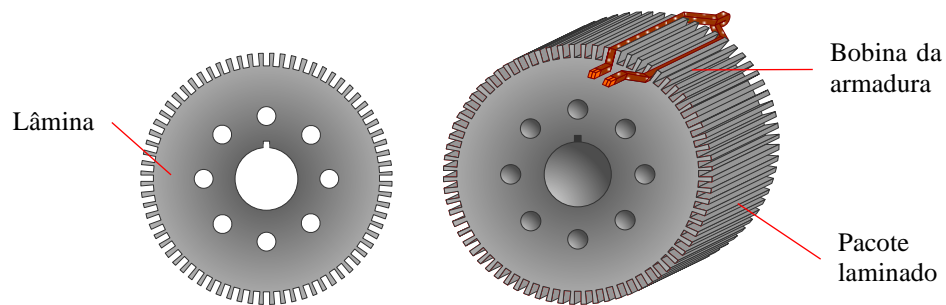
#### 3.3.1.2.1 Eixo

O eixo possui em como material em sua estrutura, o aço carbono. A finalidade do eixo é transmitir a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

### 3.3.1.2.2 Rotor com enrolamento

O rotor tem forma de tambor, é formado por um pacote de lâminas de aço-silício. É posicionado no centro da carcaça com ranhuras axiais em sua periferia que acomodam o enrolamento de armadura. O enrolamento de armadura que é constituído de espiras defasadas no espaço proporciona junto a essa estrutura um conjugado constante durante o giro completo do rotor.

**Figura 3.11 - Lâmina, pacote laminado e montagem das bobinas da armadura**



Fonte: [18]

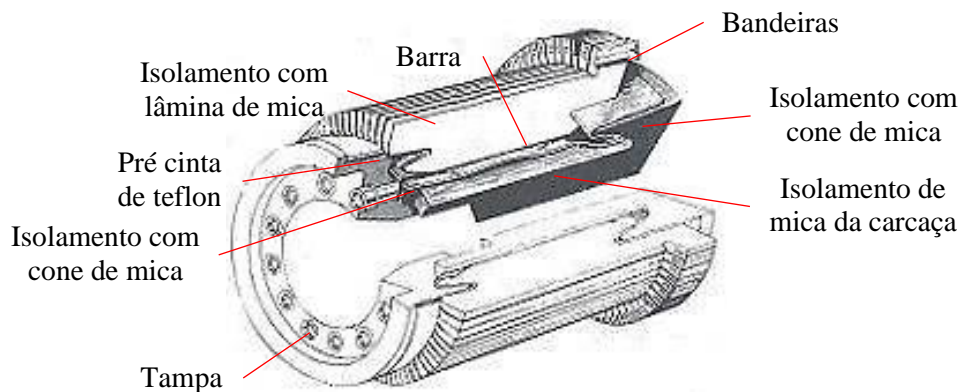
Este enrolamento de armadura é conhecido como enrolamento do tipo ondulado. Os motores que utilizam esse enrolamento são aplicados em situações que utilizam alta tensão e baixa corrente, conseqüentemente sua operação será em altas velocidades

### 3.3.1.2.3 Comutador

O comutador popularmente conhecido como te chamado “coletor”, está presente em todos os motores de corrente contínua. É uma parte mecânica que deve robusta pois que está sujeita a grandes variações de aceleração e frenagem [21].

O comutador é alimentado por uma fonte de corrente contínua, e sua finalidade é transforma a a ação mecânica em energia elétrica ao enrolamento da armadura, possibilitando a circulação de corrente alternada.

Figura 3.12 - Comutador detalhado



Fonte: [18]

Os comutadores exercem três funções básicas referente a referência [18]:

- Fornecem o contato elétrico deslizante indispensável entre as escovas fixas e a armadura em rotação;
- Atuam como chave de reversão;  
 À medida que as pontas das bobinas de armadura passam pelas escovas, o comutador transfere-as de um circuito para outro, fazendo com que todas as bobinas sejam atravessadas por corrente elétrica, fluindo sempre na direção correta.
- Conduzem à superfície das escovas a tensão de cada bobina da armadura do circuito; Essas tensões são adicionadas, lâmina por lâmina, entre as escovas.  
 Em consequência, a voltagem total de operação da máquina aparece nas escovas.

### 3.3.1.3 Motor em corrente contínua com excitação série

O MCC possui dois circuitos:

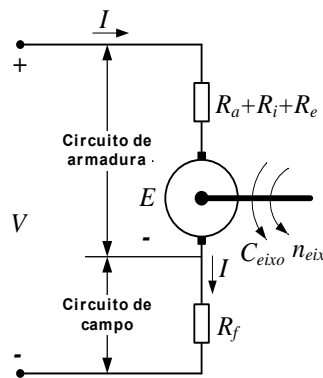
- **Circuito de armadura** ⇒ constituído pelas quatro bobinas de interpolo ligadas em série com a bobina de armadura.
- **Circuito de campo** ⇒ constituído pelas quatro bobinas de campo ligadas em série.

O circuito de campo e o circuito de armadura de um MCC podem ser ligados:

- Em separado (ligação independente);
- Em paralelo (excitação paralela ou campo shunt) - operam a velocidade constante
- Em série (excitação série ou campo série) - operam a potência constante

O MCC na configuração campo série possui as características mais apropriadas para atender o serviço dos veículos elétricos, pois apresenta um melhor conjugado mecânico na ponta do eixo do motor e mantém uma potência constante.

Figura 3.13 - Ligação dos circuitos de campo e de armadura



Fonte: [18]

### 3.3.1.4 Conjugado no eixo do motor

O funcionamento de um MCC está baseado nas forças produzidas pela interação entre o campo magnético e a corrente de armadura, que tendem a mover o condutor da armadura num sentido que depende do sentido do campo e da corrente na armadura. Com o deslocamento dos condutores da armadura no campo, surgem tensões induzidas, forças contra eletromotriz, atuando no sentido contrário ao da tensão aplicada. A soma das forças que atuam sobre os condutores da armadura gera um conjugado eletromagnético diretamente proporcional ao produto do fluxo magnético multiplicado pela corrente da armadura, dado por:

$$C_{eixo} = k_c \cdot \phi \cdot I \tag{5}$$

$k_c$  ⇒ Constante do motor;

$\phi$  ⇒ Fluxo magnético;

$I$  ⇒ Corrente de armadura.

O fluxo magnético na configuração do MCC com campo série, onde a corrente de armadura circula tanto no circuito de campo quanto no circuito de armadura, é diretamente proporcional a variação da corrente de armadura  $I$ , isto é:

$$\phi = a \cdot I \tag{5}$$

$a$  ⇒ Constante do motor;

$I$  ⇒ Corrente de armadura.

Substituindo a expressão do fluxo na expressão do conjugado, temos:

$$C_{eixo} = k_c \cdot a \cdot I^2 = B \cdot I^2 \tag{5}$$

$B$  ⇒ Constante do motor.

Lembrando que durante a tração, a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor pode ser dada pela expressão:



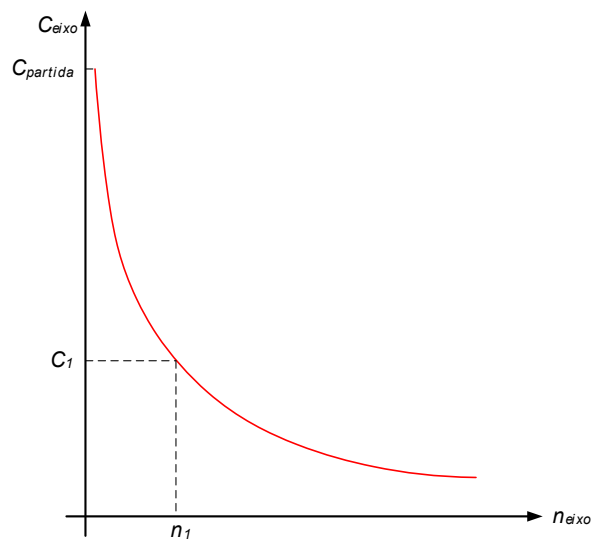
$$P_{eixo} = C_{eixo} \cdot n_{eixo} \quad (6)$$

$n_{eixo}$   $\Rightarrow$  Velocidade do eixo do motor.

$$C_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{n_{eixo}} \quad (7)$$

Se a potência for mantida constante igual a nominal, a relação entre o conjugado mecânico desenvolvido pelo motor e a velocidade na ponta do eixo do motor, segue a curva mostrada na Figura 3.14. Esta curva é chamada de “Característica Mecânica do Motor de Tração”, que é a característica mais importante de um MCC para tração em veículos elétricos.

**Figura 3.14 - Conjugado x Velocidade**



Fonte: Adaptado de [29]

Mesmo o MCC com campo série ser considerado em desuso, possui vantagens como:

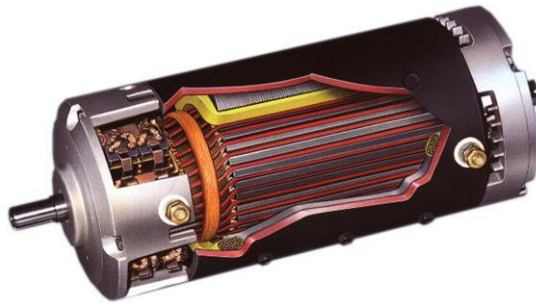
- Características de conjugado x velocidade elevada em baixas velocidades de rotação;
- Ampla variação de velocidade e um controle relativamente fácil, que o torna mais adequado para a tração de um VE.

As desvantagens:

- Possuem menor rendimento;
- São mais caros que os motores de indução
- Necessitam de manutenção como troca de escovas e limpeza de coletores.

Na Figura 3.15 podemos observar um exemplo de um MCC em corte, utilizado em VE.

Figura 3.15 - MCC em em corte



Fonte: Adaptado [40] e [59]

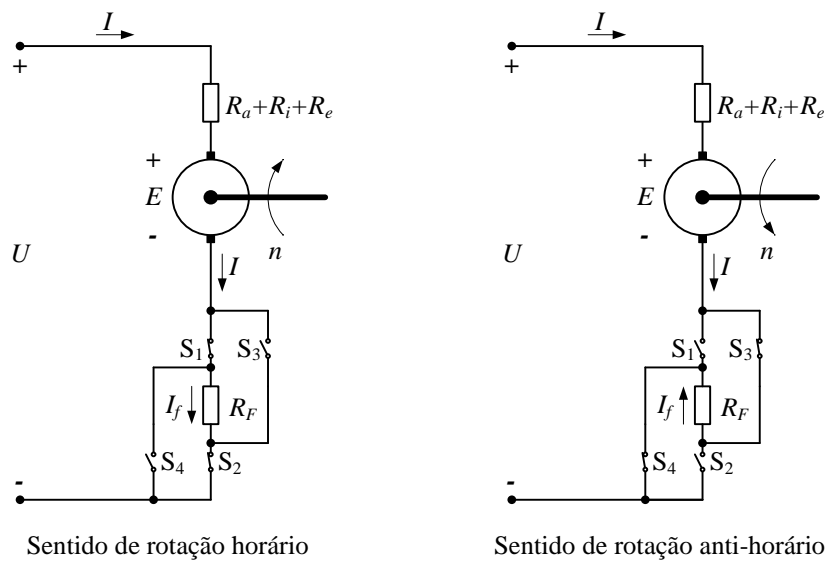
Esses motores também são populares por suas características:

- Tensão x corrente;
- Velocidade do eixo x corrente;
- Rendimento x corrente.

### 3.3.1.5 Sentido de rotação do motor CC com excitação série

Os MCC's devem funcionar nos sentidos de rotação horário e anti-horário conforme mostrado na Figura 3.16. O sentido de rotação do motor ocorre quando se inverte a polaridade de ligação do circuito de campo ou armadura de campo. Isso é realizado por um conjunto de chaves numa configuração em ponte e assim enviar corrente máxima ao motor [18].

Figura 3.16 - Sentido de rotação



Fonte: [18]

### 3.3.1.6 Frenagem elétrica do MCC

O MCC pode ser transformado em um gerador de energia, que converte a energia cinética (momento) em energia elétrica. Um exemplo prático é quando o MCC continuar girando sob a ação do veículo na situação de um declive, neste caso, o MCC produzirá um torque retardador, contrário ao torque produzido pela inércia. Esse tipo de freio não substitui o freio mecânico que para o veículo por completo.

Um MCC pode ser freado eletricamente recuperando a energia por dois modos [18]:

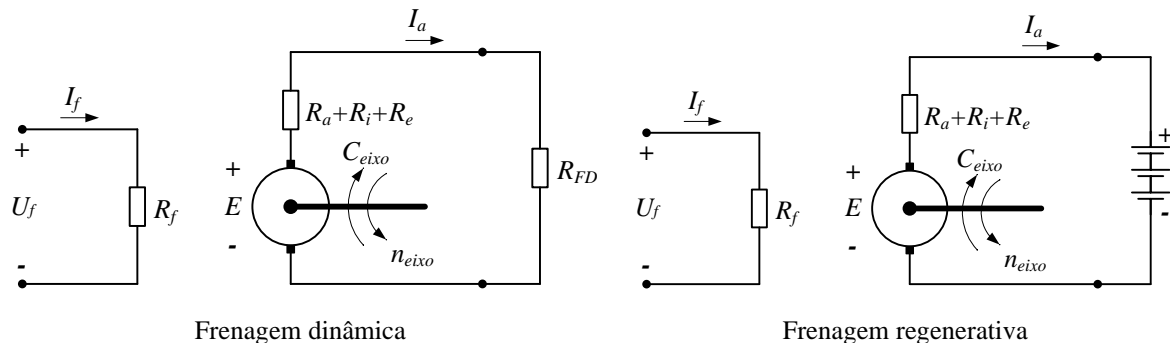
#### 1. Frenagem dinâmica

O MCC atuando como gerador, produz a energia elétrica que é dissipada em forma de calor, por efeito Joule, nos resistores do banco de resistências do freio dinâmico conectados aos terminais do motor.

#### 2. Frenagem regenerativa

O MCC atuando como gerador, produz energia elétrica que é devolvida ao sistema elétrico de alimentação fazendo com que a corrente elétrica percorra no sentido contrário ao normal.

Figura 3.17 - Esquêmatics do motor durante a frenagem elétrica



Fonte: [18]

A energia armazenada é utilizada no próprio sistema na operação do motor.

### 3.3.2 MCC com excitação por meio de ímãs permanentes

Esse motor existe desde 1837 e foi pouco utilizado devido à baixa eficiência que ele apresentava e o mecanismo de comutação era muito complexo. Nessa época os ímãs permanentes eram de baixa qualidade, e somente a partir de 1931 com a evolução desses ímãs que os estudos foram retomados [60].

### 3.3.3 Motor CA assíncrono de indução

O motor de corrente alternada (MCA) foi criado devido algumas limitações do MCC. Dentre essas limitações a que mais se destacava era o alto custo de manutenção devido a seu aspecto construtivo e obtenção de maior potência [18].

Os motores de corrente alternada trifásica utilizados na tração dos veículos [18], são divididos em duas classes principais [29]:

- a. Motor Síncrono;
- b. Motor Assíncrono de Indução.

O motor CA assíncrono de indução é constituído de duas partes básicas:

➤ Estator

O estator, a parte fixa do motor, é constituído pelos polos do motor, que podem ser da forma:

- Polos salientes
- Polos não salientes

➤ Rotor

É a parte rotativa do motor que pode se apresentar numa das duas nas formas:

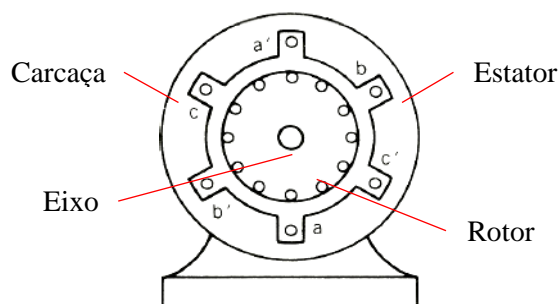
- Bobinado

O estator é bobinado à semelhança de outros motores. O motor com rotor bobinado não é muito usado em veículos elétricos por possuir coletores com escovas e assim ser mais caro e aumentar a manutenção.

- Gaiola de esquilo

A vantagem do rotor em gaiola de esquilo em relação ao rotor bobinado, é ter uma construção mais simples, mais barata, quase sem manutenção, resultando num motor bastante robusto. Porém o (conjugado) torque de partida não é muito elevado [21].

**Figura 3.18 - Estator e rotor de um motor CA assíncrono de indução**



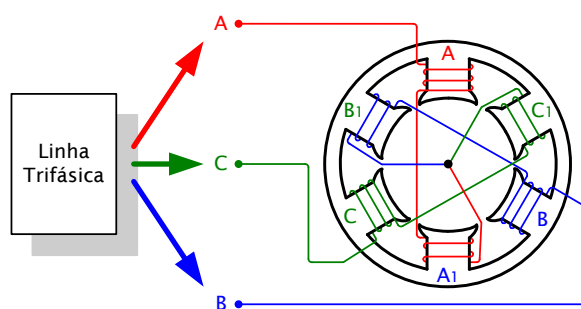
Fonte: Adaptado de [21]

Não há ligação elétrica entre o estator e o rotor. O rotor é livre de quaisquer conexões elétricas, sendo sua tensão totalmente induzida pelos campos magnéticos criados pela circulação das

correntes no estator. Portanto a corrente que circula nos enrolamentos de armadura no rotor é originada do fluxo magnético que cruza o entreferro (espaço vazio) entre o rotor e estator, portanto diz-se que os circuitos são acoplados magneticamente.

Portanto o movimento de rotação neste motor ocorre devido ao acoplamento magnético e a interação entre eles, pois estes tendem a se alinhar e, no entanto, como esse alinhamento não ocorre, o desalinhamento desses campos acaba gerando o conjugado e, portanto, ocorre a movimentação.

**Figura 3.19 - Alimentação dos três enrolamentos do motor**



Fonte: [18]

A curva do conjugado x velocidade produzida pelo motor não é adequada para a tração do VE, sendo necessário a aplicação de um inversor de frequência.

Quando uma tensão alternada trifásica é aplicada aos enrolamentos do estator, tem-se um campo magnético girante e essas características formam o motor CA assíncrono de indução trifásico.

Para a geração do campo magnético girante ocorrer é necessário dispor de três fases que são constituídas por enrolamentos idênticos e são dispostos simetricamente em eixos de  $120^\circ$ . Esses enrolamentos de fase devem ser percorridos por três correntes igual a frequência do valor eficaz, e assim como no espaço, no tempo elas também precisam ser defasadas de  $120^\circ$  [18].

Cada fase, gera um campo magnético pulsante direcionado ao seu eixo respectivo, então para cada instantes essas fases combinam seus campos magnéticos e sua orientação norte-sul gira continuamente e sua intensidade é constante [18].

Quanto a utilização MIT para a tração em veículos, quando comparado ao MCC, possui mais vantagens do que desvantagens como disposto no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1 - Vantagens e desvantagens do MIT com relação ao MCC**

Vantagens	Desvantagens
- Mais utilizado;	
- Menor custo;	
- Maior tempo de durabilidade;	
- Construção simples;	
- Construção robusta;	- Aumento da eletrônica embarcada;
- Resistente;	- Manutenção demanda profissionais especializados;
- Não possui comutador ou escovas;	- Custo inicial maior na aquisição.
- Baixa manutenção mecânica e elétrica;	
- Partida com menor sobrecarga térmica;	
- Frenagem dinâmica melhor;	
- Maior capacidade de potência;	
- Maior Capacidade de potência na tração.	

Fonte: Pelo próprio autor baseado nas informações de [18]

### 3.3.3.1 Velocidade Síncrona

No motor CA assíncrono de indução trifásica, o modo com que os enrolamentos são dispostos no estator que determina o número de polos pares magnéticos. Cada fase da alimentação trifásica deve ser conectada a cada polo magnético do estator, assim com a circulação de corrente é gerado um fluxo magnético em torno do estator chamada de campo magnético girante [18]. A velocidade de rotação do campo magnético girante é a “velocidade síncrona do motor”, definida pela expressão:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (6)$$

$f$  ⇒ Frequência da rede de alimentação;

$P$  ⇒ Número de polos criados no processo de enrolamento do estator.

### 3.3.3.2 Escorregamento

A diferença entre a velocidade de rotação do rotor e velocidade síncrona do motor (campo magnético girante) faz com que as linhas de forças aumentem que influenciam e induzem uma maior tensão no circuito do rotor causando a circulação de correntes induzidas elevadas na mesma frequência da linha de alimentação trifásica neste circuito. Essas correntes induzidas, geram seus próprios campos magnéticos, de polaridades opostas à do campo girante [18].

Como os campos opostos se atraem, e como o campo girante é rotativo, o rotor tenta acompanhar a rotação do campo girante, desenvolvendo um conjugado no motor que faz com que o motor gire acionando a carga acoplada ao eixo. Quanto maior a carga acoplada maior deve ser o conjugado que requer maiores campos produzidos e, portanto, maiores correntes induzidas, o que acarreta em uma maior diferença de velocidade de rotação do rotor e velocidade síncrona do motor e a também há uma diminuição do giro do rotor. Essa diminuição do giro do rotor, que é uma perda de rotação, precisa produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado referente a essa perda [18]. A esse conjugado eletromagnético chamamos de escorregamento, e pode ser expresso por:

$$s = n_s - n \quad (7)$$

$n_s$   $\Rightarrow$  Velocidade síncrona do motor;

$n$   $\Rightarrow$  Velocidade nominal do motor.

Teoricamente, para um motor girando em vazio e sem perdas, não temos tensão induzida no rotor, que irá girar na velocidade síncrona, isto é:

$$s = 0$$

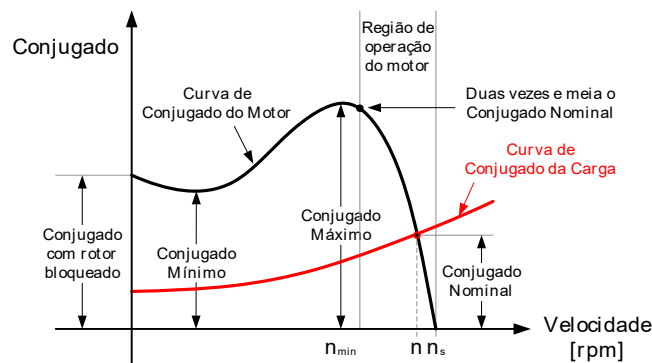
A indicação do escorregamento também pode ser feita em porcentagem da velocidade síncrona:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad \text{ou} \quad s = \left(1 - \frac{n}{n_s}\right) \cdot 100\% \quad (8)$$

### 3.3.3.3 Curva conjugado-velocidade

A curva característica que indica como o conjugado cresce com o aumento velocidade de rotação do motor, em um motor CA assíncrono de indução trifásico, para uma tensão de alimentação a uma dada frequência mantida constante pode ser visto na Figura 3.20. Portando o conjugado é diretamente proporcional ao aumento da velocidade, porém a curva atinge um ponto em que a reatância indutiva começa a limitar a corrente do rotor e a partir desse momento um aumento adicional na velocidade provoca um aumento na reatância indutiva, e assim causa uma diminuição na corrente do rotor e, conseqüentemente se verifica uma queda no conjugado. Caso o motor chegue na velocidade síncrona, podemos observar o conjugado nulo no gráfico [18].

Figura 3.20 - Curva conjugado-velocidade



Fonte: [18]

Portanto vimos que com o aumento de carga do motor, a rotação cai gradativamente até atingir um valor máximo de conjugado e ultrapassando esse ponto, haverá uma queda abrupta na velocidade e na potência do motor e isso pode causar o seu travamento, o que conclui-se que o melhor intervalo para operação de um motor CA assíncrono de indução trifásico está situado entre o ponto de velocidade síncrona e inferior ao conjugado máximo [18].

### 3.3.4 Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo [18]

Esse motor ganha espaço no mercado pois tem uma construção simplificada e é considerado confiável. Estruturalmente dividido em duas partes, estator e rotor que serão comentados nos próximos tópicos.

#### 3.3.4.1 Estator

Estruturalmente, o estator é um núcleo magnético formado por um pacote de aço laminado soldado a carcaça do motor, que possui a funcionalidade de reduzir as perdas por correntes parasitas, correntes de Foucault, e perdas por histerese. Os condutores de cobre das bobinas são distribuídos e engastados nas ranhuras existentes na periferia interna do núcleo magnético. A não existência de polos salientes, proporciona um entreferro uniforme em toda a superfície do núcleo magnético.

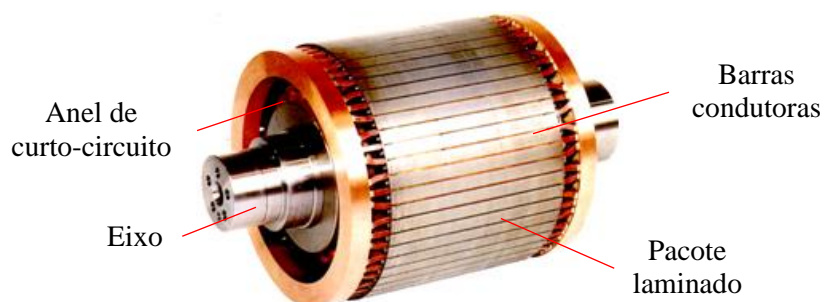


**Figura 3.21 - Estator do motor de indução**

Fonte: [18]

### 3.3.4.2 Rotor

Condutores de alumínio ou de cobre são engastados nas ranhuras paralelas existentes em um cilindro de aço laminado, que forma seu núcleo, e curto-circuitado por anéis condutores em ambas as extremidades. Por sua configuração e seu movimento se assemelhar ao de uma gaiola de esquilo, esse tipo de rotor recebe a denominação de “rotor gaiola de esquilo” [18].

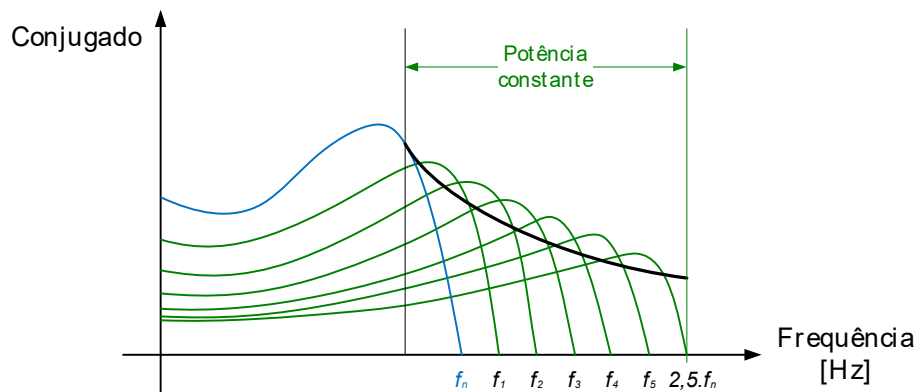
**Figura 3.22 - Rotor gaiola de esquilo**

Fonte: [18]

### 3.3.4.3 Controle de velocidade do motor de indução

O objetivo do sistema de controle ideal é fazer com que os motores de indução operem num nível de conjugado constante sobre toda a sua faixa de velocidades de operação. No entanto, só é possível manter-se o conjugado de saída praticamente constante até que a máxima tensão aplicada seja atingida, pois, infelizmente, a natureza dos motores elétricos de alta potência impede a produção de conjugado constante em velocidades elevadas. A partir desse ponto, o melhor que pode ser obtido é a operação com potência constante, isto é, nessa faixa de velocidades a relação tensão/frequência deve ser produzida de modo a assumir valores tais que a potência desenvolvida pelo motor seja constante [18].

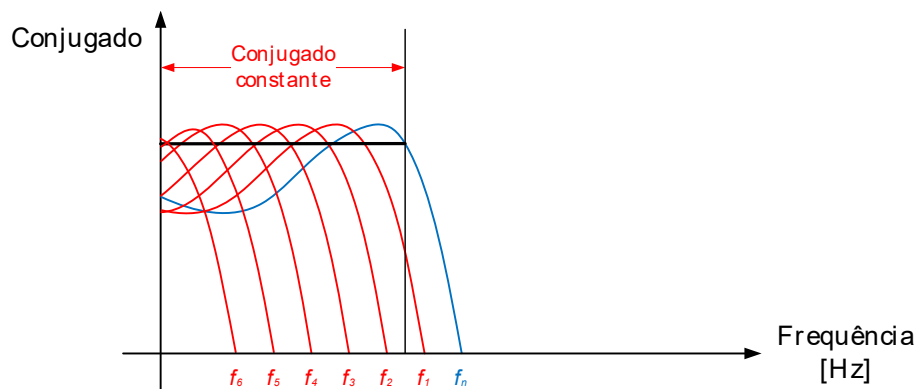
Figura 3.23 - Variação da velocidade com potência constante



Fonte: [18]

Se for feita uma tentativa de diminuir a frequência da fonte de alimentação do motor abaixo da nominal, causará uma corrente excessiva no estator que provoca uma saturação do fluxo no entreferro. Portanto, a região abaixo da frequência nominal deve ser acompanhada da correspondente redução da tensão de alimentação do estator de modo a manter o fluxo no entreferro constante [18].

Figura 3.24 - Variação da velocidade com fluxo constante

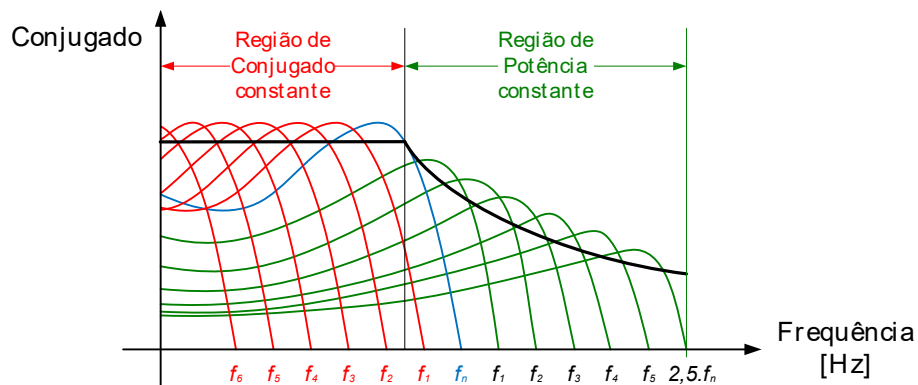


Fonte: [18]

Da Figura 3.24 podemos observar que o conjugado máximo permanece constante exceto na região de baixa frequência, onde o fluxo no entreferro é reduzido pela queda da impedância do estator. Nessa região a queda da impedância do estator deve ser compensada por um reforço adicional na tensão a fim de produzir o conjugado máximo [18].

As diferentes regiões das curvas conjugado-velocidade de um sistema de acionamento de um motor com fonte de tensão e frequência variáveis são mostradas na Figura 3.25.

Figura 3.25 - Regiões das curvas conjugado velocidade



Fonte: [18]

Como podemos observar da Figura 3.25, o motor tem duas regiões de operação separadas pela frequência nominal:

- Uma de conjugado constante;
- Outra de potência constante.

Na região de conjugado constante, se a frequência assumir um valor maior, a tensão deve ser aumentada proporcionalmente para que a corrente do estator permaneça a mesma de anteriormente. Assim, a corrente de magnetização é mantida constante o que garante o mesmo conjugado máximo. A relação tensão/frequência é linear com exceção para as baixas frequências, onde um reforço na tensão é requerido para compensar a queda no estator.

Uma vez que o motor é operado com um fluxo no entreferro constante, a sensibilidade do conjugado por ampère da corrente do estator é alta permitindo respostas rápidas aos transientes no sistema de acionamento [18].

Na extremidade direita da região de conjugado constante, a máxima tensão de alimentação é alcançada e o motor entra na região de potência constante ou região de enfraquecimento de campo. Nesta região, a velocidade do motor pode ser elevada pelo aumento da frequência, o que produz um decréscimo do fluxo no entreferro, mas a corrente de estator é mantida constante pelo aumento do escorregamento. O conjugado é reduzido porque para a mesma corrente de estator, a corrente de magnetização é reduzida com a redução da relação tensão/frequência. A redução do conjugado se dá segundo uma hipérbole retangular, de modo que a potência de saída permanece constante [18].

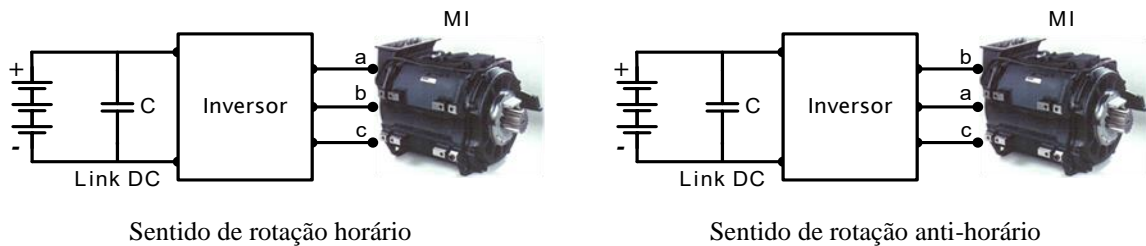
Num sistema de acionamento de tensão e frequência variável, usualmente o motor tem um baixo escorregamento, resultando numa melhor eficiência.

Apesar do baixo conjugado de partida para a operação na frequência nominal, o motor pode sempre partir com conjugado máximo.

### 3.3.4.4 Sentido de rotação

O sentido de rotação do MI pode ser facilmente invertido por meio da inversão da sequência de chaveamento das chaves estáticas, invertendo assim a sequência de alimentação trifásica para o motor.

Figura 26 - Sentido de rotação MI

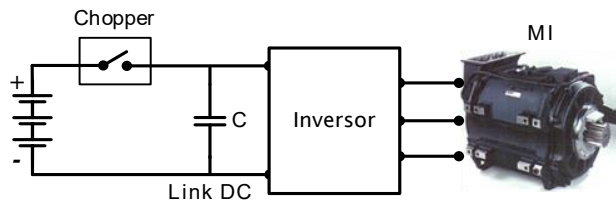


Fonte: [18]

### 3.3.4.5 Frenagem regenerativa

Se a velocidade síncrona do motor de indução for superada pela velocidade do veículo, o motor passa a operar como um gerador que fornece energia de recarga da bateria através de um circuito Recortador - *Chopper*, acionado por um sistema PWM.

Figura 3.27 - Circuito de freio regenerativa



Fonte: [18]

### 3.3.5 Motor Síncrono de Ímã Permanente

Os motores síncronos a ímãs permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM*), surgiram devido a uma necessidade de operação em altas faixas de velocidade e alta eficiência, em que o MI era insuficiente.

Estes motores são compostos fundamentalmente de duas partes:

- Estator;
  - Possui os enrolamentos de armadura que são alimentados por corrente alternada com o objetivo de produzir um fluxo magnético girante.
- Rotor.

No rotor são utilizados ímãs permanentes no lugar dos enrolamentos de campos, o que viabiliza uma maior faixa de velocidades.

A troca de enrolamentos de campos por ímãs permanentes para a geração do fluxo magnéticos contínuo e estacionário, proporciona ao motor um melhor rendimento, pois garantem uma grande redução nas perdas Joules, e conseqüentemente asseguram uma menor elevação da temperatura do motor.

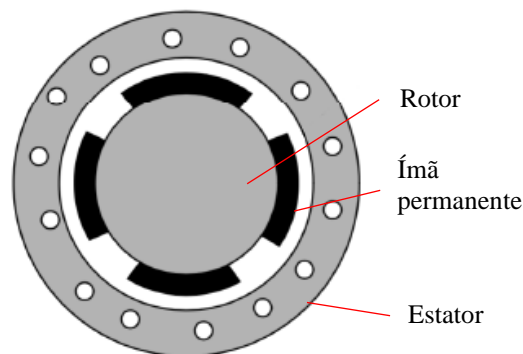
Os ímãs permanentes podem ser fixados:

- Na superfície do rotor;

O motor com ímãs superficiais apresenta uma capacidade limitada para operar em velocidades acima da nominal, com potência constante, devido à baixa indutância resultante do grande entreferro.

As indutâncias do eixo direto ( $L_d$ ) e quadratura ( $L_q$ ) são praticamente iguais e constantes.

**Figura 3.28 - Motor de polos salientes**

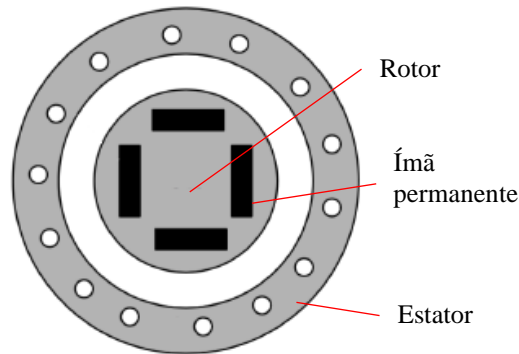


Fonte: Adaptado de [30]

- No interior do rotor.

A inserção dos ímãs no interior do rotor permite que o ímã fique protegido contra a força centrífuga, o que torna os motores capazes de operar em uma grande faixa de velocidades acima da nominal de potência constante, com operação de enfraquecimento de fluxo.

Devido à saliência do rotor, este tende a produzir indutâncias do eixo direto ( $L_d$ ) e quadratura ( $L_q$ ) diferentes. Esta saliência produz torque de relutância que, somado ao torque eletromagnético devido aos ímãs, produz um torque resultante maior.

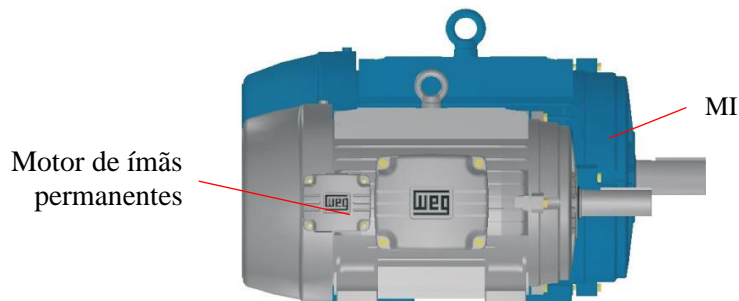
**Figura 3.29 - Motor de polos lisos**

Fonte: Adaptado de [30]

Quanto ao fluxo magnético, os PMSM's podem ser classificados em:

- Radial
- Axial
- Transversal

A substituição dos enrolamentos de campo por ímãs permanentes faz com que os PMSM's possuam tamanho e volume reduzidos e podem funcionar em uma ampla faixa de velocidades, sem necessidade de ventilação independente.

**Figura 3.30 - Comparativo de volume entre um MI e um motor de ímãs permanentes**

Fonte: Adaptado de [60]

Quando comparamos os motores de indução e de ímã permanente de mesma potência, percebe-se que o volume do motor de ímã permanente reduz cerca 47% ao MI, resultando em uma alta relação de torque/volume e uma redução de 36% no peso o que proporciona redução do sistema de ventilação e por conseguinte, seus ruídos e perdas por calor, o que aumenta a vida útil do mesmo [60].

Ainda, comparando com os MI's, esses motores também possuem alto torque, não só na partida, mas para uma grande faixa de velocidades e possui bons rendimentos.

A sua principal desvantagem é o preço, devido ao custo dos ímãs, normalmente feitos a partir de terras raras como o neodímio.

São motores propícios a aplicações que necessitem de elevado desempenho.

Os PMSM's alimentados por inversor de frequência podem ser utilizados onde a variação de velocidade com torque constante e alto desempenho são requeridos, possuem baixo peso, torque suave, baixo nível de rotação e baixos ruídos [60]. Também estão sendo usados em aplicações onde requer confiabilidade, torque suave, baixos níveis de vibração e ruído são fundamentais. Além disso, são muitos os atrativos para aplicações com espaço reduzido e necessidade de eliminação de redutores,

Os motores CA síncronos de ímãs permanentes são classificados em:

- Motor DC sem escovas - (*Brushless DC Motor* - BLDC);
- Motor AC sem escovas - (*Brushless AC Motor* - BLAC);

### 3.3.5.1 Motores CA síncronos de ímãs permanentes de fluxo radial [59]

Quando projetamos os motores de fluxo radial, FREITAS sugere que tenhamos atenção nos seguintes quesitos:

- Se os ímãs forem colocados no estator, os enrolamentos de cobre terão de ficar no rotor onde é mais difícil o escoamento de calor.
- Se os enrolamentos forem colocados no estator (onde é mais fácil arrefecer) os ímãs terão de ficar no rotor, o que no caso de ímãs à superfície, limita a velocidade (a força centrífuga pode descolar os ímãs).

**Figura 3.31 - Motores de ímãs permanentes de fluxo radial**



Fonte: [59]

A Figura 3.32 mostra um motor PMSM de fluxo radial fabricado pela Honda.

**Figura 3.32 - Motor PMSM de fluxo radial do Honda IMA**

Fonte: [59]

### 3.3.5.2 Motores CA síncronos de ímãs permanentes de fluxo axial [59]

FREITAS destaca as vantagens que possuem os motores de fluxo axial em relação ao de fluxo radial:

- Possuem elevada densidade de potência;
- Elevado torque, devido a grandes diâmetros, a mesma força com braço maior;
- Podem funcionar como volante de inércia (*flywheel*);
- São facilmente integrados dentro da roda do veículo, devido as dimensões axiais bastante reduzidas;

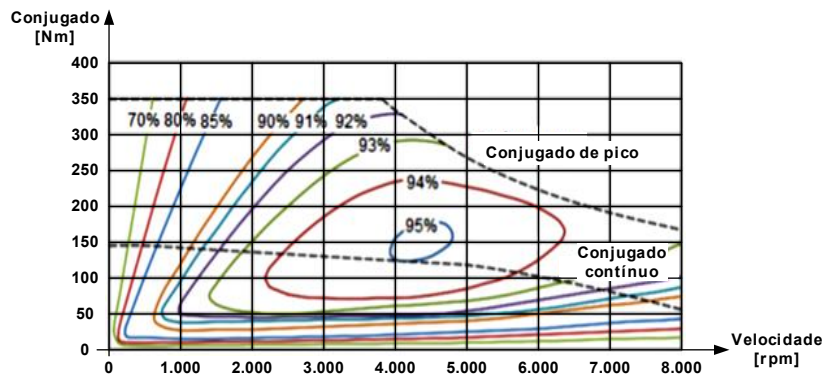
**Figura 3.33 - Motores de ímãs permanentes de fluxo axial**

Fonte: [59]

A forma física com que os motores de fluxo axiais são dispostos, facilita a passagem do ar entre os elementos que compõem os motores, o que elimina a chances de eventuais problemas relacionados a temperatura que podem ir danificar os isolamentos das bobinas e desmagnetização dos ímãs permanentes.

A Figura 3.34 mostra o mapa de rendimento de um motor PMSM de 64kW, de fluxo axial e arrefecido a água.



**Figura 3.34 - Mapa de eficiência da unidade, incluindo perdas na eletrônica de potência**

Fonte: [59]

Os motores de fluxo axial, podem assumir três configurações:

- Face simples;
- Dupla face;
- Multidiscos.

Na Figura 3.35 se tem uma vista externa e outra interna de um motor de dupla face.

**Figura 3.35 - Motores de ímãs permanentes fluxo axial de dupla face**

Fabricante EVO



Fabricante APEX

Fonte: Adaptado de [59]

Surgiu recentemente a tecnologia dos motores de fluxo axial multidiscos. São motores em forma de disco e poderão possuir o mesmo torque de um motor de ímãs permanentes. É como ter vários motores numa só carcaça, sendo que cada face é composta por um par de discos magnéticos (ímã e bobina).

Quando submetidos a várias faixas de rotação, conseguem manter a potência constante, suportando maiores temperaturas.

Quanto aos custos de produção, FREITAS afirma que os novos motores se mantêm quando comparados aos motores de indução, e é significativamente inferior ao dos motores síncronos de ímãs permanentes e não requer o uso de “terras raras” cujo monopólio é detido por poucos países.

### 3.3.5.3 Motores CA síncronos de ímãs permanentes de fluxo transversal [59]

A tecnologia de fluxo transversal está sendo estudada atualmente, mas sua origem foi em 1896. Quando comparado com o motor de fluxo axial, seu tamanho pode ser reduzido gerando a mesma potência, porém seu custo de produção é alto.

**Figura 3.36 - Motores de ímãs permanentes de fluxo transverso**



Fonte: [59]

Outros motores de ímãs permanentes de fluxo axial citados por FREITAS são:

- Yasa Motors, Figura 3.37, que reduz a temperatura por meio da água.
- KLD, Figura 3.38, que reduz a temperatura por meio do ar. Foi criado justamente para reduzir a poluição da Malásia (na Ásia).

**Figura 3.37 - Motor de fluxo axial da Yasa Motors**



Fonte: [59]

**Figura 3.38 - Motor de fluxo axial da KLD**



Fonte: [59]

O veículo elétrico híbrido HEV parece ser uma das melhores maneiras de reduzir o consumo de combustível. Consiste em associar um motor elétrico junto ao motor térmico clássico. Neste sistema embarcado, a eficiência e o torque por unidade de massa são muito importantes.

Portanto, parece ser uma boa ideia usar um motor síncrono de ímã permanente, que é reconhecida por atender a esses dois objetivos.

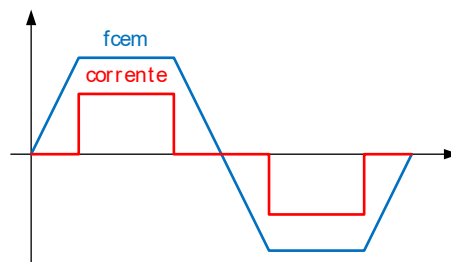
#### 3.3.5.4 Motor DC sem escovas

O motor DC sem escovas (*brushless* DC - BLDC), também conhecido por ECM (*Electronically Commutated Motor*), na verdade é um motor CA, que recebeu essa denominação porque foi desenvolvido a partir do motor DC com escovas e porque sua característica de conjugado  $\times$  velocidade é muito semelhante à do motor DC com escovas. Componentes eletrônicos adicionais, que podem ser fixados na carcaça, permitiram a eliminação das escovas ao se utilizar de sensores para identificar a posição de rotação da armadura e comutar as correntes dos enrolamentos. Assim, sendo possível fornecer o motor mais energia eliminando faíscas (uso de escovas) [62].

A partir de 1962, com a disponibilidade de circuitos eletrônicos mais complexos e de baixa custo, os motores DC sem escovas passaram a ser produzidos com excitação por meio de ímãs permanentes. Então em 1983 o uso de motores BLDC aumentou após a criação dos ímãs de terras raras de Neodímio - NdFeB [62].

O BLDC foi desenvolvido para que atender uma forma de onda da força contra eletromotriz ( $f_{cem}$ ) trapezoidal [60], geralmente obtida com a montagem dos ímãs permanentes na superfície do rotor. A corrente de alimentação dos enrolamentos do estator idealmente tem a forma retangular sincronizada com a posição do rotor, através do uso de sensores, de efeito Hall e ópticos, conforme mostrado na Figura 3.39.

Figura 3.39 - Forma de onda da  $f_{cem}$  e da corrente no motor



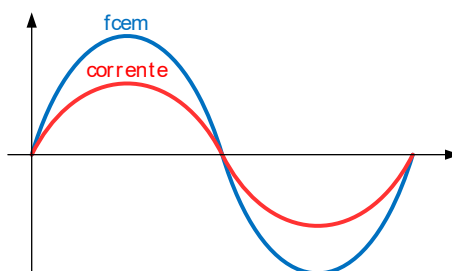
Fonte: Adaptado de [60]

Este tipo de motor apresenta um conjugado mais pulsante em relação ao *brushless* AC, e geralmente, são utilizados em aplicações menores potências (kW) e baixo desempenho [60].

### 3.3.5.5 Motor AC sem escovas

O motor AC sem escovas (*brushless AC - BLAC*) pode ser desenvolvido com ímãs superficiais ou ímãs internos no rotor que possui o intuito de gerar torques suaves através de uma  $f_{cem}$  e corrente de alimentação senoidais conforme Figura 3.40 [60].

Figura 3.40 - Forma de onda da  $f_{cem}$  e da corrente no motor



Fonte: Adaptado de [60]

Portanto o motor *brushless AC* é mais utilizado em aplicações onde requer um alto desempenho, pois seu controle é mais complexo do que o motor *brushless DC* [60].

### 3.3.6 Motor de relutância comutada

O motor de relutância comutada - SRM, também é conhecido como motor síncrono de relutância variável – MRVT, é composto fundamentalmente de duas partes [18]:

- Estator;

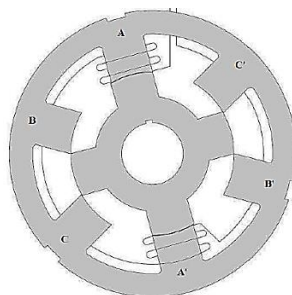
Se assemelha ao de um motor de indução com polos salientes, que acomodam em sua estrutura os enrolamentos de campo, e são excitados pela circulação da corrente alternada.

- Rotor.

É constituído por ferro laminado, com polos salientes, isentos de enrolamentos. Portanto não possui perdas por circulação de corrente no rotor.

O número de polos do rotor é sempre menor do que o número de polos do estator.

Figura 3.41 - Seção Transversal do MRVT 6x4



Fonte: [35]

O princípio de funcionamento é bastante simples. A excitação dos campos ocorre de forma sequencial entre as fases do estator. O conjugado é gerado pela tendência do rotor se alinhar com o polo do estator, quando a indutância e o fluxo produzidos pelo bobinado do estator são máximos. O conjugado contínuo é produzido por uma sincronização de excitação de cada fase com a posição do rotor.

Apesar de apresentar:

- Construção simples, robusta e de baixo custo;
- Operação a velocidades elevadas;
- Excelente controlabilidade;
- Bom rendimento;
- Funcionar facilmente como gerador;
- Permitir o funcionamento a temperaturas elevadas;

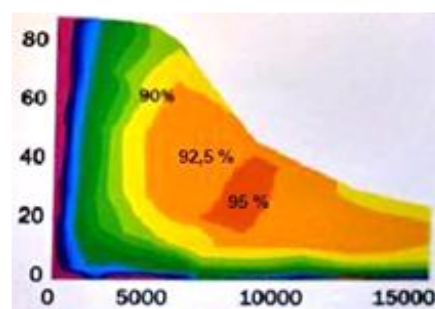
o motor de relutância comutada - SRM era considerado como inapropriado para uso em VEB's, por possuir uma densidade de potência comparativamente baixa, o que requer motores grandes e pesados. No entanto, seu desenvolvimento, nomeadamente por Akira Chiba, professor da Universidade de Tóquio, possibilitou um aumento na sua densidade de potência, tornou o motor menor, e conseqüentemente bastante promissor para uso em VEB's.

Segundo FREITAS, em 2012 a empresa Nidec apresentou um motor SRM de 19 kW em Tokyo (44 kW de pico) com torque de 50 Nm (86 Nm de pico) e rotação máxima de 12.000 rpm. O motor tem um diâmetro de 177 mm e pesa cerca de 26,5 kg. A Figura 3.42 mostra uma foto e o mapa de rendimento desse motor [59].

Figura 3.42 - Motor SRM da Nidec



motor SRM



mapa de rendimento

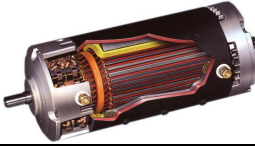



Fonte: [59]

### 3.4 Avaliação de motores para veículos elétricos

Na Tabela 3.1 é mostrado a avaliação para os quatro motores dos VEB's com nota mínima zero (muito ruim) e nota máxima cinco (muito bom). Essa avaliação auxilia na escolha do motor

para o VE, mas também são necessários analisar em que condições o motor irá operar, e qual transmissão é mais adequada [59].

Tabela 3.1 - Avaliação de tecnologias de motores elétricos

Tipo de motor	CC (c/escovas)	Indução	Ímãs permanentes	Relutância comutada
Característica				
Densidade de potência	2,5	3,5	5	3,5
Rendimento	2,5	3,5	5	4
Controlabilidade	5	4	4	4
Confiabilidade	3	5	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4
Custo	4	5	3	4
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>24,5</b>

Fonte: Adaptado de [44] e [59]

### 3.5 Resfriamento dos motores elétricos segundo a norma IEC 60034

FREITAS nos lembra o quão importante é eliminar o calor gerado pelas perdas elétricas e mecânicas, menciona também que a norma IEC 60034 classifica esse resfriamento em três grandes grupos [59]:

- Motores abertos: Onde meio para retirar o calor é o ar;
- Motores fechados arrefecidas a ar: Onde meio para retirar o calor é o ar através de ventiladores;
- Motores fechados arrefecidos a líquido, onde o meio para retirar o calor é água ou óleo.

Figura 3.43 - Motor elétrico arrefecido a água



Fonte: [59]

## 4 Motores de fluxo magnético axial

### 4.1 Introdução

Podemos analisar historicamente que os primeiros motores eram do tipo de fluxo magnético axial. Em 1821 o físico químico Michael Faraday desenvolvia este motor, porém devido às limitações dos materiais utilizados para a construção do motor na época, não foi possível criar um protótipo que alcançasse o sucesso e pleno funcionamento [23][34]. O problema que limitou o desenvolver desse motor naquela época, foi a existência de uma força magnética grande entre o estator e o rotor então a única solução foi substituir estes motores pelos motores de fluxo radial [64]. Com o desenvolvimento e melhora do material destinado a construção desse tipo de motor, nos últimos anos, o motor de ímã permanente de fluxo axial (AFPM) tem sido estudado com crescente interesse e fabricado em grande escala [23][34].

Dentre várias vantagens desses motores, destacam-se nos estudos a alta relação de potência/peso. Portanto, com a estrutura geométrica adequada e a possibilidade de realizar motores compactos de múltiplos estágios, os motores de fluxo axial serão usados no futuro em diversas aplicações potenciais, que incluem os sistemas de tração de acionamento direto para VEB's.

A aplicação ideal, será analisada conforme a posição do rotor e estator, bem como a quantidade utilizada de cada um, e o arranjo dos enrolamentos [63].

Na referência [63], os autores mostram que temos duas características em qualquer estrutura de motores de fluxo axial:

1. O fluxo trafega no sentido axial;
2. Possui ímãs permanentes no rotor.

### 4.2 Classificação dos motores de fluxo axial

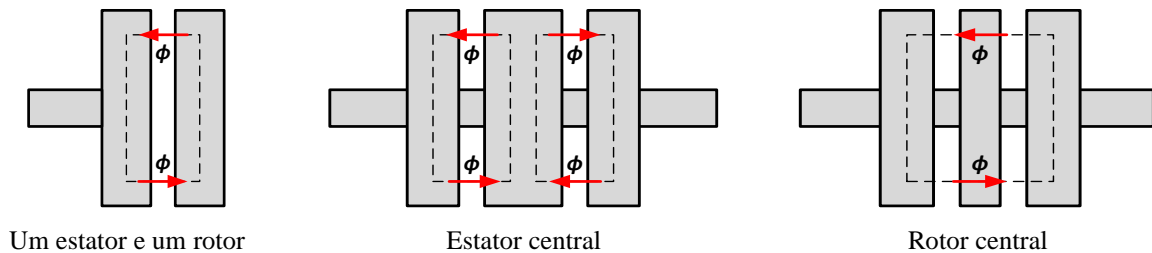
Os autores da referência [64], classifica as possíveis estruturas desses motores de acordo com o circuito magnético:

1. Um estator e um rotor (um entreferro): geram uma alta atração magnética entre si e fornecem um bom torque;
2. Um estator entre dois rotores (entreferro duplo): configuração também conhecida por estator central. Essa configuração potencializa o torque e seus dois rotores atuam como ventiladores naturais no sistema;
3. Um rotor entre dois estatores (entreferro duplo): configuração também conhecida por rotor central. Essa configuração potencializa o torque.

4. Vários estágios, inclui diversos rotores e estatores no mesmo eixo - motor multidisco (vários entreferros): eliminam a restrição que se tem sobre o diâmetro do motor e o torque eletromagnético, pois estes são grandezas diretamente proporcionais. E sabemos, que o diâmetro é um fator limitador para motores adicionados a roda. Portanto essa configuração proporciona maiores torque que as demais.

A Figura 4.1 mostra as topologias do circuito magnético de um motor de fluxo axial.

**Figura 4.1 - Topologias do circuito magnético de um motor de fluxo axial**



Fonte: Adaptado de [64]

### 4.3 Diferenças entre motores de fluxo axial e de fluxo radial

Em teoria, cada tipo de motor de fluxo radial terá um motor de fluxo axial análogo [23]. Portanto, um motor de fluxo axial pode operar como um motor DC, bem como um motor AC síncrono ou de indução.

Na prática, os motores de fluxo axial para tração estão limitados aos três seguintes tipos [23]:

- Motor DC sem escovas BLDC - utiliza ímã permanente;
- Motor de indução BLAC - utiliza ímã permanente;
- Motor de relutância comutada MVRT - utiliza relutância variável.

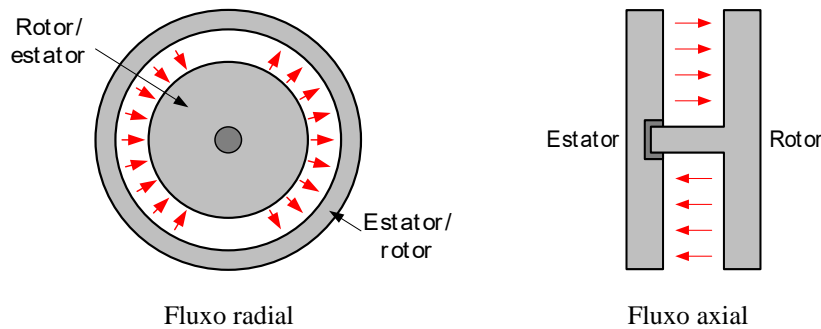
Os motores de fluxo axial diferem dos motores de fluxo radial nos seguintes pontos [64]:

1. O fluxo no entreferro é axial a direção.

O sentido do fluxo é estabelecido ao redor do eixo mecânico do motor radial, enquanto nos motores de fluxo axial o fluxo magnético fica estabelecido paralelamente ao eixo.



Figura 4.2 - Direção do fluxo magnético no motor



Fonte: Adaptado de [37]

- Os condutores ativos de corrente são posicionados radialmente.

A corrente que percorre a bobina do estator interage com o fluxo gerado pelos ímãs no rotor, produzindo uma força tangencial ao rotor [63].

- Os núcleos do estator e do rotor são do tipo disco.

- Uma porcentagem maior do enrolamento do estator produz torque.

O enrolamento pode variar sua disposição geométrica de acordo com o projeto requerido. No motor Torus o enrolamento do estator é disposto em uma configuração toroidal. Assim, as duas superfícies de trabalho do núcleo são ambas ativas para a conversão de energia eletromecânica.

- Obtenção maior da relação potência/peso, pois reduz o material do núcleo e a potência fornecida continua alta. Portanto, com a redução do volume, o momento de inércia do motor também diminui.

- Precisa de menor espaço físico para produzir os motores.

- O momento de inércia influencia a reposta do motor.

Para uma mesma potência nominal, os motores de fluxo axial possuem comprimento axial curto, porém, o diâmetro maior, enquanto nos motores de fluxo radial, o comprimento axial é maior, mas o diâmetro é menor. Portanto no motor de fluxo axial, o momento de inércia é baixo para discos que possuem raio pequeno e para discos que possuem raio grande, o momento de inércia também será alto.

Quando consideramos apenas as características mecânicas dos motores, a melhor escolha para VE's, seriam os motores de fluxo magnético axial, mas quando analisamos que os motores de fluxo magnético radiais podem ser desenvolvidos mecanicamente com facilidade, isto faz com que suas características elétricas o tornem a melhor opção para a empregabilidade nos VE's [62].

Na Tabela 4.1 estão mostradas as principais diferenças entre as características mecânicas e elétricas entre os motores de fluxo axial e radial.

**Tabela 4.1 - Características dos motores**

	<b>Característica</b>	<b>Motor axial</b>	<b>Motor radial</b>
Mecânicas	Enrolamento (necessidade de cobre)	Bobinas menores (menos cobre)	Bobinas maiores (mais cobre)
	Área para a montagem do enrolamento	Restrito	Não é crítico
	Alteração do entreferro	Simples	Exige reprojetado do motor
Elétricas	Torque do motor	Bom	Maior
	Potência do motor	Bom	Maior
	Força radial	Irrelevante	Significativa
	Força axial	Significativa	Irrelevante
	Corrente no atuador ao aumentar a rotação	Aumenta a corrente	Aumenta muito menos

Fonte: Adaptado de [62]

#### 4.4 Utilização dos motores de fluxo axial

As vantagens produzidas pela utilização do motor de fluxo axial, são [37]:

- Mais leve;
- Construção compacta;
- Potência elevada;
- Torque elevado;
- Não possui perdas do cobre no rotor devido à existência de ímãs permanentes;
- Estrutura mais robusta.
- Estrutura promove a melhor circulação de ar.

Em contrapartida, sua utilização apresenta como desvantagens [37]:

- Alto custo de fabricação;
- Alto momento de inércia para grandes raios nos discos;
- Falhas mecânicas ligadas a trepidação.
- Possui altas perdas no enrolamento em aplicações com velocidade elevada;

## 4.5 Rotor

O rotor, ou enrolamento de armadura deste tipo de motor, é fabricado com fios de cobre, que podem ser enrolados em torno do rotor ou impressos, onde não existe o núcleo ferromagnético [23]. Os rotores que possuem ímãs permanentes, são livres de enrolamentos.

### 4.5.1 Funcionamento

O princípio de funcionamento do motor de fluxo axial é baseado na interação entre os fluxos magnéticos gerados pelos ímãs e pelas bobinas, que se originam na atração e repulsão dos polos magnéticos quando alimentados.

O alinhamento dos polos do rotor ocorre pela atração dos polos de enrolamento do estator quando alimentados por corrente, o que proporciona o giro do motor. No caso dos VE's, o giro do motor pode ser usado para andar para frente ou para dar ré (movimento horário e anti-horário).

Para eliminar possíveis conjugados negativos quando o rotor passar da posição de alinhamento, se faz necessário que a corrente seja zerada antes do próximo alinhamento [63].

Quando ocorre a comutação entre o rotor e estator, é necessário que exista um módulo de potência para que essa interação ocorra de forma segura. A posição do rotor deve ser sempre controlada, pois o conjugado gerado pelo rotor deve estar relacionado as fases excitadas [63].

O controle dos acionamentos CA que alimentam os motores de ímãs permanentes requer o conhecimento da reatância transitória e das constantes de tempo do motor. Além disso, a geometria não convencional dos motores, requer uma discussão dedicada ao assunto de identificação de parâmetros.

## 4.6 Principais configurações de motores de fluxo axial [64]

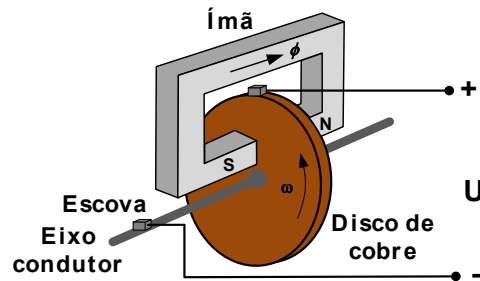
Existem muitas estruturas de motores de ímãs permanentes de fluxo axial sendo estudadas. O básico é composto por um rotor com ímãs permanentes que se alternam entre norte e sul para interagirem com um estator laminado que possui enrolamentos multifásicos. Existem também estruturas multicamadas.

### 4.6.1 Disco de Faraday

Foi desenvolvido por Faraday quando iniciou seus estudos de motores de fluxo magnético axial em 1982, e pode ser conhecido como gerador ou motor homopolar conforme Figura 4.3.

Faraday demonstrou que o disco de cobre sendo girado gerava uma tensão nas escovas como mostra na Figura 4.3 [64].

**Figura 4.3 - Disco de Faraday ou motor homopolar**



Fonte: Adaptado de [64]

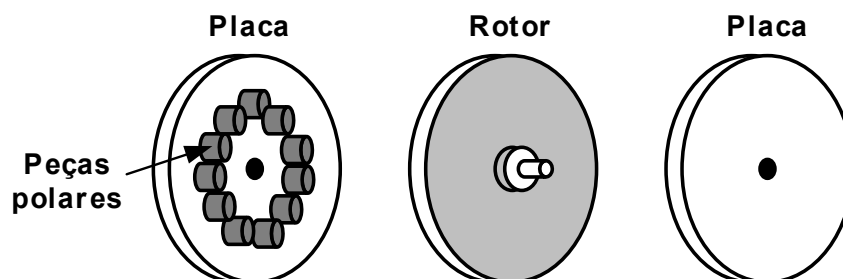
Esta máquina tinha a desvantagem de ter um pico na corrente de magnetização muito grande devido ao grande entreferro do disco do rotor, impossibilitando a implementação naquele momento.

#### 4.6.2 Motores de placa de circuito impresso

A primeira placa de circuito impresso (PCB do inglês *printed-circuit-board*) em motor DC, foi no ano de 1958 criado por F. H. Raymond e J. Henry-Baudot. Essa tecnologia proporciona as vantagens de se obter motores mais leves, com baixa inércia de rotação e mais rápidos [64].

As linhas condutoras no rotor, são projetadas com folhas de cobre e soldadas no disco. Disco esse que une as linhas condutoras com o comutador em seu centro. A representação esquemática de um motor PCB é mostrada na Figura 4.4.

**Figura 4.4 - Motor de fluxo axial**



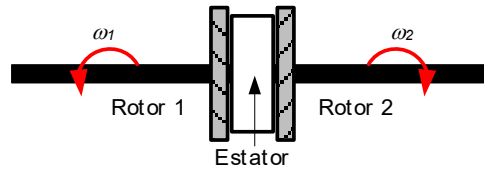
Fonte: Adaptado de [64]

#### 4.6.3 Motor de indução diferencial eletromagnético de fluxo axial

Na Figura 4.5 podemos analisar a estrutura sanduíche que forma os dois rotores que possuem enrolamentos de forma de gaiola de esquilo com um único estator possui enrolamento de forma toroidal. Essa estrutura proporciona que cada rotor possua sua velocidade angular independente,

portanto possuem giros distintos. Para que seja gerada uma densidade de fluxo adequada, é necessário que os entreferros sejam minimizados [64].

**Figura 4.5 - Motor com um estator e dois rotores**



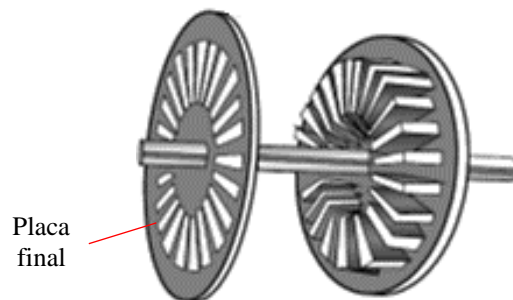
Fonte: Adaptado de [64] e [37]

Esta estrutura tem sido utilizada em veículos não só para o acionamento de rodas, mas também como o diferencial.

#### 4.6.4 Motores de fluxo axial com núcleo de armadura sem forma

Este motor compreende dois núcleos de rotor dentados em formas de lâminas conforme mostrado na Figura 4.6.

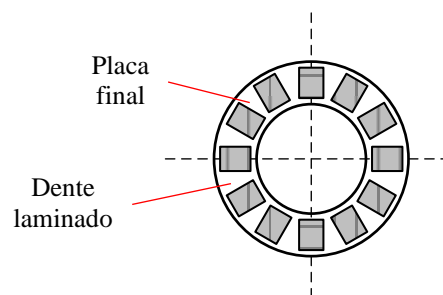
**Figura 4.6 - Armadura**



Fonte: Adaptado de [64]

O estator é inserido no conjunto através de uma placa terminal com dentes laminados conforme Figura 4.7 e inserido no sistema antes da segunda placa terminal ser inserida neste conjunto.

**Figura 4.7 - Vista lateral da laminação do núcleo da armadura**



Fonte: Adaptado de [64]

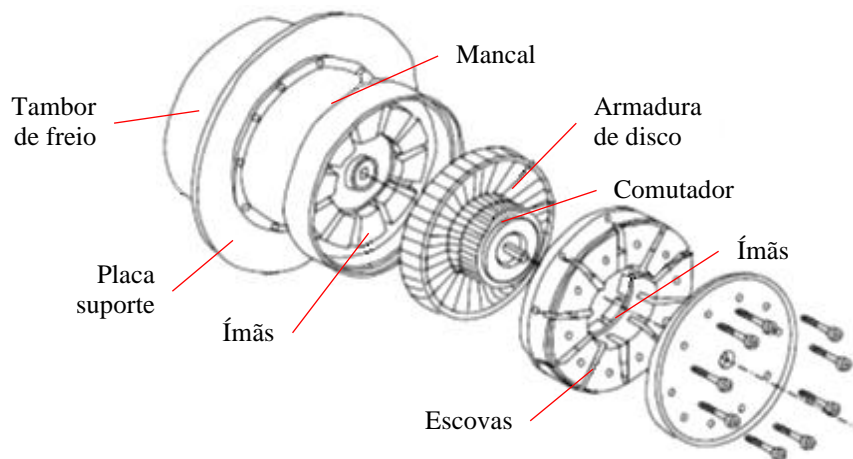
#### 4.6.5 Motores de indução de fluxo axial monofásicos

São aplicados em equipamentos domésticos que requer baixa potência. A força axial que ocorre na interação dos campos pode ser evitada por fixação dos componentes a mancais de apoio. Nestes casos o rotor pode ser conectado diretamente com a carga mecânica.

#### 4.6.6 Motor DC de armadura de disco

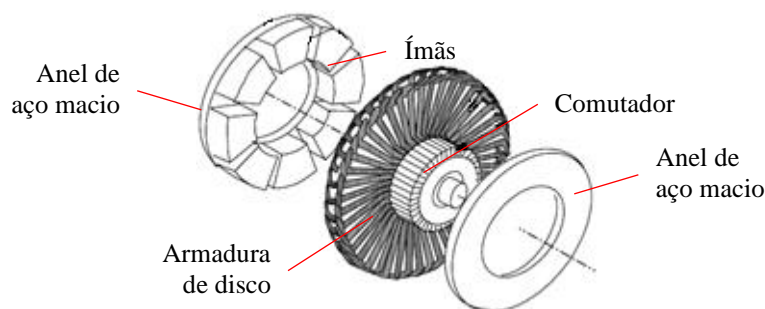
Conforme na Figura 4.8, pode-se observar que o campo é gerado através de ímãs permanentes fixados em placas terminais e fixados por adesivo de resina epóxi. A resina epóxi também compõe a armadura (que possui dois enrolamentos de camada dupla) e armazena os enrolamentos, eliminando dessa forma o ferro.

Figura 4.8 - Motor de armadura de disco



Fonte: Adaptado de [64]

Essa estrutura elimina as perdas geradas pelo circuito magnético, que são as perdas por histerese (por calor) e correntes parasitas. Porém essa estrutura requer entreferros grandes, o que não é o ideal. Os entreferros devem ser reduzidos e não aumentados, então para diminuir o entreferro, é necessário reduzir o comprimento do ímã, então fez-se necessário inserir um anel de fluxo na armadura. O problema é que a inserção do anel de fluxo causa o retorno das perdas geradas pelo circuito magnético, o que gera um empuxo magnético entre o rotor e estator, então faz-se necessário mais um enrolamento para eliminar esse problema [64].

**Figura 4.9 - Motor de armadura de disco com anel de retorno de fluxo**

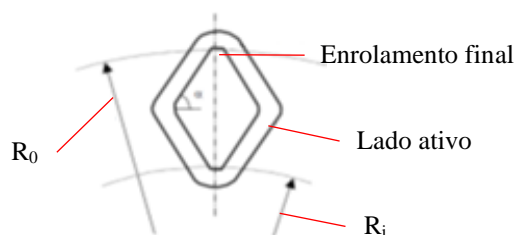
Fonte: Adaptado de [64]

A estrutura do deste motor se assemelha à placa de circuito impresso (PCB), porém se destaca por possuir uma densidade de fluxo do entreferro mais uniforme e resistir maiores correntes de sobrecarga [64].

#### 4.6.7 Motor de ímã permanente de fluxo axial multiestágio com estator sem ferro refrigerado a água

Esse motor se caracteriza por ser leve e por resistir a altas sobrecargas por um tempo longo. É utilizado em ambientes agressivos e por isso sua estrutura é toda fechada e robusta, portanto, necessita de refrigeração direta nos enrolamentos do estator. A refrigeração direta neste motor ocorre pela substituição do núcleo de ferro por um duto de água [64].

Com a estrutura deste motor, pode-se alcançar altos valores de torque através das bobinas de enrolamento com a forma romboidal, conforme Figura 4.10.

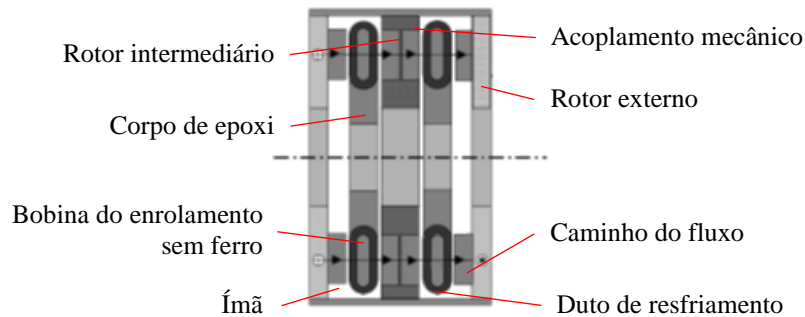
**Figura 4.10 - Forma de bobina romboidal para motor com estator sem ferro**

Fonte: Adaptado de [64]

Outra característica que contribui para que o motor possua altos troques é a configuração multiestágios, que é aplicada quando existe a limitação de do aumento do diâmetro.

Os rotores compartilham o mesmo eixo mecânico e os terminais elétricos dos enrolamentos trifásicos podem ser projetados de forma paralela ou em série. Na Figura 4.11, temos um exemplo de motor com configuração de dois estágios.

**Figura 4.11 - Seção transversal do motor de ímã permanente de campo axial de dois estágios com enrolamento do estator refrigerado a água sem ferro**

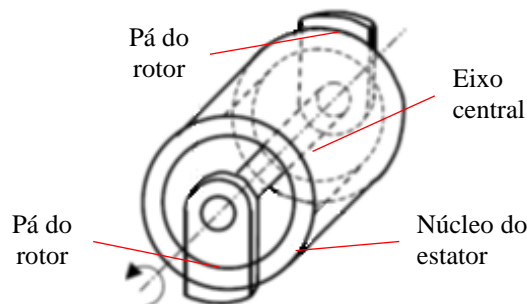


Fonte: Adaptado de [64]

#### 4.6.8 Alternador de disco duplo com excitação do lado A.C.

Conforme mostrado na Figura 4.12, o arranjo do circuito magnético deste motor consiste em um estator cilíndrico central enrolado e construído por lâminas, posicionado concentricamente com o rotor. O rotor é fixado por duas pás que giram de acordo com a interação dos polos [64].

**Figura 4.12 - Arranjo do circuito magnético**



Fonte: Adaptado de [64]

A bobina de campo entorno do eixo central é estacionária e separada do cilindro.

#### 4.6.9 Motor síncrono de fluxo axial de ímã permanente interior

Este motor possui a configuração sanduiche com estator central entre dois rotores. Os enrolamentos polifásicos no estator são inseridos na estrutura de anel com ranhuras e os ímãs permanentes são fixados nos rotores.

Conforme os autores da referência [64], temos as seguintes características para esta estrutura de motor:

- A máquina é bastante robusta porque os ímãs permanentes do rotor e os enrolamentos do estator estão localizados dentro da estrutura de ferro.
- O entreferro efetivo é pequeno, portanto, o valor das indutâncias será grande o suficiente para permitir a operação na região de enfraquecimento do fluxo.



- O torque resultante tem dois termos: um devido à excitação do campo e outro devido à saliência.

#### 4.6.10 Motor Torus [64]

Este motor DC sem escovas recebeu o nome Torus devido a sua configuração de estator toroidal. É um motor experimental de 2,5 kW montado a um motor de indução de 4 kW desenvolvido pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade de Manchester - UMIST conforme podemos observar na Figura 4.13.

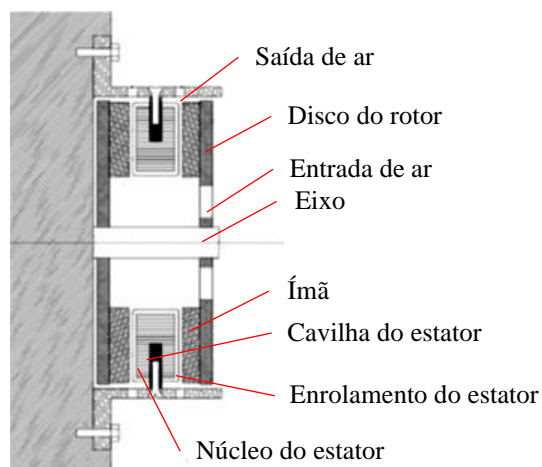
Figura 4.13 - Motor Torus experimental de 2,5 kW



Fonte: Adaptado de [64]

Os furos em torno do conjunto toroidal e os discos dos rotores proporcionam a dissipação do calor, eliminando as perdas por calor. Os ímãs permanentes utilizados são sintetizados de Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B) que proporciona alta cargas magnéticas e, portanto, reduz de maneira significativa os tornando as indutâncias e resistências baixas. Na Figura 4.14 podemos analisar a seção transversal do motor Torus.

Figura 4.14 - Seção transversal de um motor Torus



Fonte: Adaptado de [64]

Portanto com o motor Torus, temos as vantagens de possuir uma alta potência devido as altas cargas magnéticas que consequentemente reduz as indutâncias e resistências, e consegue-se eliminar perdas por calor pelo sistema de resfriamento.

Com o estator toroidal, é possível alta densidade fluxo na direção tangencial, porém axialmente a densidade de fluxo é menor o que gera menores perdas de ferro. Na Figura 4.15 podemos analisar o exemplo de um estator toroidal simples com enrolamento de 11 fases.

**Figura 4.15 - Estator toroidal com enrolamento de 11 fases**



Fonte: Adaptado de [64]

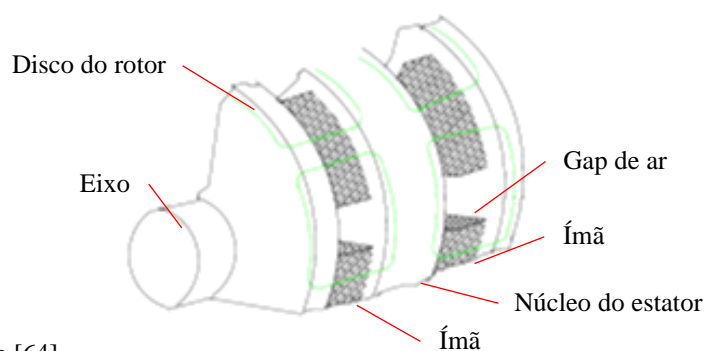
Na Figura 4.16 podemos analisar o exemplo de um rotor e seis ímãs polarizados axialmente.

**Figura 4.16 - Rotor interno de seis polos para o motor experimental de 2.5 kW**



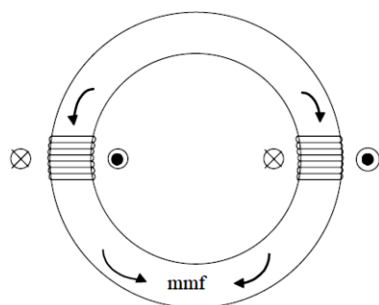
Fonte: Adaptado de [64]

Na Figura 4.17 observa-se o exemplo do caminho que percorre o fluxo principal representado pela linha verde percorre entre o estator e o rotor. Neste caso o rotor está fixado diretamente ao eixo eliminando desta forma as perdas mecânicas.

**Figura 4.17 - Principais caminhos do fluxo**

Fonte: Adaptado de [64]

Outra propriedade presente neste motor é a circulação de fluxo magnético no núcleo toroidal, então algumas referências citam que a única possibilidade para evitar esses fluxos é inserir em cada fase na armadura um par de bobinas enroladas no núcleo. Essas bobinas enroladas devem estar diametralmente opostas em posições que compreendem  $180^\circ$  mecânicos para que seja eliminada o fluxo no núcleo toroidal conforme Figura 4.18 [64][65].

**Figura 4.18 - Cancelamento da circulação do fluxo magnético pelo arranjo diametralmente oposto dos enrolamentos**

Fonte: Adaptado de [65]

Esse método para eliminação do fluxo magnético foi relatado pelos autores no artigo que possui referência [64] no ano de 2000, teoria essa que foi criada em 1992. Porém GOLTZ [65] em sua tese de mestrado apresentada no ano de 2012, mostra que para evitar essa circulação de fluxo é necessário apenas que os números de polos dos enrolamentos sejam par, pois estes geram um plano axial magnético entre os polos vizinhos, onde não possui fluxo circunferencial, criando um ponto médio da face polar, pode-se comparar esse fenômeno com a comutação mecânica das máquinas de corrente contínua, que geram as linhas neutras na armadura [65].

#### 4.6.10.1 Operação do motor Torus

Este motor DC sem escovas utiliza um inversor de frequência variável para alimentar as correntes nos enrolamentos do estator sincronizado com a velocidade do rotor. O inversor é controlado de acordo com as leituras realizadas pelo sensor de posição do rotor [64].

#### 4.6.10.2 Propriedades do motor Torus

Com os experimentos realizados pelos autores da referência [64], estes resumem as propriedades do motor Torus da seguinte forma:

1. Os motores Torus têm comprimento axial curto e alta relação potência/peso. O arranjo geral do Torus é compacto e adequado para integração de sistemas mecânicos.
2. O enrolamento de entreferro sem ranhura fornece valores baixos de indutância mútua e de fuga porque o entreferro efetivo é necessariamente grande e o vazamento de ranhura está ausente.
3. Devido ao grande comprimento efetivo do entreferro, os ímãs são menos propensos à desmagnetização.
4. Vibração, ondulação de fluxo e perdas do rotor de alta frequência devido ao entalhe do estator são eliminadas.
5. A ausência de ranhuras leva a um motor de baixo ruído com torque de engrenagem insignificante.
6. A saturação e as perdas de ferro dos dentes do estator estão ausentes.

#### 4.7 Aplicações dos motores de fluxo axial

Vimos que esses motores são utilizados em aplicações em que:

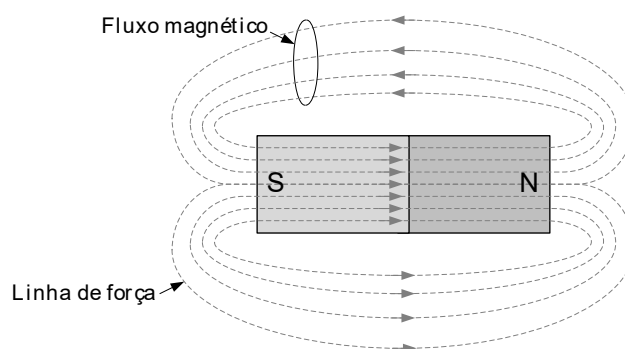
- O espaço onde serão instalados é limitado, e, portanto, requer motores mais compactos e consequente leves, de forma que esses fatores não limitem sua potência. Por isso dizemos que estes possuem alta relação potência-peso.
- São necessários alto torque, mas existe a limitação do diâmetro do motor, então usamos a configuração de multiestágios.
- Precisam de liberdade de mudanças desenvolvimento de alteração de projeto, como alterar os circuitos magnéticos ou varia o tamanho do entreferro.

## 5 Ímãs permanentes

### 5.1 Ímãs e teorias dos domínios magnéticos

O ímã é um corpo que armazena uma energia denominada de magnetismo. Ao longo deste capítulo iremos estudar as propriedades desses materiais e as características de cada um para que possamos mostrar o quanto esta energia é importante no funcionamento dos motores [43]. Um material magnético apresenta um campo magnético que é representado por inúmeras linhas (fluxo magnético ou fluxo de indução magnética) ao seu redor e em seu interior que ocorre devido interação entre seus dois polos, norte e sul, que possuem forças iguais [18].

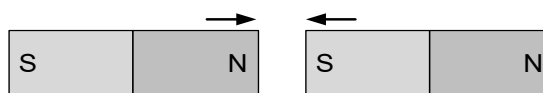
**Figura 5.1 - Linhas de força que formam o campo magnético.**



Fonte: Adaptado de [45]

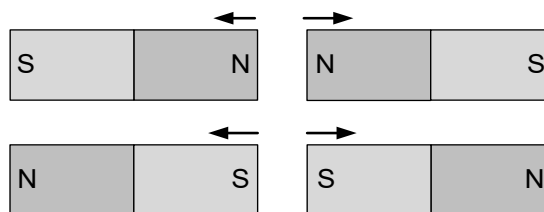
A interação entre ímãs, podem ser as seguintes:

**Figura 5.2 - Ímãs que se atraem**



Fonte: Adaptado de [45]

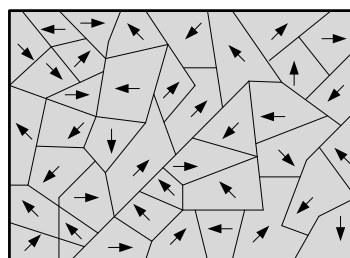
**Figura 5.3 - Ímãs que se repelem**



Fonte: Adaptado de [45]

Da formação atômica das moléculas desses materiais, diz-se que cada molécula é denominada como um ímã molecular.

Figura 5.4 - Ímãs Moleculares



Fonte: Adaptado de [32]

Os ímãs moleculares podem ou não ser orientados magneticamente, portando os materiais podem ser divididos em [18][43]:

- a. Magnéticos: onde o material permite que suas moléculas sejam orientadas;
- b. Não-Magnéticos: onde o material não permite que suas moléculas sejam orientadas.

Os materiais magnéticos são divididos em [43]:

- a. Paramagnéticos;
- b. Diamagnéticos;
- c. Ferromagnéticos;
- d. Ferrimagnéticos;
- e. Naturais;
- f. Artificiais

Porém, para desenvolvimento deste trabalho serão discutidos apenas os materiais magnéticos [43]:

- a. Naturais: encontrados na natureza, onde inicialmente os chamavam de pedras magnéticas ou magnetitas compostas de óxido de Ferro -  $Fe_3O_4$ ;
- b. Artificiais: são produzidos a partir de outro ímã, artificial ou natural, ou por processo de imantação.

Podem ser divididos [43]:

- **Temporários:** produzidos a partir de materiais com baixa relutância e conseqüentemente alta permeabilidade, portanto os ímãs temporários são magnetizados e/ou desmagnetizados com a mesma facilidade;
- **Permanentes:** produzidos a partir de materiais com alta relutância e conseqüentemente e baixa permeabilidade, o que torna o material respectivamente mais resistente ao estabelecimento e concentração das linhas de campo, e, permite que as linhas de campo atravessem o seu interior com maior facilidade, o que faz com que o ímã adquira propriedades de magnetização alta, sendo muito difícil sua desmagnetização.

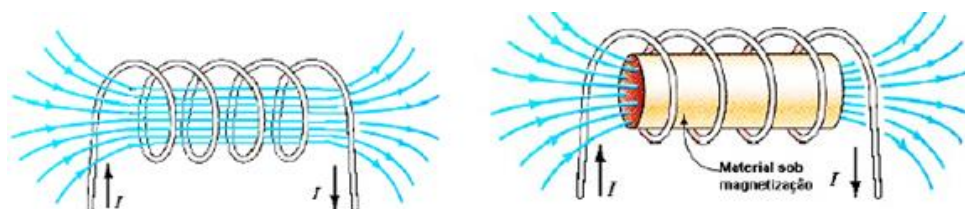
Portanto, o ímã que será discutido em diante, será o ímã artificial permanente, popularmente conhecido como ímã permanente.

## 5.2 Ímãs permanentes

Ímãs permanentes, são ímãs artificiais que após ganharem suas formas através das misturas dos materiais através das ligas, ganham suas formas e tamanhos variados e posteriormente são submetidos ao processo de imantação.

O processo de imantação consiste na magnetização dos materiais, ou seja, orienta as moléculas do material, tornando-o em um material magnético. Para que esse processo ocorra, é necessário que os materiais sejam inseridos em uma bobina de alta indutância que é submetida a uma corrente alta, onde as linhas magnéticas geradas são maiores que a relutância do material e assim transformam as moléculas antes desordenada, agora ordenadas e agora com polos norte e sul.

Figura 5.5 - Exemplo de um processo de imantação



Fonte: [32]

O objetivo de criação de um ímã permanente deu-se a necessidade que dos ímãs produzirem um campo magnético de maior intensidade e que possuíssem menor volume. Além dessas características, os ímãs deveriam ser estáveis magneticamente, ou seja, deveriam ser resistentes a desmagnetização, portanto até hoje são estudados materiais que melhorem suas propriedades magnéticas permanentes.

Tipos de materiais que compõem o ímã permanente [45][46]:

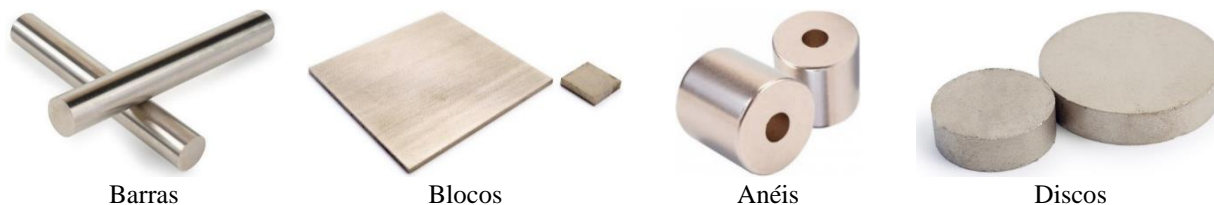
- a. Alnico;
- b. Ferrite;
- c. Terras raras:
  - Samário-cobalto;
  - Neodímio-ferro-boro.
- d. Nanocristalinos ou Nanoestruturados

### 5.2.1 Alnico

Os ímãs que contém Alnico foram descobertos em 1920. Esses ímãs são formados por ligas de Ferro (Fe) com Alumínio (Al), Níquel (Ni) e Cobalto (Co). Estes ímãs possuem alta estabilidade térmica, aproximadamente de 250°C a 550°C.

O alnico revolucionou a indústria do ímã permanente, mas sua fabricação através do processo de fundição é complexa e as matérias-primas são caras. Em particular, o cobalto é um material estratégico cuja oferta está sujeita a mudanças no clima político mundial.

**Figura 5.6 - Formas regulares dos ímãs permanentes de alnico**



Fonte: Adaptado de [18] BORBA, J.L. **Mecânica de Locomotivas**. e [47]

O alnico cooperou muito para o crescimento da indústria de ímãs permanentes, porém possuía grandes desvantagens, como fabricação complexa e matéria prima alta.

### 5.2.2 Ferrite

O Ferrite foi descoberto em 1950, são ímãs cerâmicos ferrimagnéticos que surgem a partir da calcinação de materiais como: hematita  $Fe_2O_3$  ou magnetita  $Fe_3O_4$  com ligas de níquel, ou zinco, ou compostos de manganês, ou bário ou carbonato de estrôncio.

**Figura 5.7 - Formas regulares dos ímãs permanentes de ferrite**



Fonte: Adaptado de [18] e [47]

A maior vantagem desses ímãs, são os valores. Por possuírem custos mais baratos, são bastante utilizados.

### 5.2.3 Terras Raras: Samário-Cobalto

Os ímãs que contém Samário-Cobalto foram descobertos em 1970, esses ímãs são compostos por liga samário e cobalto que pertencem ao grupo das terras raras, que possuem maiores forças magnéticas que as anteriores mencionadas, porém os custos de fabricação destes são elevados.



**Figura 5.8 - Formas regulares dos ímãs permanentes de samário**

Fonte: Adaptado de [18] e [47]

#### 5.2.4 Terras Raras: Neodímio-Ferro-Boro

Os ímãs que contém Neodímio-Ferro-Boro foram descobertos em 1980, esses ímãs são compostos por liga Neodímio-Ferro-Boro e também pertence ao grupo das terras raras, que possuem maiores forças magnéticas e vem substituindo a liga de Samário-Cobalto por possuir menores custos de fabricação.

**Figura 5.9 - Formas regulares dos ímãs permanentes de neodímio**

Fonte: Adaptado de [18] e [47]

Os ímãs nanocristalinos ou nanoestruturados foram descobertos em 1980. Esses ímãs são constituídos de grãos nanométricos com alta quantidade de ferro, portanto altos valores de magnetização e possui baixo teor de terras raras. O custo deste ímã é considerado baixo.

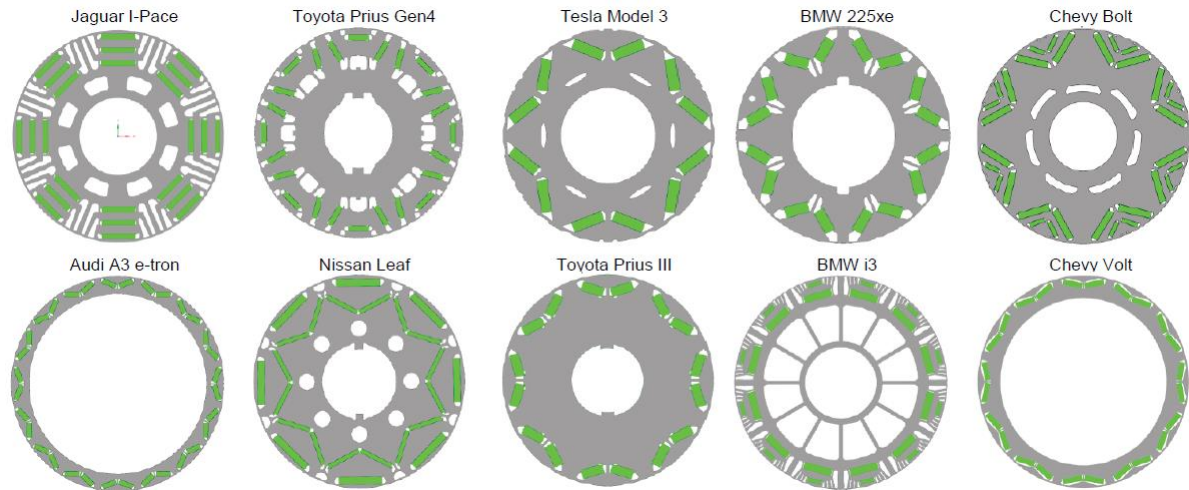
#### 5.2.5 Aplicação dos ímãs permanentes em veículos elétricos

Os ímãs permanentes potencializam a performance dos motores nos veículos elétricos pois proporcionam a redução de as perdas e conseqüentemente aumentam o rendimento, e proporcionam motores compactos e de alta potência.

A empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A. nos mostra em seu artigo Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG que o ímã de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) possui alta energia quando comparados com outros, porém seu custo ainda é alto. Porém nos últimos anos esse ímã tem ganhado espaço no mercado e suas propriedades estão sendo cada

vez mais estudadas, principalmente pelos fabricantes que visam o fornecimento de motores elétricos para grandes empresas. Na Figura 5.10, podemos ver as aplicações dos ímãs de NdFeB em empresas renomeadas fabricante de veículos [61].

**Figura 5.10 - Veículos elétricos que utilizam ímãs de Neodímio Ferro Boro NdFeB no motor**



Fonte: [61]

---

## 6 Conclusões e considerações futuras

Ao longo da pesquisa do assunto tratado, houve uma dificuldade muito grande para encontrar materiais completos referente aos motores de fluxo axial, por isso esse trabalho teve o objetivo de unir informações e conhecimentos de publicações de vários autores.

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível observar que os veículos elétricos possuem altas performances quando comparados aos veículos a combustão, não somente em seu funcionamento, mas também por trazer benefícios ao meio ambiente. No entanto, a autonomia é o seu ponto fraco. Para viabilizar os veículos totalmente elétricos (VEB) no que diz respeito a sua autonomia, são necessários mais estudos e desenvolvimentos de forma a minimizar a relação massa/peso para reduzir o consumo de energia. Esse fato, mostra o quanto é importante reduzir o peso do motor, e motivou o tema do nosso trabalho de conclusão de curso “ESTUDO DE MOTORES DE FLUXO AXIAL APLICADOS AOS SISTEMAS DE TRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS”.

Ao longo do trabalho ficou notório que os motores de fluxo magnético axial possuem grande potencial para reduzir o peso do veículo. Mas é claro, que esses motores representam um número relativamente pequeno dentre todos os itens que compõem um VEB, sendo também imprescindível a busca de melhorias e redução de peso dos demais equipamentos. Além disso, financeiramente, ainda se faz necessária a redução de valores dos ímãs permanentes, das baterias, dos controladores dentre outros equipamentos, pois conseqüentemente o custo final do veículo elétrico também será reduzido. Sem a implementação dessas melhorias, os carros a combustão continuarão como líderes no mercado.

Nos países europeus, como a França, o governo está incentivando a compra de automóveis elétricos, como a opção por um bônus ou a compra do veículo sem a bateria. O usuário pode adquirir a bateria por € 8.000 mais uma taxa de € 1.000 para seu descarte, ou fazer um aluguel por € 100/mês que inclui sua manutenção.

No Brasil a realidade é bem diferente:

- O país não possui fabricantes nacionais;
- Não existem incentivos fiscais;
- O custo de aquisição do VE é duas vezes maior do que o de um VCI de mesma potência e categoria;
- O custo de aquisição de componentes é muito elevado;
- O custo de manutenção é mais elevado, por praticamente não existir revendedores e uma rede autorizada de manutenção.

---

Realizando estudos de Custo de Ciclo de Vida (Life Cycle Cost - LCC) baseado nessas condições e nas premissas encontradas no mercado nacional, para um prazo de vida de 16 anos, é impossível de se encontrar uma aplicação favorável aos VE's.

Portanto para que os veículos elétricos à bateria sejam uma realidade aqui no Brasil, e elimine o setor de transportes do *ranking* de poluentes, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Estudos de todo os sistemas que compõem os VEB's para que suas massas sejam reduzidas, tornando esses veículos o mais leves possíveis.
- Realizar simulações no Matlab/Simulink, para compreender melhor o funcionamento dos diversos motores de fluxo axiais e assim poder observar em quais pontos eles podem e devem ser melhorados. Um exemplo que pode ser tomado como base é a simulação presente no artigo [70] realizada pelos integrantes da Universidade Federal do Paraná.
- Realizar pesquisas e sugestões através de análises de leis e padrões técnicos que interferem diretamente nas aquisições dos veículos elétricos.
- Realizar pesquisas e sugerir melhorias para que o nosso sistema elétrico brasileiro suporte o consumo de uma grande frota de veículos utilizando apenas fontes de energias renováveis.
- Realizar estudos de como planejar e executar uma rede nacional de abastecimento.

## 7 Referências bibliográficas

- [1] ESCOBAR.H; ARTE: L; MAGALHÃES, L. **IPCC: Se nada for feito, colapso climático é iminente** - Jornal da USP. 2021. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/ipcc-se-nada-for-feito-colapso-climatico-e-iminente/> Acesso em: 07 jun.2021
- [2] CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (CEBDS). **O que é o acordo de paris?** 2019. Disponível em: <https://cebds.org/o-que-e-o-acordo-de-paris/#.YRPiyIhKjIU> Acesso em: 07 set. 2021
- [3] SOUZA M. C. O.; CORAZZA R. I. Do protocolo Kyoto ao acordo de paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **DMA – DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**, São Paulo, v. 42, p. 52-80, dez. 2017.
- [4] TEIXEIRA, B. S.; MOLLETA D. G. S.; LUEDEMANN, G. **BRASIL: ESFORÇOS NACIONAIS SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9289/1/Brasil.pdf> Acesso em: 11 ago. 2021
- [5] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – Governo Brasileiro - **Decreto Nº 2.652, de 1º de julho de 1998** – Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d2652.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2652.htm) Acesso em: 11 ago. 2021
- [6] FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. **Carros Elétricos**. Caderno Ano 4 - Número 7, mai. 2017.
- [7] GOVERNO FEDERAL. **Discurso da presidenta da república, Dilma Rousseff, durante sessão de abertura da 21ª CONFERÊNCIA DAS PARTES DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE A MUDANÇA DO CLIMA - COP21 – Paris, 30 de novembro de 2015**. Disponível em: <https://www.gov.br/mre/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/discursos-artigos-e-entrevistas/presidente-da-republica/presidente-da-republica-federativa-do-brasil-discursos/discurso-da-presidenta-da-republica-dilma-rousseff-durante-sessao-de-abertura-da-21-conferencia-das-partes-da-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-a-mudanca-do-clima-cop21-paris-30-de-novembro-de-2015> Acesso em: 11 ago. 2021
- [8] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Disponível em: <http://www.ons.org.br/> acessado em 25 ago.2021
- [9] VICENTINI, B. **Poluição sonora: crime ambiental**. Publicado em 11 de abril de 2019. Disponível em: <https://www.politize.com.br/poluicao-sonora-crime-ambiental/> Acesso em: 17 ago. 2021
- [10] LARMINIE J.; LOWRY J. **Electric Vehicle Technology Explained**. John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra: 2003
- [11] MARTINS, C.N. **Condicionantes da difusão do carro elétrico no Brasil: análise dos fatores institucionais, econômicos e técnicos**. 2015. Tese de Doutorado – Políticas Públicas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2015. f. 52-67.

- 
- [12] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Where the Energy Goes: Electric Cars.** Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml> Acesso em: 17 ago. 2021
- [13] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles.** Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml> Acesso em: 17 ago. 2021
- [14] IFUNNY. **Uma van a DIESEL, com um gerador a GASOLINA, carregando um carro ELÉTRICO que teve "pane seca" por zerar as baterias. O futuro não é brilhante?** Disponível em: <https://br.ifunny.co/picture/uma-van-a-diesel-com-um-gerador-a-gasolina-carregando-IZR6ZTDQ7> acessado em 19 fev. 2022
- [15] BLOOMBERG. **Bloomberg Electric Vehicle Outlook.** Disponível em: <https://www.bloomberg.com/> Acesso em: 25 ago. 2021
- [16] CORTEZZI, F. C. M. Monografia: **O VEÍCULO ELÉTRICO E O IMPACTO NA CURVA DE CARGA DE CONSUMIDORES: ESTUDO DE CASO DO FIAT 500E - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - 2017**
- [17] MELHORIA CONTINUA CONSULTORIA. **LCC (Life Cycle Cost).** Disponível: <https://www.melhoriacontinuumcc.com.br/?p=2551> Acesso em: 07 set. 2021
- [18] BORBA, J.L. **Mecânica de Locomotivas.** Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária - Notas de Aula – Instituto de Educação Continuada - PUC Minas – 2009
- [19] G1 - **HILLARY RECEBEU GARANTIA DA CHINA SOBRE TERRAS-RARAS -** Disponível: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2010/10/hillary-recebeu-garantia-da-china-sobre-terras-raras.html> acessado em 07 set. 2021
- [20] ARPA.e - **RARE EARTH ALTERNATIVES IN CRITICAL TECHNOLOGIES -** Disponível: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/react> acessado em 07 set. 2021
- [21] SEN, P.C. **PRINCIPLES OF ELECTRIC MACHINES AND POWER ELECTRONICS.** 3ª ed. 2013
- [22] MECÂNICA INDUSTRIAL. **CAUSAS PARA FALHAS DO MOTOR ELÉTRICO** Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/determinando-causas-para-falha-no-motor-eletrico/> acessado em 27 set. 2021
- [23] GIERAS J. F.; WANG R. J.; KAMPER M. J. **AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET BRUSHLESS.** 2ª Ed. 2008
- [24] GARIK, M.L. **MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA.** 2ª Ed. RJ, BRASIL. 1958
- [25] SHERLOCK BOOKS. **Motor CC.** Disponível: <https://statics-submarino.b2w.io/sherlock/books/firstChapter/121016615.pdf> acessado em 27 set. 2021

- 
- [26] TESTANDO MOTORES. **TESTES EM MOTORES ELÉTRICOS DE CORRENTE CONTÍNUA**. Disponível: <https://testandomotores.blogspot.com/2013/03/testes-em-motores-eletricos-de-corrente.html?m=1> acessado em 10 set. 2021
- [27] DISCIPLINAS DA USP. **APOSTILA PARTE 3 – MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA**. Disponível: <https://edisciplinas.usp.br/> acessado em 10 set. 2021
- [28] AZANELLI INDÚSTRIA E COMÉRCIO. **ACOPLAMENTO**. Disponível: <https://azanelli.com.br/acoplamentos/> acessado em 01 set. 2021
- [29] CHAPMAN, S.J. **FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. 5ª Ed. PORTO ALEGRE, RS, BRASIL. 2013
- [30] SANTOS, O.W.P. Monografia: **COMPARAÇÃO ENTRE MOTOR DE INDUÇÃO E MOTOR DE IMÃ PERMANENTE** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS. 2015
- [31] PINHEIRO, M. L. Tese de Mestrado: **ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES (MSIP) EM EMBARCAÇÕES COM SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA** – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFERJ - 2013
- [32] FITZGERALD, A.E; KINGSLEY, C.K; UMANS, S.D. **MÁQUINAS ELÉTRICAS**. 7ª Ed. Porto Alegre, RS Brasil. 2014
- [33] DIAS, J. R. Tese de Mestrado: **MOTORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6x4 e 6x6. ESTUDO COMPARATIVO DE OPERAÇÃO E DESEMPENHO** – Universidade Federal de Uberlândia – UFU. MG. 2011
- [34] HINCAPIÉ, J. S. L.; SANDOVAL, A. V.; PARRA, J. Z. **AXIAL FLUX ELECTRIC MOTOR**. Military University of New Granada
- [35] DIAS, R.J. **MOTORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6x4 e 6x6 – ESTUDO COMPARATIVO DE OPERAÇÃO E DESEMPENHO** - Universidade Federal de Uberlândia - 2017
- [36] GRAÇA, C. **CAPÍTULO 9: MATERIAIS MAGNÉTICOS FÍSICA GERAL E EXPERIMENTAL III** - Disponível em [http://coral.ufsm.br/cograca/graca9\\_1.pdf](http://coral.ufsm.br/cograca/graca9_1.pdf) acessado em 11 nov. 2021
- [37] PELIZARI, A. Tese de Doutorado: **ESTUDO DA TOPOLOGIA DE MOTORES DE FLUXO AXIAL DE EXCITAÇÃO HÍBRIDA COM FOCO NA UTILIZAÇÃO EM TRACÇÃO ELÉTRICA** – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP. 2015
- [38] INSIDEEVs - **MOTORES NAS RODAS E SEM FREIOS: O CARRO ELÉTRICO DO FUTURO?** - Realizado por Dr. Stefan Leichsenring e traduzido por Julio Cesar - Disponível: <https://insideevs.uol.com.br/news/529769/plataforma-motores-eletricos-roda/> acessado em ago. 2021
- [39] **CLICK PETRÓLEO E GAS - EMPRESA CRIA NOVO MOTOR PARA CARROS ELÉTRICOS QUE PODE SER INSTALADO NAS RODAS DOS VEÍCULOS** -

Disponível: <https://clickpetroleoegas.com.br/empresa-cria-novo-motor-para-carros-eletricos-que-pode-ser-instalado-nas-rodas-dos-veiculos/> acessado em jun. 2021

[40] **STUDY ELECTRICAL - LOSSES IN DC MACHINE (DC GENERATOR AND MOTOR)** - Disponível: <https://studyelectrical.com/2014/05/losses-in-dc-machine-dc-generator-and.html> acessado em nov. 2021

[41] **INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA CARRO ELÉTRICO COM MOTOR NAS RODAS É MELHOR DO QUE SE PENSAVA** - Disponível: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=carro-eletrico-motor-rodas-melhor-se-pensava&id=010170160906#.Yi8m-3rMLIU> CESSADO EM jan. 2022

[42] **OLIVEIRA, M. A. N.; SUEMITSU, W. I. UMA ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DOS BARCOS SOLARES** - Universidade Federal do Rio de Janeiro - 2017

[43] **BRITO, D. TEORIA DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS.** Disponível em <http://www.drb-m.org/av1/Teoria%20dos%20Dominios%20Magneticos.pdf> acessado em 11 nov. 2021

[44] **AZEVEDO, M. H. Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação: CARROS ELÉTRICOS: VIABILIDADE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE INSERÇÃO COMPETITIVA NO MERCADO** - Ouro Preto - 2018

[45] **MUSSOI, PROFº.F. L. R. MAGNETISMO.** Disponível em: [https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/9/93/Aula\\_2\\_Magnetismo.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/9/93/Aula_2_Magnetismo.pdf) acessado em 11 nov. 2021

[46] **KOIMÃS. ALNICO.** Disponível em <https://www.koimas.com.br/produtos-magneticos/alnico/imas-de-alnico/> acessado em 13 nov. 2021

[47] **AUTOMÓVEIS ELÉTRICOS. OS ÍMÃS PERMANENTES E OS MOTORES PURAMENTE MAGNÉTICOS (PARTE 1/2)** - Disponível em <http://automoveiseletricos.blogspot.com/2013/01/imas-permanentes.html> acessado em 15 nov. 2021

[48] **IAA MOBILITY. DEEPDRIVE RETHINKING ELECTRIC MOBILITY IAA 2021** - Disponível: [https://exhibitors.iaa.de/download/1126\\_9\\_9\\_1826\\_9\\_1\\_104/iaa\\_die-deepdrive-e-fahrzeugplattform.pdf](https://exhibitors.iaa.de/download/1126_9_9_1826_9_1_104/iaa_die-deepdrive-e-fahrzeugplattform.pdf) acessado em 10 jan. 2022

[49] **BATTERY UNIVERSITY. BATTERY.** Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 20 nov. 2021

[50] **BATTERY UNIVERSITY. BU-204: HOW DO LITHIUM BATTERIES WORK?** Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 20 jan. 2022

[51] **BATTERY UNIVERSITY. BU-205: TYPES OF LITHIUM-ION** - Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 20.01 acessado em 20 jan. 2022



---

[52] BATTERY UNIVERSITY. **BU-206: LITHIUM-POLYMER: SUBSTANCE OR HYPE** - Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 20 jan. 2022

[53] BATTERY UNIVERSITY. **BU-212: FUTURE BATTERIES** - Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 20 jan. 2022

[54] BATTERY UNIVERSITY. **BU-216: SUMMARY TABLE OF LITHIUM-BASED BATTERIES** - Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 21 jan. 2022

[55] BATTERY UNIVERSITY. **BU-301a: TYPES OF BATTERY CELLS** - Disponível em: <https://batteryuniversity.com> acessado em 21 jan. 2022

[56] INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **CARRO ELÉTRICO COM MOTOR NAS RODAS É MELHOR DO QUE SE PENSAVA** - Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=carro-eletrico-motor-rodas-melhor-se-pensava> acessado 21 jan. 2022

[57] LEICHSENDRING, Dr. S. **MOTORES NAS RODAS E SEM FREIOS: O CARRO ELÉTRICO DO FUTURO?** Traduzido por: Julio Cesar – 05.09.21

[58] MOTOR SHOW. **COMO FUNCIONAM OS MOTORES DOS CARROS ELÉTRICOS?** Disponível em: <https://motorshow.com.br/como-funcionam-os-motores-dos-carros-eletricos/> acessado em 24 jan. 2022

[59] FREITAS, J. C. N. Tese de Mestrado: **PROJETO E ANÁLISE AO FUNCIONAMENTO DE CARROS ELÉTRICOS** - Universidade do Minho - Portugal – 2012

[60] WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. **ARTIGO: MOTOR DE ÍMÃS PERMANENTES E INVERSOR DE FREQUÊNCIA WEG** - Departamento de P&D do Produto – Motores – WEG Equipamentos Elétricos S.A. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hce/h39/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> acessado em 25 jan. 2022

[61] WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. **APLICAÇÃO DE ÍMÃS DE TERRAS RARAS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS.** Disponível em: [https://antigo.cdn.br/images/eventos/material/slides\\_sbtr/12-16h40\\_WEG\\_Motores-Aplicacao\\_de\\_%c3%admas\\_de\\_terras\\_raras\\_em\\_maquinas\\_eletricas-Sebastiao\\_Nau\\_WEG.pdf](https://antigo.cdn.br/images/eventos/material/slides_sbtr/12-16h40_WEG_Motores-Aplicacao_de_%c3%admas_de_terras_raras_em_maquinas_eletricas-Sebastiao_Nau_WEG.pdf) acessado em 25 jan. 2022

[62] CAMARGO, F. A. Tese mestrado: **ACIONAMENTO POR MOTOR ELÉTRICO DE ROTOR APOIADO POR MANCAL MAGNÉTICO COM CONTROLE UNIAXIAL** – Universidade de São Paulo - USP 2011

[63] ARANHA, R. S; SANTOS, E. B. **ASPECTOS DO MOTOR DE FLUXO AXIAL E A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS**

[64] AL-BADI, A.; GASTLI, A.; BOURDOUCEN, H.; JERVASE, J. **EVOLUTION OF AXIAL-FIELD ELECTRICAL MACHINES** - Science and Technology, Special Review (2000) 227-245

- 
- [65] GOLTZ, E.C. Tese de Mestrado: **ESTUDO DE MÁQUINA ELÉTRICA DE FLUXO AXIAL APLICADA A SISTEMA DE TRACÇÃO AUTOMOTIVA COM ACOPLAMENTO DIRETO E FRENAGEM REGENERATIVA** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS – 2012
- [66] MAROJA, F. B. Monografia: **APLICAÇÃO DE MOTOR DE FLUXO AXIAL NA TRACÇÃO VEICULAR** - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ – 2017
- [67] NEOCHARGE. **CONHEÇA OS TIPOS DE CARROS ELÉTRICOS** - Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos> acessado em 24 jan. 2021
- [68] KLEIMAIER, A.; HOFFMANN, B. **AXIAL FLUX MOTOR "DYNAX®" - A COMPACT ELECTRIC DRIVE FOR AUTOMOTIVE POWER TRAINS COMPACT DYNAMICS GMBH**
- [69] GOLDEMBERG, C.; LEBENSZTAJN, L.; PELLINI, E. L. **A EVOLUÇÃO DO CARRO ELÉTRICO** - PEA/EPUSP - Ago. 2005
- [70] BAIL, J. A.; MENDONÇA, F. N.; PAUKA, G. M.; FIUZA, C. A. VILELA JR, J. A. **INVERSORES DE FREQUÊNCIA COM CONTROLE DE CAMPO ORIENTADO PARA ACIONAMENTO DE MOTORES SÍNCRONOS DE IMÃ PERMANENTE DE FLUXO AXIAL** - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná - Curitiba, Paraná, Brasil.
- [71] FACCIN, M. M.; FLORES FILHO, Á. F. **ACIONAMENTO E FRENAGEM DE UMA MÁQUINA BRUSHLESS DE FLUXO AXIAL** - Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, LMEAE – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2013
- [72] FERREIRA, D. M.; OSÓRIO, J. O. M.; FLORES FILHO, Á. F.; TAVARES, A. M.; LOUREIRO, L. T. D. R. **ANÁLISE DE UMA MÁQUINA TORUS COM DIFERENTES FORMATOS DE ÍMÃS PERMANENTES** - Laboratório de Máquinas Elétricas - Acionamentos e Energia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense
- [73] KURRONEN, P.; PYRHONEN J. **ANALYTIC CALCULATION OF AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNET MOTOR TORQUE** – 2007
- [74] FOITO, D.; GUERREIRO, M.; CORDEIRO, A. **ANTI-SLIP WHEEL CONTROLLER DRIVE FOR EV USING SPEED AND TORQUE OBSERVERS** - Escola Superior de Tecnologia de Setúbal - Instituto Politécnico de Setúbal e Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - Instituto Politécnico de Lisboa - Portugal
- [75] RODRIGUES, A. L. **NOVO MOTOR ELÉCTRICO DE RELUTÂNCIA COM MATERIAL SUPERCONDUTOR NO ROTOR** - Departamento de Engenharia Electrotécnica - Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa – PORTUGAL

- 
- [76] CAVAGNINO, A.; LAZZARI, M.; PROFUMO, F.; TENCONI, A. **AXIAL FLUX INTERIOR PM SYNCHRONOUS MOTOR: PARAMETERS IDENTIFICATION AND STEADY-STATE PERFORMANCE MEASUREMENTS** - Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Elettrica Industriale - Corso Duca degli Abruzzi - Torino, Italy
- [77] YAN, G-J.; HSU, L-Y.; WANG, J-H.; TSAI, M.-C.; WU, X.-Y. **AXIAL-FLUX PERMANENT MAGNET BRUSHLESS MOTOR FOR SLIM VORTEX PUMPS** Micro/Meso Mechanical Manufacturing R&D Section, Metal Industries Research and Electric Motor Technology Research Center, National Cheng Kung University – Taiwan
- [78] SILVA, J. M. G. Dissertação de Mestrado: **IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA PARA UM SISTEMA DE TRACÇÃO BASEADO NO CONTROLO DTC DE UM MOTOR AFPMSM PARA APLICAÇÃO DE MOBILIDADE ELÉTRICA** - Engenharia Eletrônica Industrial e de Computadores
- [79] BECK, J. C. P.; CAUDURO, C. R.; SILVA, I. N. L.; FERNÁNDEZ, L. C. **CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E SEU USO VEICULAR** - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e Universidade de Caxias do Sul - RS
- [80] KALENDER O.; EGE, Y.; NAZLIBILEK, S. **DESIGN AND DETERMINATION OF STATOR GEOMETRY FOR AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET FREE ROD ROTOR SYNCHRONOUS MOTOR** - Turkish Military College and Balikesir University and Bilkent University - Turkey
- [81] TUTELEA, L. N.; DEACONU, S. I.; BOLDEA I. **DESIGN AND FEM VALIDATION FOR AN AXIAL SINGLE STATOR DUAL ROTOR PMSM** - Electrical Engineering Department and Electrical Engineering and Industrial Informatics Department Politehnica University of Timisoara
- [82] TAKORABET N.; MARTIN, J.P.; TIAOBANR, F. M.; SHARIF, F.; FONTAINE, P. **DESIGN AND OPTIMIZATION OF A PERMANENT MAGNET AXIAL FLUX WHEEL MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE**
- [83] CHAIEB, M.; TOUNSI, S.; NEJI, R. **DESIGN AND OPTIMIZATION OF AXIAL PERMANENT MAGNET MACHINE FOR ELECTRIC VEHICLE** – 2009
- [84] TSAI, M.-C.; HSU, L.-Y. **DESIGN OF A MINIATURE AXIAL-FLUX SPINDLE MOTOR WITH RHOMBOIDAL PCB WINDING** - Department of Mechanical Engineering - National Cheng Kung University - Taiwan - IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. VOL. 42, NO. 10, OCTOBER 2006
- [85] DESSEL, M. V.; BEIMANS, R.; HANITSCH, R.; HEMEAD, E. A. **DESIGN OF A SMALL, AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNET MOTOR** - ETEP Vol. 6, No. 2, March/April 1996
- [86] SEO, J.-M.; RHYU, S.-H.; KIM, J.-H.; CHOI, J.-H.; JUNG, I.-S. **DESIGN OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR FOR ROBOT JOINT MODULE** - Korea

[87] YANG, Y.-P.; LUH, Y.-P.; PAN, Y.-G. **DETERMINATION OF THE PHASE CURRENT WAVEFORM FOR A DISC-TYPE AXIAL-FLUX WHEEL MOTOR** - Asian Journal of Control, Vol. 5, No. 2, pp. 287-292, June 2003

[88] SUGIMOTO, H.; TSUDA, T.; MORISHITA, T.; HONDOU, Y.; TAKEDA, T.; TOGAWA, H.; OOTA, T.; OHMATSU, K.; YOSHIDA S. **DEVELOPMENT OF AN AXIAL FLUX TYPE PM SYNCHRONOUS MOTOR WITH THE LIQUID NITROGEN COOLED HTS ARMATURE WINDINGS** - IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 17, no. 2, June 2007 1637

[89] ÁLVAREZ, A.; SUÁREZ, P.; CÁCERES, D.; GRANADOS, X.; PÉREZ, B.; CEBALLOS, J.M. **DISK-SHAPED SUPERCONDUCTING ROTOR FOR AN AXIAL FLUX INDUCTION MOTOR** - Department of Electrical Engineering, Industrial Engineering School, University of Extremadura e ICMAB-CSIC, Campus UAB – SPAIN – 2003

[90] NEVES, R. A.; LUCA, H. P. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM APLICAÇÃO DE MOTORES DE IMÃS PERMANENTES**

[91] WANGHON, A. J. L. Monografia: **ENERGIA DO HIDROGÊNIO** - Universidade do Sul de Santa Catarina - Palhoça - 2018

[92] AFONSO, J.M.P. Tese de Mestrado: **ENSAIO DE MOTORES ELÉTRICOS** - Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra – Set. 2014

[93] NOCE, T. **ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E CONTRIBUIÇÕES AO SEU APERFEIÇOAMENTO** - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - Belo Horizonte - 2009

[94] UPADHYAY, P. R.; RAJAGOPAL, K. R. **FE ANALYSIS AND COMPUTER-AIDED DESIGN OF A SANDWICHED AXIAL-FLUX PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR** - Department of Electrical Engineering, Institute of Technology, Nirma University of Science Ahmedabad and Technology and Electrical Engineering Department, Indian Institute of Technology Delhi - India

[95] RODRIGUES, A. L. **BRUSHLESS ELECTRICAL MACHINES WITH SUPERCONDUCTING ROTORS** - Department of Electrical Engineering - Faculty of Science and Technology - New University of Lisbon - ICEM 2002 - PORTUGAL

[96] RODRIGUES, A. L. **NEW ELECTRIC RELUCTANCE MOTOR WITH BULK SUPERCONDUCTING MATERIALS ON THE ROTOR** - Department of Electrical Engineering - Faculty of Science and Technology - New University of Lisbon - June 2001 - ACEMP 2001 - PORTUGAL

[97] DEACONU, S. I.; HORGA, V.; TOPOR, M.; MARIGNETTI, F.; TUTELEA, L. N.; NUCA, I. **LIGHTWEIGHT HIGH-EFFICIENCY POWER TRAIN PROPULSION WITH AXIAL-FLUX MACHINES FOR ELECTRIC OR HYBRID VEHICLES** - IntechOpen

---

[98] DE, S.; RAJNE, M.; POOSAPATI, S.; Patel, C.; Gopakumar, K. **LOW INDUCTANCE AXIAL FLUX BLDC MOTOR DRIVE FOR MORE ELECTRIC AIRCRAFT** - Honeywell Technology Solutions and Indian Institute of Science - India

[99] LIU, C.-T.; LEE, S.-C. **MAGNETIC FIELD MODELING AND OPTIMAL OPERATIONAL CONTROL OF A SINGLE-SIDE AXIAL-FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR WITH CENTER POLES** - Department of Electrical Engineering - 6 March 2006 - Taiwan

[100] MAGRO, M. C.; PINA, M.; GONÇALVES, A.; NEVES, V.; RODRIGUES, L. **MULTIPOLE SUPERCONDUCTING SYNCHRONOUS GENERATOR** - Department of Electrical Engineering - Faculty of Science and Technology - New University of Lisbon – PORTUGAL

[101] REGNER, R. R. Tese de Mestrado em Modelagem Matemática: **MODELAGEM MATEMÁTICA DA DINÂMICA DA RODA DE TRACÇÃO DE UM VEÍCULO COM ACIONAMENTO ELÉTRICO** - Panambi - RS – 2019

[102] SANCHES, E. S. Tese de Doutorado: **UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E CONTROLE DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO DE FLUXO AXIAL COM UM SÓ ESTATOR** - Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal Fluminense - Dez. 2015

[103] Disciplinas da USP - **PARTE 7: MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA DE COMUTAÇÃO ELETRÔNICA** - “BRUSHLESS DC” - Disponível:  
[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5320651/mod\\_resource/content/1/PEA%20-%205728\\_Parte%207\\_Motores%20Brushless.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5320651/mod_resource/content/1/PEA%20-%205728_Parte%207_Motores%20Brushless.pdf) acessado em 10 dez. 2021

[104] NAU, DR. ENG. PROF. S. L. **MOTOR DE FLUXO AXIAL** - Set 2017

[105] BASSO, C. **O IMPACTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS PLUG-IN NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA** - Universidade Federal do Pampa - Alegrete – RS

[106] LIU, C.-T.; LIN, S.-C.; CHIANG, T.-S. **ON THE ANALYTICAL FLUX DISTRIBUTION MODELING OF AN AXIAL-FLUX SURFACE-MOUNTED PERMANENT MAGNET MOTOR FOR CONTROL APPLICATIONS** - Department of Electrical Engineering and National Sun Yat-Sen University

[107] KAHOURZADE, S.; MAHMOUDI, A.; RAHIM, N. A.; PING, H. W. **SIZING EQUATION AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OPTIMUM DESIGN OF AXIAL-FLUX PERMANENT- MAGNET MOTOR FOR ELECTRIC VEHICLE DIRECT DRIVE** - UM Power Energy Dedicated Advanced Centre (UMPEDAC), Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia – IEEE 2012

[108] PINA, J. M.; GONÇALVES, A.; NEVES, M. V.; RODRIGUES, A. L. **HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS IN ELECTRIC MOTORS**

---

[109] PLATT, D. **PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH AXIAL FLUX GEOMETRY** - IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 25, NO. 4, JULY 1989 - The University of Wollongong - Australia.

[110] BARRIÈRE, O.; HLIOUI, S.; AHMED, H. B.; GABSI, M.; LOBUE, M. **PM AXIAL FLUX MACHINE DESIGN FOR HYBRID TRACTION** - Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 65 (2010), No. 1, pp. 203-218 - INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE - 2009

[111] CARVALHO, C. F.; SIGNORELLI, M. H. A. **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E ACIONAMENTO DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL** - Faculdade de Engenharia Elétrica - Laboratório de Acionamentos Elétricos: Universidade Federal de Uberlândia - MG - Brasil

[112] ORRICO, M. V. M. Monografia: **PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE MOTOR E BATERIA PARA VEÍCULO ELÉTRICO** - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - Julho de 2013 - Brasília

[113] MACHADO, O. **PROJETO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL E SIMULAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS** - Universidade Federal de Uberlândia - 2020 - UBERLÂNDIA, MG - Brasil

[114] SILVA, PROF. DR. J. B. C. **PRÉ-PROJETO DE ROTORES DE MÁQUINAS DE FLUXO GERADORAS RADIAIS** - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM - Universidade Estadual Paulista – UNESP - Novembro de 2000 - Ilha Solteira

[115] NARDINI, M.; PEREIRA, R. A.; SILVA, L. A. **PROJETO DE UM GERADOR DE IMÃS PERMANENTES DE FLUXO AXIAL SEM NÚCLEO DE FERRO COM ARRANJO HALBACH** - 2017

[116] ARAUJO, G. H. S. **PROJETO DE UM VEÍCULO AUTOMOTIVO URBANO DE 2 LUGARES COM PROPULSÃO ELÉTRICA**

[117] RIGHI, L. A.; COSTA, L. H.; MOLENDAS, C. H. A. **PROJETO DE VEÍCULO ELÉTRICO PARA COMPETIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA** - VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING - agosto de 2010 - Campina Grande - Paraíba - Brasil

[118] PRIMO JR., A. R.; SALAZAR, A. O.; FONTES., F. A. O. **SISTEMA DE CONVERSÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO** - Universidade Federal de Rio Grande do Norte - Departamento de Engenharia Mecânica - Campus Universitário - 2001 - Lagoa Nova

[119] DARABI A.; GHANBARI, T.; SANATI-MOGHADAM, M. **SLOTLESS AXIAL FLUX HYSTERESIS MOTOR, MODELLING AND PERFORMANCE CALCULATION** - Faculty of Electrical and Robotics Engineering - Shahrood University of Technology - Iran

---

[120] TSAI, M.-C.; HSU, L.-Y. **Winding Design and Fabrication of a Miniature Axial-Flux Motor by Micro-Electroforming** - IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 7, JULY 2007