

JOÃO GABRIEL ALBANO DE CARVALHO

Planejamento e execução de um módulo didático que exemplifique as forças de reação em carcaça de motores e geradores elétricos de corrente contínua.

João Gabriel Albano de Carvalho

Planejamento e execução de um módulo didático que exemplifique as forças de reação em carcaça de máquinas elétricas de corrente contínua.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Zangrandi Filho

Guaratinguetá - SP
2019

C331p	Carvalho, João Gabriel Albano de Planejamento e execução de um módulo didático que exemplifique as forças de reação em carcaça de máquinas elétricas de corrente contínua / João Gabriel Albano de Carvalho – Guaratinguetá, 2019. 74 f : il. Bibliografia: f. 73 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. João Zangrandi Filho 1. Máquinas elétricas. 2. Motores elétricos. 3. Dínamos. I. Título. CDU 621.313
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

João Gabriel Albano de Carvalho

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO ZANGRANDI FILHO
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
UNESP-FEG

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
UNESP-FEG

Dezembro/2019

DADOS CURRICULARES

João Gabriel Albano de Carvalho

NASCIMENTO	16.01.1996 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Crêbson José de Carvalho Adriana Maria Albano
2014/2019	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá

A minha família, que me motiva sempre a seguir em frente.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação e vida acadêmica.

Aos meus amigos, que sempre estiveram comigo em todas as adversidades na minha caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de toda vida e todo conhecimento. Agradeço pela oportunidade de poder viver todos os dias.

Agradeço a todos os meus familiares, que sempre me apoiaram e, apesar de todas as dificuldades, me motivaram e ajudaram chegar até aqui, possibilitando minha formação em engenharia e a formação do meu caráter.

Ao meu professor orientador Dr. João Zangrandi Filho, o qual serviu de base fundamental neste trabalho, contribuindo com o seu vasto conhecimento técnico e possibilitando o meu aprendizado sobre assuntos diversos relacionados à engenharia e a vida.

A todos os professores que em todo o tempo, auxiliaram, instruíram e deram o suporte necessário para enfrentar todos os problemas durante o ciclo de graduação da Engenharia Mecânica.

*“Quanto melhor é adquirir a sabedoria do que o ouro! E
quanto mais excelente, adquirir a prudência do que a
prata”*

Provérbios 16:16

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se os sistemas de conversão de energia e, especificamente, o conversor DC - DC. Descreve-se os principais conhecimentos básicos de magnetismo e eletromagnetismo com exemplos práticos. Apresenta-se também os principais tipos de motores e geradores DC utilizados no dia a dia. Como o foco do trabalho é a reação da carcaça em motores e geradores elétricos DC, uma explicação detalhada de como estas máquinas funcionam é apresentada. O foco do trabalho é a reação da carcaça nas máquinas. É discutido o projeto mecânico do equipamento, que consiste de uma estrutura onde um motor elétrico DC aciona mecanicamente através de correia um gerador elétrico DC. Estas duas máquinas são montadas convenientemente em uma estrutura a fim de que o fenômeno da reação da carcaça em motores e geradores seja demonstrado. Nesta estrutura, também são ligadas ao gerador duas lâmpadas para absorver a energia mecânica do motor. Na conclusão são apresentadas as fotos do equipamento sem carga e com as cargas elétricas aplicadas ao gerador.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Elétrico DC. Gerador elétrico DC. Reação de Carcaça.

ABSTRACT

This work, presents the energy conversion systems and, specifically, the AC-DC converter. It describes the basic theory dealing with magnetism and electromagnetism and related practical applications. It also presents the main types of DC motors and generators that have common applications as well as explanation how they run. The focus of the work is the reaction of the carcass on motors. It is discussed the mechanical design of the equipment, which consists of a structure where both the motor and the generator is conveniently coupled, in order that the phenomenon of the reaction of the frame in motors and generators can be demonstrated. In the structure it is also, installed two bulb lamps connected to the generator so as to absorb the mechanical energy of the electric DC motor.

The result is shown with pictures of the equipment running at no load and with the generator loaded taking into account the bulb lamps.

KEYWORDS: Electric DC Motor. Electric DC generator. Reaction of the frame.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo de energia em máquinas elétricas	18
Figura 2 – Classificação dos motores elétricos	20
Figura 3 – Ímã permanente e linhas de campo magnético	21
Figura 4 – Força entre campos magnéticos com polaridades diferentes	22
Figura 5 – Força entre campos magnéticos com polaridades diferentes - eletroímas	22
Figura 6 – Força entre campos magnéticos com polaridades iguais	22
Figura 7 – Força entre campos magnéticos com polaridades iguais - eletroímas	23
Figura 8 – Esquema de corrente eletrônica	23
Figura 9 – Esquema de corrente convencional	24
Figura 10 – Regra da mão direita - campo magnético em um fio	25
Figura 11 – Regra da mão direita – campo magnético em uma bobina	25
Figura 12 – Regra da mão esquerda – campo, corrente e força	26
Figura 13 – Ímã permanente se aproximando de uma bobina	27
Figura 14 – Ímã permanente parado em relação à bobina	28
Figura 15 – Ímã permanente se afastando da bobina	28
Figura 16 – Esquema demonstrativo da lei de Faraday	29
Figura 17 – Pêndulo eletromagnético	30
Figura 18 – Figura obtida do osciloscópio	31
Figura 19 – Gerador elementar com apenas uma espira	33
Figura 20 – Detalhe do anel coletor e escova	33
Figura 21 – Rotor de gerador automotivo	34
Figura 22 – Corte longitudinal de um alternador automotivo	35
Figura 23 – Gerador de corrente contínua com motor de indução	36
Figura 24 – Gerador DC para acoplar à tomada de força de trator	36
Figura 25 – Motor de corrente contínua elementar	37
Figura 26 – Motores de corrente contínua utilizados em celulares	38
Figura 27 – Componentes do micromotor	38
Figura 28 – Detalhes motor DC – 3 saliências polares	39
Figura 29 – Sequência de funcionamento motor DC – 3 saliências polares	40
Figura 30 – Esquema dos pólos no rotor e estator do motor DC	42
Figura 31 – Máquina motora e geradora acopladas	43
Figura 32 – Representação das forças desenvolvidas no rotor/estator	44

Figura 33 – Reação da carcaça no micromotor sem carga	45
Figura 34 – Reação da carcaça no micromotor – teste com os dedos	46
Figura 35 – Acoplamento monobloco – pedestal no gerador - esquema.....	47
Figura 36 – Acoplamento monobloco – pedestal no gerador - foto.....	47
Figura 37 – Acoplamento monobloco – pedestal no motor - esquema	48
Figura 38 – Acoplamento monobloco – pedestal no motor - foto	48
Figura 39 – Força de reação perpendicular ao pino do pistão - motor	49
Figura 40 – Fixação de um motor veicular	50
Figura 41 – Braço de torque de um motor hidrostático	51
Figura 42 – Reação da carcaça em um helicóptero	52
Figura 43 – Motor de ventilador de teto	52
Figura 44 – Moto BMW	53
Figura 45 – Gerador elétrico de corrente contínua	54
Figura 46 – Força de repulsão entre os pólos magnéticos do rotor/estator	55
Figura 47 – Força de reação perpendicular ao pino do pistão - compressor	56
Figura 48 – Configuração do conjunto eletromecânico	59
Figura 49 – Motor/gerador montado na bancada	60
Figura 50 – Conjunto motor/gerador e acessórios – sem carga	61
Figura 51 – Conjunto motor/gerador e acessórios – com carga aplicada	62
Figura 52 – Eixo, placa e pinos – vista explodida	63
Figura 53 – Montagem do motor/gerador – carcaça livre nos rolamentos	63
Figura 54 – Vista explodida do subconjunto – mancal/pedestal	64
Figura 55 – Esquema das ligações elétricas	65
Figura 56 – Conjunto mecânico final	66
Figura 57 – Conjunto em funcionamento sem carga	67
Figura 58 – Posição das barras com uma lâmpada	68
Figura 59 – Posição das barras com duas lâmpadas	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DC	Direct Current
AC	Alternate Current
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
UNESP	Universidade Estadual Paulista
DME	Departamento de Mecânica
N	Polo Norte
S	Polo Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

F	força
i	corrente convencional
e	corrente eletrônica
B	densidade de fluxo magnético
ω	velocidade angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	MÁQUINAS ELÉTRICAS	17
2.2	CONCEITOS BASICOS	20
2.3	GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA OU GERADORES DC.....	32
2.4	MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA OU MOTORES DC.....	37
3	REAÇÃO DA CARÇAÇA	41
3.1	REAÇÃO DA CARÇAÇA EM UM MOTOR ELÉTRICO	41
3.2	REAÇÃO DA CARÇAÇA EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA ..	48
3.3	REAÇÃO DA CARÇAÇA EM OUTRAS MÁQUINAS MOTORAS	50
3.4	REAÇÃO DA CARÇAÇA EM HELICÓPTERO	51
3.4	REAÇÃO DA CARÇAÇA EM VENTILADOR DE TETO	52
3.4	REAÇÃO DE CARÇAÇA EM MOTO BMW.....	53
3.4	REAÇÃO DE CARÇAÇA EM UM GERADOR ELÉTRICO	53
3.4	REAÇÃO DE CARÇAÇA EM UM COMPRESSOR ALTERNATIVO	55
4	METODOLOGIA DE PESQUISA	57
5	PROJETO MECÂNICO	59
5.1	DEFINIÇÃO DO CONJUNTO	59
5.2	DETALHES DAS PEÇAS	62
5.3	LIGAÇÕES ELÉTRICAS	64
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
6.1	O CONJUNTO MECÂNICO	66
6.2	A REAÇÃO DA CARÇAÇA	66
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
8	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A reação da carcaça é um fenômeno físico presente em todas as máquinas rotativas e transformadoras de energia. As máquinas como motores diesel, a gasolina, elétrico, a vapor, hidráulico, evoluíram, mas a reação da carcaça desde as máquinas mais antigas até as mais modernas sempre esteve ligada a elas, é um fenômeno físico. Toda máquina transformadora de energia que possua um eixo sempre terá torque neste eixo, quer a máquina seja motora ou geradora. Se o torque está presente no eixo é porque existe algum meio interno na máquina que o gerou. Este torque interno é causado por uma força e um braço. E, se existe a força existe uma reação dela que está na carcaça. Esta força e um braço equivalente na carcaça geram o torque de reação da carcaça.

A reação da carcaça tende a girar a carcaça no sentido contrário da rotação do eixo nas máquinas motoras, e no mesmo sentido de rotação do eixo nas máquinas geradoras

Podemos ver e sentir a reação da carcaça se tentarmos segurar o eixo de um pequeno motor elétrico. Então sentiremos o torque que o eixo aplica nos nossos dedos e vemos a pequena carcaça girar em sentido contrário aquele do eixo. Vemos a tendência de movimento de giro do bloco de um grande motor a gasolina V8 quando abrimos o capô de um Landau e o motor é acelerado repentinamente. Neste caso a reação é devido a inércia das partes girante do motor.

Uma visão mais ampla da reação da carcaça é aquela do movimento de rotação que o helicóptero faz quando está parado e muda de direção seu eixo longitudinal. Ainda neste helicóptero existe o rotor de cauda que atua com uma força contrária para equilibrar seu eixo longitudinal.

Quando utilizamos uma pequena furadeira manual ficamos com as mãos firmes segurando a carcaça da furadeira para evitar que ela gire em sentido contrário ao da broca. Em alguns casos pode até causar lesões se a broca repentinamente for travada no furo.

Em um poço artesiano a bomba e o motor são fixados na extremidade de uma longa tubulação. Esta tubulação metálica e não de plástico, precisa ter rigidez suficiente para resistir a tendência de girar da tubulação.

Se observarmos todas as máquinas rotativas possuem um pedestal fixo ao chão que é para absorver o torque de reação. O pedestal, parte integrante da estrutura da máquina, tem como objetivo fixar a máquina ao chão e absorver a reação da carcaça.

No entanto existem motores hidrostáticos que não possuem pedestal. O eixo de saída desses motores, normalmente oco, é acoplado ao eixo da outra máquina, por exemplo, o eixo

de um tambor de um guincho. A carcaça deste motor fica totalmente livre para girar apoiada nos rolamentos internos. O que fazer? Então sua carcaça possui acoplada um braço de torque cuja extremidade é presa indiretamente ao chão para absorver o torque de reação.

Nos aviões monomotores devido a reação da carcaça há uma tendência do corpo do avião girar em trono do seu eixo longitudinal que é compensada por ajuste na sustentação das asas.

A reação da carcaça, entretanto é utilizada para ensaiar motores. É através deste fenômeno físico que se obtém a curva torque versus rpm nos motores. Esta curva é freqüentemente apresenta na especificação de motores automotivos, elétricos, hidrostáticos e em turbinas hidráulica e a gás.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho consiste em projetar um conjunto composto por um motor elétrico DC acoplado através de polias e correia sincronizadora a um gerador elétrico DC de maneira a demonstrar qualitativamente as reações de carcaça em motores e geradores DC. O motor será fixado de forma que sua carcaça fique livre para girar, e desta forma, sendo possível demonstrar visualmente a existência do binário de forças que age na carcaça do motor, ou seja, o torque de reação da carcaça, quando o motor puder girar livremente de um pequeno ângulo no sentido contrário ao de rotação do seu eixo. Da mesma forma o gerador é fixado para demonstrar que a carcaça tende a girar no mesmo sentido do seu eixo de rotação.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O torque de reação da carcaça é uma característica intrínseca às máquinas rotativas, logo, este fenômeno está presente em todas as máquinas motoras e geradoras.

O processo de determinação da potência efetiva de uma máquina motora e/ou geradora a partir do torque de reação da carcaça já existe e é amplamente utilizado. Com base neste processo, é possível constatar a existência do efeito da reação de carcaça em uma máquina rotativa submetida a determinada carga, tema bastante importante e tratado na disciplina de Projeto Mecânico na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

O sistema de freio proposto neste trabalho será apresentado no curso de Projeto Mecânico em anos posteriores, como um facilitador pedagógico, cujo intuito é favorecer o processo de ensino e compreensão do fenômeno abordado.

Considerando-se que dentro das pesquisas realizadas, não foi possível encontrar uma relacionada à construção deste tipo de sistema, dessa forma, torna-se interessante a obtenção do conhecimento para a construção deste equipamento eletromecânico, porém com uma tecnologia específica que ainda não foi desenvolvida comercialmente.

Sendo assim, a principal motivação para este trabalho é a ausência de um conjunto eletromecânico deste tipo no mercado. Logo, torna-se válida a proposta deste trabalho de implementar este sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS

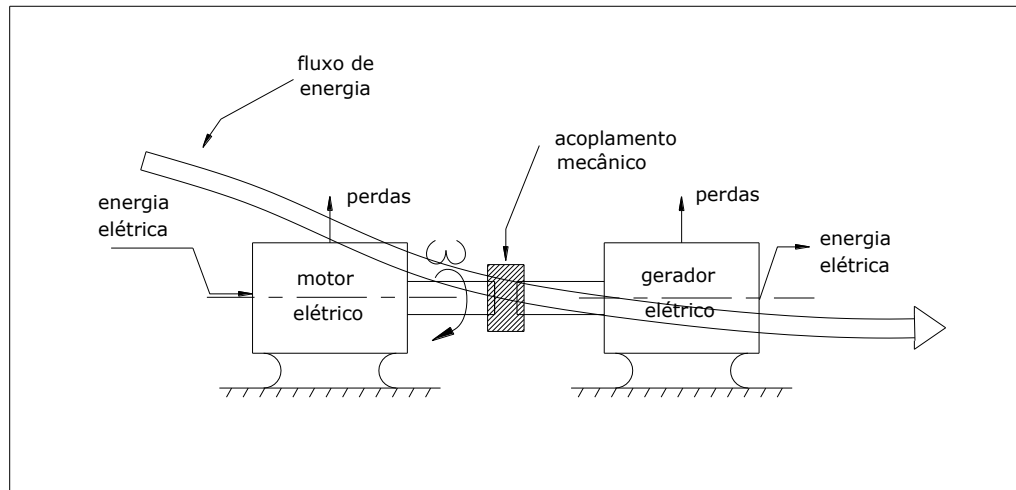
No início dos estudos da eletricidade somente se conhecia as cargas elétricas obtidas por atrito entre materiais convenientes (Bim, 2012). Depois descobriu-se que estas cargas elétricas se movimentavam e o estudo passou ser sobre a corrente elétrica. Em seguida cargas elétricas em movimento geravam calor. E, depois, vem a melhor descoberta, aquela que corrente elétrica gerava campo magnético. O estudo da mutualidade da eletricidade e do magnetismo levou à descoberta da indução eletromagnética e à possibilidade da associação entre energia elétrica e mecânica, a qual foi introduzida em 1831, pelo físico e químico Michael Faraday (Bim, 2012). Após esta etapa foi possível desenvolver o conceito e o princípio de funcionamento das máquinas elétricas. A partir da relação entre as forças eletromagnéticas e mecânicas, as máquinas elétricas permitem a transformação da energia elétrica em mecânica, através do motor elétrico e da energia mecânica em elétrica, através do gerador elétrico (CHAPMAN, 2013).

Uma máquina elétrica tem uma característica importante que é ser reversível, isto é, pode transformar energia mecânica em elétrica assim como pode transformar energia elétrica em mecânica, daí a vasta utilização das máquinas elétricas na produção de trabalho mecânico ou na produção de energia elétrica conforme necessário, sem que haja grandes perdas de energia. Dentre os tipos de energia disponíveis a energia elétrica é considerada uma forma limpa e altamente eficiente de energia. Desta forma, é de grande importância o estudo das características que definem as máquinas elétricas, tais como, potência, rotação, eficiência, etc. (CHAPMAN, 2013).

No estudo dos sistemas elétricos onde um motor elétrico está fornecendo energia mecânica a outra máquina, elétrica ou não, o fluxo de energia sempre caminha da energia elétrica de entrada para a energia de saída da outra máquina e é decrescente, pelo princípio de conservação de energia, conforme mostrado na Figura 1. O mesmo raciocínio vale para outros tipos de motores e geradores, por exemplo, um motor hidrostático acionando uma bomba hidrostática, ou um motor elétrico acionando uma bomba centrífuga, ou uma turbina hidráulica acionando um alternador, e assim por diante.

Vale lembrar também que o acoplamento, quer seja por correia, por engrenagens, por luva rígida ou elástica, não interfere na forma como a energia é transferida da máquina motora para a máquina geradora.

Figura 1 – Fluxo de energia em máquinas elétricas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve-se observar que um motor elétrico nunca pode funcionar como uma máquina motora se ele não estiver acoplado mecanicamente a uma outra máquina, isto é, se não há energia mecânica sendo entregue pelo eixo, não está havendo transformação da energia elétrica (NORTON, 2013). As perdas nas máquinas elétrica acontecem de várias formas:

1. Perdas por efeito Joule, ou perdas no cobre (perdas I^2R): são as perdas geradas pelo aquecimento resistivo dos fios do enrolamento do estator e do rotor. Este efeito é inerente aos fios condutores, podendo ser muito pequeno ou mesmo significativo, portanto sempre que há uma corrente elétrica passando pelo condutor, será gerado calor (CHAPMAN, 2013).
2. Perdas por histerese, que acontece devido a interação entre campo magnético e material ferromagnético, e perdas por corrente parasita, que na realidade são correntes elétricas que no material ferromagnético devido à lei de Faraday e estas correntes internas geradas produzem calor devido ao efeito Joule. “Elas variam com o quadrado da densidade de fluxo B ” (CHAPMAN, 2013, p.184).
3. Perdas mecânicas: toda máquina rotativa está apoiada em mancais que de qualquer forma gera atrito. Normalmente as máquinas precisam expulsar o calor gerado internamente a fazem isto através da ventilação. As perdas por atrito ocorrem nos

mancais de rolamento ou de deslizamento das máquinas, assim como podem ocorrer no conjunto escova/coletor como acontece em motores ou geradores com este tipo de comutação. As perdas por ventilação são as perdas causadas pelo atrito entre o ar e as partes móveis do motor, quando em rotação (CHAPMAN, 2013).

4. Perdas suplementares: são as demais perdas não relacionadas a nenhuma das categorias anteriores e que, portanto, são agrupadas nesta. “Para a maioria das máquinas, as perdas suplementares são consideradas por convenção como representando 1% da carga total.” (CHAPMAN, 2013, p.185).

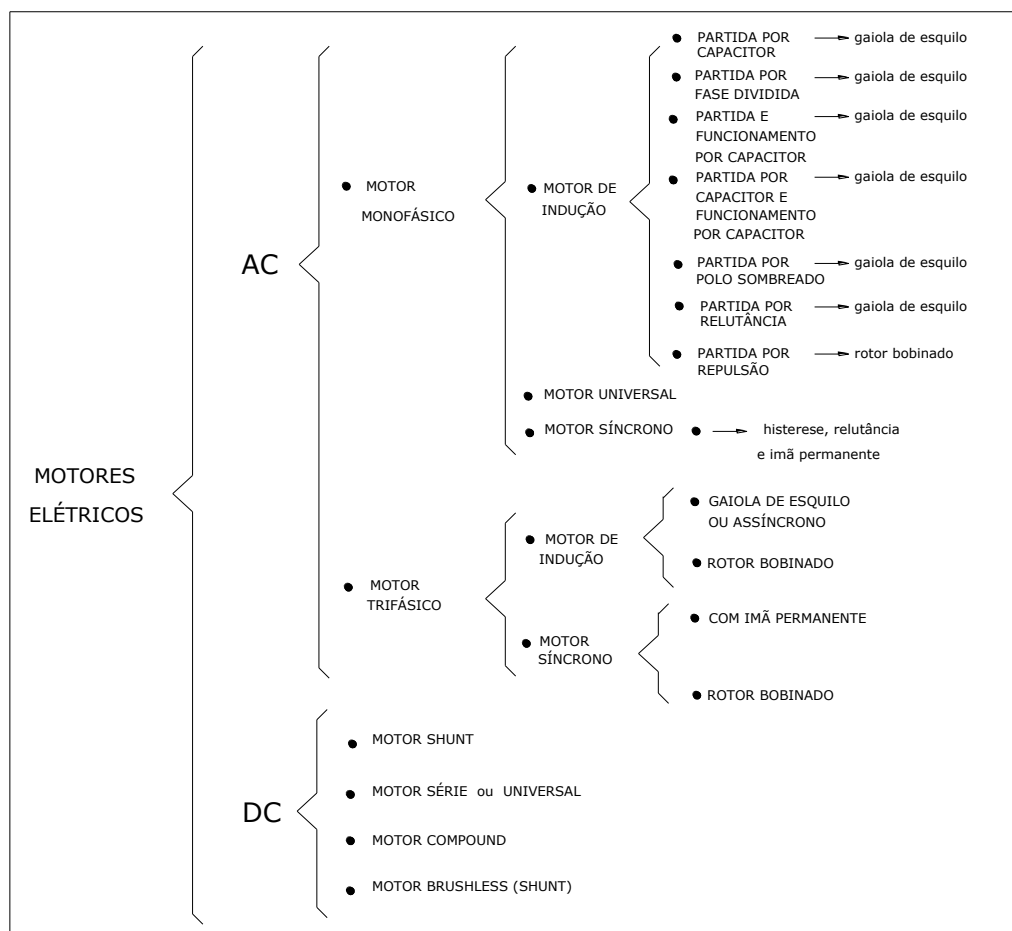
Resta então o calor gerado por todos esses meios ser retirado de dentro ou da superfície dessas máquinas elétricas. Estabelece-se então mais uma perda de energia, pelo acoplamento de uma hélice ao eixo da máquina. Isto acontece porque, além do atrito por ventilação entre a hélice e o ar (perda mecânica por ventilação), é necessária uma energia adicional utilizada para acionar a hélice, que recebe energia mecânica no seu eixo e a transforma em energia eólica nas suas pás.

Analisando em termos da energia elétrica que as máquinas elétricas utilizam no funcionamento, observa-se que tanto aquela utilizada pelo motor como aquela fornecida pelo gerador são comumente de dois tipos (WEG, 2017):

1. Corrente contínua (CC ou DC): a corrente contínua pode ser obtida de baterias para o acionamento dos motores, ou então através de um dispositivo que converta a corrente alternada em corrente contínua. Além disso, estes motores apresentam custos mais elevados em comparação aos motores de corrente alternada (WEG, 2017).
2. Corrente alternada (CA ou AC): por poder ser utilizado diretamente na corrente fornecida pela rede, sem que seja necessária a utilização de dispositivos de conversão de corrente, este tipo de motor é amplamente aplicado. Podem ser divididos em dois grupos: o síncrono, que funciona a uma velocidade fixa e o de indução, que funciona a uma velocidade que varia moderadamente em função da carga aplicada. Possuem custo baixo, desta forma, é o tipo de motor mais utilizado, tanto nas aplicações industriais quanto nas domésticas (WEG, 2017).

Os principais tipos de motores elétricos utilizados são exibidos nas Figuras 2.

Figura 2– Classificação dos motores elétricos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o trabalho refere-se a duas máquinas as elétricas, a motora e a geradora, a fonte de tensão DC é importante. No caso do motor a fonte de tensão vai fornecer a energia elétrica ao motor que transformará em energia mecânica, mais as perdas. Esta fonte pode ser, ou uma bateria chumbo ácida, ou de íons de lítio, ou uma célula fotovoltaica, ou um retificador DC, que são fontes mais comuns, ou um gerador DC eletromecânico. No caso de um gerador DC ele receberá energia mecânica no eixo e a transformará em energia elétrica DC, mais as perdas

2.2 CONCEITOS BÁSICOS

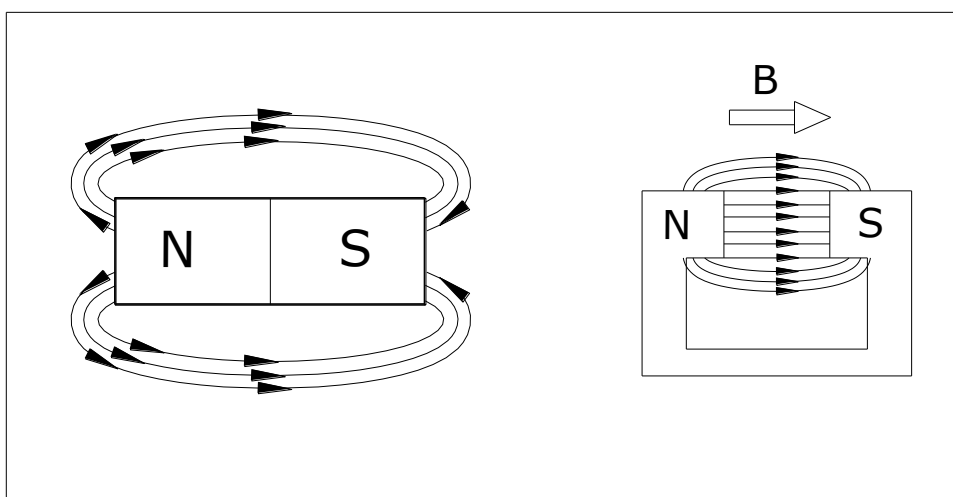
Para o estudo destas duas máquinas é necessário conhecer os conceitos básicos de física, tais como:

- Imã permanente
- Princípio de conservação de energia

- c) Corrente elétrica e campo magnético
- d) Força em um fio e corrente elétrica
- e) Lei de Oersted
- f) Lei de Faraday
- g) Efeito Joule

O campo magnético foi descoberto por acaso por pastores antigos quando uma pedra grudava nos seus cajados. Depois de muito tempo os ímãs foram artificialmente construídos utilizando-se ligas, por exemplo, de alumínio, cobre e cobalto (Bim, 2012). Algum aço também pode ser utilizado para se obter ímãs permanentes. Num ímã permanente existem sempre dois pólos: o pólo norte e o pólo sul. Não existe ímã com apenas um pólo. Se se quebrar um ímã forma-se dois outros ímãs com pólos norte e sul. As linhas de campo magnético B são linhas fechadas e são orientadas do pólo norte para o pólo sul externamente. Fica claro que internamente as linhas são orientadas do pólo sul para o pólo norte. A Figura 3 mostra esta orientação.

Figura 3 - Ímã permanente e linhas de campo magnético

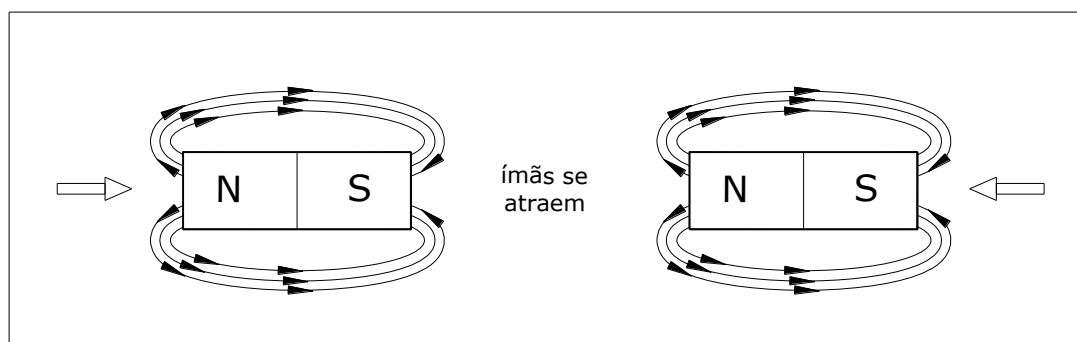


Fonte: Elaborado pelo autor.

As forças geradas entre dois ímãs são tais que:

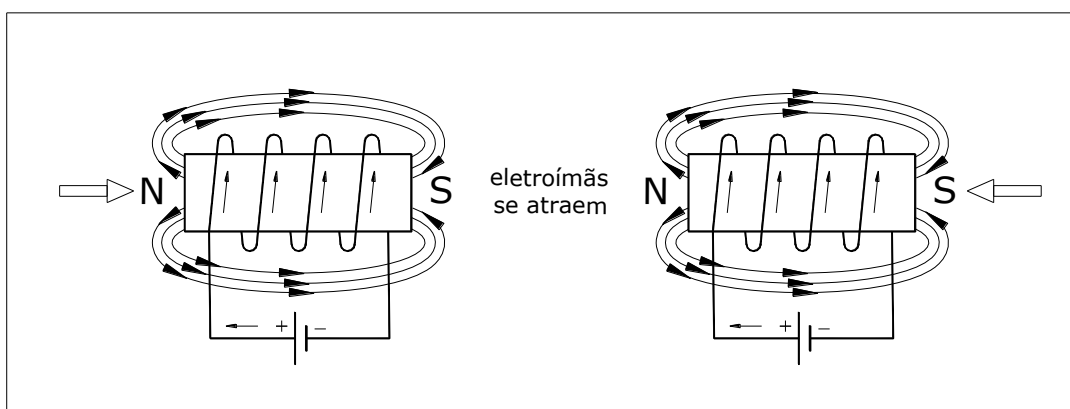
- a) campos magnéticos com polaridades diferentes se atraem, como mostrado na Figura 4 e Figura 5

Figura 4 – Força entre campos com polaridades diferentes



Fonte: Elaborado pelo autor.

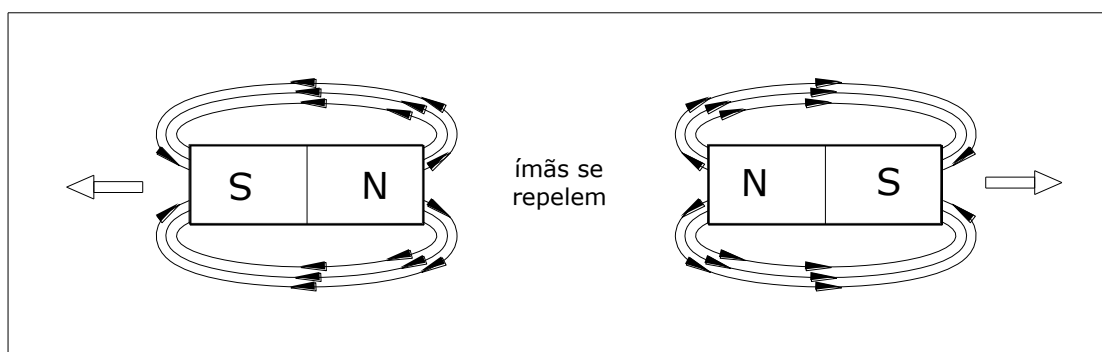
Figura 5 – Força entre campos com polaridades diferentes - eletroímãs



Fonte: Elaborado pelo autor.

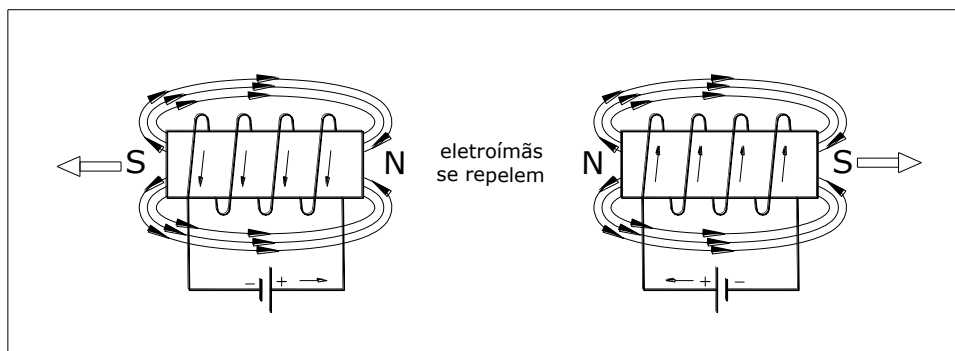
b) campos magnéticos com polaridades iguais se repelem, como mostrado na Figura 6 e figura 7.

Figura 6 – Força entre campos com polaridades iguais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Força entre campos com polaridades iguais – eletroímãs



Fonte: Elaborado pelo autor.

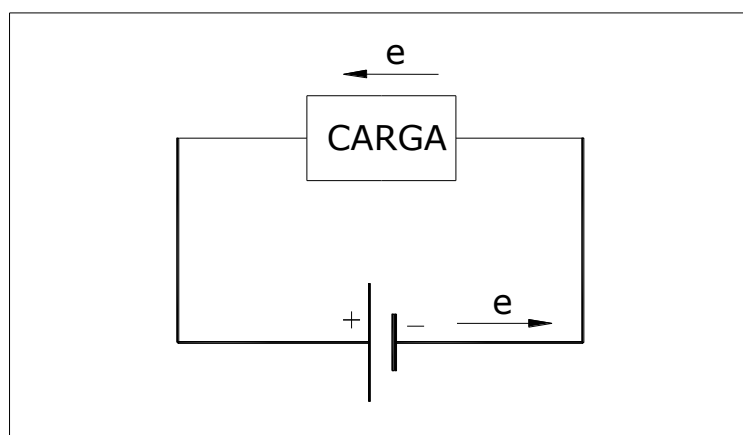
O princípio de conservação e transformação de energia estabelece que energia não se cria, se transforma, e na sua transformação o rendimento é sempre menor que um.

O campo magnético inicialmente descoberto somente se apresentava com os ímãs permanentes. No entanto depois da descoberta da corrente elétrica os campos magnéticos passaram a ser criados artificialmente em bobinas e matérias ferromagnéticas.

A corrente elétrica é o movimento das cargas elétricas (GOLDEMBERG, 1970). Existem duas considerações sobre a corrente com respeito ao seu sentido:

- a) A corrente elétrica se desloca na carga do pólo negativo da bateria para o polo positivo (FRAZEE, 1958). Esta corrente “e” recebe o nome de corrente eletrônica, isto é, são cargas negativas, ou os elétrons, que se deslocam no fio, conforme Figura 8.

Figura 8 – esquema de corrente eletrônica

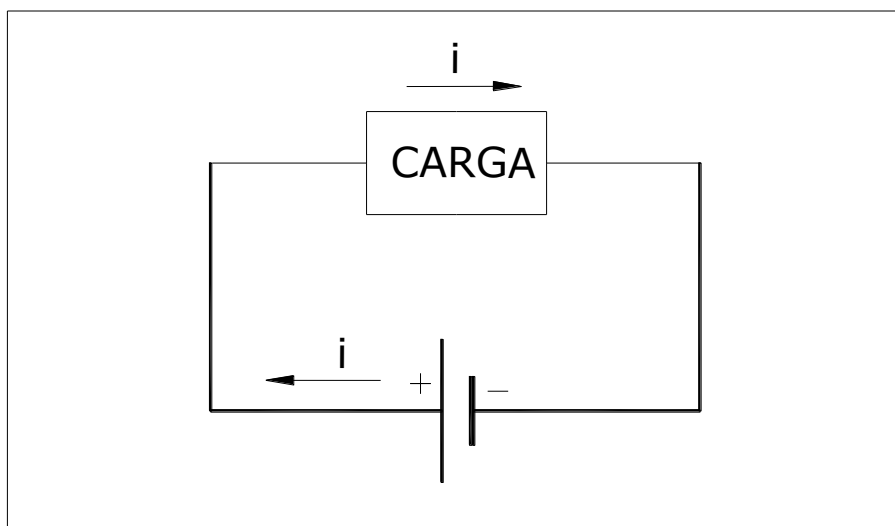


Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem livros sobre circuitos elétricos (FRAZEE, 1958) que adotam a corrente eletrônica para todo o tratamento dos seus assuntos. Por exemplo, para explicar a relação entre corrente elétrica e campo magnético, ou para mostrar como é o funcionamento de uma bateria chumbo-ácido. Fica claro que determinadas regras utilizadas na convenção sobre esta direção de corrente elétrica, ficam trocadas em relação à outra convenção.

- b) A corrente elétrica se desloca na carga do pólo positivo da fonte para o pólo negativo. Esta corrente “ i ” é chamada de corrente convencional, ou seja, são as cargas positivas que se deslocam no fio, conforme Figura 9. Neste trabalho toda a análise será feita para este tipo de corrente

Figura 9 – esquema de corrente convencional

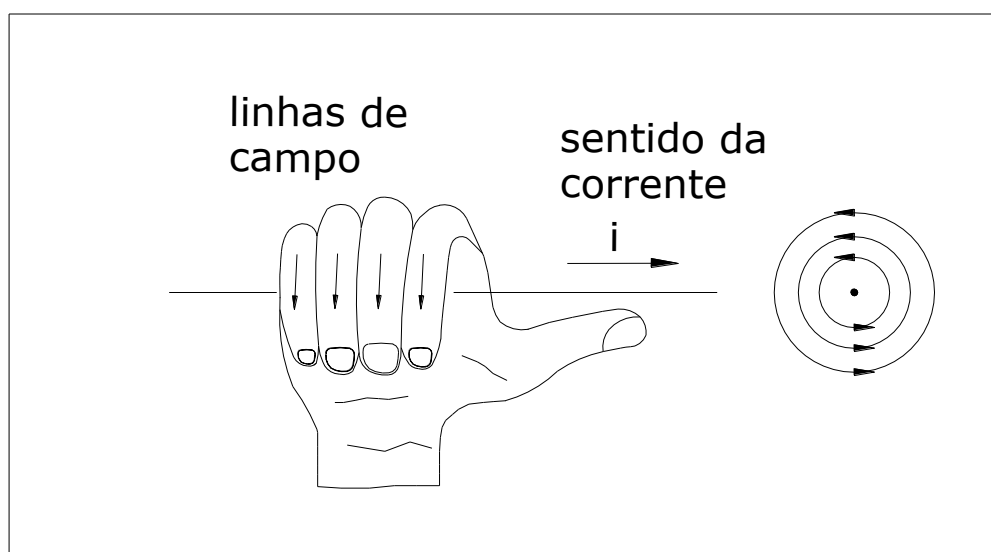


Fonte: Elaborado pelo autor.

A maioria dos livros sobre eletrotécnica, tais como, motores elétricos, transformadores, circuitos transmissão de energia, e mesmo aqueles sobre circuitos eletrônicos adotam a corrente elétrica convencional

A Lei de Oersted estabelece que quando a corrente elétrica flui em um fio existe um campo magnético em torno deste fio. Esta lei foi descoberta em 1820 por este físico dinamarquês. O sentido do campo magnético é ditado pela regra da mão direita: o polegar aponta para o sentido da corrente e os outros dedos para o sentido do campo magnético, conforme mostrado na Figura 10.

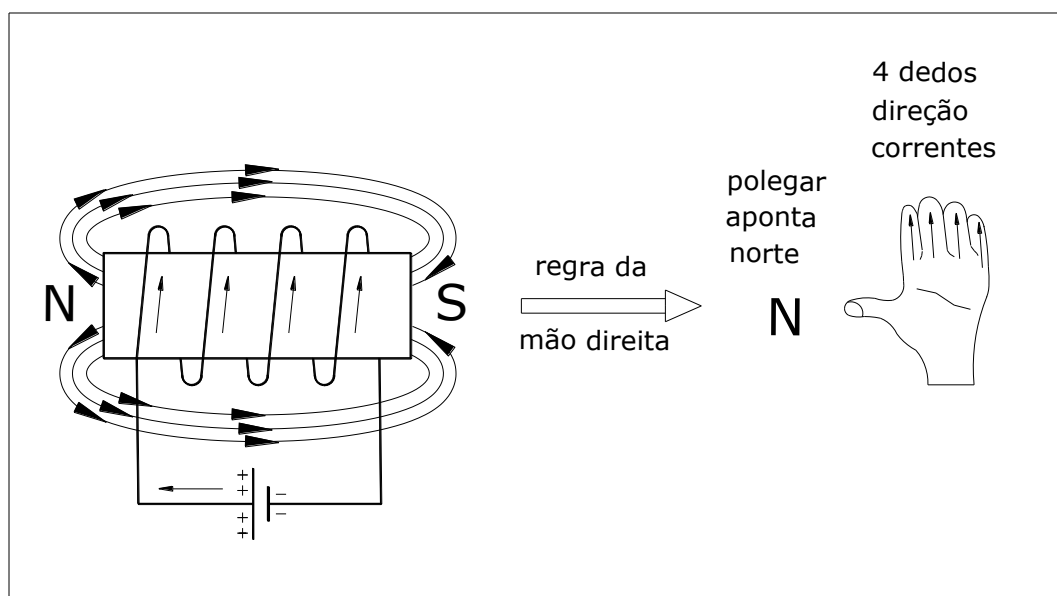
Figura 10 - Regra da mão direita – campo magnético em um fio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na prática, no entanto, usam-se bobinas, as quais consistem de fios enrolados em torno de um núcleo ferromagnético, ou não. Neste caso também se usa a regra da mão direita onde os dedos apontam a direção das correntes paralelas e o polegar aponta para o pólo norte da bobina, conforme Figura 11.

Figura 11 – Regra da mão direita – Campo magnético em uma bobina

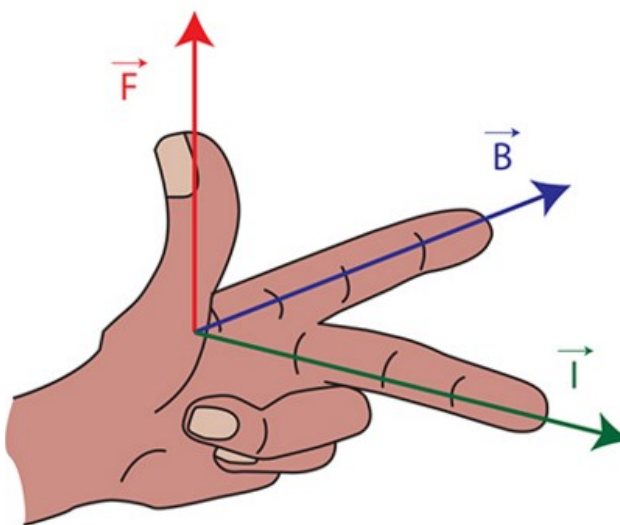


Fonte: Elaborado pelo autor.

Sabe-se até aqui como se cria um campo magnético, qual o seu sentido e que existe uma fonte de tensão elétrica que faz a corrente circular num circuito fechado.

Por outro lado, um fio conduzindo corrente elétrica dentro de um campo magnético sofre uma força, a qual é dada pela regra da mão esquerda onde o dedo indicador aponta para a direção do campo magnético $\vec{B}$, o dedo médio aponta para o sentido da corrente convencional “ i ” e o dedo polegar indica a direção da força resultante $\vec{F}$, conforme mostrado na Figura 12. Na realidade o que acontece é a interação entre dois campos magnéticos, isto é, o campo magnético formado pela corrente, conforme mostrado pela Lei de Oersted, e o campo magnético propriamente dito, o qual pode ser o campo magnético de um ímã permanente ou o campo magnético de um eletroímã. Esta força é exatamente aquela utilizada para a explicação do funcionamento de um motor elétrico e outros dispositivos eletromecânicos.

Figura 12 – regra da mão esquerda – campo, corrente e força



Fonte: Adaptado de Halliday (2016).

Existe um outro meio de se obter uma fonte de energia elétrica que não seja aquela criada quimicamente através de eletrólitos e substâncias convenientes, por exemplo, solução de ácido sulfúrico e chumbo (FRAZEE, 1958), íons de lítio, pilha de Lechanché, etc.

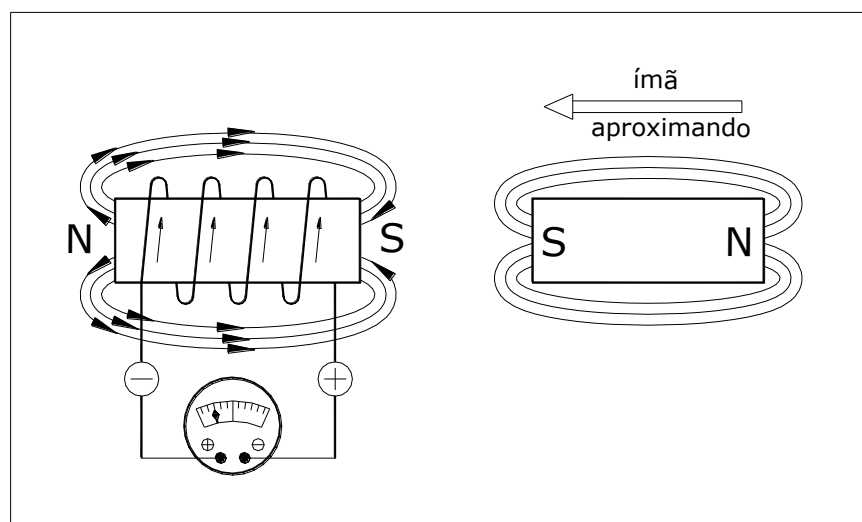
Depois da descoberta da relação entre corrente elétrica e campo magnético perguntava-se se campo magnético não poderia gerar corrente elétrica, ou uma força eletromotriz. Então, o físico inglês Michael Faraday, onze anos depois de Oersted, descobriu que campo magnético e uma bobina, ou ainda somente uma espira, ou um fio deslocando-se perpendicularmente ao campo magnético, podiam gerar uma corrente elétrica, desde que

houvesse movimento relativo entre estes dois elementos. Na realidade o que Faraday descobriu foi que sempre que houver variação do número de linhas magnéticas dentro de uma espira, ou uma bobina, haverá a geração de uma tensão, ou força eletromotriz, nos seus terminais.

A Lei de Faraday pode ser facilmente demonstrada através de várias experiências físicas, mas que no fundo é a comprovação do mesmo fenômeno.

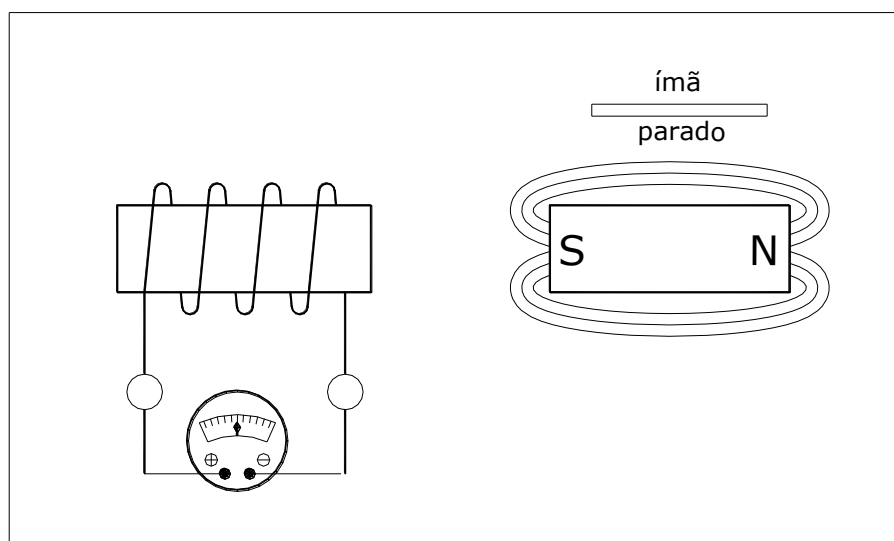
Deve-se também entender, associada à Lei de Faraday, a lei de Lenz que no fundo é o princípio de conservação de energia. Esta lei estabelece que quando um campo magnético se aproxima de uma espira, ou bobina, cria-se nesta bobina um outro campo magnético que tende a se opor ao campo que se aproxima. Sendo assim, se o polo sul de um ímã se aproxima de uma bobina será criado um campo também com pólo sul na bobina. E se o mesmo pólo sul se afastar da mesma bobina será criado um pólo norte nesta bobina. Na realidade quando o ímã se aproximou da bobina, houve uma variação do campo magnético dentro da bobina devido a aproximação do ímã e, por este motivo, gerou a força eletromotriz que fez circular uma corrente na bobina, desde que os seus terminais estejam conectados, e que gerou o campo magnético contrário. O mesmo aconteceu no afastamento do ímã. No entanto, se o ímã ficar parado ao lado da bobina não há variação do campo magnético e a tensão é zero. As Figuras 13, 14 e 15 exemplificam todos estes fenômenos.

Figura 13 – esquema de ímã permanente se aproximando de uma bobina



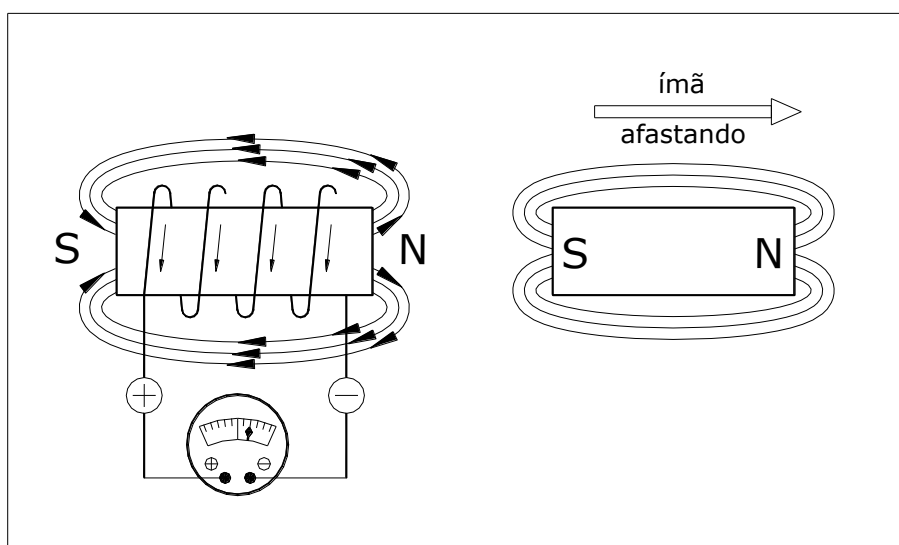
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – ímã permanente parado em relação à bobina



Fonte: Elaborado pelo autor.

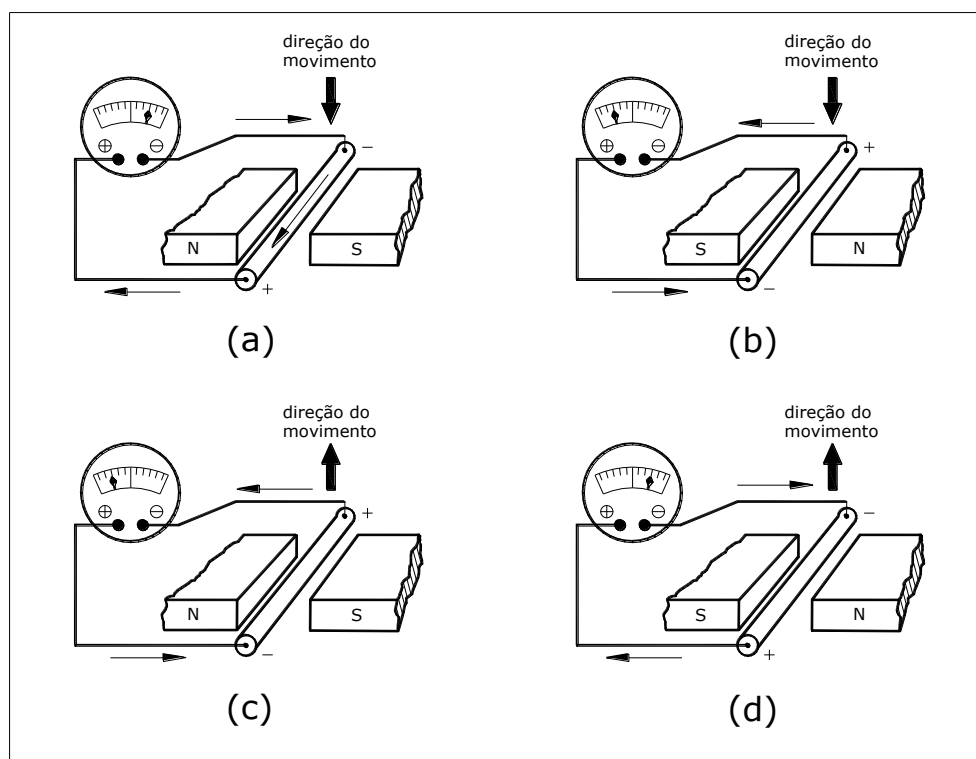
Figura 15 – ímã permanente se afastando da bobina



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma outra forma de entender a Lei de Faraday é mostrada na Figura 16 onde um fio reto se desloca perpendicularmente à um campo magnético, inicialmente o fio se desloca de cima para baixo gerando as polaridades “+” e “-”.

Figura 16 – esquema demonstrativo da lei de Faraday



Fonte: Elaborado pelo autor.

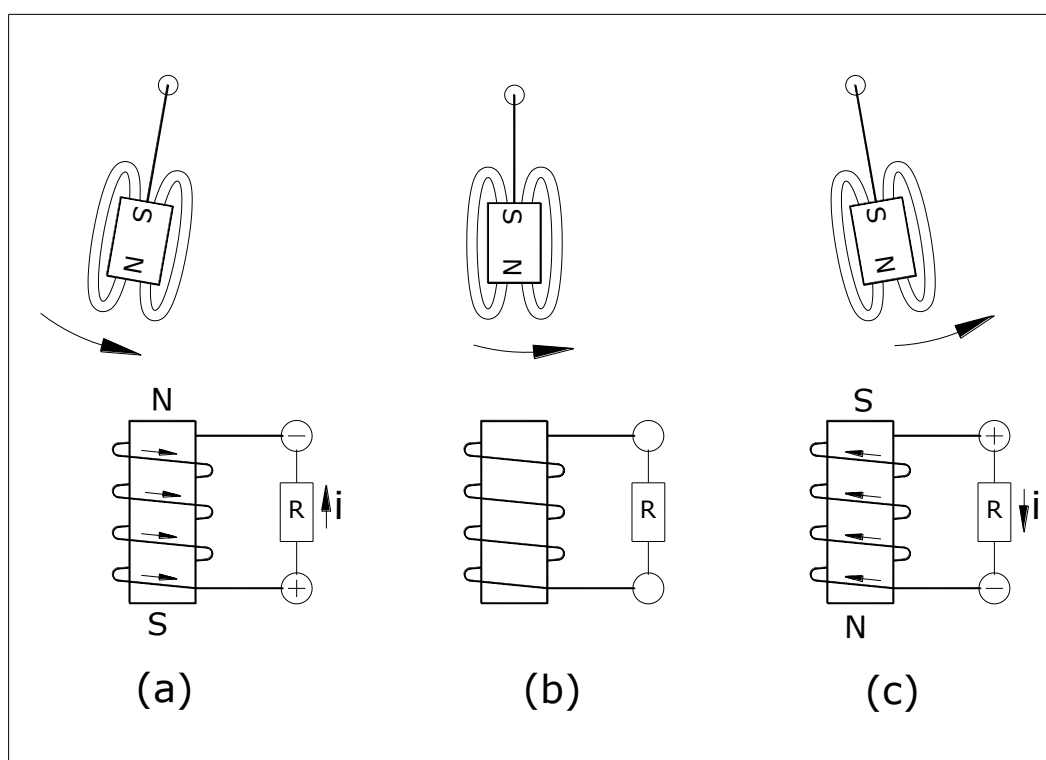
Durante o deslocamento do fio, ele forma com os outros fios que se conectam ao voltímetro uma espira. Conforme o fio se desloca para baixo em (a) há uma variação do número de linhas magnéticas com o tempo dentro dessa espira, gerando uma força eletromotriz. Nesse circuito fechado circula uma corrente, que por sua vez gera uma energia muito pequena no fio e uma energia para fazer o ponteiro do instrumento se mover. Agora, analisando por um outro modo, de onde vem esta energia? Ela é originada pela força que é necessária para movimentar o fio dentro do campo magnético. Então pelo princípio de conservação de energia, se existe uma força no fio é necessário haver uma força contrária externa para movimentá-la dentro do campo magnético. E a polaridade da tensão gerada por que assume estas posições? — . Pela regra da mão esquerda a corrente no fio, dentro do campo magnético, tem que seguir do terminal “—” para o terminal “+” a fim de que a força no fio seja contrária ao movimento. Durante o movimento o fio se comporta como uma bateria onde a corrente, na carga, vai do pólo “+” para o pólo “—”. No instrumento o ponteiro se desloca para a direita, pois o terminal “+” do fio dentro do campo magnético está conectado ao terminal “+” do instrumento. O mesmo raciocínio vale quando o fio também é

deslocado para baixo, mas a direção do campo magnético é mudada, como mostrado em (b). Por outro lado, quando o fio se desloca de baixo para cima a tensão gerada assume as características mostradas em (c) e em (d) de forma análoga ao que foi discutido em (a) e (b).

O mesmo fenômeno da indução da Lei de Faraday e da conservação da energia, ou Lei de Lenz, pode ser visto na Figura 17 onde um pêndulo eletromagnético se aproxima de uma bobina induzindo um campo magnético norte na bobina. Quando o ímã passa exatamente pelo centro da bobina, neste instante não há variação com o tempo do campo magnético dentro da bobina e, então, a força eletromotriz induzida na bobina é zero. Finalmente, quando o ímã se afasta da bobina um campo magnético sul é criado na bobina. Nestes três casos, de onde vem a energia? Vem da energia potencial do ímã, pois ele inicialmente foi colocado a uma certa altura da sua posição de equilíbrio estável, isto é, quando ele está na posição vertical.

Observar a polaridade de cada bobina em todas as posições apresentadas (a), (b) e (c). Em cada instante a bobina se comporta como uma fonte de tensão eletroquímica, ou uma fonte fotovoltaica, as quais são fontes estáticas, isto é, não dependem de movimento para funcionarem.

Figura 17 – Pêndulo eletromagnético

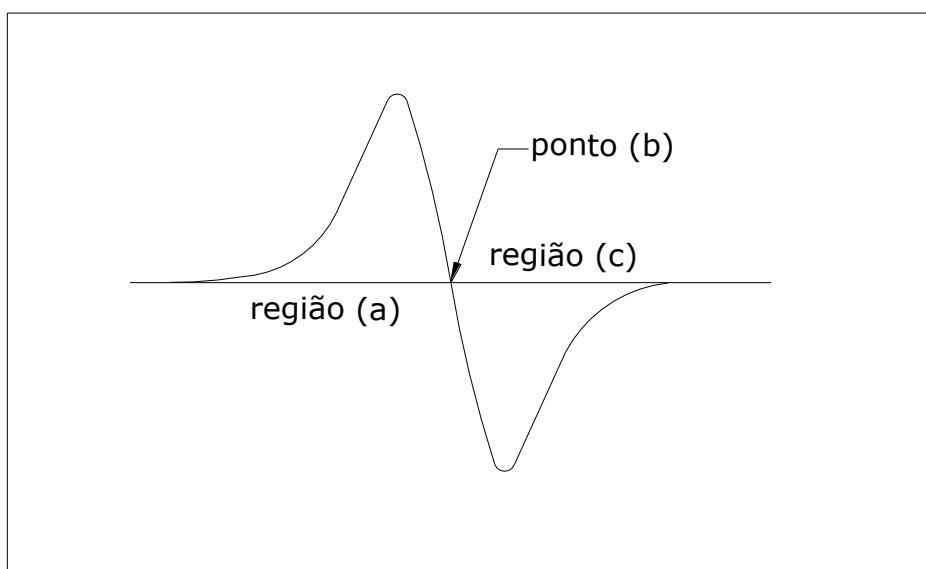


Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma comprovação mais detalhada da Lei de Faraday no caso do pêndulo eletromagnético, e utilizando um osciloscópio, é mostrada na Figura 18. Quando o ímã está afastado da bobina não há geração de tensão, pois o campo magnético do ímã não alcança a bobina e não varia com o tempo. Conforme o ímã se aproxima da bobina a tensão vai aumentando devido a rapidez com que as linhas variam dentro da bobina, até atingir uma variação máxima. Em seguida a tensão cai rapidamente até zero, quando o ímã ficar alinhado com a bobina. Neste instante não haverá variação das linhas de campo magnético com o tempo dentro da bobina. Em seguida, a força eletromotriz gerada muda de sinal, quando o ímã se afasta, até ficar zero novamente.

Se o ímã que forma o pêndulo for substituído por um mecanismo que funcione continuamente girando, e não oscilando, uma tensão alternada com o formato de onda da Figura 18 será detectado na resistência R., no entanto, esta tensão será espaçada por um tempo grande em que a tensão será zero, isto é, durante o ângulo de giro que o pólo N do ficar afastado da bobina. O valor de pico desta tensão dependerá da velocidade angular de rotação, pois quanto mais rápido o ímã passar em frente da bobina, mais rápido será a variação das linhas de campo magnético com o tempo.

Figura 18 – Figura obtida de osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Geradores de corrente contínua ou gerador DC

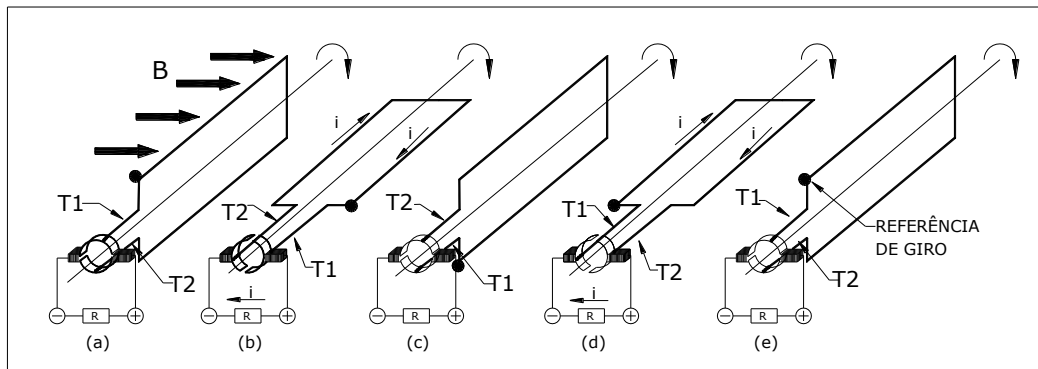
Um gerador de corrente contínua é uma máquina que recebe energia mecânica no eixo e a transforma em energia elétrica, mais perdas. Em um gerador existe componentes rotativos e estáticos. Os componentes rotativos são o eixo, parte dos mancais, o rotor e as bobinas que estão acoplados ao eixo e o coletor. A parte fixa constitui-se do pedestal, da carcaça, das escovas e campo magnético constituídos de imas permanentes. Muitos geradores em lugar do ímã permanente utilizam uma bobina alimentada por tensão contínua. Pode-se afirmar que todos os geradores de corrente contínua geram internamente uma tensão alternada que é retificada através do coletor e das escovas. Diz-se, então, que neste tipo de gerador a tensão é retificada mecanicamente. Mas, existem geradores que também geram internamente tensão alternada e retificam através de diodos para obter nos seus bornes de saída uma tensão contínua.

Os geradores de corrente contínua necessitam de uma fonte de energia mecânica acoplada ao seu eixo. Esta fonte pode ser qualquer tipo de máquina motora, isto é, ou um motor elétrico, ou um motor de combustão interna, ou uma turbina hidráulica, ou uma turbina eólica. Pode também utilizar ainda a energia mecânica proveniente de um animal, por exemplo, cavalo, boi, ou mesmo, de um ser humano acionando uma manivela, ou pedalando uma bicicleta.

Em geral o campo magnético de um gerador de corrente contínua possui um ímã permanente, mas ele pode ser substituído por um eletroímã, que por sua vez pode ser alimentado por uma outra fonte de tensão contínua, ou ainda, ser alimentado pela própria saída do gerador. Neste caso, um magnetismo residual do estator do gerador fornece uma pequena tensão quando o gerador começa a funcionar. Esta pequena tensão alimenta o campo aumentando o campo magnético do estator, que por sua vez aumenta a tensão gerada que realimenta o campo. Este processo iterativo continua até que o campo do estator satura e a tensão de saída permanece constante.

Na Figura 19 é mostrado um gerador elementar com apenas uma espira em cinco posições de giro. Na primeira posição (a) a espira está girando, mas não há tensão induzida porque não há variação das linhas de campo dentro da espira. A espira continua girando e 90 graus depois em (b), quando a espira está paralela às linhas de campo a variação é máxima.

Figura 19 – gerador elementar com apenas uma espira

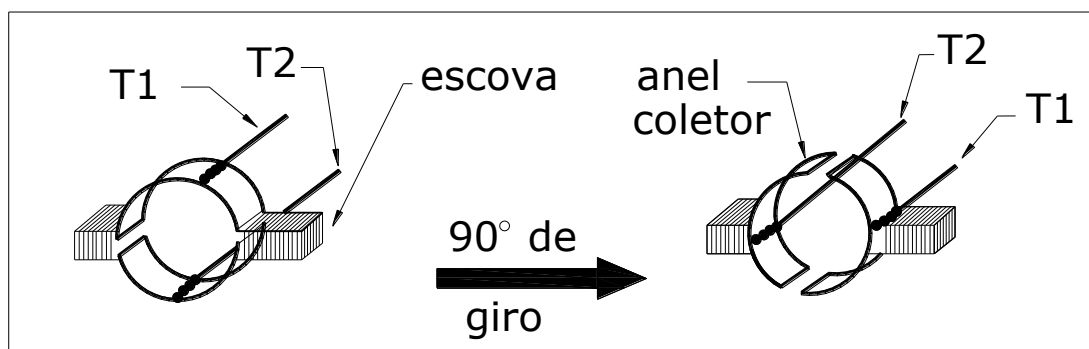


Fonte: Elaborado pelo autor.

E, portanto, a tensão induzida é máxima. Mais 90 graus de giro, em (c), e a espira está perpendicular à direção do campo magnético. Nesta posição novamente não há variação do campo magnético e, portanto, a tensão induzida nos seus terminais é zero. Na quarta posição, em (d), apresenta novamente a espira que está numa posição em movimento onde a variação volta a ser máxima, com conseqüente máxima tensão induzida nos seus terminais. E, finalmente, completando o ciclo, a bobina volta a ficar numa posição, em (e), onde não há variação das linhas de campo magnético e, conseqüentemente, pela lei de Faraday, a tensão induzida nos seus terminais é zero.

Deve-se observar que um terminal da espira é conectado à metade do anel coletor, assim como o outro terminal é conectado à outra metade do anel coletor. A Figura 20 mostra detalhes do anel coletor e escovas. Os terminais 1 e 2 da espira, como estão conectados às duas metades do anel coletor, assim como a própria espira, todos sempre giram juntos com o eixo da máquina. Entretanto, as duas escovas posicionadas à 180 graus, sempre estarão fixas e na mesma posição.

Figura 20 – detalhe do anel coletor e escovas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por que sempre os terminais de saída das escovas têm sempre a mesma polaridade? Observar que na posição de tensão induzida zero os dois terminais da bobina, através dos anéis coletores estão curto circuitados. Não há problema, pois, a tensão induzida é zero. Mas, um instante após, cada escova estará conectada à cada metade do anel coletor. Observar ainda que à cada 180 graus cada metade do anel coletor automaticamente troca de posição com cada escova. Sendo assim, toda vez que um terminal da espira, através do anel coletor entrar em contato com uma escova, este terminal terá sempre a mesma polaridade e, portanto, o terminal de saída da escova também terá sempre a mesma polaridade. Pode-se, então, afirmar que internamente na espira sempre há uma tensão alternada, mas através do anel coletor e das escovas esta tensão alternada é retificada para uma tensão contínua na saída. Num gerador deste tipo acima analisado, invertendo-se o sentido de giro inverte-se também a polaridade dos terminais de saída. O mesmo acontece se for invertida a direção do campo magnético.

Um gerador de corrente contínua comercial, entretanto possui algumas modificações com a finalidade de torná-lo mais potente em relação ao seu peso e volume. Sendo assim, o anel coletor é dividido não em apenas duas seções, ou duas lâminas, mas em muitas seções, ou muitas lâminas. É típico para um gerador automotivo ter em torno de 28 lâminas, como mostrado na Figura 21. Fica evidente que também o número de espiras não é unitário, mas com muitas espiras convenientemente posicionadas, ou enroladas, em volta do rotor.

Figura 21 – rotor de gerador automotivo

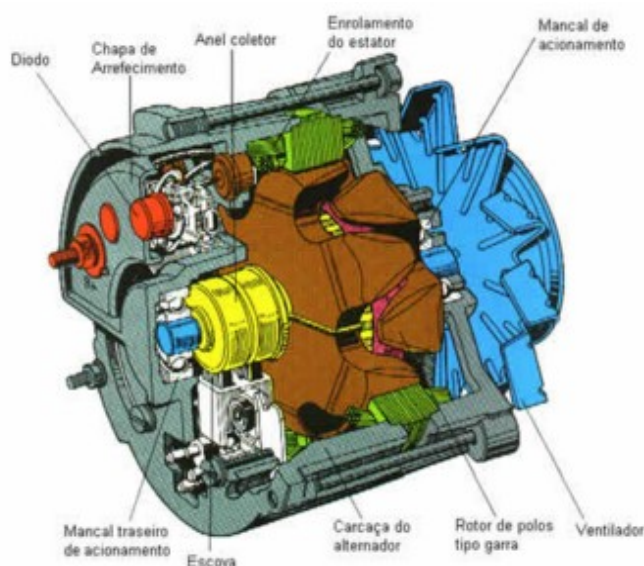


Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem dois tipos principais de enrolamento das espiras, isto é, o enrolamento série ou ondulado e o enrolamento imbricado ou paralelo. Existe ainda um tipo de enrolamento não muito comum chamado enrolamento tipo anel.

Os geradores de corrente contínua também podem ser construídos utilizando-se em lugar de coletor e escovas, retificadores eletrônicos através de diodos. A Figura 22 mostra um alternador automotivo, um gerador de corrente contínua típico e muito utilizado na indústria automobilística, que apesar de comercialmente ser chamado de alternador, ele é um gerador de corrente contínua.

Figura 22 – Corte longitudinal de um alternador automotivo



Fonte: Adaptação da revista Oficina Brasil

Este gerador gera uma tensão alternada não em seu rotor, mas no estator. Neste caso os anéis coletores contínuos não são utilizados para a tensão de saída do alternador, mas para energizar com tensão contínua o eletroímã que induz nos enrolamentos estatóricos a tensão alternada.

Geradores de corrente contínua de potências maiores são muito utilizados como fontes para solda elétrica, pois são preferidos em lugar de solda com tensão alternada e transformadores. Neste caso é muito comum um motor elétrico de indução acionar um gerador de corrente contínua com acoplamento coaxial, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – gerador de corrente contínua com motor de indução



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a mesma finalidade de solda elétrica este tipo de gerador ainda pode utilizar para o seu acionamento motores diesel ou a gasolina, ou ainda, ser acionado pela tomada de força de tratores agrícolas., como mostrado nas figuras 24.

Figura 24 - Gerador DC para acoplar em tomada de força de trator



Fonte: Aeroexpo (2018).

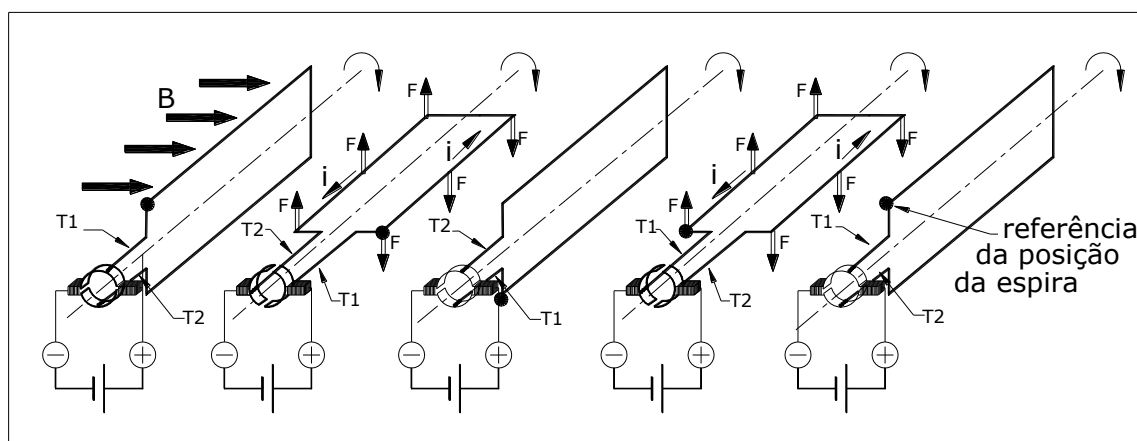
Existem ainda geradores de corrente contínua acoplados diretamente ao eixo de alternadores nas usinas hidrelétricas. Estas máquinas são utilizadas para fornecer tensão DC para os polos dos rotores desses alternadores.

2.4 Motores de corrente contínua ou motor DC

Um motor de corrente contínua é uma máquina que recebe energia elétrica contínua e a transforma em energia mecânica, mais perdas. Este tipo de motor é uma máquina reversível, isto é, ela também pode se comportar como um gerador utilizando energia mecânica e fornecendo energia elétrica. Então dependendo do tipo de energia que a máquina recebe ela ficará caracterizada ou como um motor, ou como um gerador.

Um motor de corrente contínua elementar é mostrado na Figura 25. Existe uma fonte de energia elétrica contínua, um campo magnético, a espira, o anel coletor e escovas. Quando a corrente elétrica circula na espira uma força devido à interação entre corrente e campo aparecerá, de acordo com a regra da mão direita para campo, corrente e força.

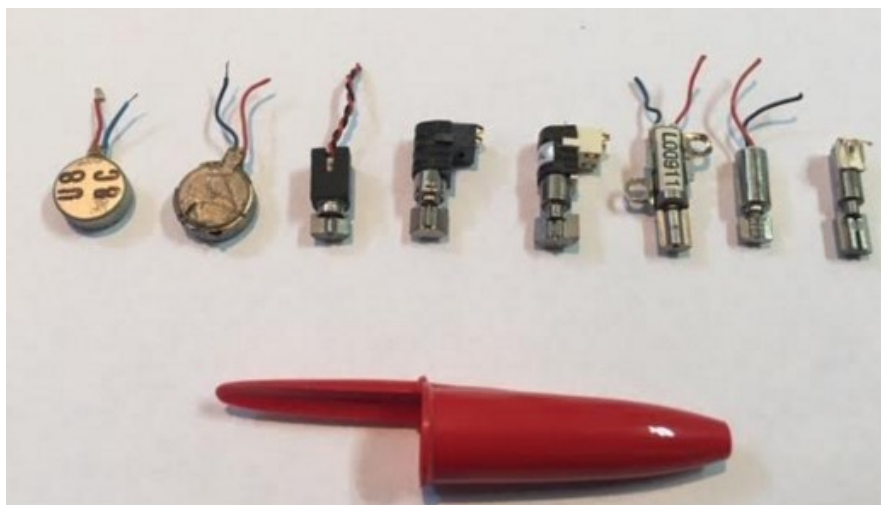
Figura 25 - um motor de corrente contínua elementar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os motores de corrente contínua são utilizados em muitas aplicações do nosso dia a dia. Um dos menores motores que praticamente todos carregam no bolso é o micromotor utilizado em aparelhos celulares. Este motor é acoplado à uma pequena massa desbalanceada para obter o que se chama de “vibracall”. A Figura 26 mostra uma foto destes motores, em formato cilíndrico e formato de um botão. Comparar o tamanho dos motores com a tampa de uma caneta.

Figura – 26 - Motores de corrente contínua utilizados em celulares.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 27 mostra os componentes desses micromotores, onde observa-se os pequenos enrolamentos, o ímã permanente em forma de anel e a carcaça. Observe também que o rotor onde estão os dois enrolamentos é seccionado para que haja desbalanceamento e consequente vibração. Mostra também outro rotor onde está conectado o coletor.

Figura 27 – componentes do micromotor



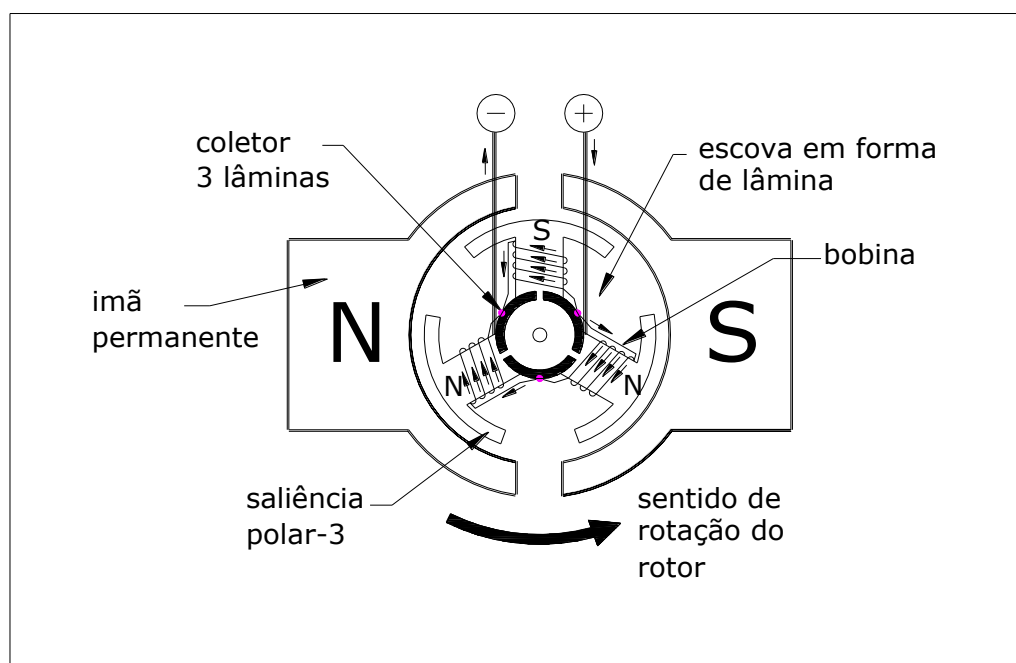
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na indústria automobilística são utilizados pequenos motores para acionamento de espelhos e vidros das portas. Motores um pouco maiores são utilizados para acionar ventoinha de refrigeração dos painéis, assim como limpadores de para-brisa. Na ordem crescente de potência, ainda nos veículos, existem motores para a ventoinha de refrigeração dos radiadores. Finalmente, em ordem crescente de potência, ainda nos veículos, existem os motores para acionar a partida, ou motores de arranque. Todos esses motores possuem basicamente um ímã

permanente para o campo magnético do estator, um rotor com enrolamento dos fios junto com o coletor, e as duas escovas de carvão grafitado. Todos estes motores possuem o coletor com várias lâminas e sempre apenas duas escovas quando existe apenas um par de polos.

Entretanto existe um outro tipo de motor elétrico de corrente contínua que é muito comum à sua aplicação em brinquedos e autoramas. Este motor possui um ímã permanente no estator e um rotor com um enrolamento composto de três bobinas, com três saliências polares, e diferentemente dos outros motores acima citados possui um coletor com três lâminas e duas escovas à 180 graus como nos outros tipos. As duas escovas são em forma de lâmina e tangentes ao coletor. A Figura 28 mostra os detalhes deste tipo de motor.

Figura 28 - Detalhe dos componentes do motor DC - 3 saliências

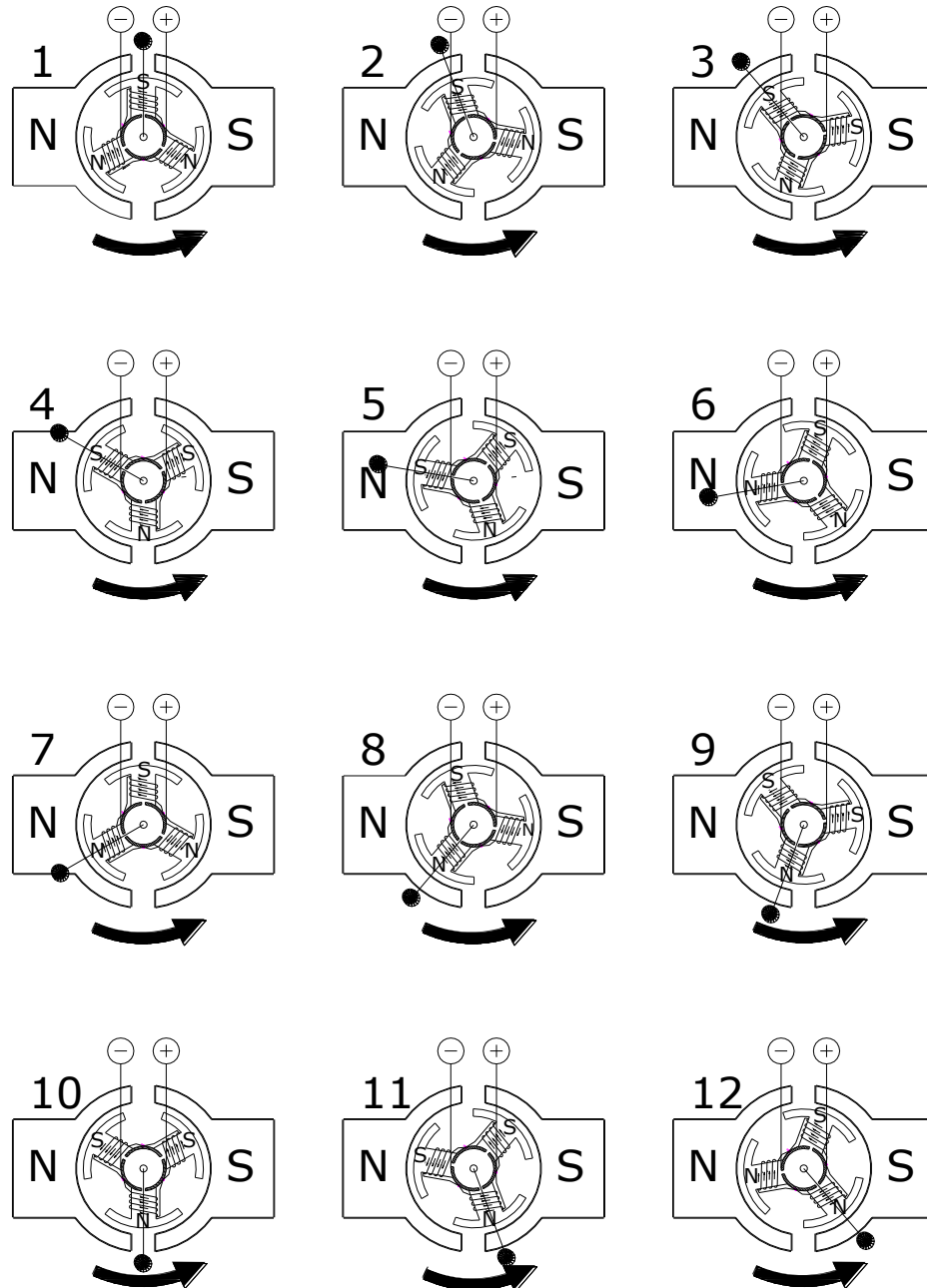


Fonte: Elaborado pelo autor.

O seu funcionamento é melhor entendido quando é analisada a polaridade, em cada instante, que ocorre nas três saliências polares, conforme mostrado na sequência, de 1 a 12, na Figura 29. O círculo preto mostra a posição do rotor em cada instante. Observar que sempre existe nas três saliências polares do rotor campos magnéticos formados pela circulação de corrente nas suas bobinas. Estes campos magnéticos, em cada instante, vão ser atraídos ou repelidos pelos campos N e S do estator, gerando um movimento contínuo do rotor e sempre no mesmo sentido.

Este tipo de motor também é utilizado nos celulares mais antigos. Externamente possuem uma aparência tubular. Eles têm a função de girar uma massa excêntrica na ponta do eixo a fim de produzir uma vibração. Esses telefones são chamados de celular que possui “VibraCall”.

Figura 29 – Seqüência de funcionamento do motor DC -- 3 saliências



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Mazzochi (1927), este tipo de motor sendo atribuída sua invenção a Brush e Thomson, foi abandonado devido à dificuldade de evitar o forte faiscamento no

coletor. Pelo que se sabe não é fabricado em tamanhos grandes, apenas micromotores para brinquedos com tensões DC baixas.

Comparando os motores elétricos DC com os geradores elétricos DC:

- a) Nas duas máquinas sempre existe corrente elétrica nos enrolamentos do rotor;
- b) Nas duas máquinas sempre existe um campo magnético no rotor;
- c) No motor o campo do rotor empurra o estator no sentido contrário do giro;
- d) No gerador o campo do rotor empurra o estator no mesmo sentido de giro

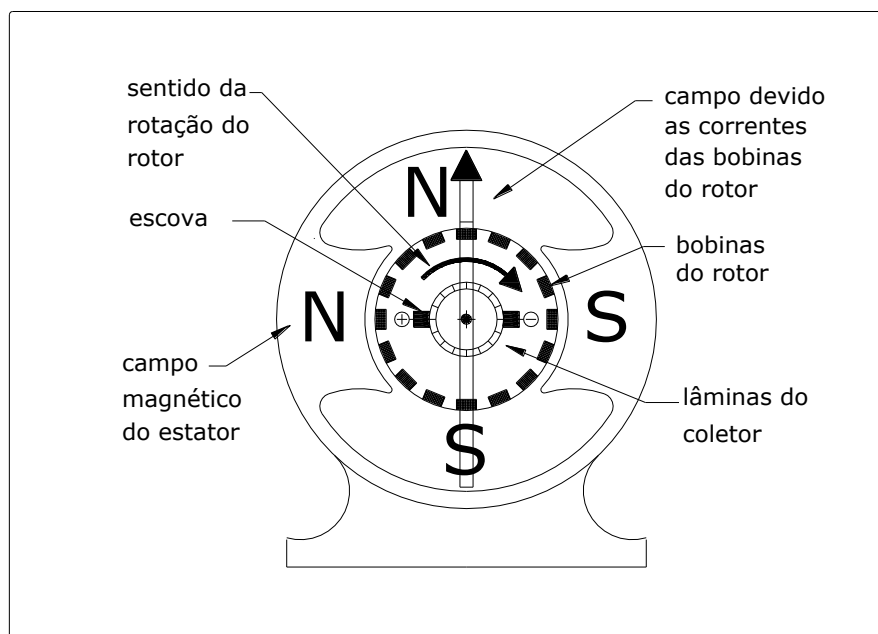
3 REAÇÃO DA CARCAÇA

3.1 Reação da Carcaça em um Motor Elétrico

A força eletromagnética é o mecanismo pelo qual se dá a conversão entre as energias elétricas e mecânicas. No caso particular das máquinas motoras, o princípio básico que caracteriza o comportamento do campo magnético é pelo desenvolvimento de uma força em um fio conduzindo corrente elétrica e que esteja na presença de um campo magnético (CHAPMAN, 2013).

Quando o eixo de um motor gira, é porque sempre existe um campo magnético formado no rotor pelos fios de seu enrolamento, ou bobinas do rotor, conduzindo uma corrente elétrica. Esta corrente elétrica percorre cada enrolamento do rotor direcionada convenientemente pelas lâminas do coletor e pelas duas escovas no caso de um motor de 2 pólos, como mostrado na Figura 30. As escovas estão fixas na carcaça, logo o campo magnético formado pelo rotor sempre estará, em relação ao campo magnético do estator, na mesma posição, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – esquema dos pólos no rotor e estator do motor DC



Fonte: Elaborado pelo autor.

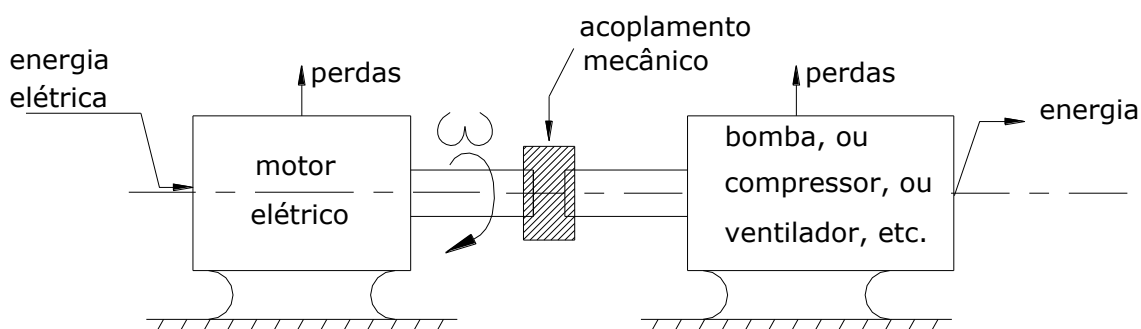
O enrolamento do rotor, as lâminas do coletor, as escovas e a polaridade “+” ou “-” da fonte de corrente contínua, são montados um em relação ao outro de tal forma que,

quando o rotor gira existe sempre um campo magnético devido ao seu enrolamento, e sempre com a mesma polaridade em relação ao campo magnético do estator, para o mesmo sentido de rotação. Nestas mesmas condições, caso a rotação seja invertida o campo magnético do rotor também será invertido. Estes dois campos, na melhor condição de funcionamento, devem estar à 90° um em relação ao outro para que a força tangencial que vai girar o rotor seja a maior possível para gerar o maior torque. Dependendo da posição das escovas a direção do campo do rotor pode variar e não ser perpendicular. Lembrar que o campo magnético do estator, além de ser um ímã permanente, pode ser obtido com uma bobina e uma fonte de tensão contínua.

Quando o motor está girando sem carga, no seu eixo o campo magnético formado no rotor é pequeno gerando uma força, e conseqüentemente, um torque apenas para vencer as perdas devido a ventilação, atritos nos mancais e nas escovas, e outras. Esta força que depende do campo magnético nas bobinas é função da corrente nestas bobinas. Na realidade a corrente nas bobinas é basicamente a tensão resultante dividida pela resistência elétrica das bobinas, isto é, $i = V/R$. E, qual é esta tensão resultante? Ela é a diferença entre a tensão aplicada pela fonte de corrente contínua menos a força contra eletromotriz gerada pelos próprios enrolamentos, e devido a Lei de Faraday, quando eles giram dentro do campo magnético do estator.

Por outro lado, quando existe uma carga aplicada ao eixo do motor o eixo diminui um pouco sua rotação. Então a força contra eletromotriz também diminui e a tensão resultante nos terminais das bobinas do rotor aumenta, fazendo com que a corrente aumente e conseqüentemente o seu campo magnético. Desta forma a força gerada pelo rotor aumenta assim como o torque, contrabalançando o torque da carga que lhe foi aplicada. A carga do motor pode ser de várias formas como mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Máquina motora e geradora acopladas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do que foi exposto conclui-se que o motor somente gera um torque útil no seu eixo se ele estiver acoplado a uma carga externa, fazendo a transformação da energia elétrica que lhe foi aplicada e transformando em energia mecânica no eixo, mais as perdas.

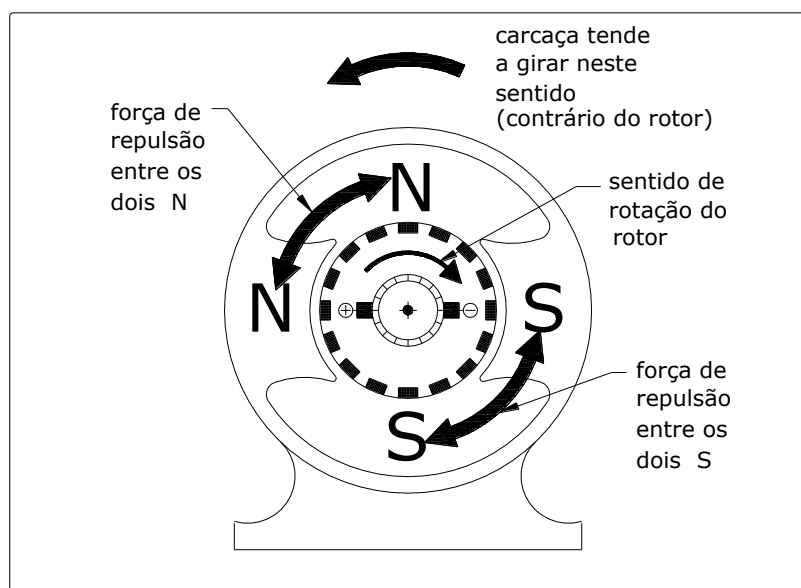
Dado que o eixo do rotor esteja submetido a um torque, é necessário que exista uma força aplicada neste eixo, dentro do motor, e que produza este torque. No caso do motor elétrico, esta força é gerada no rotor que está acoplado ao eixo através dos fios do enrolamento do rotor.

Em um motor elétrico, a razão da energia mecânica fornecida no eixo por tempo, ou a potência mecânica no eixo, é o produto do torque que o eixo fornece a uma outra máquina pela velocidade angular do eixo. Na transformação da potência elétrica em potência mecânica há perdas que são inerentes do processo, o que significa que na conversão de energias sempre há uma energia perdida, ou seja, a energia na saída é sempre menor que a energia na entrada

Por outro lado, a força aplicada ao rotor precisa ser igual e oposta àquela aplicada ao estator. Deve-se observar que só e somente só quando o eixo de um motor está acoplado ao eixo de outra máquina, ou uma carga, é que ele transmite energia mecânica. Caso contrário, o eixo não é caracterizado como um eixo de transmissão, sendo carregado apenas estaticamente e não transmite torque algum (NORTON, 2013).

O par de forças magnéticas opostas, figura 32, ou seja, ação e reação, atuam na carcaça e no estator de forma mútua.

Figura 32 – Representação das forças desenvolvidas no rotor/estator



Fonte: Elaborado pelo autor.

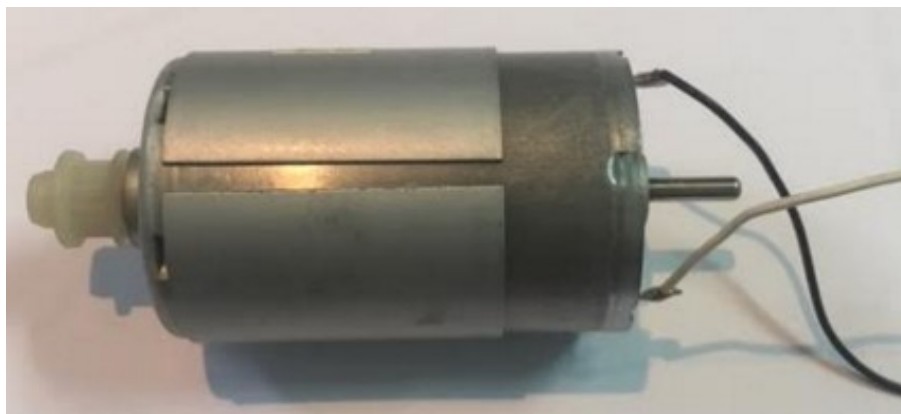
A força de repulsão entre o pólo norte do estator e o pólo norte do rotor, assim como do pólo S do estator e o pólo S do rotor, faz com que o rotor gire no sentido horário, ao passo que a carcaça do estator tende a rotacional no sentido oposto. O torque ao qual a carcaça está submetida é chamado de reação da carcaça. O mesmo raciocínio pode ser feito quando o pólo S do rotor atrai o pólo N do estator, ao mesmo tempo que o pólo N do rotor atrai o pólo S do estator, fazendo com que a carcaça tenda a rotacional.

A reação da carcaça, em um pequeno motor elétrico ou micromotor, figura 33, pode ser facilmente demonstrada por um operador. Basta ligar um pequeno motor, com carcaça cilíndrica, e colocá-lo em funcionamento sobre uma mesa. Em seguida, tentar segurar o eixo do motor e observar que a carcaça tende a girar em sentido contrário ao eixo, como vemos na Figura 34. Ao tentar segurar o eixo, se aplica um torque de carga ao eixo do motor e surge uma força no rotor, devido à interação eletromagnética entre o campo magnético do rotor e do estator

Mas por que a carcaça tende a girar? Acontece que o eixo deste motor, e de todos os outros motores, está apoiado no anel interno do rolamento e a carcaça está fixada no anel externo do rolamento. O mesmo acontece caso o mancal seja de deslizamento. Então o eixo do motor e a carcaça estão livres para girar, um em relação ao outro. Como demonstrado acima existe a força de repulsão entre rotor, ou eixo, e estator, ou a carcaça. Por este motivo o eixo gira em um sentido e a carcaça tende a girar em sentido contrário.

Quando o pequeno motor é ligado e deixado livre sobre a mesa, figura 33, observa-se nitidamente, no instante da partida, que a carcaça tende a girar em sentido contrário ao eixo, mesmo sem carga externa aplicada ao eixo.

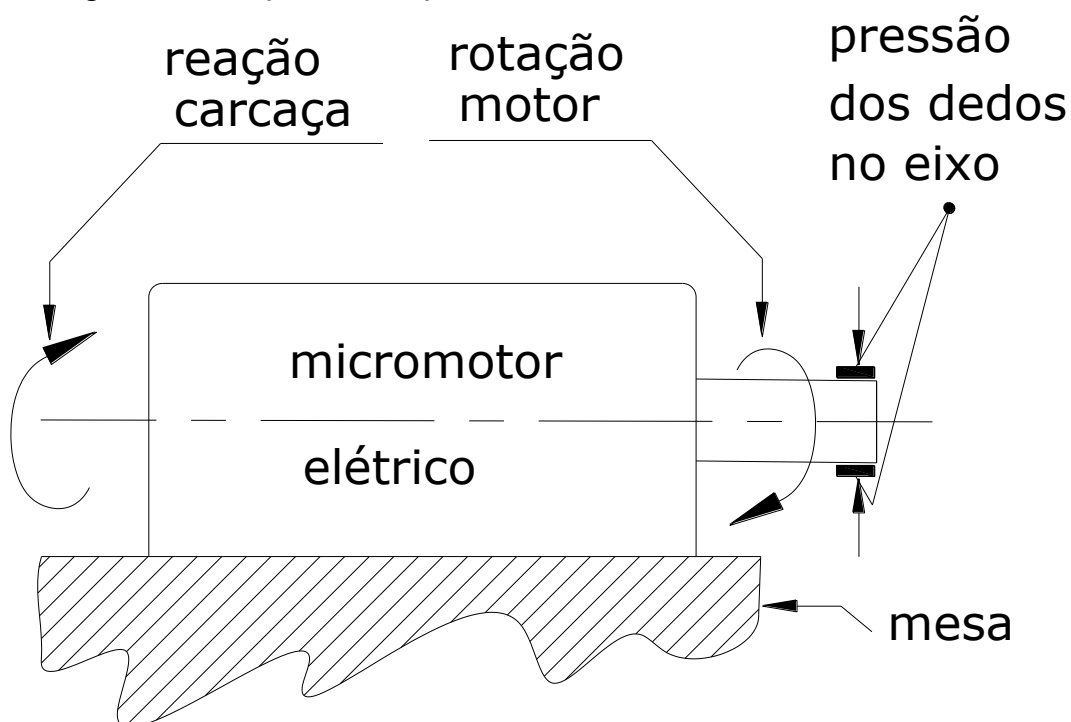
Figura 33 – Reação da carcaça no micromotor sem carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso a reação é devido à inércia do eixo/rotor do motor. O torque, neste caso, é devido à aceleração que o eixo sofre ao mudar de rotação zero até um valor constante. Quando a rotação fica constante, praticamente não há mais este fenômeno físico.

Figura 34 – Reação da carcaça no micromotor – teste com os dedos



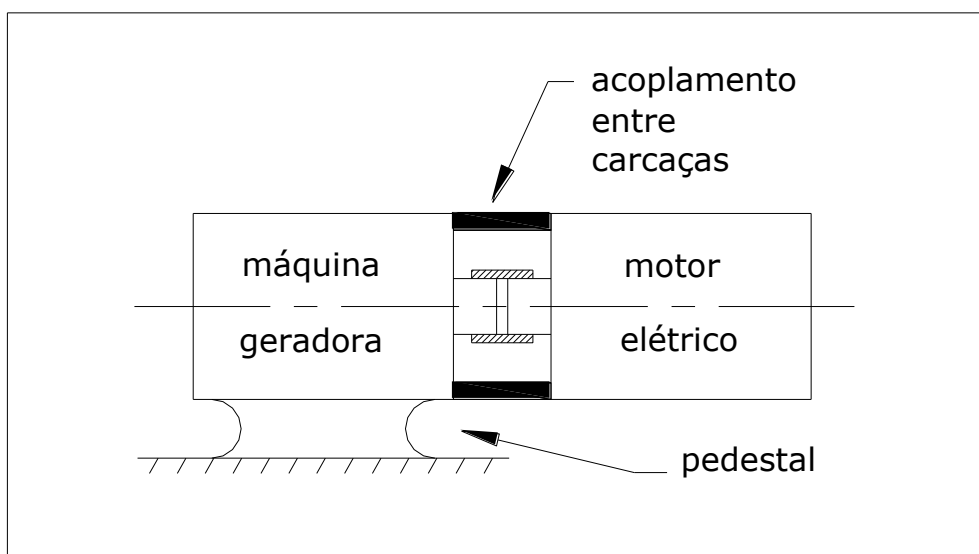
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na realidade, mesmo sem carga aplicada ao eixo de um motor, haverá sempre um pequeno torque de reação da carcaça devido ao pequeno atrito nos mancais e às perdas eletromagnéticas e por ventilação.

Sendo assim, devido ao torque de reação, ou a reação da carcaça, todos os motores elétricos, precisam direta ou indiretamente serem fixados ao chão pelos seus pedestais para deter a reação da carcaça. Se assim não fosse, a carcaça giraria em sentido contrário àquela do eixo.

Observa-se que em muitos motores elétricos, a carcaça não é fixada no chão através de pedestais, mas aparafusadas através de flanges à carcaça da máquina geradora, a qual está presa ao chão. Este acoplamento é conhecido como acoplamento tipo monobloco. O inverso também existe, isto é, o motor é fixado pelo pedestal e o gerador é acoplado ao motor.

Figura 35 – Acoplamento monobloco - pedestal no gerador - esquema



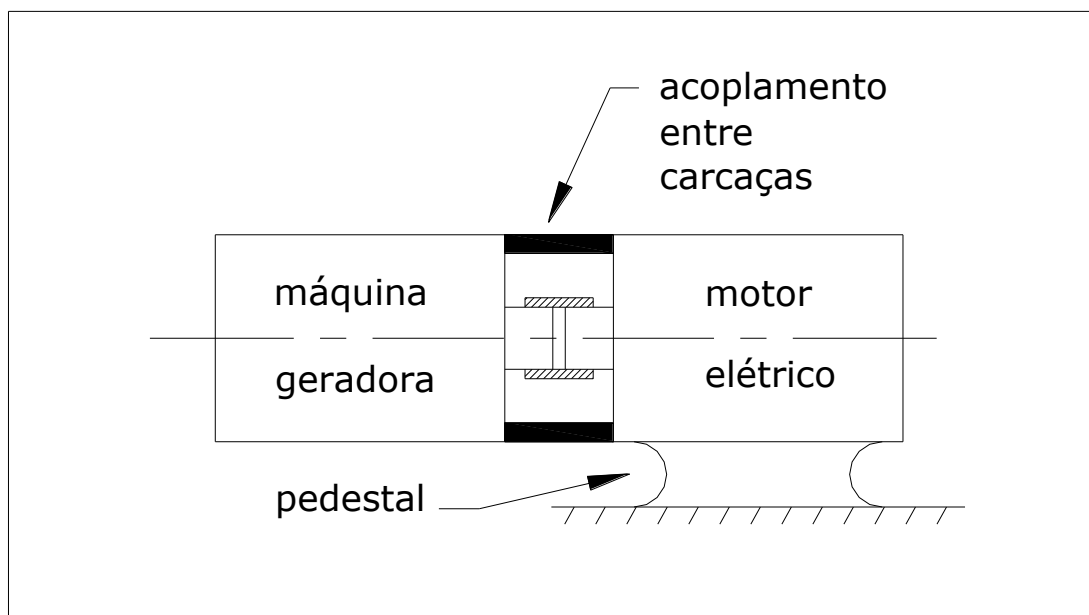
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Acoplamento monobloco- pedestal no gerador - foto



Fonte: Adaptado de Catálogo bomba (2014).

Figura 37 - Acoplamento monobloco – pedestal no motor – esquema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 – Acoplamento monobloco - pedestal no motor – foto

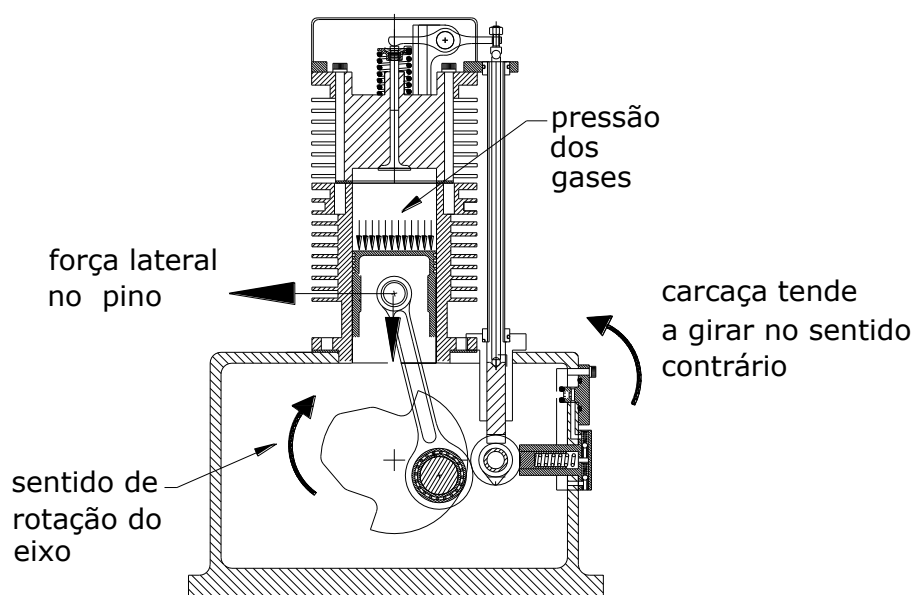


Fonte: Elaborado pelo autor (Catálogo bomba)

3.2 Reação da Carcaça em um Motor de Combustão Interna

Nos motores de combustão interna, a reação da carcaça aparece devido à força perpendicular às paredes do cilindro, que a biela faz através do pistão, como mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Força de reação perpendicular ao pino do pistão - motor



Fonte: Adaptado de Bruno (2009)

Esta força é a componente lateral da força que a pressão dos gases faz na cabeça do pistão e é transmitida à biela através do pino do pistão.

Da mesma forma que se observa no pequeno motor elétrico, onde a carcaça tende a girar quando ele é ligado, pode-se também observar, principalmente num motor V8, que a carcaça deste motor tende a girar de forma bastante clara, quando o motor, mesmo com o veículo parado, é acelerado repentinamente.

É possível observar este fenômeno pois o motor não é rigidamente preso ao chassi do veículo, mas através de borrachas amortecedoras, ou coxins, que permitem pequenos deslocamentos.

Em um motor à combustão interna, a carcaça também tende a girar no sentido contrário ao do eixo de virabrequim quando está sob carga.

Estes motores, quando utilizados em veículos, são acoplados através de borracha/parafuso, ou coxim, ao chassi do veículo, conforme Figura 40.

Outra preocupação da reação da carcaça de um motor a combustão interna, ou uma turbina a gás, é verificada num avião, principalmente no tipo monomotor. A carcaça do motor, que neste caso é presa à estrutura do avião, fica livre para girar em torno do eixo longitudinal da aeronave. Neste caso para evitar que o monomotor seja afetado por esta reação, durante o projeto da aeronave é levado em conta este fator, e uma sustentação maior num dos lados da asa é prevista.

Figura 40 – Fixação de um motor veicular



Fonte: Adaptado pelo autor (BRUNO, 2009).

A carga acoplada a estes motores pode ser de vários tipos:

- a. Gerador elétrico – conjunto moto gerador
- b. Bomba d'água – irrigação, piscinas, tratamento de água;
- c. Caixa de câmbio – veículos automotores;
- d. Guinchos, etc.

3.3 Reação da Carcaça em outras máquinas motoras

Todas as outras máquinas motoras, além das duas acima descritas possuem reação da carcaça de modo análogo, pois para que o motor aplique um torque na outra máquina, este

deve ser gerado no interior do motor e a sua reação está na sua carcaça. Existem motores, como por exemplo o motor hidrostático Hagglunds, que possuem um eixo oco e estriado acoplado ao eixo estriado da outra máquina, a máquina geradora. Este motor então fica suspenso pelo eixo da outra máquina. Neste caso, no entanto, a carcaça do motor fica livre para girar e sem pedestal. Então, um braço de torque é fixado na carcaça do motor para absorver, ou equilibrar, o torque de reação de sua carcaça, com mostrado na Figura 41

Figura 41 – Braço de torque de um motor hidrostático



Fonte: Adaptada pelo autor do Catálogo HAGGLUNDS

3.4 Reação da carcaça em helicóptero

Uma das características mais marcantes de efeito da reação da carcaça em motores é o caso do helicóptero, figura 42. Quando o motor do helicóptero aciona a hélice de sustentação, ou seja, a hélice maior e horizontal, a carcaça do motor que está fixada ao corpo do helicóptero tende a girar em sentido contrário ao da hélice. Porque o corpo do helicóptero não gira? Porque na cauda do avião existe uma força horizontal, gerada pela hélice vertical, que multiplicada pela distancia até o eixo de rotação do motor, aplica um torque contrário àquele do motor. A montagem é equivalente ao braço de torque do motor hidrostático Hagglunds.

Figura 42 – Reação da carcaça em um helicóptero



Fonte: Adaptado pelo autor.

3.5 Reação da carcaça em um ventilador de teto

Normalmente nos motores a carcaça é a parte externa onde é fixado o pedestal da máquina, ou o braço de torque. Entretanto, existem motores elétricos e a combustão interna onde o eixo fica parado e a carcaça gira. Neste caso pode-se dizer que o eixo é a carcaça e a carcaça é o eixo, ou o rotor. Um exemplo comercial de aplicação deste tipo de máquina é o motor elétrico de indução monofásico utilizado em ventiladores de teto. Neste tipo de motor a carcaça é constituída de um eixo oco, que será fixado ao teto, e o rotor passa a ser a parte externa que está acoplada a hélice. A Figura 43 mostra este tipo de motor que poderia ser chamado de motor que utiliza a reação do rotor para o acionamento da carga externa.

Figura 43 - Motor de ventilador de teto



Fonte: Elaborado pelo autor.

. O enrolamento do motor está na extremidade do eixo fixo e é conectado à fonte de energia elétrica passando pelo interior do eixo fixo, o qual na realidade é um tubo.

3.6 Reação da carcaça em uma moto BMW

Com a moto parada e o motor funcionando se acelerar o motor repentinamente há uma tendência de a moto girar em torno do seu eixo longitudinal. Por que acontece este fenômeno? Como o motor desta moto tem seu eixo de virabrequim no sentido longitudinal, pois tem dois cilindros opostos, ao ser acelerada na moto, devido à inércia da massa do motor, haverá um torque no eixo do motor e a sua carcaça, ou o corpo da moto, tende a girar em sentido contrário. A Figura 44 mostra uma foto desta moto.

Figura 44 - Moto BMW



Fonte: Adaptado pelo autor.

Logo, concluímos que em todas as máquinas motoras a carcaça tende a girar no sentido contrário do eixo de rotação.

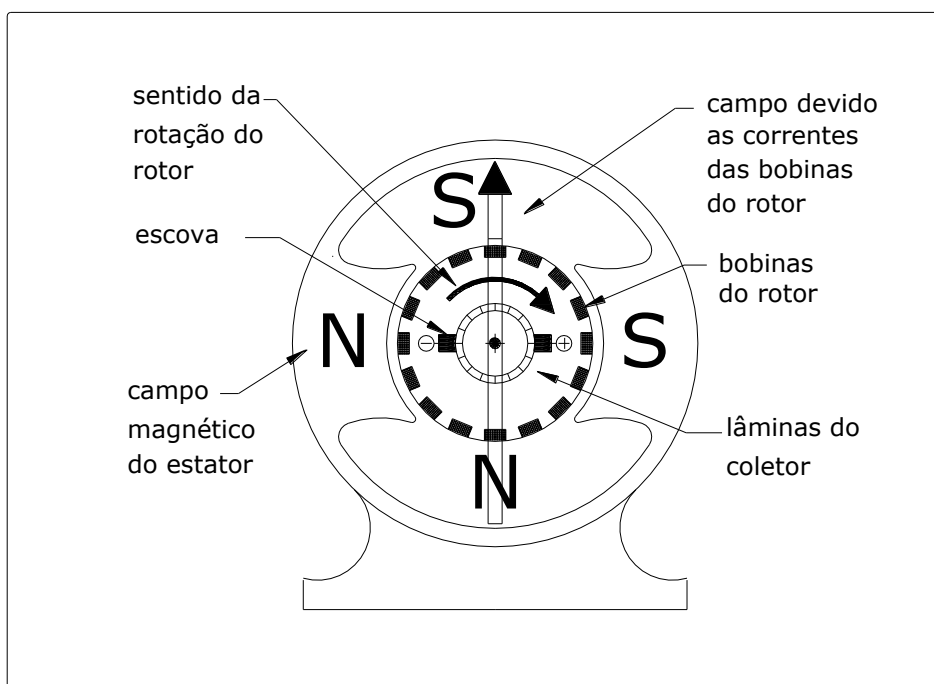
3.7 Reação da Carcaça em geradores elétricos

Assim como no motor elétrico, a força eletromagnética é o mecanismo pelo qual se dá a conversão entre a energia mecânica, fornecida ao eixo do gerador, e a elétrica quando uma carga é ligada nos seus terminais. Quando as bobinas do rotor estão girando acopladas ao

rotor, que está dentro do campo magnético do estator, existe uma tensão elétrica nos seus terminais, devido à lei de Faraday. Estes terminais estão conectados fora do rotor através do coletor e das escovas. O princípio básico que caracteriza o comportamento do campo magnético no rotor é pela circulação de uma corrente elétrica quando uma carga é ligada nos terminais do gerador.

A corrente elétrica percorre cada enrolamento do rotor direcionada convenientemente pelas lâminas do coletor e pelas duas escovas, no caso de um gerador de 2 pólos, como mostrado na Figura 45.

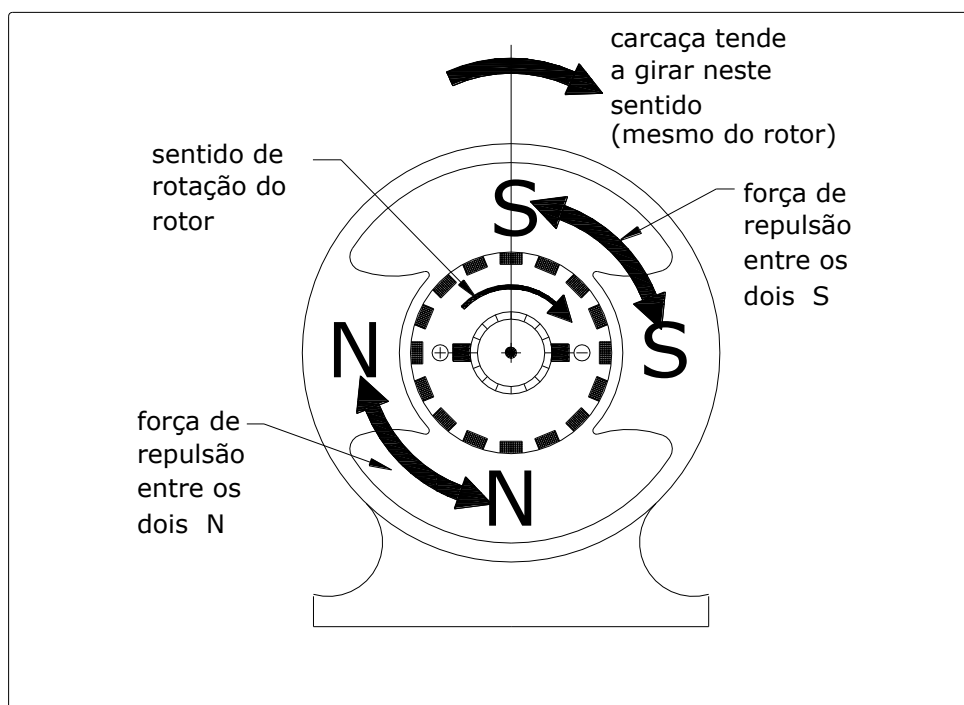
Figura 45 -. Gerador elétrico de corrente contínua



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 46 é muito parecida com a Figura 30 do motor elétrico, pois o sentido de rotação é o mesmo, os polos magnéticos do estator estão na mesma disposição, mas os polos magnéticos formados pela circulação da corrente no rotor estão trocados. Então o polo N do rotor vai tender a girar a carcaça no mesmo sentido da rotação do rotor, assim como faz o polo S. Isto acontece obrigatoriamente pelo princípio de conservação de energia, pois para haver a transformação da energia mecânica do eixo é necessário que a fonte de energia mecânica aplique um torque no eixo. E, para que isso aconteça deverá haver um torque contrário no eixo do gerador que é devido a força de repulsão entre os polos magnéticos do rotor e estator.

Figura 46 - força de repulsão entre os polos magnéticos do rotor e estator



Fonte: Elaborado pelo autor.

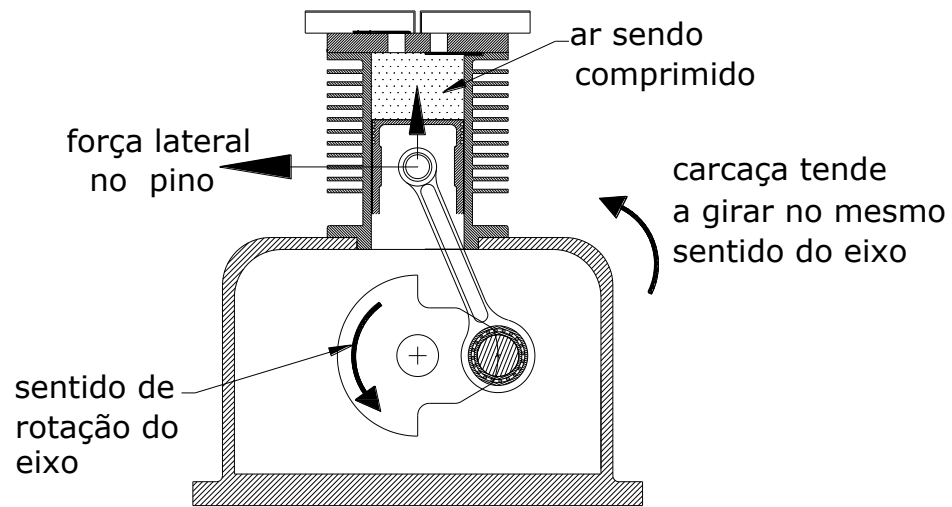
3.8 Reação da Carcaça em outras máquinas geradores

Todas as outras máquinas que recebem energia mecânica no eixo são chamadas máquinas geradoras, pois elas transformam a energia mecânica em outro tipo de energia, como hidráulica, pressão, eólica, etc.

A Figura 47 mostra uma máquina geradora denominada de compressor a pistão onde ela transforma a energia mecânica em energia de pressão do ar, mais perdas. Nesta máquina a reação da carcaça acontece devido a componente da força que a biela faz através do pino do pistão, quando o ar é comprimido. Esta força atua perpendicular a camisa do cilindro fazendo com que a carcaça gire no mesmo sentido de rotação do eixo. Na realidade a carcaça não gira, pois ela é fixada ao chão através do seu pedestal. Lembrar que a carcaça de todas as máquinas fica livre para girar em relação ao eixo, devido a forma de montagem dos mancais de rolamento ou deslizamento entre eles

Todas as outras máquinas geradoras, tais como bomba centrífuga, ventilador, bomba hidrostática, alternadores, etc. têm o mesmo comportamento com relação a tendência de giro da carcaça

Figura 47 – Força de reação perpendicular ao pino do pistão - compressor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, concluímos que em todas as máquinas geradoras a carcaça tende a girar no mesmo sentido do eixo de rotação.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia utilizada, vastamente aplicada aos projetos de máquinas, se baseia nas seguintes etapas:

a) Pesquisa bibliográfica:

Nesta etapa inicial realiza-se um estudo aprofundado, com referência em bibliografias, em artigos e teses existentes na literatura e com o intuito de ampliar o conhecimento do funcionamento dos motores elétricos de corrente contínua, ou DC, assim como no funcionamento de outras máquinas motoras e geradoras.

b) Pesquisa tátil-visual:

Após realizada a pesquisa bibliográfica, em seguida é feita a pesquisa tátil-visual, com o objetivo de conhecer, na prática, o funcionamento do dinamômetro e do efeito da reação de carcaça do motor elétrico e do gerador elétrico DC. Desta forma, laboratórios do Departamento de Mecânica e do Departamento de Energia da FEG-UNESP são utilizados para verificação do funcionamento destes sistemas.

c) Pré-dimensionamento:

A partir dos materiais e equipamentos disponíveis no laboratório do Departamento de Mecânica da FEG-UNESP, os dados iniciais do projeto são definidos. Estes dados referem-se aos dois motores DC, polias e correias sincronizadoras, rolamentos, anéis elásticos, placa e tarugo de aço. A partir das dimensões dos motores pode-se estabelecer as dimensões preliminares de todo o conjunto. Na realidade um dos motores funciona como motor DC propriamente dito, ao passo que o outro motor funciona como gerador DC, pois são máquinas reversíveis.

d) Fase: desenho-cálculo-desenho:

Esta fase deve ser desenvolvida a partir dos dados iniciais definidos na etapa anterior para a obtenção do desenho de conjunto proposto e de forma iterativa, feitos os ajustes necessários e a determinação do desenho final. Esta fase é assim denominada, pois iniciado o desenho de conjunto através do motor e do gerador, deve-se parar o desenho e voltar a analisar as dimensões dos outros componentes que comporão o conjunto. Daí, então, volta-se para continuar o desenho de conjunto. Este processo iterativo deve prosseguir até que o desenho de conjunto seja finalizado. Esta é a fase mais longa do projeto.

e) Fase: desenho de detalhes

Após definição final do conjunto, isto é, as suas dimensões, é necessário desenhar os detalhes das peças não padronizadas.

f) Fase: usinagem das peças

Nesta fase as peças desenhadas com detalhes são usinadas.

g) Fase: montagem do conjunto

Em seguida, a montagem do equipamento é iniciada e a realização de eventuais ajustes é feita.

h) Fase: testes e resultados

Nesta última etapa, são executados os testes necessários para a validação do projeto. Estes consistem basicamente no funcionamento e verificação do torque de reação de carcaça pela força aplicada à mola através do braço fixado ao motor. Os testes poderão ser realizados aplicando-se diferentes cargas no gerador elétrico através de ligação de lâmpadas.

5 PROJETO MECÂNICO

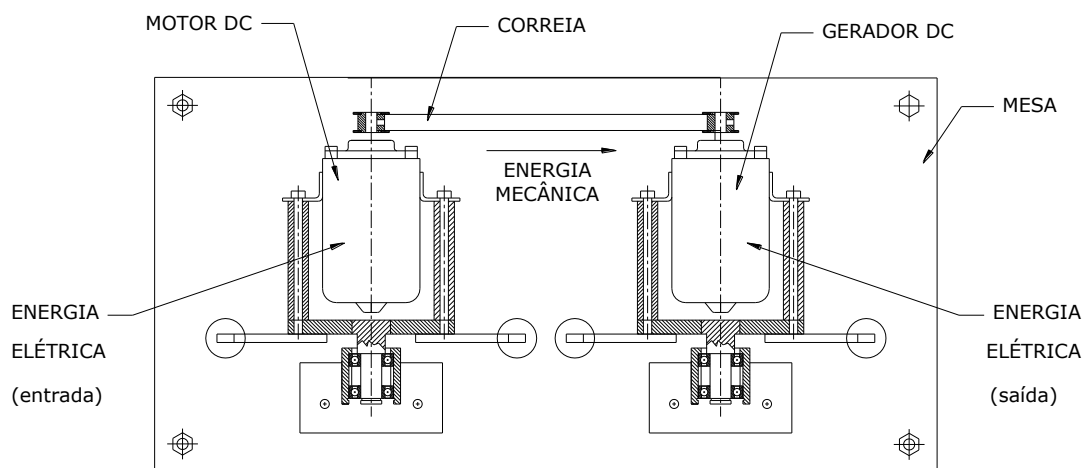
5.1 DEFINIÇÃO DO CONJUNTO

O conjunto mecânico proposto neste trabalho é constituído por dois motores elétricos DC acoplados mecanicamente. Serão tratados inicialmente como máquinas elétricas DC, isto é, poderão se comportar, ou como motor, ou como gerador, dependendo da forma de energia que elas recebem, pois são máquinas reversíveis. No acoplamento mecânico entre as máquinas a transmissão de potência será feita utilizando-se polias e correias sincronizadoras.

Para que seja possível a demonstração da reação da carcaça atuante no motor, ou no gerador, a carcaça de cada máquina deverá estar livre para girar pequenos ângulos. Desta forma não poderão estar diretamente fixadas ao chão através de pedestais.

A representação esquemática da configuração do conjunto mecânico a ser desenvolvido pode ser vista, em planta, na Figura 48.

Figura 48 – Configuração do conjunto eletromecânico



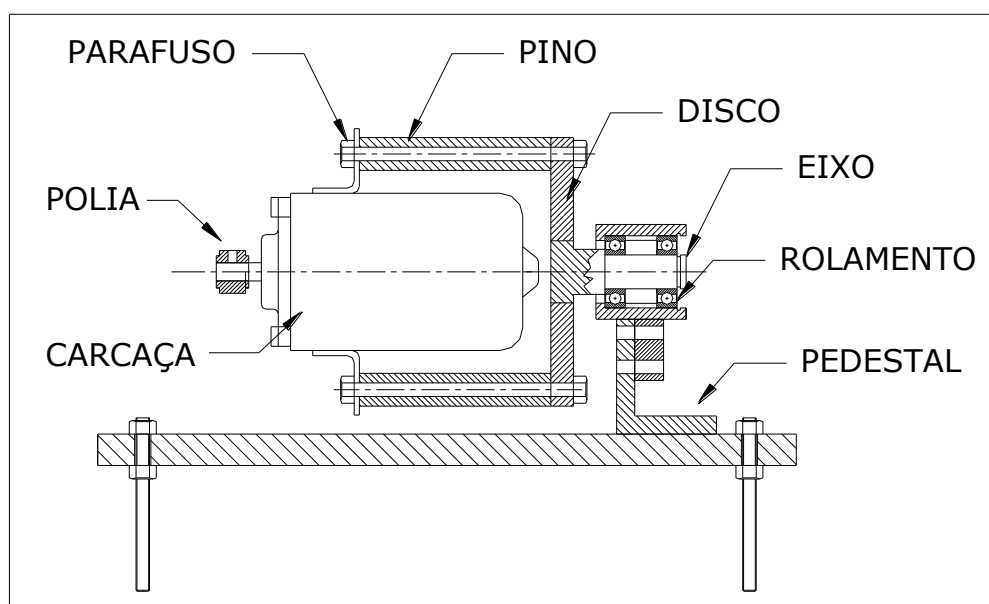
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando em termos do fluxo de energia do sistema, a energia elétrica alimenta uma das máquinas que se comporta como motor DC que fornece energia mecânica no eixo, mais perdas. Através de uma polia e correia sincronizadora, acoplada ao eixo, a energia mecânica segue pela correia até a polia da outra máquina, que agora se comporta como um gerador DC. Então, a energia mecânica, agora através do gerador, transforma-se em energia elétrica DC,

mais perdas. O gerador DC, então, é acoplado eletricamente através de fios à uma carga elétrica composta de duas lâmpadas independentes. Observa-se ainda que neste sistema montado há transformação de energia elétrica DC, na entrada do motor, em energia elétrica DC, na saída do gerador. Fica também evidente, pelo princípio de transformação e conservação de energia, que a energia elétrica de saída é menor que aquela da entrada, pois existem diversos tipos de perdas nas transformações de energia.

A fixação do motor será feita de tal forma que permita a rotação da carcaça do motor em relação ao seu próprio eixo, em pequenos ângulos, como mostrado na Figura 49. Para isto, a carcaça do motor será modificada e fixada a um disco de aço por intermédio de pinos vazados e parafusos. Ao disco, será prensado um eixo, de forma concêntrica ao eixo do motor, no qual será montado o anel interno do rolamento. O anel externo será montado a um pedestal, que estará fixado na estrutura de madeira com quatro pés.

Figura 49 - Motor/gerador montado na bancada



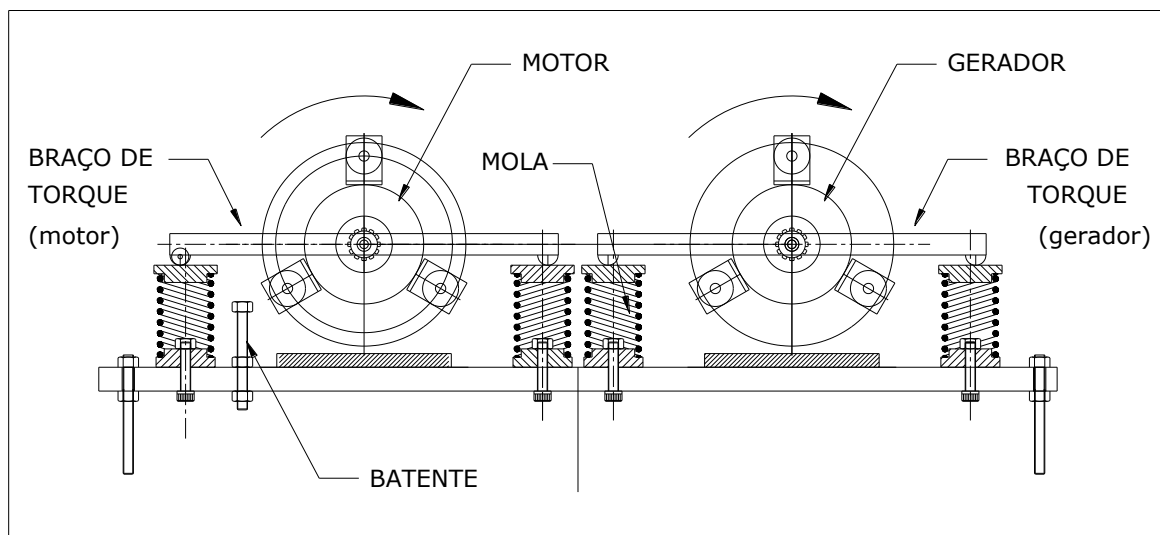
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que a rotação da carcaça do motor seja limitada à pequenos ângulos, será instalado um batente junto a estrutura de madeira. Este pequeno deslocamento angular, ao qual a carcaça está submetida, é suficiente para demonstrar e/ou medir, de forma satisfatória, a força e o efeito do torque de reação da carcaça.

Na parte central da carcaça do motor e do gerador, na posição horizontal, será instalado o braço de torque em cada máquina. Na extremidade do braço será entreposta uma mola de

compressão, através da qual será constatado o binário de forças atuante na carcaça do motor e, portanto, o efeito do torque de reação da carcaça, como mostrado na Figura 50. Na posição mostrada nesta figura os dois braços de torque praticamente estão na horizontal, pois não há carga externa aplicada ao conjunto. Existe sim uma pequena carga devido às perdas.

Figura 50 - conjunto motor/gerador e acessórios - sem carga

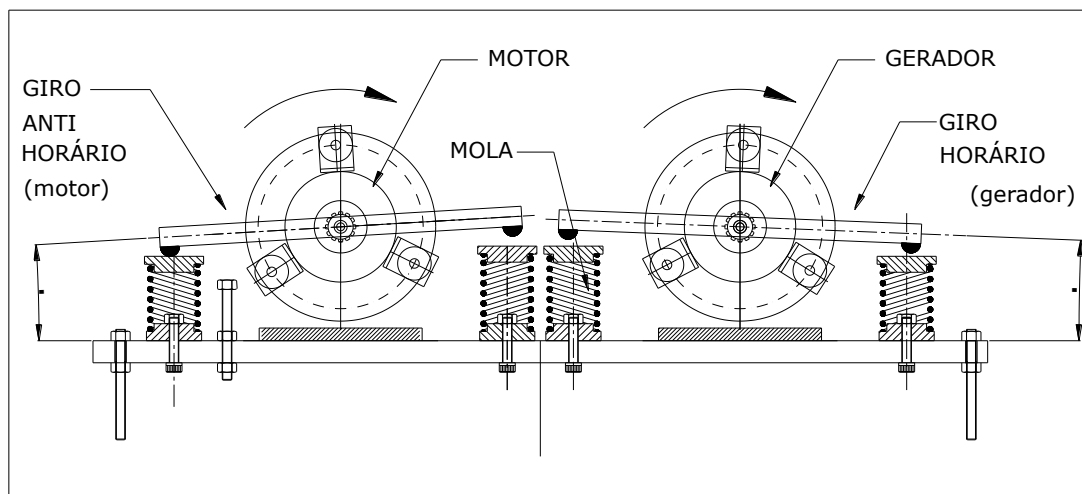


Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso se deseje mensurar a intensidade da força atuante, poderá ser utilizado uma balança ou uma célula de carga no lugar das molas. Conhecendo-se então a força, a distância entre a linha de centro do eixo de rotação e a linha de ação da força, na extremidade do braço, e a velocidade de rotação do eixo, é possível determinar a potência mecânica efetiva do motor ou do gerador.

Na Figura 51 observa-se, após ligar uma lâmpada no gerador, isto é uma carga, que uma deflexão do braço de torque tanto no gerador como no motor acontece. No entanto, a deflexão no gerador é no sentido horário, ou seja, no mesmo sentido do eixo de rotação. Por outro lado, a deflexão no motor é no sentido contrário ao eixo de rotação. Observar que devido ao acoplamento mecânico pela correia o sentido de rotação das duas máquinas é no sentido horário.

Figura 51 -. Conjunto motor/gerador - com carga aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor.

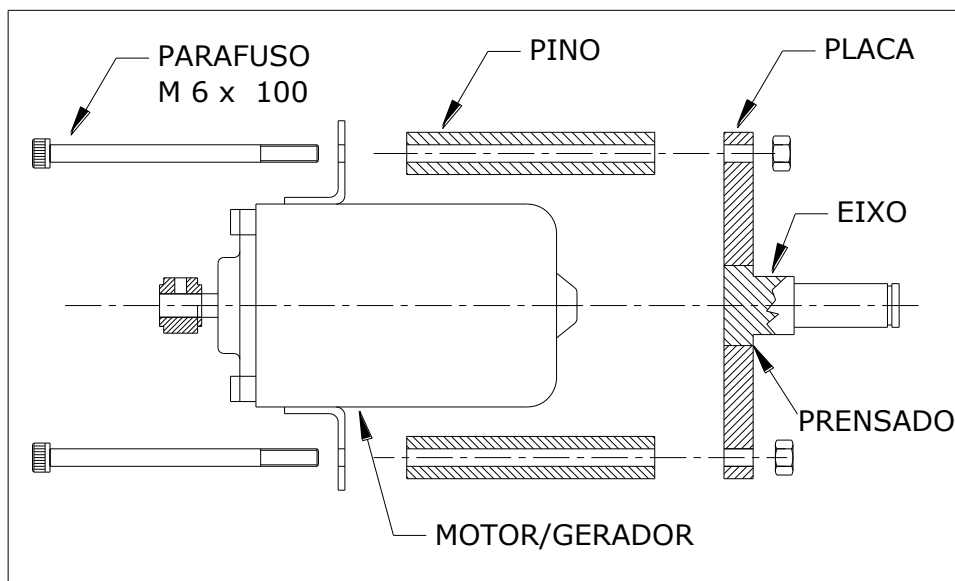
5.2 DETALHE DAS PEÇAS E MONTAGEM

As dimensões iniciais das peças foram definidas tendo como base os materiais disponíveis para usinagem, de forma iterativa, isto é, sendo continuamente ajustadas conforme necessidades reais do projeto. Assim sendo, alguns dos desenhos em 2D sofreram modificações ao longo desta etapa.

A etapa da confecção das peças iniciou-se pela usinagem do disco de aço e do eixo do disco. O eixo foi prensado no furo do disco com montagem tipo forçado duro. Após a prensagem foi executada a usinagem do conjunto resultando na Figura 52

As dimensões do diâmetro externo do disco e dos diâmetros e localização dos 4 furos, para alojamento das barras roscadas, foram definidas em função da localização e diâmetro dos furos já existentes na carcaça do motor. As dimensões do diâmetro nominal do eixo e do canal para o anel elástico na sua extremidade, foram definidas em função do rolamento rígido de esferas disponível número 6002, respeitando as áreas das regiões proibidas do rolamento. Na montagem do rolamento deve-se levar em conta o ajuste entre o eixo e o anel interno do rolamento, o qual deve ser forçado leve. Por outro lado, o ajuste entre o anel externo do rolamento e o furo deve ser deslizante justo. As tolerâncias para a obtenção desses ajustes são fornecidas pelo catálogo do rolamento.

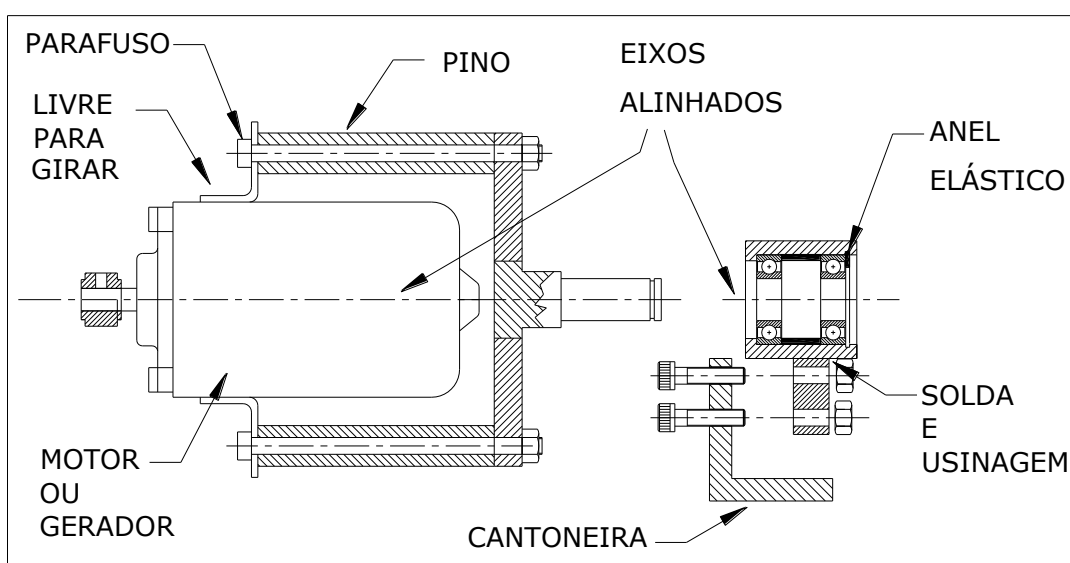
Figura 52 – Eixo, placa e pinos – vista explodida



Fonte: Elaborado pelo autor.

O cuidado tomado na usinagem dos discos e dos respectivos eixos e na adaptação desta montagem em substituição à carcaça original do motor/gerador, foi no sentido de garantir a concentricidade entre os eixos dos discos e o eixo do rotor, assegurando que o centro de rotação da carcaça do motor estivesse alinhado ao do rotor, como mostrado na figura 53.

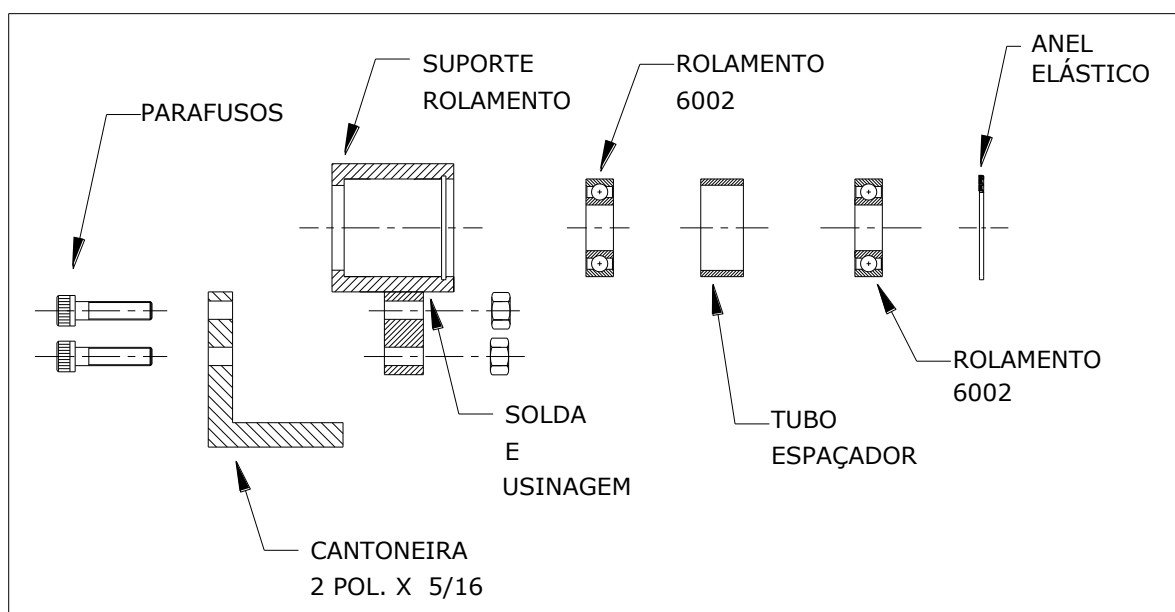
Figura 53 Montagem do motor/gerador - carcaça livre nos rolamentos



Fonte: Elaborado pelo autor.

O subconjunto composto pelo pedestal e o mancal é apresentado na Figura 54 em uma vista explodida. Os rolamentos são fixados ao suporte cilíndrico e ao eixo pelos seus anéis elásticos. São separados por um tubo e fixados longitudinalmente pelo escalonamento do furo e pelo anel elástico. O suporte cilíndrico é soldado à uma base que por sua vez é fixada à cantoneira pelos parafusos. Este subconjunto juntamente com motor/gerador é fixado através da cantoneira à base de madeira com os quatro pés.

Figura 54 - Vista explodida do subconjunto do mancal e pedestal

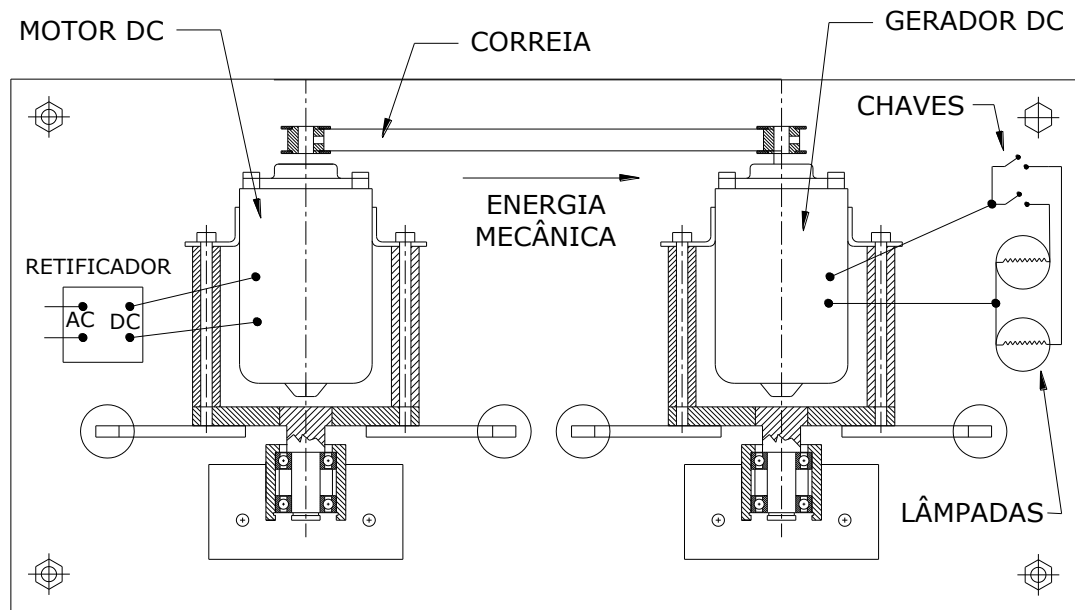


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 LIGAÇÕES ELÉTRICAS

Para a alimentação da energia elétrica do sistema usa-se a tensão da rede elétrica que é alternada. Uma fonte retificadora transforma a tensão AC de 127 V em tensão DC de 12 / 5 V. Esta tensão contínua energiza o motor que por sua vez, mecanicamente, energiza o gerador. Ao gerador são acopladas duas lâmpadas de 60W cada uma. Elas são ligadas através de duas chaves, ora individualmente, ora juntas. Para a alimentação do motor também pode ser utilizada a tensão de 5V. A reação da carcaça do motor durante a partida é mais suave com 5V do que com 12V, pois no instante da partida o rotor não possui força contra eletromotriz e a corrente depende apenas da resistência do rotor. A Figura 55 mostra o esquema das ligações elétricas.

Figura 55 - Esquema das ligações elétricas



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 O CONJUNTO MECÂNICO

A figura 54 apresenta o conjunto mecânico final após a montagem dos subconjuntos e componentes, conforme projeto.

Figura 56 – Conjunto mecânico final



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste equipamento, o motor elétrico DC, com a carcaça modificada, possui liberdade para girar em torno do seu eixo central. No eixo de acionamento está fixada uma polia sincronizadora que, através de uma correia, é conectada à polia do gerador. Para permitir o ajuste do tensionamento da correia, foi adotado um sistema no qual o gerador pode ser deslocado na direção da correia através de um furo oblongo. Correias sincronizadoras necessitam estar bem tensionadas para funcionarem corretamente. Assim, o posicionamento do gerador, e consequentemente, o tensionamento da correia pode ser ajustado. A fixação da posição após o ajuste é realizada apertando as duas porcas na base do gerador.

5.2 A REAÇÃO DA CARCAÇA

Com o motor em funcionamento e inicialmente sem carga elétrica no gerador, pode-se observar que imediatamente após o motor ser acionado, houve uma reação grande da carcaça.

Este pico no valor da força deve-se ao fato de que na partida do motor o torque para vencer a inércia das massas girantes do motor e do gerador é mais elevado do que àquele necessário ao funcionamento do sistema, quando a velocidade de rotação é acelerada de zero a um valor ligeiramente inferior ao da rpm nominal de projeto do motor, até que se torna constante. Após este momento, com a velocidade de rotação constante, observa-se que não existe mais a reação violenta da carcaça. Existe apenas uma força que é devida à potência necessária para suprir as perdas no sistema, isto é, perdas mecânicas, perdas no núcleo e perdas no coletor e escovas, tanto do motor quanto do gerador. A Figura 55 mostra esta situação.

Figura 57 Conjunto em funcionamento - sem carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, foi realizada uma simulação adicionando-se cargas elétricas no gerador. A barra de torque reage instantaneamente à presença da carga, aumentando a deflexão e, consequentemente, o torque na carcaça como resposta ao aumento de torque no eixo do motor para gerar a energia então requerida.

Em seguida com o conjunto em funcionamento e estabilizado, uma lâmpada é ligada ao gerador através de uma chave. Imediatamente observa-se que a carcaça do gerador e do motor giram de um pequeno ângulo e em sentidos opostos, isto é, a carcaça do gerador gira no sentido horário ao passo que a carcaça do motor gira em sentido anti-horário, conforme mostra a Figura 56.

Figura 58 Posição das barras com uma lâmpada ligada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois mais uma lâmpada é ligada ao gerador e a deflexão das máquinas aumenta, isto é, a barra do gerador inclina-se mais um pouco no sentido horário e a barra do motor mais um pouco no sentido anti-horário, conforme Figura 57

Figura 59 Posição das barras com duas lâmpadas ligadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se explicar os dois casos da seguinte forma em termos de energia:

a) no primeiro caso, apenas uma lâmpada é ligada à energia elétrica que vem do gerador. Esta energia elétrica é a transformação da energia mecânica que vem, através da correia, do motor. E, a energia mecânica do motor vem da fonte de energia elétrica que alimenta o motor.

A energia que alimenta a lâmpada vem da geração da tensão gerada no rotor do gerador devido à Lei de Faraday. Dentro do rotor circular uma corrente elétrica que produz um campo magnético que interage com o campo magnético do rotor, gerando uma força e produzindo um torque no eixo, que por sua vez gera um torque na carcaça fazendo a sua deflexão no mesmo sentido de rotação. O torque no rotor existe porque a correia aplica uma força na sua polia. Esta força, por outro lado, foi gerada pela polia do motor, que por sua vez cria um torque no eixo do motor que através do campo magnético do estator faz com que a carcaça do motor gire em sentido contrário da rotação do eixo.

Observa-se que o aparente simples fato da lâmpada ser acesa, imediatamente outros fenômenos acontecem no mesmo instante, tais como, fenômenos elétricos, eletromagnéticos e mecânicos.

b) no segundo caso, quando mais uma lâmpada é ligada os fenômenos são os mesmos, mas com valores maiores, pois mais energia é envolvida.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho proposto apresentou o desenvolvimento de uma bancada para a visualização da reação da carcaça de duas máquinas elétricas pequenas. Os ensaios forneceram a reação da carcaça no motor e no gerador em três situações distintas, onde observou-se o que acontece sem carga aplicada ao sistema, ou com uma carga aplicada, ou com duas cargas aplicadas. Analisando os três casos os resultados mostraram-se conforme esperado e de acordo com a teoria. Desta forma, o método proposto neste trabalho é válido e satisfatório.

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se aplicar o desenvolvimento de um método semelhante para o estudo da reação de carcaça para obter valores de torque tanto para o motor como para o gerador. Pode-se incluir a utilização de células de carga ou balanças para uma medição mais precisa da força de reação atuante. Também a inclusão de uma fonte de tensão controlada utilizando-se a técnica de modulação por largura de pulso poderá ser feita.

Analogamente é possível montar um conjunto com máquinas mais robusta utilizando-se bombas e motores hidrostáticos, bombas centrífugas e motores elétricos, ventiladores e motores elétricos, ou qualquer outra combinação de máquina motora com máquina geradora.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, Pedro G. D. **Freio dinamométrico para ensaio de pequenos veículos de tração eléctrica**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em engenharia eléctrica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010

BIM, Edson. **Máquinas eléctricas e acionamento**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2012. 547 p.

BRUNO, Everaldo Pinheiro. **Projeto de um motor 4 tempos a gasolina monocilíndrico: cálculo termodinâmico, desenho, usinagem e montagem da parte alternativa**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/97062>. Acesso em: 07 maio 2018.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas eléctricas**. 5. ed. Porto Alegre : AMGH, 2013. 684 p.

FRAZEE, Irving; LANDON, Willian; VENK, Ernest. **Automotive electrical systems**. 3. ed. USA: American Technical Society, 1958. 435 p.

KOSOW, Irving L. **Máquinas eléctricas e transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1982. 667 p. v.1.

GOLDEMBERG, JOSÉ. **Física geral e experimental**. 2.ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1970. 387 p.

MAZZOCCHIO, Manlio. **Macchine elettriche**. Milano: Librai Della Real Casa, 1927. 604 p.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

WEG. **Motores eléctricos: guia de especificação**. Jaraguá do Sul: Unidade Motores, 2017. 67 p. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 07 maio 2018.

REXROTH, Bosch Group. **Häggglunds torque arm drive system: the all in one drive solution**. Grove City: Bosch Rexroth Corporation, 2017. 4p. Disponível em: https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/R999001388_H%C3%83%C2%A4gglunds%20TADS_2017-05_view.pdf?db=brmv2&lvid=1205051&mvid=13705&clid=20&sid=A6413A4F59ED846770352DC9B147A57F.borex-tc&sch=M&id=13705,20,1205051. Acesso em: 07 maio 2018.