unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ELLEN DA SILVA ALVES

Projeto de um freio utilizando a reação de carcaça para um motor elétrico de indução

Guaratinguetá - SP
2018

Ellen da Silva Alves

Projeto de um freio utilizando a reação da carcaça para um motor elétrico de indução

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
2018

Alves, Ellen da Silva
A474p Projeto de um freio utilizando a reação da carcaça para um motor elétrico de indução / Ellen da Silva Alves – Guaratinguetá, 2018.
60 f : il.
Bibliografia: f. 59-60

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. João Zangrandi Filho

1. Motores elétricos de indução. 2. Dinamômetro. 3. Projetos de engenharia. I. Título.

CDU 621.313.333

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETA

ELLEN DA SILVA ALVES

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 SAMMIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CHAVES
UNESP-FEG

Prof. Dr. ANTÔNIO WAGNER FORTI
UNESP-FEG

Dezembro 2018

DADOS CURRICULARES

ELLEN DA SILVA ALVES

NASCIMENTO	13.02.1991 – Osasco / SP
FILIAÇÃO	Lairto Marcílio Alves Regina da Silva Marcílio
2012/2018	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Guaratinguetá

Aos meus pais, que são meu alicerce e minha motivação para seguir em frente.
A todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica.
Por fim, aos meus familiares e amigos, que sempre estiveram comigo em toda minha caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador e professor Dr. João Zangrandi Filho, o qual contribuiu com a minha formação acadêmica nas disciplinas de Introdução à Engenharia Mecânica e Projeto Mecânico, disciplinas que além de proporcionar minha capacitação pessoal, serviu como base fundamental neste trabalho, sendo isto possível, pelo avançado senso de observação, visão técnica e visão analítica fortemente transmitidos durante os cursos.

Agradeço imensamente por ter estado sempre presente e disponível a me auxiliar, instruir e fazer com que este projeto pudesse ser concluído. Agradeço também pelo apoio e pela amizade desenvolvida nesse período de trabalho conjunto, o qual se passou em um momento difícil.

Agradeço ao professor Dr. Marcelo Sampaio por toda a ajuda, suporte e disposição em sempre auxiliar nos problemas enfrentados pelos alunos do curso de Engenharia Mecânica durante o ciclo de graduação.

“For you, a thousand times over”

Hosseini, Khaled

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de um dispositivo para determinação da potência mecânica efetiva de um motor elétrico de indução monofásico pela utilização de um freio dinamométrico. Inicialmente, é apresentada uma revisão teórica sobre os componentes que são utilizados no projeto mecânico, tais como, máquinas motoras e geradoras, freios dinamométricos e reação de carcaça. São descritas, detalhadamente, as etapas do desenvolvimento do conjunto mecânico, desde a modelagem 3D até a montagem final do conjunto. Como resultado do objetivo proposto, o ensaio do motor fornece o valor da intensidade da força que age na carcaça do motor em três situações distintas, onde três diferentes cargas elétricas foram acopladas ao gerador, provando, portanto, a existência do efeito da reação de carcaça. A partir dos resultados, é possível determinar a potência mecânica requerida do motor.

PALAVRAS-CHAVE: Motor elétrico de indução. Reação de carcaça. Freio de Prony. Dinamômetro. Potência de eixo.

ABSTRACT

This work presents the design of a device to define the effective mechanical power of a monophasic induction electric motor by the use of a dynamometric brake. Initially, it is presented a theoretical review of all the components that are used in the mechanical design, such as motors, alternators, dynamometric brakes and carcass reaction. The stages of the development of the mechanical device, from 3D modeling to the final assembly of the device, are described in detail. As result of the proposed objective, the test of the motor provides the value of the force acting on the motor carcass, in three different situations, where three different electric charges were coupled to the alternator, thus proving the existence of the effect of the carcass reaction. From the results, it is possible to determine the required mechanical power of the motor for each charge coupled.

KEYWORDS: Electric induction motor. Carcass reaction. Prony brake. Dynamometer. Axis power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo de energia em máquinas elétricas 18
Figura 2 – Classificação dos motores DC 20
Figura 3 – Classificação dos motores AC 21
Figura 4 – MIM: Partida por capacitor 22
Figura 5 – MIM: Partida por fase dividida 23
Figura 6 – MIM: Partida e funcionamento por capacitor de partida e de trabalho 23
Figura 7 – MIM: Partida e funcionamento por capacitor de partida e trabalho 24
Figura 8 – Motor de polo sombreado 24
Figura 9 – MIM: Partida por relutância variável 25
Figura 10 – Furadeira manual 26
Figura 11 – Motor universal 26
Figura 12 – Motor síncrono 27
Figura 13 – MIT: Gaiola de esquilo 28
Figura 14 – MIT: Rotor bobinado 28
Figura 15 – Freio de Prony 29
Figura 16 – Ensaio de motor utilizando freio de Prony 30
Figura 17 – Freio hidrodinâmico 31
Figura 18 – Freio hidrodinâmico em corte 32
Figura 19 – Freio hidrodinâmico em corte 33
Figura 20 – Rotor e anel indutor 34
Figura 21 – Características do dinamômetro Eddy Current 35
Figura 22 – Esquema da carcaça 35
Figura 23 – Força indutiva em um fio condutor de corrente na presença de um campo magnético 37
Figura 24 – Espira simples na presença de um campo magnético uniforme: (a) vista frontal (b) vista da bobina 37
Figura 25 – Esquema básico das máquinas elétricas 38
Figura 26 – Máquina motora e geradora 39
Figura 27 – Representação das forças desenvolvidas no rotor/estator 40
Figura 28 – Reação da carcaça no micromotor 40
Figura 29 – Acoplamento monobloco: pedestal no motor 41
Figura 30 – Acoplamento monobloco: pedestal no gerador 41

Figura 31 – Fixação de um motor veicular automotivo 42
Figura 32 – Força perpendicular ao cilindro 43
Figura 33 – Braço de torque de um motor hidrostático 44
Figura 34 – Configuração do conjunto mecânico 46
Figura 35 – Transmissão de potência motor/alternador 47
Figura 36 – Esquema do acoplamento motor/gerador – transformação de energia 47
Figura 37 – Detalhamento da fixação do motor 48
Figura 38 – Braço de torque 49
Figura 39 – Fixação do alternador 49
Figura 40 – Conjunto mecânico 50
Figura 41 – Disco de aço 51
Figura 42 – Eixo do disco 51
Figura 43 – Pedestal em C 52
Figura 44 – Suporte para alojamento do rolamento 52
Figura 45 – Carcaça modificada do MIM 53
Figura 46 – Conjunto mecânico final 54
Figura 47 – Sistema de medição do conjugado de reação 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de peças/componentes usinados.....50
Tabela 2 – Lista de peças/componentes fornecidos pelo DMEC 53
Tabela 3 – Ensaio com carga elétrica 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
DC	Direct Current
AC	Alternate Current
MIM	Motor de Indução Monofásico
MIT	Motor de Indução Trifásico
2D	bidimensional
3D	tridimensional
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
DMEC	Departamento de Mecânica

LISTA DE SÍMBOLOS

F	força
i	corrente
l	comprimento
B	densidade de fluxo magnético
θ	ângulo
r	raio
R	comprimento (raio)
B	comprimento
F	massa
τ	torque
η	eficiência
ω	velocidade angular
T	torque de eixo
N	velocidade de rotação
P_{mec}	potência mecânica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA 16
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA 16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS 18
2.2 FREIOS DINAMOMÉTRICOS 28
2.2.1 Freio de Prony 29
2.2.2 Freio Hidrodinâmico 30
2.2.3 Dinamômetro de Correntes Eddy 33
2.3 REAÇÃO DA CARCAÇA 36
2.3.1 Reação da Carcaça em um Motor Elétrico 36
2.3.2 Reação da Carcaça em um Motor de Combustão Interna 41
2.3.3 Reação da Carcaça em Outros Motores 43
3 MATERIAL E MÉTODO 45
4 PROJETO MECÂNICO 46
4.1 DEFINIÇÃO DO CONJUNTO E MODELAGEM 3D 46
4.2 CONFECÇÃO DAS PEÇAS E COMPONENTES DO CONJUNTO 50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 54
5.1 O CONJUNTO MECÂNICO 54
5.2 A REAÇÃO DA CARCAÇA 55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 58
REFERÊNCIAS ..... **Erro! Indicador não definido.**
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 59

1 INTRODUÇÃO

O motor elétrico, a gasolina, diesel, etc., desde que foram criados, passaram por diversas modificações com o passar do tempo, e ainda existem praticamente em todos os setores. Estas máquinas, entretanto, não sofreram alterações quanto ao seu princípio de funcionamento, continuam exatamente baseadas nas leis da física.

Estas máquinas possuem basicamente eixos girantes e carcaça, os quais geram torque durante seu funcionamento. A máquina sempre que está em funcionamento transformando energia, quer seja elétrica, hidráulica, ou outra qualquer, em energia mecânica no eixo, obrigatoriamente terá um torque no eixo e um torque na carcaça. Então, nas máquinas motoras, quando o eixo aplica um torque em uma máquina geradora, a carcaça gerará um torque de reação, que neste caso é contrário ao sentido de rotação do eixo.

O pedestal, parte da estrutura da carcaça, tem como utilidade além de fixar a carcaça ao chão, evitar que a carcaça gire num movimento contrário àquele do eixo. Entretanto, alguns motores não estão diretamente presos ao chão através do pedestal, mas presos por uma estrutura chamada braço de torque. Neste caso a carcaça está livre para girar, porque está apoiada nos próprios rolamentos, onde o anel externo é fixado à carcaça e o anel interno fixado ao eixo (BOSH REXROTH, 2017).

Além desta necessidade de prender a carcaça ao chão devido à reação ao torque do eixo, este problema pode ser utilizado para medir vários parâmetros dos motores. É útil para determinar a curva de torque versus rotação, assim como para medir a potência no eixo destas máquinas. Pode-se observar que estas curvas fazem parte constante na especificação dos motores automotivos, industriais, domésticos, assim como são necessárias ao projetista no instante de escolher o motor mais apropriado para cada projeto (BATISTA, 2010).

Estudar e entender o que é e como funciona a reação da carcaça em um motor, é importante também para o projetista dimensionar o pedestal destas máquinas. Este esforço atua diretamente no cisalhamento na direção tangencial da carcaça. Em máquinas que utilizam o braço de torque, como em motores de pistões radiais, a reação da carcaça atua no dimensionamento da flexão deste braço.

Existem motores, principalmente motores hidrostáticos, que são totalmente fixados na ponta do eixo da outra máquina, por exemplo, um redutor. Nestes motores a reação da carcaça necessariamente precisa ser equilibrada pelo braço de torque (BOSH REXROTH, 2010).

A reação da carcaça pode ser visualizada no dia a dia se abrirmos o capô de um automóvel, principalmente aqueles que possuem motores relativamente grandes, como nos motores V8, e

acelerarmos rapidamente este motor. Observa-se então que o motor gira no sentido horário e sua carcaça tende a girar no sentido anti-horário.

A reação da carcaça também é importante nos motores elétricos utilizados nos poços tubulares profundos, onde estes motores são fixados na extremidade de longas tubulações. Estas tubulações servem como suporte para o conjunto motor-bomba, para conduzir a água das profundezas do poço até a superfície e também para absorver o torque produzido pelo motor elétrico. Neste caso a tubulação não pode ser de plástico, porque não tem capacidade suficiente para absorver a torção.

A reação da carcaça é transmitida aos nossos braços ao utilizarmos uma furadeira manual. Em alguns casos pode até levar a lesões sérias quando, por exemplo, há um travamento da broca no furo. O mesmo efeito pode ser observado nas parafusadeiras pneumáticas.

Outro exemplo muito claro deste fenômeno físico está presente nos helicópteros onde ele é contrabalançado pelo rotor de cauda. Neste caso, se houver pane no rotor de cauda, a hélice principal gira num sentido e o corpo do helicóptero em sentido contrário, levando a um desastre. Por outro lado, nos aviões monomotores a reação da carcaça é compensada pela diferença de sustentação nas asas. Nesta área de aeronáutica ainda resta os atuais drones, onde este efeito também está presente.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho consiste em projetar um conjunto composto por um motor elétrico acoplado através de polias e correia em V a um gerador elétrico. O motor será fixado de forma com que sua carcaça fique livre para girar, sendo possível medir o valor do binário de forças que age na carcaça do motor, ou seja, o torque de reação da carcaça, quando o motor pode girar livremente em um pequeno ângulo de giro.

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.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

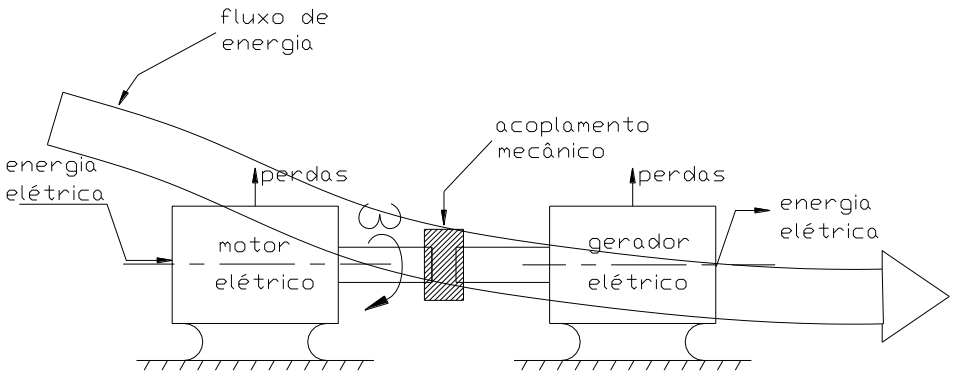
2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS

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, e a partir da qual 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 característica importante da transformação eletromecânica, e que justifica a vasta utilização das máquinas elétricas na produção de trabalho mecânico e/ou energia elétrica, é a possibilidade de converter e reconverter um tipo de energia em outro, conforme necessário, sem que haja grandes perdas de energia. Além disso, envolve a energia elétrica, 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).

Num sistema 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.

Figura 1 – Fluxo de energia em máquinas elétricas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve-se observar que um motor elétrico nunca pode funcionar como um motor 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).

Na Figura 1, o fluxo de energia elétrica na entrada do motor é maior que o fluxo de energia elétrica na saída do gerador, isto porque existem sempre perdas associadas ao processo de transformação de energia. As perdas relacionadas à conversão da energia elétrica para a mecânica e vice e versa podem ser divididas em quatro categorias fundamentais (CHAPMAN, 2013).

1. Perdas elétricas ou no cobre (perdas I2R): são as perdas geradas pelo aquecimento resistivo dos fios do enrolamento do estator e do rotor. O efeito Joule 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 no núcleo: ocorrem por histerese, que acontece devido a interação entre campo magnético e material ferromagnético, e por corrente parasita (pela lei de Faraday, correntes internas geradas nos materiais ferromagnéticos e que produz calor). “Elas variam com o quadrado da densidade de fluxo ($\mathbf{B}^2$) e, para o estator, com a potência 1,5 da velocidade de rotação dos campos magnéticos ($n^{1,5}$). ” (CHAPMAN, 2013, p.184).

3. Perdas mecânicas: são as perdas associadas aos efeitos mecânicos, podendo ser por atrito ou por 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 moveis 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 agrupas 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

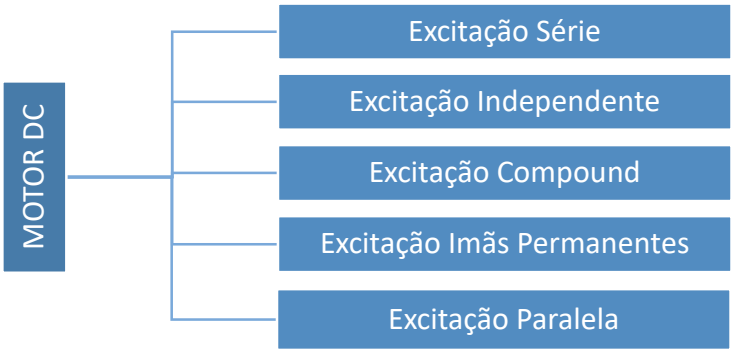
de uma hélice ao eixo da máquina. Isto acontece porque, além do atrito por ventilação entre a hélice e o ar (perda mecânica por ventilação), é necessária uma energia adicional utilizada para acionar a hélice, que recebe energia mecânica no seu eixo e a transforma em energia eólica nas suas pás.

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): no caso dos motores, é necessária a aplicação de algum 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).

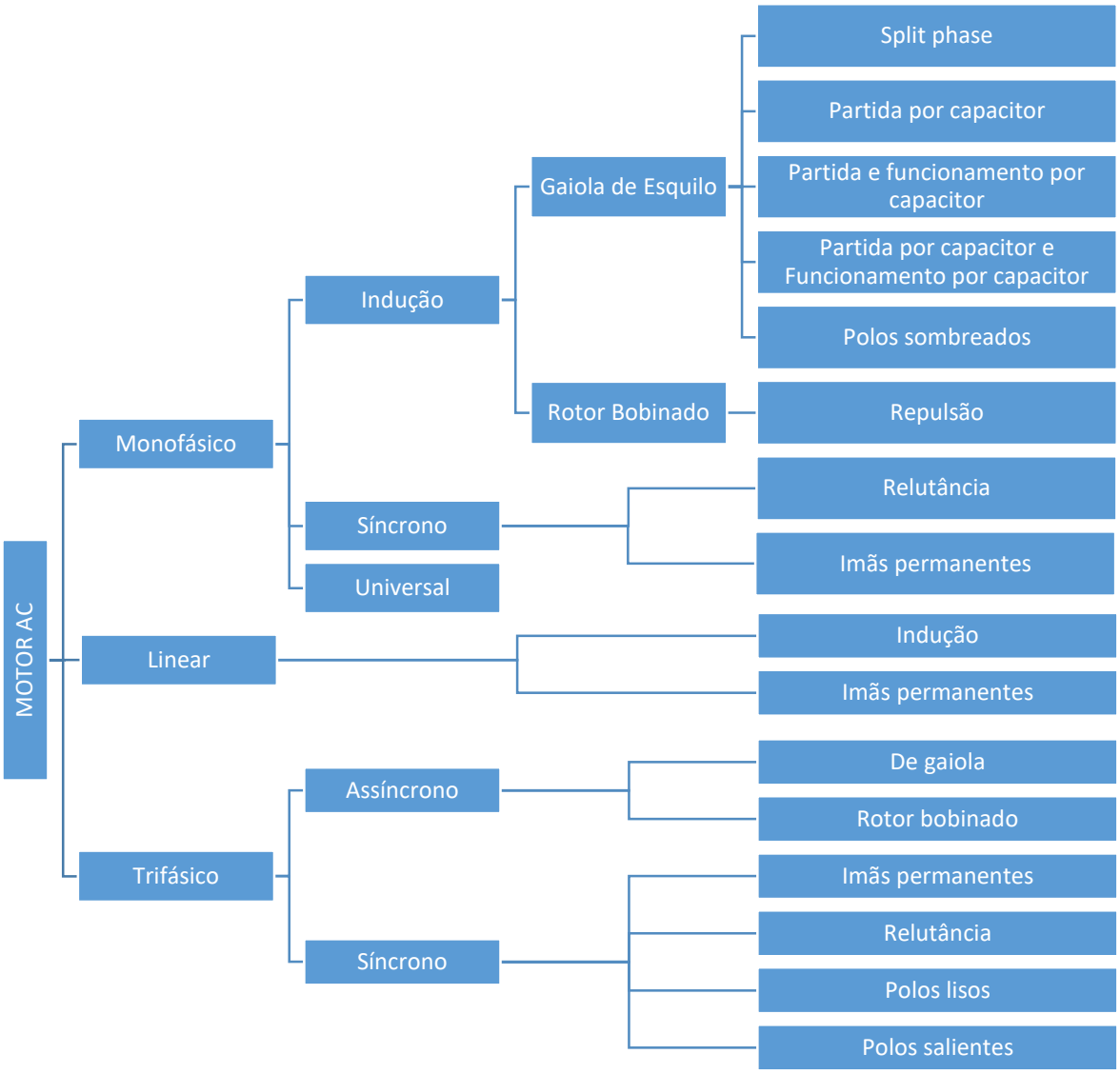
Os principais tipos de motores utilizados são exibidos nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Classificação dos motores DC



Fonte: Adaptado de WEG (2017).

Figura 3 – Classificação dos motores AC



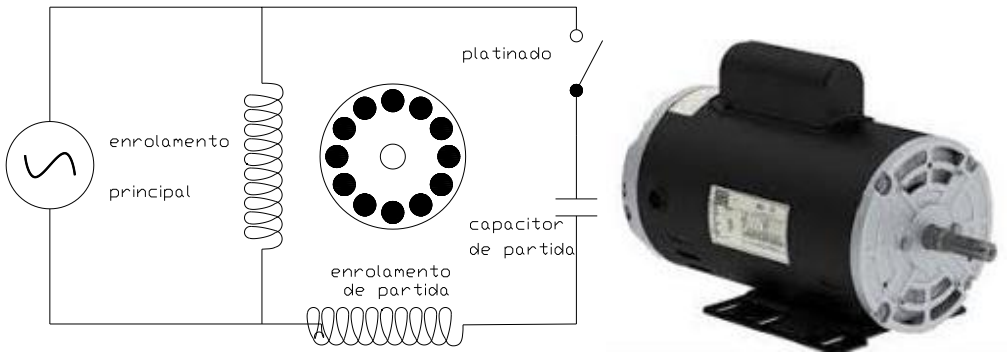
Fonte: Adaptado de WEG (2017).

Os motores de indução monofásicos (MIM) necessitam para o seu funcionamento de um campo girante ou de um campo pulsante. Na realidade demonstra-se que um campo pulsante é equivalente a dois campos girantes em sentidos opostos. Os motores de indução monofásicos que possuem um campo pulsante, necessitam de dispositivos para poderem começar a funcionar. Após a partida eles podem continuar a funcionar com o campo pulsante. Desta forma, existem dispositivos que permitem que na partida exista um campo girante para estes motores funcionarem. Alguns motores monofásicos, no entanto, possuem campo girante, mesmo não constante, durante todo o seu funcionamento, isto é, desde a partida até o pleno funcionamento.

A seguir serão analisados todos estes tipos de motores de indução monofásicos de acordo com estes dispositivos auxiliares para o seu funcionamento (CHAPMAN, 2013).

O motor de indução monofásico com partida por capacitor utiliza um capacitor eletrolítico em série com um enrolamento auxiliar e em paralelo com o enrolamento principal (Figura 4). Este motor possui ainda um platinado em série com o enrolamento auxiliar, o qual está ligado no instante da partida e que é desligado por um dispositivo centrífugo quando a rotação do motor atinge aproximadamente 75% da rotação máxima. É utilizado para acionar bombas d'água (KOSOW, 1982).

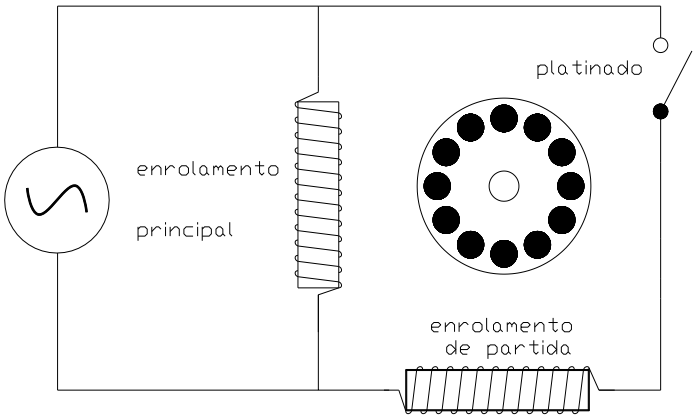
Figura 4 – MIM: Partida por capacitor



Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

O motor de indução monofásico com partida por fase dividida (Figura 5) possui um enrolamento de partida onde o fio é mais fino, com número de espiras diferente do enrolamento principal. Então a parte indutiva e a parte resistiva dos enrolamentos são diferentes, consequentemente, a impedância dos dois enrolamentos são diferentes e há uma defasagem entre as suas correntes. Esta defasagem cria um campo magnético girante no estator suficiente para que o motor dê partida. Semelhante ao motor com partida por capacitor, o enrolamento auxiliar é desligado com 75% da rotação máxima. Este motor é externamente muito semelhante ao motor com partida por capacitor. Deve-se lembrar, por outro lado, que esses dois tipos de motores acima referidos nem sempre tem o capacitor eletrolítico colocado sobre a carcaça, conforme mostrado, mas algumas vezes este capacitor é colocado internamente (KOSOW, 1982).

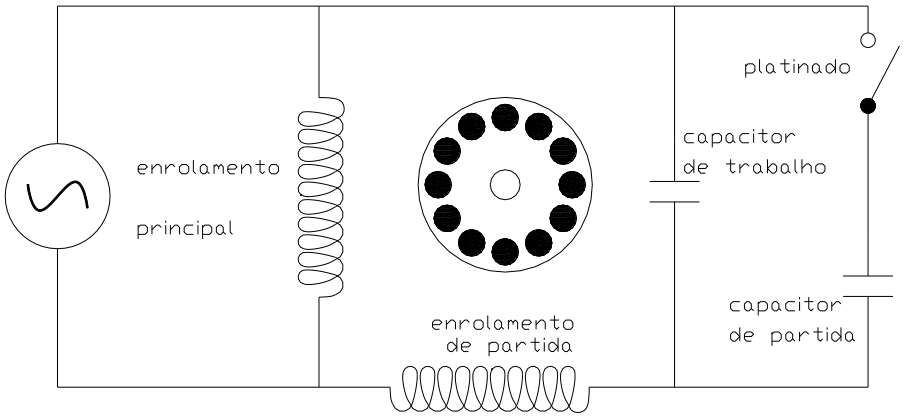
Figura 5 – MIM: Partida por fase dividida



Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

O motor de indução monofásico com partida por capacitor e funcionamento por capacitor possui um capacitor de trabalho em série com um enrolamento e um capacitor de partida em série com o platinado. O capacitor de trabalho é ligado em paralelo com o capacitor de partida e o platinado, conforme Figura 6. Durante a partida, os dois capacitores e o platinado funcionam. Após a partida, apenas o capacitor de trabalho permanece no circuito, pois o platinado e o outro capacitor são desligados (KOSOW, 1982).

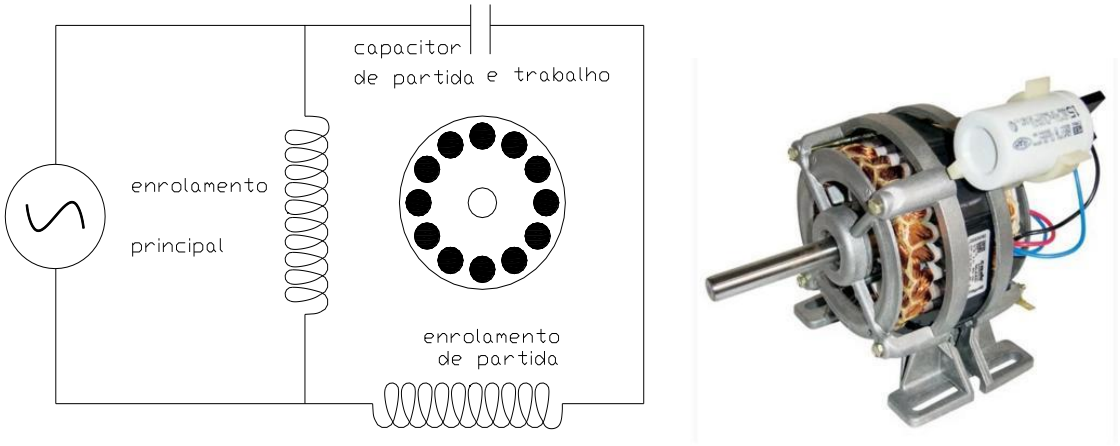
Figura 6 – MIM: Partida e funcionamento por capacitor de partida e de trabalho



Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

O motor de indução monofásico de partida e funcionamento com capacitor possui um enrolamento de partida, neste caso, um enrolamento de funcionamento também, em série com um capacitor e os dois em paralelo com o enrolamento principal, como mostrado no esquema da Figura 7 (CHAPMAN, 2013).

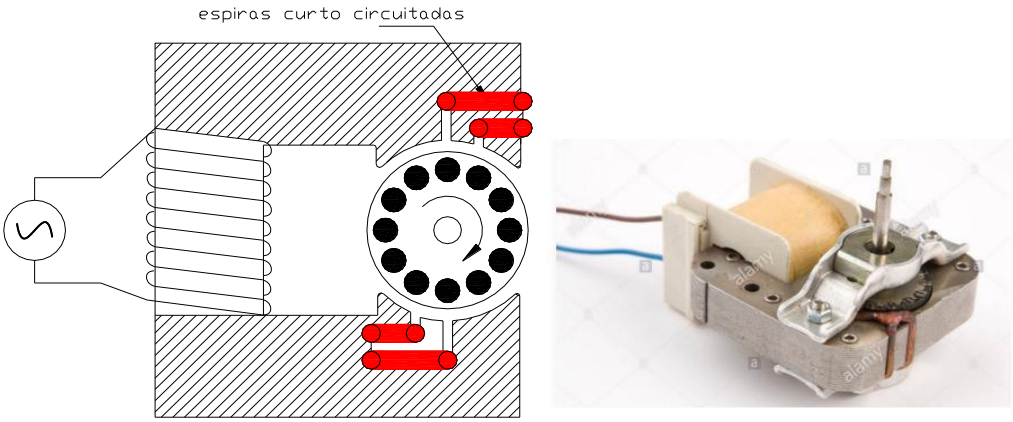
Figura 7 – MIM: Partida e funcionamento por capacitor de partida e trabalho



Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

O motor de polo sombreado é um motor de indução monofásico que possui apenas o enrolamento principal de funcionamento ligado à rede elétrica de tensão alternada monofásica. Para a partida, este motor possui uma espira de fio grosso curto-circuitada no material ferromagnético do estator, perpendicular à direção das linhas de campo magnético. Normalmente existem duas espiras lado a lado, conforme mostrado no esquema da Figura 8, que retardam o crescimento do campo magnético nesta área, fazendo com que o campo resultante gire. O sentido de rotação é único e sempre do lado não sombreado para o lado sombreado. Estes motores são utilizados em potências pequenas e possuem baixo rendimento (KOSOW, 1982).

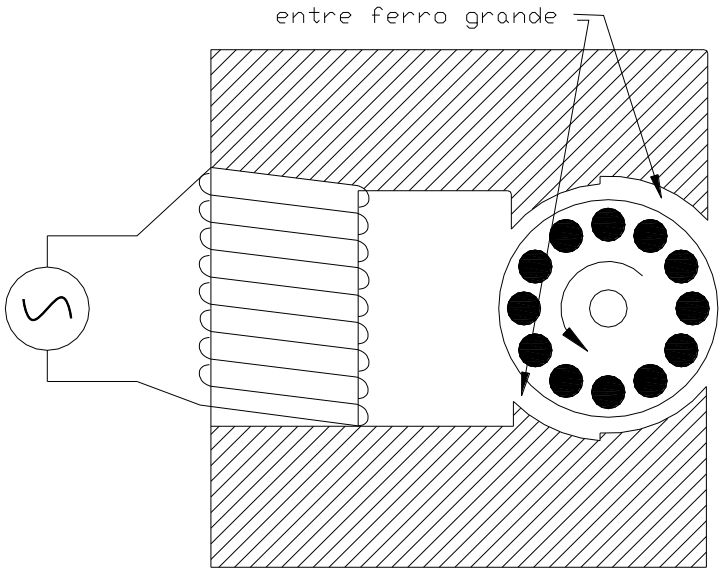
Figura 8 – Motor de polo sombreado



Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

O motor indução monofásico com partida por relutância variável é semelhante ao motor de partida por pólo sombreado. Se na área do estator onde estão as espiras em curto circuito for feito um entreferro maior, o campo magnético nesta seção se adiantará em relação à seção com entreferro menor, estabelecendo então um campo girante. Embora este motor seja chamado de partida por relutância, ele sempre estará funcionando desta forma, mesmo após a partida. O sentido de rotação é do lado com maior entreferro para o de menor entre ferro, no mesmo pólo (Figura 9) (KOSOW, 1982).

Figura 9 – MIM: Partida por relutância variável



Fonte: Adaptado de Kosow (1982).

O motor universal possui um rotor bobinado com coletor e escovas. É chamado de motor universal porque funciona tanto em tensão AC quanto em tensão DC. O enrolamento do estator está ligado em série com o enrolamento do rotor, por isso também é chamado de motor série. Este tipo de motor é muito usado em aparelhos industriais manuais, pois possui potência relativamente alta e peso pequeno. As aplicações mais usadas são em motosserras manuais, esmerilhadeiras, politrizes, furadeiras manuais, lixadeiras, etc. (Figura 10) (KOSOW, 1982).

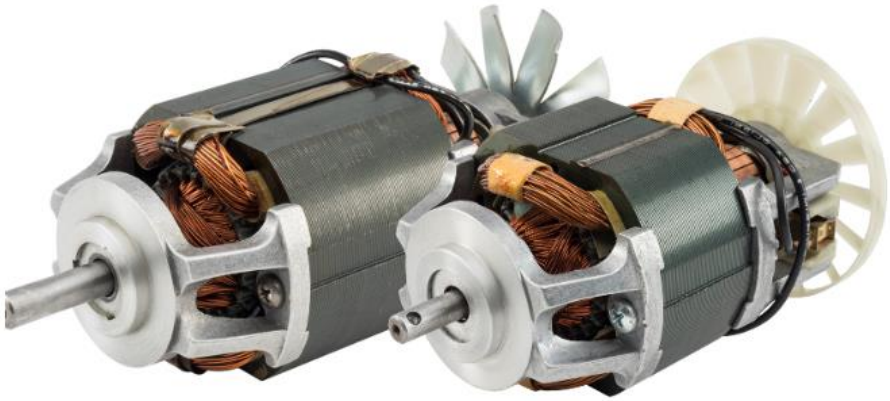
Figura 10 – Furadeira manual



Fonte: Demotor (2018).

Nas aplicações em eletrodomésticos, são usados em liquidificadores, enceradeiras, mixers, secadores de cabelo, lava-jatos, batedeiras, etc. (Figura 11).

Figura 11 – Motor universal



Fonte: Mecânica Industrial (2018).

O motor de corrente alternada monofásico síncrono é usado em timer de máquina de lavar roupa, relógios, etc. (Figura 12). Possuem imã permanente no rotor com muitos polos (KOSOW, 1982).

Figura 12 – Motor síncrono



Fonte: Kollmorgen (2018).

Este tipo de motor síncrono também possui rotor com polos salientes, ou de relutância variável. Outro tipo de motor síncrono monofásico utiliza rotor com imã permanente, onde o estator é do tipo com entreferro variável, que possibilita ter um campo girante. É utilizado em espremedor de laranja doméstico, mas possui um ruído elevado (KOSOW, 1982).

Os motores elétricos AC podem ainda serem do tipo trifásico. Comparado com os motores elétricos monofásicos são mais simples, com manutenção mais barata e são utilizados em potências que abrangem a faixa dos motores monofásicos até potências muito grandes. A principal característica dos motores de indução trifásicos é que eles possuem campo girante intrinsicamente, não necessitando de dispositivos de partida. Estes motores possuem um rotor de gaiola de esquilo junto com o eixo que é apoiado em dois mancais, que praticamente é o único ponto de manutenção mecânica. Existem motores de indução trifásicos com mancais de deslizamento que trabalham dezenas de anos, praticamente sem parar, como por exemplo em fábricas de tecido (Figura 13) (KOSOW, 1982).

Figura 13 – MIT: Gaiola de esquilo



Fonte: WEG (2017).

Um segundo tipo de motor de indução trifásico chama-se motor de indução trifásico de rotor bobinado. Possui um enrolamento estático igual àquele do motor de indução. Entretanto, ao invés de ser de gaiola de esquilo, o rotor é enrolado convenientemente e normalmente possui três coletores com anéis lisos conectados por escovas a um banco de resistências, permitindo variar as características de partida deste tipo de motor. Na Figura 14 é mostrado este tipo de motor (KOSOW, 1982).

Figura 14 – MIT: Rotor bobinado



Fonte: WEG (2017).

2.2 FREIOS DINAMOMÉTRICOS

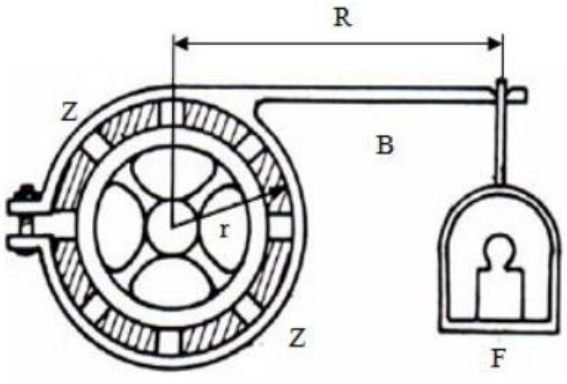
Os dinamômetros, ou freios dinamométricos, são dispositivos utilizados para medir torque e, consequentemente, potência das máquinas motoras ou geradoras.

2.2.1 Freio de Prony

O freio de Prony foi o mais antigo freio dinamométrico a ser utilizado. Foi criado em 1821, pelo engenheiro e matemático francês Gaspard de Prony, com o intuito de medir a potência desenvolvida pelas máquinas, sendo utilizado até os dias atuais.

O dispositivo constitui-se por um tambor de raio r, sapatas frenantes reguláveis Z e um braço B, ao qual é suspenso uma carga F a uma distância R do eixo do tambor, como mostrado na Figura 15 (BATISTA, 2010).

Figura 15 – Freio de Prony



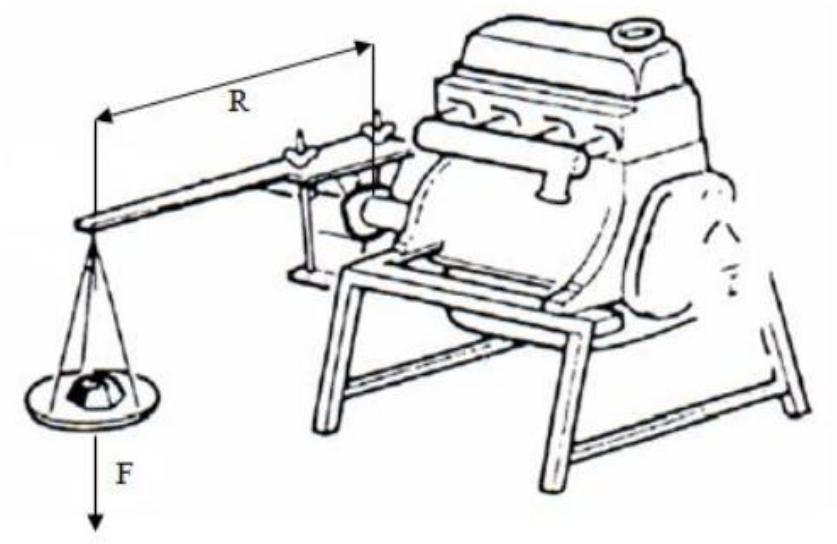
Fonte: Batista (2010).

O tambor de raio r, interdependente ao eixo motor, é envolto pelas sapatas Z. Quando o eixo do motor roda arrastando o tambor, o atrito entre este e as sapatas Z tende a fazer rodar o braço B, o qual é mantido em equilíbrio pelo peso F atuante na extremidade livre do braço B (BATISTA, 2010).

O ensaio do motor é realizado colocando-o sobre um suporte e acoplando ao seu eixo, o freio de Prony, conforme ilustrado na Figura 16. Na extremidade do braço do freio de Prony, coloca-se a carga F. O ensaio utilizando o freio de Prony deve ser realizado com uma velocidade de rotação uniforme (BATISTA, 2010).

No decorrer do ensaio, deve-se apertar repetidamente as sapatas Z contra o tambor, até que o motor seja travado na rotação a qual se deseja medir o binário de forças atuante. Desta forma, o motor é ensaiado em diferentes velocidades de rotação, onde a carga F é variada de modo a atingir o equilíbrio entre as forças de ação do eixo do motor e de reação de carcaça do motor (BATISTA, 2010).

Figura 16 – Ensaio de motor utilizando freio de Prony



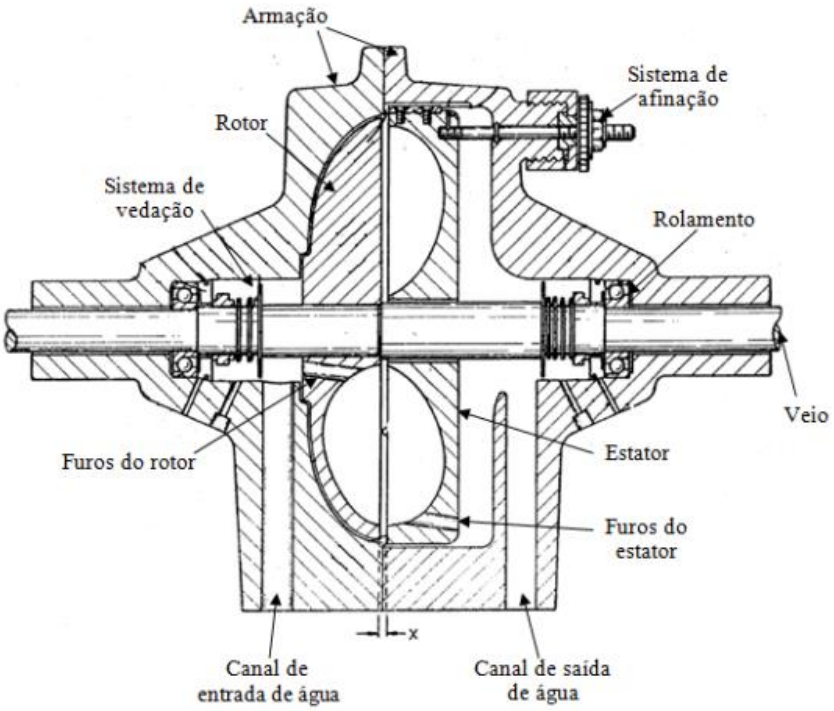
Fonte: Batista (2010).

Do produto da carga F pelo comprimento R do braço do freio de Prony (distância R da linha de centro do eixo do motor e a linha da ação da carga F), tem-se o valor do torque do motor para cada velocidade de rotação ensaiada. A partir do torque e da rotação, obtém-se a potência efetiva do motor para cada situação (BATISTA, 2010).

2.2.2 Freio Hidrodinâmico

O freio hidrodinâmico consiste numa carcaça na qual ficam alojados o estator e o rotor suportado pelo eixo que transmite o binário de forças do motor em teste. A Figura 17 apresenta o modelo esquemático do dinamômetro hidrodinâmico (BATISTA, 2010).

Figura 17 – Freio hidrodinâmico



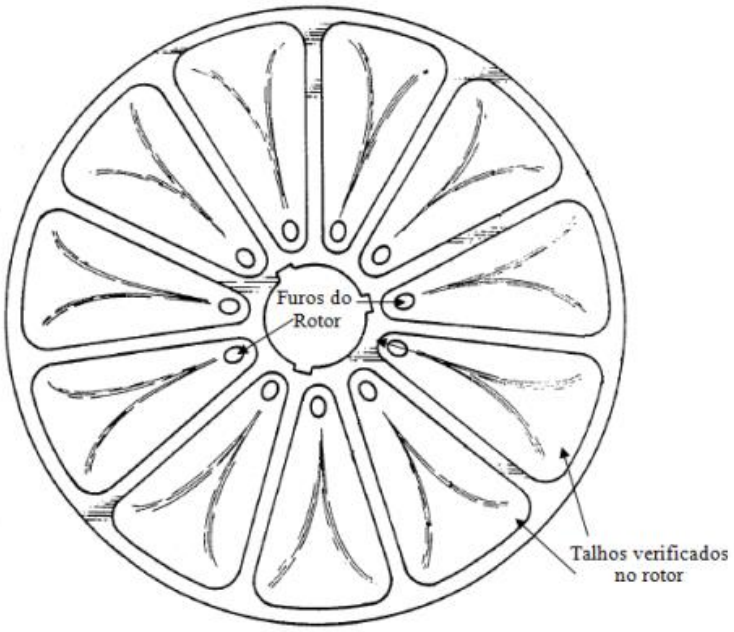
Fonte: Batista (2010).

O rotor e o estator apresentam uma estrutura física com cavidades que, quando é fornecido líquido ao compartimento da armação, são geradas tensões no líquido entre o estator e o rotor, originando forças de travagem no rotor, correspondendo a um binário aplicado ao estator e por consequência à armação (BATISTA, 2010).

> A energia mecânica fornecida pelo motor em ensaio é absorvida e convertida em calor pelo dinamômetro através de um fluxo de fluido que circula entre os talhos existentes no estator e no rotor. O binário absorvido pelo estator obriga a carcaça a um movimento de rotação no sentido inverso e com igual intensidade. Este esforço é transmitido, por meio de um braço, a uma célula de carga localizada a uma distância fixa do centro do dinamómetro, possibilitando assim o cálculo do binário (BATISTA, 2016, p. 12).

O dinamômetro hidrodinâmico estabelece um circuito fechado, o que permite a recirculação do fluido, desta forma, torna-se necessário o emprego de um sistema de alimentação do fluido, comumente por meio de uma bomba, um reservatório e uma válvula de descarga. Após passar pela válvula de entrada, o fluido é forçado a atravessar o canal de entrada da carcaça, que faz com que ele flua pelos canais presentes no rotor, conforme ilustrado na Figura 18 (BATISTA, 2010).

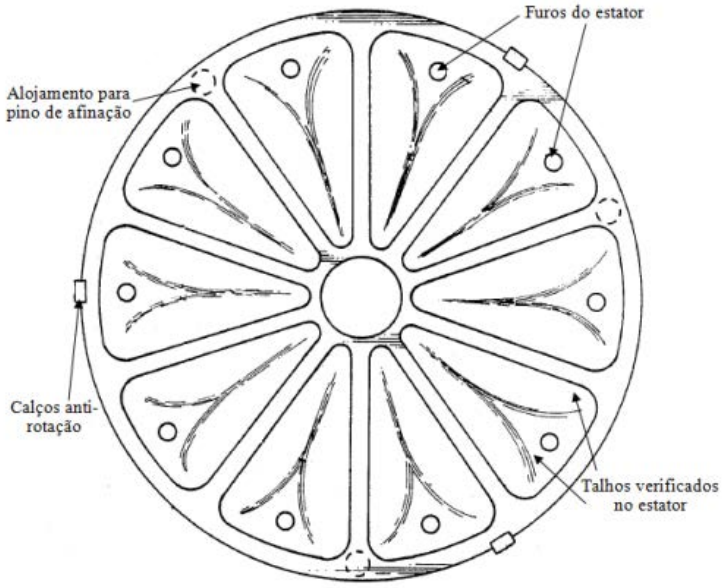
Figura 18 – Freio hidrodinâmico em corte



Fonte: Batista (2010).

O rotor e o estator estão colocados de maneira a que as suas ranhuras possam interagir através da presença de fluido. Na existência de rotação do rotor, o fluido passa através dos furos nele existentes e seu fluxo expande-se pela cavidade do rotor que, pelo efeito da rotação, leva o fluxo de água às cavidades do estator, levando ao surgimento de tensões, devido à variação de movimento entre o estator e o rotor. Além disso, nas ranhuras existentes no estator (Figura 19) há furos que possibilitam a saída e a recirculação de fluido proveniente do contato entre o rotor e o estator, cuja função é eliminar parte do calor absorvido no contato (BATISTA, 2010).

Figura 19 – Freio hidrodinâmico em corte



Fonte: Batista (2010).

A potência absorvida pelo dinamômetro depende da velocidade de rotação e da quantidade de fluido existente no interior da câmara do rotor. O nível de água na câmara do rotor é modulado através do controle das válvulas de entrada e saída (BATISTA, 2010).

> Devido à possibilidade de realizar binários elevados, são colocados três calços anti-rotação regularmente espaçados entre si (Figura 19), de maneira a garantir que, mediante qualquer binário exercido, não exista rotação do estator em relação à armação/carcaça principal. Este dinamómetro é caracterizado também por possuir três pinos que permitem a afinação da distância entre o estator e o rotor. Tal fato possibilita o teste de uma maior gama de motores, permitindo a variação de caudal de fluido entre o estator e o rotor, garantindo uma maior longevidade do dinamômetro (diminuindo a probabilidade de aquecimento) e uma melhor capacidade de ensaio visto existir a proporção correta de caudal de fluido dentro da zona de trabalho (BATISTA, 2010, p. 14).

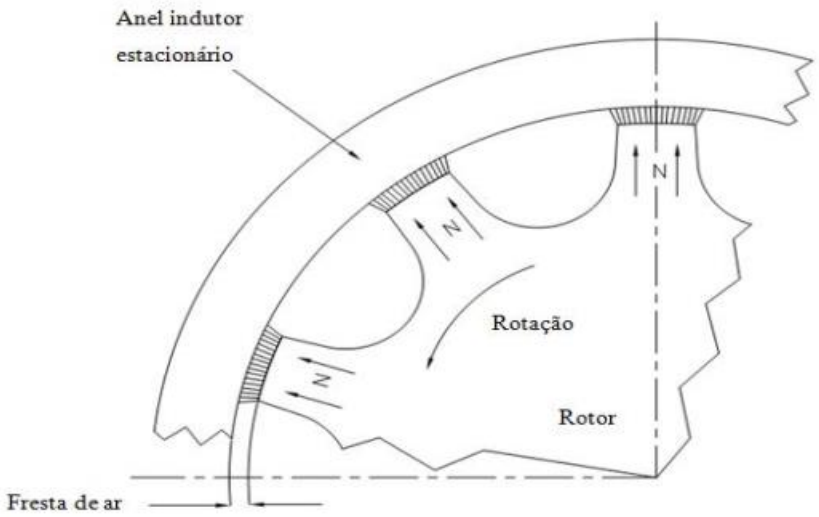
2.2.3 Dinamômetro de Correntes Eddy

O dinamômetro de correntes Eddy é um freio montado sobre os rolamentos do motor em teste. O travão eletromagnético é submetido a uma fonte de energia, desenvolvendo um binário resistente no rotor e um binário de reação no estator (BATISTA (2010)).

Quando a bobina é energizada, desenvolve-se um binário resistente, o que gera um campo eletromagnético no anel indutor e no rotor (Figura 20). Pela ação do rotor dentado, a superfície interna do anel indutor é sujeita a um fluxo magnético de intensidade variável. Esta variação do fluxo se dá devido ao posicionamento dos dentes do rotor, desta forma, em cada instante de

tempo, a superfície do anel interno está submetido à um determinado valor de fluxo. Então, a intensidade do fluxo magnético sob a extensão da superfície interna do anel indutor é variada mediante à rotação contínua do rotor (BATISTA, 2010).

Figura 20 – Rotor e anel indutor

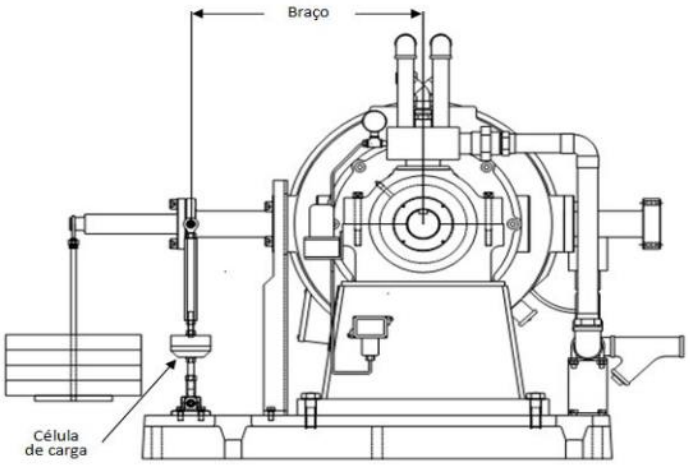


Fonte: Batista (2010).

Devido à variação de intensidade do fluxo no anel indutor, uma corrente é desenvolvida na superfície do diâmetro interno do anel. Em decorrência do surgimento destas, é criado um campo magnético, o qual interage com o campo magnético formado pelos dentes do rotor. Esta interação entre os campos eletromagnéticos promove um binário de forças (ação e reação) tangenciais ao rotor e ao estator, que é proporcional à intensidade da corrente desenvolvida. A força do campo eletromagnético é regulada através do ajuste da corrente de excitação da bobina (BATISTA, 2010).

Uma haste (braço) é fixada à caraça do motor e por meio da utilização de uma célula de carga, pode-se medir o binário de reação (Figura 21). Assim, com os valores da rotação do eixo, da força medida e da distância entre o eixo de rotação e a linha de ação da força na extremidade do braço, pode-se determinar a potência efetiva da máquina elétrica (BATISTA, 2010).

Figura 21 – Características do dinamômetro Eddy Current

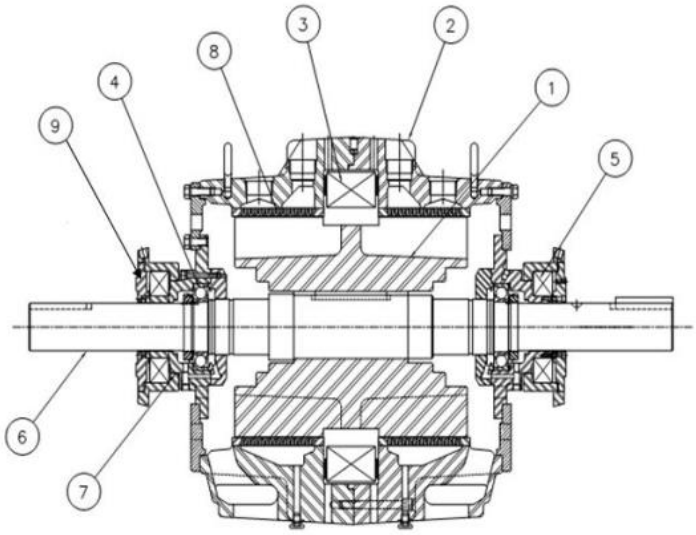


Fonte: Batista (2010).

O dinamômetro é composto por uma carcaça de rotação livre, a qual é suportada por meio de rolamentos (Figura 22). Embora a carcaça possua rotação livre, esta rotação é delimitada por meio de batentes, logo, a carcaça apenas tende a girar (BATISTA, 2010).

No estator são instaladas as bobinas e na carcaça do estator são fixados os conjuntos de anéis que permitem a circulação de um fluido de arrefecimento. O conjunto rotor/eixo é instalado dentro da carcaça. O comprimento do eixo deve ser maior do que o comprimento da carcaça, com isto, o conjunto pode ser suportado pelos rolamentos situados na carcaça do estator (BATISTA, 2010).

Figura 22 – Esquema da carcaça



Fonte: Batista (2010).

1. Rotor
2. Estator
3. Bobina
4. Rolamentos de contato angular
5. Rolamentos de alinhamento
6. Eixo
7. Mancal
8. Anéis indutores
9. Tampas de proteção do rolamento

2.3 REAÇÃO DA CARCAÇA

2.3.1 Reação da Carcaça em um Motor Elétrico

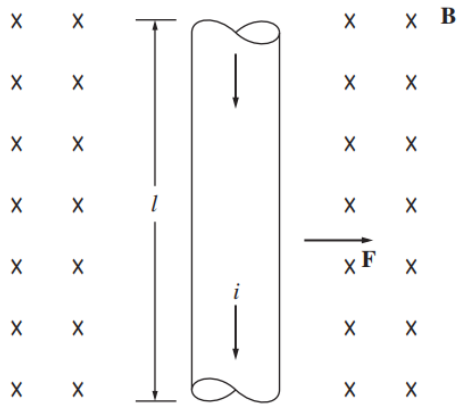
A força eletromagnética é o mecanismo pelo qual se dá a conversão entre as energias elétricas e mecânicas. No caso particular das máquinas motoras, o princípio básico que caracteriza o comportamento do campo magnético é pelo desenvolvimento de uma força indutiva em um fio condutor de corrente que esteja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

A Figura 23 representa a força indutiva **F** desenvolvida em um fio que conduz a corrente *i*, em meio a um campo magnético uniforme, com intensidade **B**, entrando na folha. A força é dada pela Equação 1 e seu sentido pode ser determinado através da regra da mão direita (CHAPMAN, 2013).

$$\mathbf{F} = i\,(l \times \mathbf{B}) \text{ ou} \qquad (1)$$
$$F = i\,l\,B \operatorname{sen}\theta$$

Sendo:
F = força induzida no fio condutor
i = corrente no condutor
l = comprimento do fio condutor
B = densidade de fluxo magnético
θ = ângulo entre **B** e o fio condutor

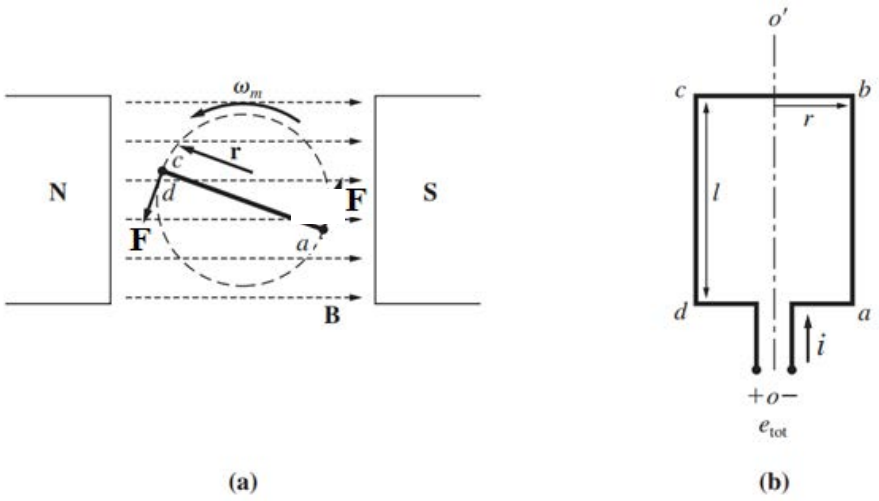
Figura 23 – Força indutiva em um fio condutor de corrente na presença de um campo magnético



Fonte: Chapman (2013).

De forma elementar, o princípio de funcionamento de um motor real pode ser explicado através do modelo de uma máquina simples, constituída por uma única espira rotativa (rotor) inserida em um campo magnético uniforme, produzido por um imã permanente (estator). Uma força magnética é induzida no fio condutor, na presença do campo magnético uniforme, com intensidade e sentido determinados pela Equação 1 e regra da mão direita, respectivamente (Figura 24). Como se pode observar, as forças possuem sentidos contrários, logo é gerado um torque induzido na espira, responsável pelo movimento de rotação do rotor (CHAPMAN, 2013; KOSOW, 1982).

Figura 24 – Espira simples na presença de um campo magnético uniforme: (a) vista frontal (b) vista da bobina



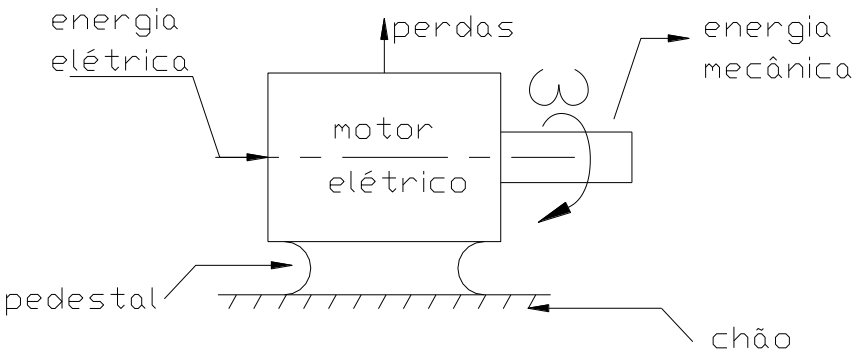
Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

O comprimento do fio depende do número de espiras e enrolamento do estator e a força eletromagnética depende do comprimento do fio condutor, da intensidade do campo magnético, e do valor da corrente induzida, que varia em função da carga aplicada ao eixo do rotor e que é, dentro de certa faixa, proporcional ao torque aplicado pela carga ao eixo (KOSOW, 1982).

Em um motor elétrico, a razão da energia mecânica 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 (Figura 25). A eficiência de uma máquina geradora pode, então, ser determinada pela Equação 2 (CHAPMAN, 2013).

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% \qquad (2)$$

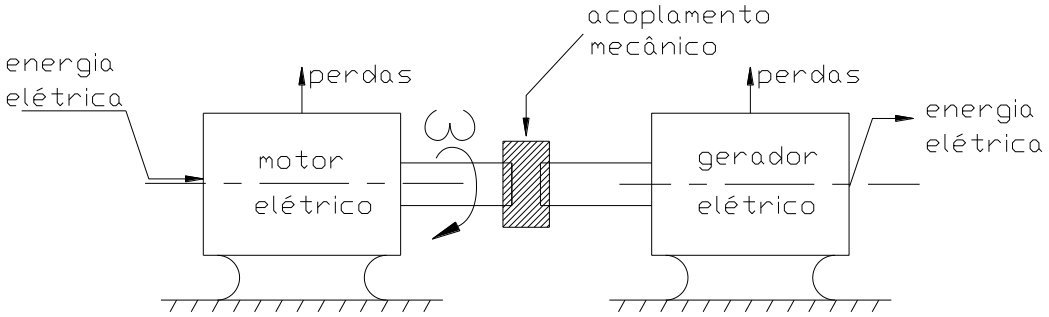
Figura 25 – Esquema básico das máquinas elétricas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve-se observar que só e somente só quando o eixo de um motor está acoplado ao eixo de outra máquina (carga) é que ele transmite energia mecânica (Figura 26), caso contrário, o eixo não é caracterizado como um eixo de transmissão, sendo carregado apenas estaticamente e não transmitindo torque algum (NORTON, 2013).

Figura 26 – Máquina motora e geradora



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do momento em que uma carga é acoplada a uma máquina motora, a velocidade do eixo é reduzida e o fluxo de corrente aumenta, o que acarreta num aumento do torque induzido, o qual se iguala ao conjugado do motor, em uma velocidade inferior (CHAPMAN, 2013).

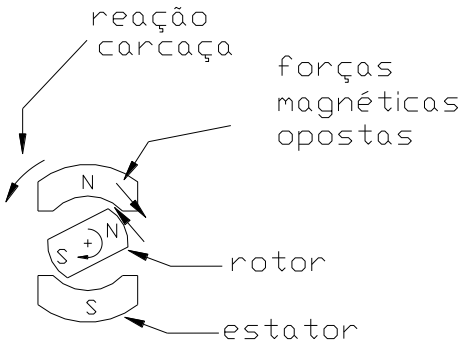
Como consequência da definição dada pela Equação 1, que determina a força induzida no fio condutor, tem-se a intensidade do torque do conjugado induzido (Equação 3). A partir do torque induzido e pelo conhecimento da velocidade de rotação, ω, pode-se definir a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor (Equação 4) (CHAPMAN, 2013).

$$\tau_{ind} = \mathbf{F} \times r \tag{3}$$

$$P_{mec} = \tau_{ind} \times \omega \tag{4}$$

Dado que o eixo do rotor esteja submetido a um torque, é necessário que exista uma força aplicada neste eixo, dentro do motor, 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. Por outro lado, a força aplicada ao rotor precisa ser igual e oposta àquela aplicada ao estator (Figura 27).

Figura 27 – Representação das forças desenvolvidas no rotor/estator

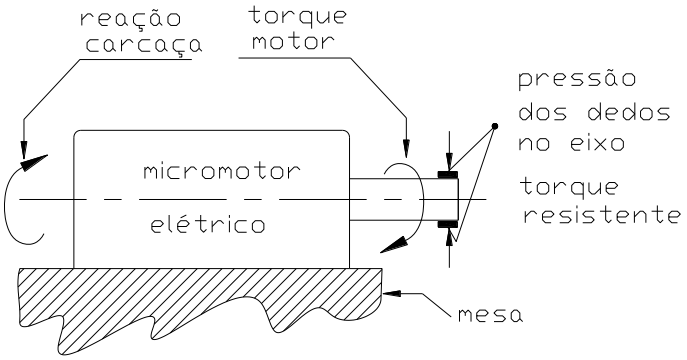


Fonte: Elaborado pelo autor.

O par de forças magnéticas opostas (ação e reação) atuam na carcaça do rotor e estator de forma mútua. A força de repulsão entre o polo norte do estator e o polo norte do rotor faz com que o rotor (adotando o sentido de rotação do motor como sendo o definido na Figura 27) rotacione no sentido horário, ao passo que a carcaça do estator gira no sentido oposto. O torque ao qual a carcaça está submetida é chamado de reação da carcaça.

A reação da carcaça, em um pequeno motor elétrico ou micromotor, 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. 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 (Figura 28).

Figura 28 – Reação da carcaça no micromotor



Fonte: Elaborado pelo autor.

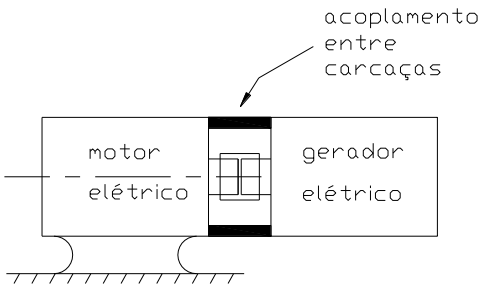
Quando o pequeno motor é ligado e deixado livre sobre a mesa, observa-se nitidamente que a carcaça tende a girar em sentido contrário ao eixo, mesmo sem carga externa aplicada ao eixo. Neste caso, a reação é devido à inércia do eixo/rotor do motor. O torque, neste caso, é devido à aceleração que o eixo sofre ao mudar de rotação zero até um valor constante. Quando a rotação fica constante, não há mais este fenômeno.

Na realidade, teórica e praticamente, 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 (CHAPMAN, 2013).

Sendo assim, devido ao torque de reação, ou a reação da carcaça, todos os motores elétricos, precisam direta ou indiretamente serem fixados ao chão, para reter a reação da carcaça (Figuras 29 e 30). Se assim não fosse, a carcaça giraria em sentido contrário àquela do eixo.

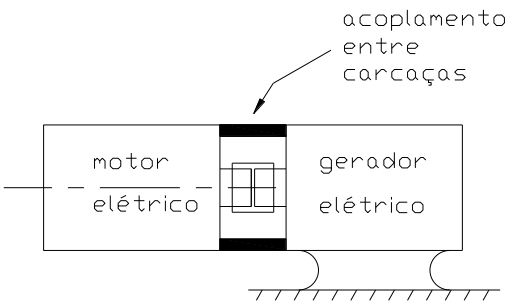
Observa-se que em muitos motores elétricos, a carcaça não é fixada no chão através de pedestais, mas aparafusadas através de flanges à carcaça da máquina geradora, a qual está presa ao chão. Este acoplamento é conhecido como acoplamento tipo monobloco. O inverso também existe, isto é, o motor é fixado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

Figura 29 – Acoplamento monobloco: pedestal no motor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Acoplamento monobloco: pedestal no gerador



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.2 Reação da Carcaça em um Motor de Combustão Interna

Em um motor à combustão interna, a carcaça também tende a girar no sentido contrário ao do eixo de virabrequim quando está sob carga (BRUNETTI, 2012).

Estes motores, quando utilizados em veículos, são acoplados através de borracha/parafuso, ou coxim, ao chassi do veículo (Figura 31) (BRUNETTI, 2012).

Figura 31 – Fixação de um motor veicular automotivo

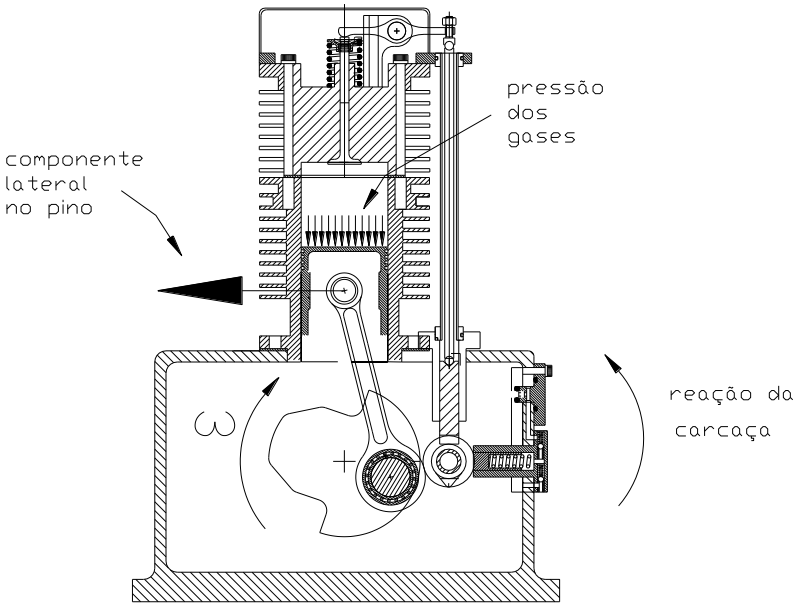


Fonte: O Mecânico (2018).

A carga acoplada a estes motores pode ser de vários tipos: gerador elétrico – conjunto moto gerador; bomba d'água – irrigação, piscinas, tratamento de água; caixa de câmbio – veículos automotores; guinchos e etc.

Segundo BRUNETTI (2012), 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 32.

Figura 32 – Força perpendicular ao cilindro



Fonte: Adaptado de Bruno (2008).

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 (BRUNETTI, 2012).

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 claramente, 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.

2.3.3 Reação da Carcaça em Outros Motores

Todas as outras máquinas motoras, além das duas acima descritas possuem reação da carcaça de modo análogo, pois para que seja aplicado um torque, este deve ser gerado no interior e apoiado como reação na carcaça. Existem motores, como por exemplo o motor hidrostático, que possuem o eixo acoplado à outra máquina e ao mesmo tempo são suspensos pelo seu próprio eixo. Na realidade, quem suporta a carcaça deste motor é a outra máquina, através do

acoplamento. Neste caso, no entanto, a caraça do motor fica livre para girar e sem pedestal. Então, um braço de torque é fixado na carcaça do motor para absorver o torque de reação de sua carcaça, com mostrado na Figura 33 (BOSH REXROTH, 2017).

Figura 33 – Braço de torque de um motor hidrostático



Fonte: Bosh Rexroth (2017).

3 MATERIAL E MÉTODO

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

a) **Pesquisa bibliográfica:** Nesta etapa inicial, foi realizado um estudo aprofundado, com referência em bibliografias, artigos e teses existentes na literatura, com o intuito de ampliar o conhecimento nos mecanismos de funcionamento dos motores elétricos de indução, assim como, no funcionamento dos freios dinamométricos.

b) **Pesquisa tátil-visual:** Após realizada a pesquisa bibliográfica, sucedeu-se 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 de indução. Desta forma, foram realizadas visitas nos laboratórios do Departamento de Mecânica e do Departamento de Energia (DEN) da UNESP, onde foi possível verificar, por meio de testes, o funcionamento de sistemas semelhantes ao proposto neste projeto.

c) **Pré-dimensionamento:** A partir dos materiais e equipamentos disponíveis no laboratório do Departamento de Mecânica da UNESP para a construção do sistema, definiu-se os dados iniciais do projeto.

d) **Fase de desenho-cálculo-desenho:** Esta fase foi desenvolvida a partir dos dados iniciais definidos na etapa anterior. Foi confeccionado o desenho do conjunto proposto e de forma iterativa, feitos os ajustes necessários e a determinação do desenho final.

e) **Fase de desenho de detalhes:** Após definição final do conjunto (dimensões e montagem), desenhou-se os detalhes dos desenhos a serem utilizados posteriormente nas etapas de usinagem das peças e montagem do conjunto.

f) **Fase de usinagem das peças:** Confecção das peças necessárias, conforme projetado.

g) **Fase de montagem do conjunto:** Montagem dos equipamentos e do conjunto. Realização de eventuais ajustes que possam ser necessários.

h) **Fase de testes:** Nesta última etapa, foram executados os testes necessários para a validação do projeto. Estes consistiram 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.

4 PROJETO MECÂNICO

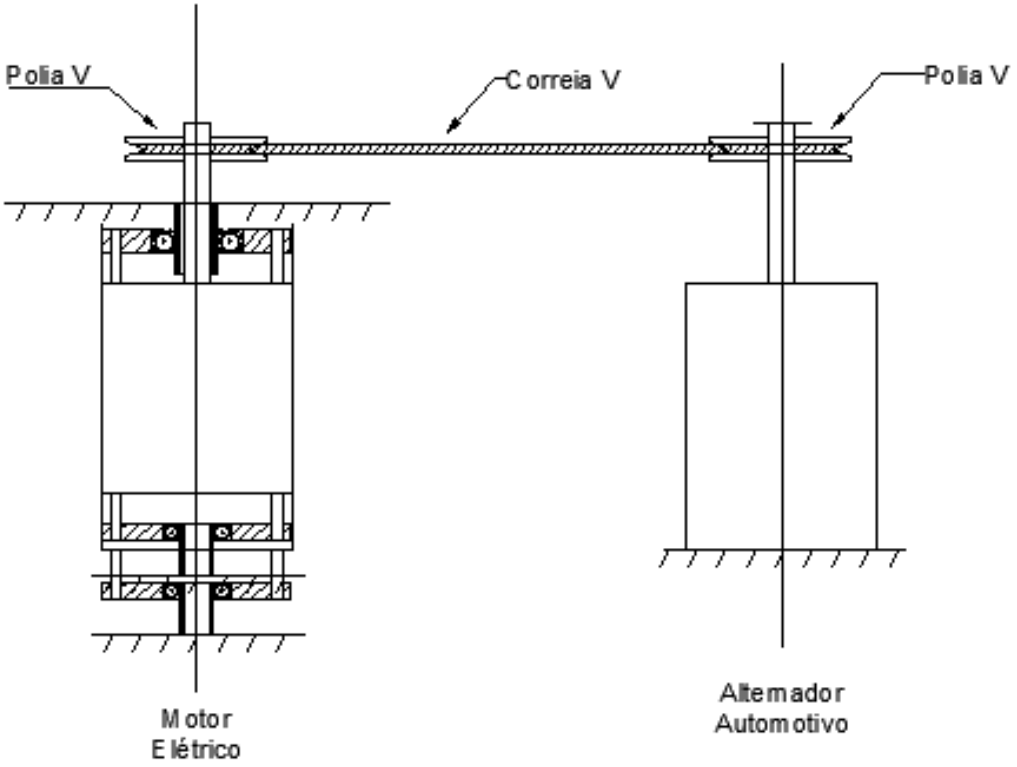
4.1 DEFINIÇÃO DO CONJUNTO E MODELAGEM 3D

O conjunto mecânico proposto neste trabalho é constituído por um motor elétrico de indução monofásico acoplado à um alternador automotivo. Como sistema de transmissão de potência, serão utilizadas polias e correias em V.

Para que seja possível a demonstração da reação da carcaça atuante no motor, este deverá estar livre para girar pequenos ângulos, desta forma, não poderá estar fixado na estrutura metálica. O alternador, por sua vez, será fixado rigidamente à estrutura.

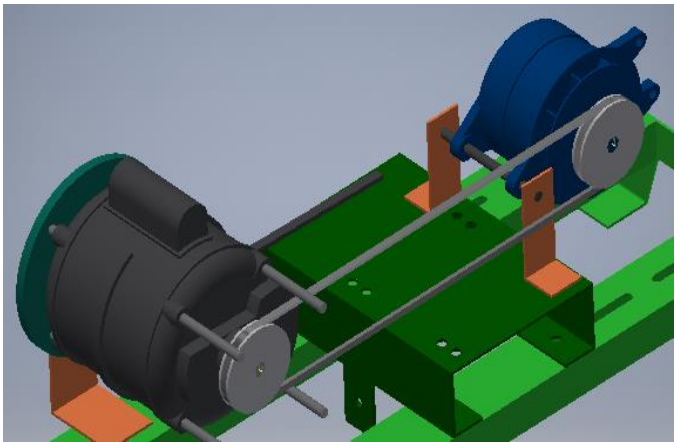
A representação esquemática da configuração do conjunto mecânico a ser desenvolvido pode ser vista nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Configuração do conjunto mecânico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Transmissão de potência motor/alternador

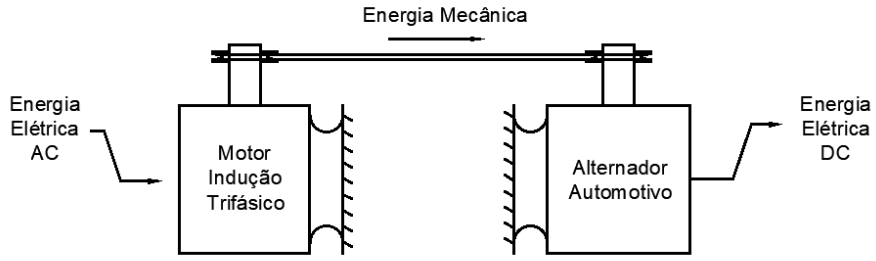


Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando em termos do fluxo de energia do sistema, a energia elétrica alimenta o motor monofásico, que fornece energia mecânica no eixo mais perdas. Através de uma polia em V, acoplada ao eixo, a energia mecânica segue pela correia em V até a polia em V do alternador. Então, a energia mecânica, agora através do alternador, transforma-se em energia elétrica DC mais perdas. O alternador é acoplado eletricamente através de fios à uma carga elétrica.

Observa-se que, neste sistema montado, há transformação de energia elétrica AC, da entrada, em energia elétrica DC, na saída, conforme Figura 36. Fica também evidente, pelo princípio de conservação de energia, que a energia elétrica de saída é menor que aquela da entrada, pois há diversos tipos de perdas nas transformações de energia. Na Figura 36, o motor está fixo à estrutura.

Figura 36 – Esquema do acoplamento motor/gerador – transformação de energia



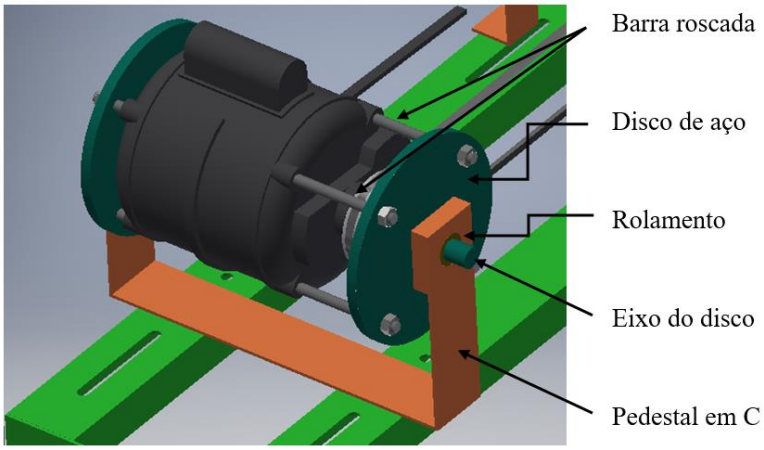
Fonte: Elaborado pelo autor.

A fixação do motor será feita de tal forma que se permita a rotação da carcaça do motor em relação ao seu próprio eixo, em pequenos ângulos. Para isto, a carcaça do motor será modificada e fixada a um disco de aço por intermédio de barras roscadas. Ao disco, será soldado

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 em C, que estará fixado na estrutura metálica.

Na Figura 37 são apresentadas as modificações e a forma de fixação descritas.

Figura 37 – Detalhamento da fixação do motor

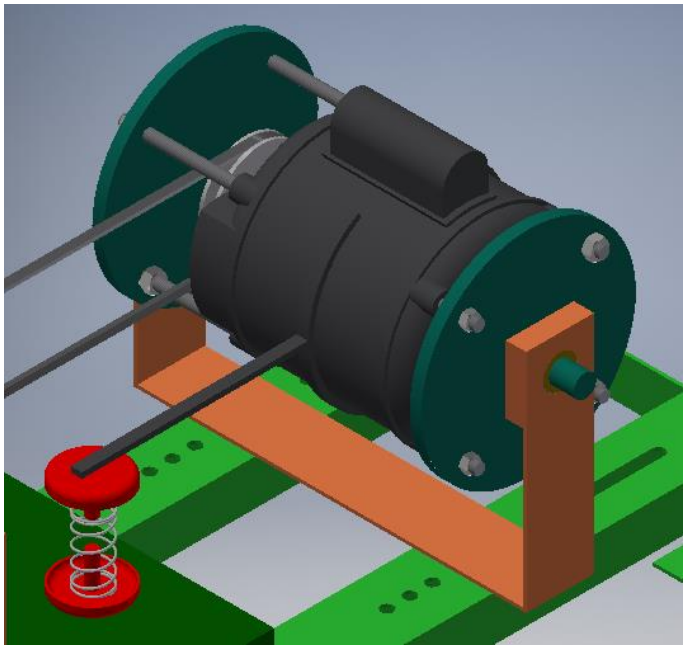


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na parte central da carcaça do motor, perpendicular à linha de centro do eixo de rotação, será instalado o braço de torque. 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 consequentemente o efeito do torque de reação da carcaça (Figura 38).

Caso se deseje mensurar a intensidade da força atuante, poderá ser utilizado uma balança ou uma célula de carga. 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.

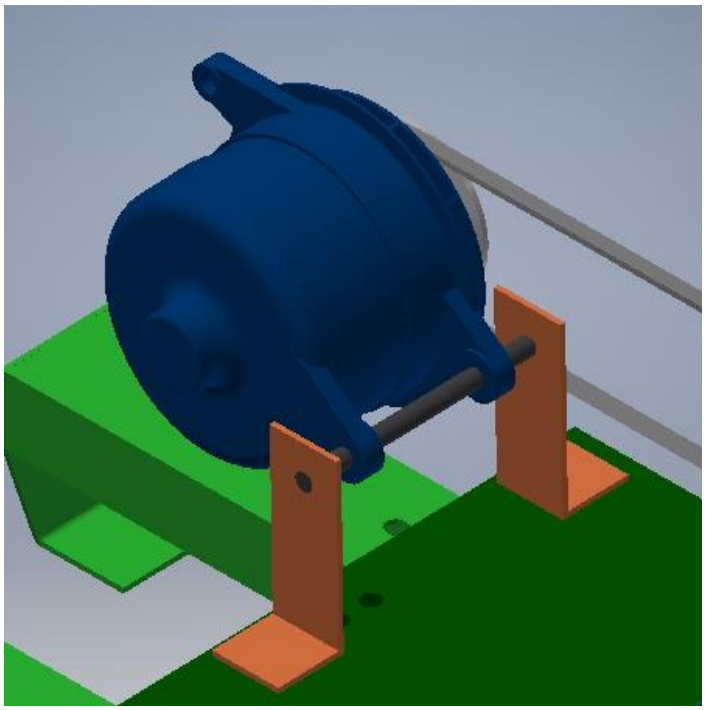
Figura 38 – Braço de torque



Fonte: Elaborado pelo autor.

O alternador será fixado à estrutura através de dois pedestais em L e de um pino, conforme representado na Figura 39.

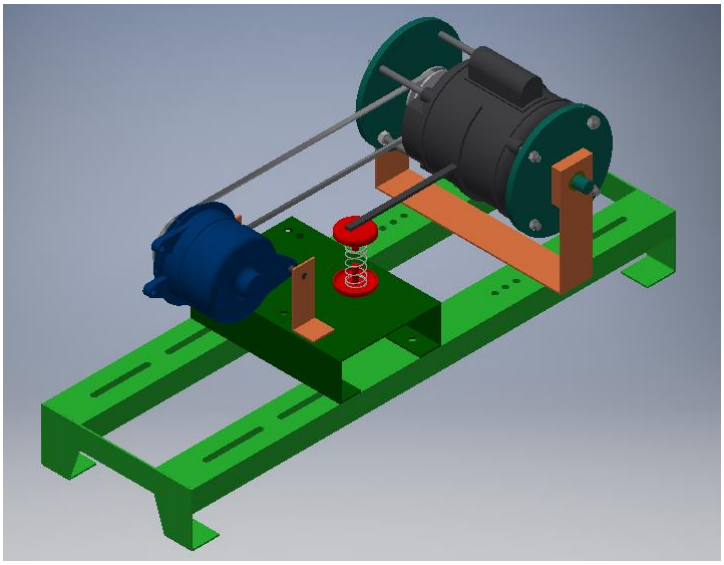
Figura 39 – Fixação do alternador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 40, é mostrada a configuração final do conjunto.

Figura 40 – Conjunto mecânico



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 CONFECÇÃO DAS PEÇAS E COMPONENTES DO CONJUNTO

Após definida a configuração final do conjunto, iniciou-se a etapa de projeto dos desenhos 2D a serem utilizados na confecção das peças/componentes. A relação de peças/componentes a serem confeccionados estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de peças/componentes usinados

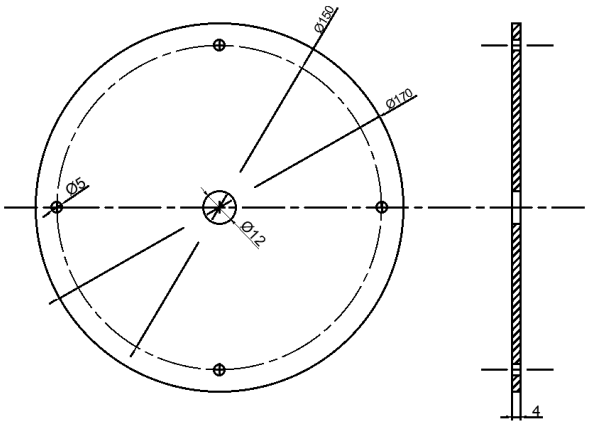
Quantidade	Descrição
02	Disco de aço
02	Eixo do disco
01	Pedestal em C (MIM)
02	Pedestal em L (alternador)
02	Suporte do rolamento
01	Braço mecânico

Fonte: Elaborado pelo autor.

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

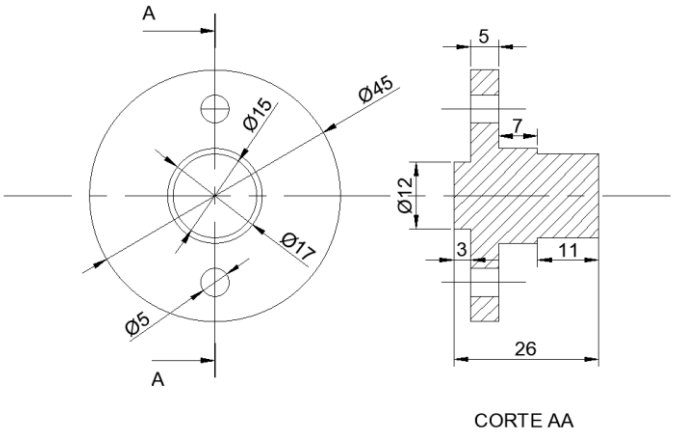
A etapa da confecção das peças iniciou-se pela usinagem do disco de aço (Figura 41) e do eixo do disco (Figura 42).

Figura 41 – Disco de aço



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 – Eixo do disco



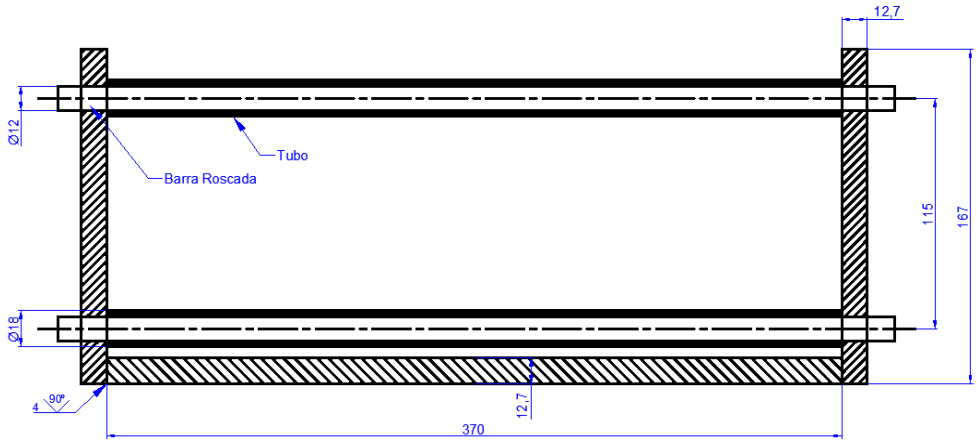
Fonte: Elaborado pelo autor.

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 no motor. As dimensões do diâmetro nominal do eixo (na extremidade a ser montado o rolamento) e do rebaixo foram definidos em função do rolamento rígido de esferas disponível, respeitando a área da região proibida.

O principal cuidado tomado na confecção dos discos, dos respectivos eixos e na adaptação desta montagem em substituição à carcaça original do motor foi garantir a concentricidade entre os eixos dos discos e o eixo do rotor, assegurando que o centro de rotação da carcaça do motor esteja alinhado ao do rotor.

Em consequência disto e partindo deste ponto, o pedestal em C e seu respectivo furo, ao qual será montado o anel externo do rolamento, devem estar perfeitamente alinhados com o eixo do disco e, consequentemente, com o eixo do rotor. Com base nesta restrição, foi necessário elaborar um dispositivo para confecção do pedestal em C. Este dispositivo consistiu em adaptar duas barras roscadas, inseridas em tubos rígidos, às duas barras retangulares verticais do pedestal, presas por meio de porcas e arruelas. Assim, as barras verticais puderam ser soldadas na barra retangular horizontal, de modo que o alinhamento e esquadrejamento do pedestal em C pudesse ser assegurado (Figura 43).

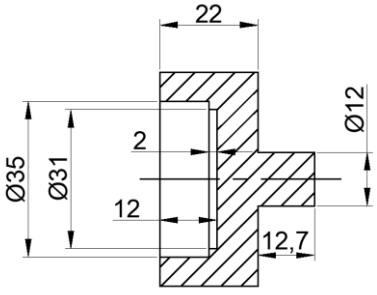
Figura 43 – Pedestal em C



Fonte: Elaborado pelo autor.

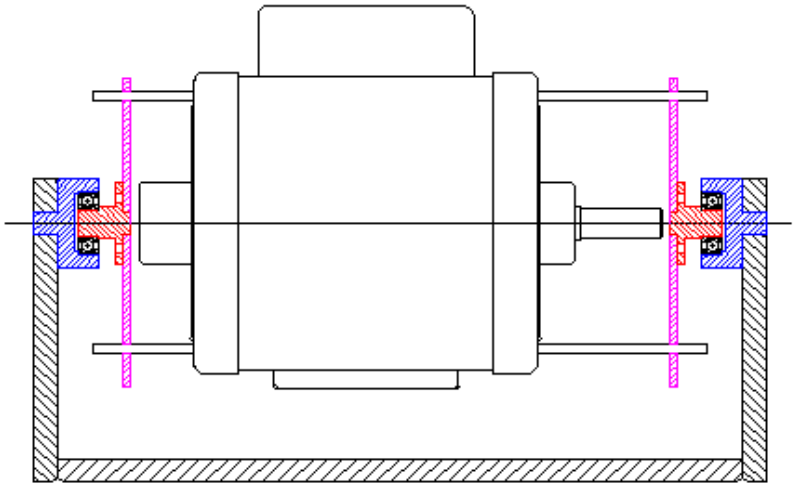
Para que os rolamentos pudessem ser introduzidos no pedestal em C, foi desenvolvido um suporte para alojamento do rolamento (Figura 44). Após o processo de soldagem do pedestal em C, as barras roscadas e tubos foram removidos para montagem do suporte (Figura 45).

Figura 44 – Suporte para alojamento do rolamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 – Carcaça modificada do MIM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os demais componentes necessários à montagem do conjunto e que foram disponibilizados pelo Departamento de Mecânica da FEG podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Lista de peças/componentes fornecidos pelo DMEC

Quantidade	Descrição
01	Estrutura metálica pré-montada
01	Motor de indução monofásico
01	Alternador automotivo
02	Polia em V
01	Correia em V
02	Rolamento rígido de esferas
02	Barra retangular vertical 12,7 x 50 x 170
01	Barra retangular horizontal 12,7 x 50 x 370
02	Tubo Ø18 x 370 mm
02	Barra roscada Ø12 x 370 mm
04	Barra roscada Ø5 x 350 mm

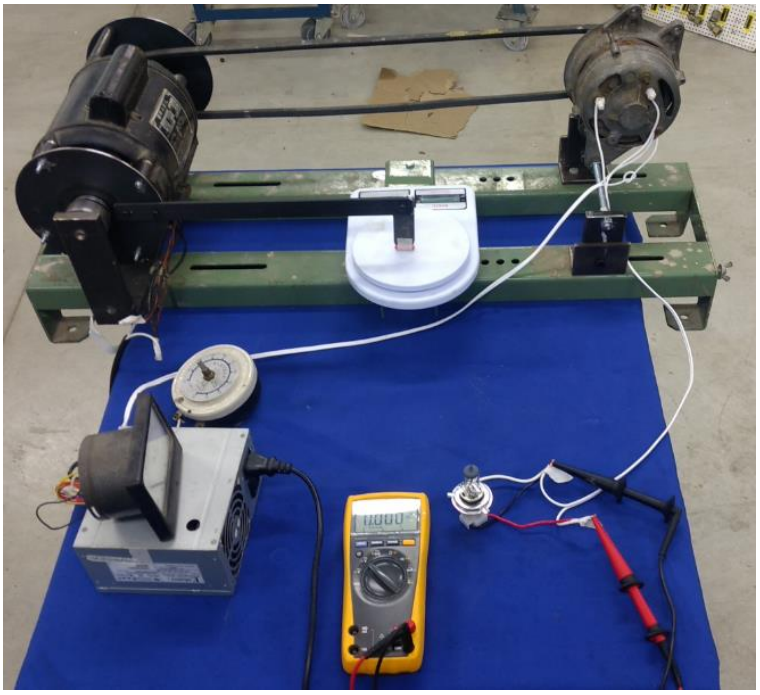
Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 O CONJUNTO MECÂNICO

Na Figura 46 é apresentado o conjunto mecânico final após a montagem dos subconjuntos e componentes, conforme projeto.

Figura 46 – Conjunto mecânico final



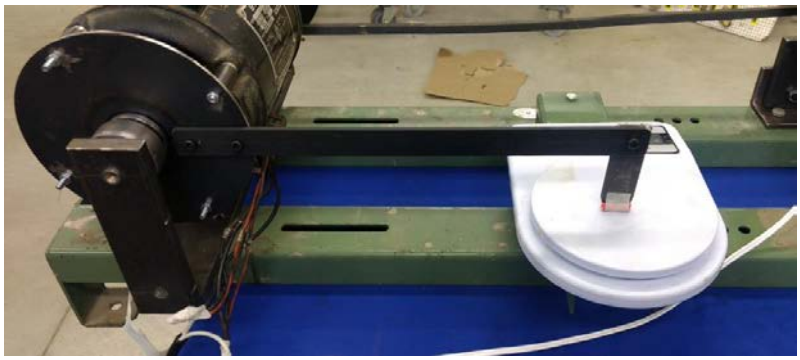
Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste equipamento, o motor elétrico de indução monofásico, com a carcaça modificada, possui liberdade para girar em torno do seu eixo central. No eixo de acionamento está fixada uma polia V que, através de uma correia V, é conectada à polia do alternador. Para permitir o ajuste do tensionamento da correia, foi adotado um sistema no qual o alternador é inserido em uma barra roscada, que por sua vez, é fixada à estrutura, sendo possível que o alternador se mova em torno deste eixo. Assim, o posicionamento da polia 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 alternador.

Para a determinação da intensidade da força de reação da carcaça, foi utilizada uma balança digital e desenvolvido o braço mecânico representado na Figura 47. O braço de torque foi fixado a um dos discos laterais, perpendicular ao eixo de rotação do motor e na posição

horizontal. Na extremidade do eixo e na direção da linha de ação do conjugado de reação da carcaça, foi fixada uma barra vertical, a qual está apoiada na superfície da balança.

Figura 477 – Sistema de medição do conjugado de reação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a fixação do braço mecânico na carcaça, a distribuição de massas em torno do eixo de rotação foi alterada. Em consequência deste fator, ainda que o sistema não esteja ligado, há uma força inicial na extremidade da haste mecânica. Portanto, antes de iniciar o experimento, deve-se eliminar este efeito através do zeramento da balança.

5.2 A REAÇÃO DA CARCAÇA

Com o motor em funcionamento e inicialmente sem carga elétrica no alternador, pode-se observar que, imediatamente após o motor ser acionado, a massa indicada na balança foi aumentada rápida e continuamente até que atingisse um valor em torno de 1200 a 1350 g. Este pico no valor da massa deve-se ao fato de que na partida do motor, o torque para vencer a inércia das massas girantes do motor e do alternador é mais elevado do que àquele necessário ao funcionamento do sistema e 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, a massa medida foi de aproximadamente 100 g. Esta massa representa a força devido à potência necessária para suprir as perdas no sistema, isto é, perdas mecânicas, perdas no núcleo e perdas suplementares, tanto do motor quanto do alternador.

Posteriormente, foi realizada um ensaio adicionando-se diferentes cargas elétricas no alternador. A barra de torque reage instantaneamente à presença da carga, aumentando a força na balança e, consequentemente, o torque na carcaça, como resposta ao aumento de torque no

eixo do motor para gerar a energia então demandada. Para cada carga foram realizados os seguintes procedimentos:

1. Acionamento do motor;
2. Observação da força de reação da carcaça do sistema sem carga;
3. Zeramento da balança;
4. Acionamento da fonte responsável por gerar o campo magnético no alternador;
5. Medição da força de reação da carcaça para a carga.

Como a tara da balança foi acionada após a estabilização da velocidade de rotação com o sistema em funcionamento, a força medida no passo 5 corresponde exclusivamente ao torque necessário para o funcionamento da carga, não incluindo as perdas do sistema.

Após obtenção dos resultados do experimento e conhecendo-se o valor da velocidade de rotação do motor (especificação do fabricante) e da distância entre a linha de ação da força de reação e o centro de rotação, pelas Equações 5 e 6, foi realizado o cálculo do torque de reação de carcaça e da potência gerada pelo motor para funcionamento da carga, respectivamente. Os resultados podem ser vistos na tabela 3.

$$T = F \times R \tag{5}$$

$$P_{mec} = \frac{2\pi n\, T}{60} \tag{6}$$

Dados:
R = 0,370 m
n = 3500 rpm

Sendo:
P = potência mecânica fornecida pelo eixo motor
R = distância entre a linha de ação da força de reação e o centro de rotação [m]
F = força de reação da carcaça [N]
T = torque de reação da carcaça [N.m]
n = rotação do motor (especificação do fabricante) [rpm]

Tabela 3 – Ensaio com carga elétrica

CARGA	FORÇA (N)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (W)
Motor DC (sem carga)	0,029	0,1053	38,58
Bobina	0,042	0,1524	55,87
Lâmpada	0,076	0,2722	99,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados obtidos para a lâmpada e tendo como base a potência elétrica (60 e 55 W) e a tensão de alimentação (12V) de especificação do fabricante, pode-se observar que a potência calculada, que é gerada pelo motor para o funcionamento da lâmpada, foi de 99,78 W, resultado consideravelmente próximo ao valor especificado (105 W), portanto é possível provar a validade do ensaio para aplicação em cálculos de potência de um motor elétrico de indução monofásico através do efeito da reação de carcaça.

A diferença entre o valor obtido do ensaio e o especificado para a lâmpada ocorre pois há diversos fatores que influenciam o resultado do experimento, tais como, os rendimentos do motor e alternador, bem como as perdas associadas; a tensão de saída do alternador, a qual embora tenha sido controlada durante o experimento através do multímetro instalado, não permaneceu rigorosamente constante e foi ajustada o mais próximo possível da tensão necessária, porém com pequenas diferenças; e por fim, a medição da massa, que foi feita através da balança digital instalada na estrutura, exposta às vibrações do sistema.

Pode-se também observar, em comparação ao funcionamento do freio de Prony, que o binário de forças desenvolvido no rotor/estator (eixo/carcaça) deste sistema desenvolvido atua no sentido contrário ao eixo, através da reação da carcaça. Por outro lado, no sistema do freio de Prony, o tambor é acoplado no próprio eixo do motor e o binário de forças atua no mesmo sentido de rotação do eixo, o qual é determinado pelo atrito entre a superfície da cinta do tambor e a superfície do eixo. Para um motor ensaiado por freio de Prony, por ser este acoplado diretamente no eixo, não é necessário a introdução de uma carga mecânica, uma vez que o freio impõe o torque reativo. Destaca-se que um mesmo motor pode ser submetido a ambos dispositivos simultaneamente e, sendo assim, as forças indicadas devem ser de mesma intensidade e com sentidos opostos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho proposto apresentou o desenvolvimento de um dispositivo para determinação da potência mecânica efetiva de um motor elétrico de indução monofásico pela utilização de um freio dinamométrico. Os ensaios forneceram o valor da intensidade da força que age na carcaça do motor em três situações distintas, onde três diferentes cargas elétricas foram acopladas ao gerador, provando, portanto, a existência do efeito da reação de carcaça. A partir dos resultados, foi possível determinar a potência mecânica requerida do motor. Analisando para o caso em que a lâmpada foi utilizada como carga, tendo como base a potência nominal fornecida pelo fabricante e considerando as possíveis perdas do sistema, bem como os erros experimentais pertinentes e anteriormente discutidos, os resultados se mostraram conforme esperado, a potência calculada é muito próxima da potência especificada. Desta forma, o método proposto neste trabalho é valido e satisfatório.

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se aplicar o desenvolvimento de um método semelhante para o estudo da reação de carcaça em uma máquina geradora, que se comporta de forma análoga ao motor elétrico, neste caso, porém, o sentido de rotação da carcaça ocorre no mesmo sentido de rotação do rotor. Pode-se, também, incluir a utilização de células de carga para uma medição mais precisa da força de reação atuante, bem como a análise estatística dos dados obtidos.

REFERÊNCIAS

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

BOSCH REXROTH. **Hägglunds torque arm drive system:** the all in one drive solution. 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.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 554 p. v. 1.

BRUNO, E. P. **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 do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

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

DEMOTOR. **Motor universal.** Disponível em: <https://pt.demotor.net/motores-eletricos/motores-universais>. Acesso em: 15 nov. 2018.

GRUPO WEG. **Motores elétricos:** guia de especificação. 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.

KOLLMORGEN. **Motores CA síncronos da série ST/SN.** Disponível em: <https://www.kollmorgen.com/pt-br/products/motors/synchronous/st-sn-pacific-scientific-/st-sn/> Acesso em: 15 nov. 2018.

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

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Como funciona o motor universal.** Disponível em: < https://www.mecanicaindustrial.com.br/como-funciona-o-motor-universal/> Acesso em: 15 nov. 2018

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas:** uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1030 p.

O MECÂNICO. **Manutenção preventiva:** coxins. Disponível em: <https://www.omecanico.com.br/ed-282-manutancao-preventiva-substituicao-dos-coxins-do-mille-2007-2008/> Acesso em: 15 nov. 2018.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R. **Resistência dos materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: Makron Books, 1999. 793 p.

GONÇALVES, H. N. B. **Projecto integrado de máquinas eléctricas de indução/conversores estáticos de potência**. 2006. 160 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 637 p.

MARTIGNONI, A. **Máquinas de corrente alternada**. 7. ed. São Paulo: Globo, 2005. 410 p.