



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**VINICIUS CANHISARES MAZUCA**

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE REBOBINAMENTO PARA  
CONVERTER MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO EM MONOFÁSICO**

**Guaratinguetá – SP**

**2014**

VINICIUS CANHISARES MAZUCA

PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE REBOBINAMENTO PARA CONVERTER  
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO EM MONOFÁSICO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, conforme exigência parcial para obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Inácio Bianchi

Guaratinguetá – SP

2014

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M476p | <p>Mazuca, Vinicius Canhisares</p> <p>Proposta de uma metodologia de bobinamento para converter motor de indução trifásico em monofásico / Vinicius Canhisares Mazuca . – Guaratinguetá , 2014</p> <p>81 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 79-81</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014</p> <p>Orientador: Prof. Dr.. Inácio Bianchi</p> <p>1. Motores elétricos 2. Motores elétricos de indução I</p> <p>.Título.</p> <p>CDU 621.313.13</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE REBOBINAMENTO PARA  
CONVERTER MOTOR TRIFÁSICO EM MONOFÁSICO**

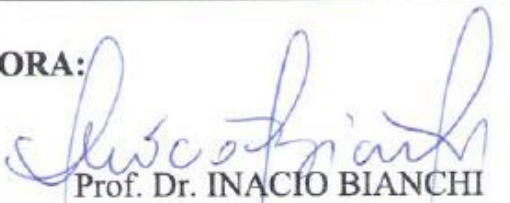
**VINICIUS CANHISARES MAZUCA**

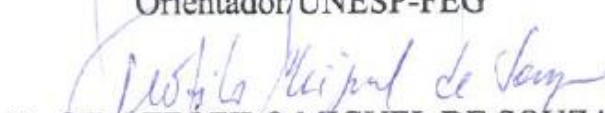
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

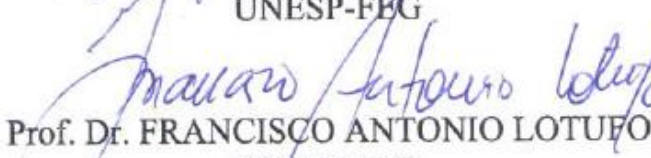
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. INACIO BIANCHI  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. TEOFILO MIGUEL DE SOUZA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO  
UNESP-FEG

de modo especial, aos meus pais David e Marlene, aos meus irmãos Gustavo e Felipe e minha namorada Vitória, que sempre apoiaram e incentivaram minha vida acadêmica , além de me providenciarem alicerce nos momentos em que precisei .

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus*, fonte da vida e da salvação. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família, minha namorada e meus amigos, mas muito mais pelos bens eternos,

ao meu orientador *Prof. Dr. Inácio Bianchi*, que jamais deixou de me encorajar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus caros examinadores *Prof. Dr. Teófilo Miguel* e *Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo*, que se dispuseram a formar a banca para avaliar o trabalho

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos meus pais *David* e *Marlene*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

aos meus irmãos *Gustavo* e *Felipe*, que se propuseram a alegrar até meus dias mais tristes

à minha querida namorada *Vitória*, por ter me ajudado com muito carinho a passar por tudo.

MAZUCA, V. C. **Proposta de uma metodologia de rebobinamento para converter motor de indução trifásico em monofásico**. 2014. 81 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## **RESUMO**

Neste trabalho aborda-se a conversão de um motor de indução trifásico em monofásico através do processo de rebobinamento de seu estator. Apresenta-se uma metodologia para o cálculo deste rebobinamento levando em consideração os parâmetros construtivos do motor, como número de ranhuras e número de polos, por exemplo. Ressaltam-se os princípios de funcionamento dos motores de corrente contínua para introduzir a lógica envolvida no cálculo dos tipos de enrolamentos imbricado e enrolado. A construção do estator para o motor de indução trifásico geralmente utiliza o enrolamento do tipo imbricado, o que será utilizado também no monofásico para realizar a conversão. O processo de rebobinagem é amplamente utilizado para reconstrução de motores elétricos industriais e residenciais que sofreram algum dano ou apresentam falhas com o uso. Portanto, muitos motores trifásicos que são descartados ou inutilizados poderiam ser reaproveitados utilizando o método descrito neste trabalho para contribuir com a eficiência energética ou meramente economizando recursos e reduzindo impactos ambientais em utilizações monofásicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rebobinagem de motores elétricos. Cálculo para enrolamento de motores. Enrolamentos imbricado e ondulado. Motores de indução trifásicos e monofásicos.

MAZUCA, V. C. **Proposal of a rewinding methodology to convert three-phase motors into single-phase.** 2014. 81 p. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

This paper proposes the conversion of a three-phase induction motor into single phase through rewinding its stator. It presents a methodology to calculate this rewinding process considering the constructive parameters of the, such as number of slots and number of poles, for instance. The operating principles of DC motors are highlighted to introduce the logic involved in the calculation of lap and wave windings. The construction of the stator three-phase induction motor generally uses the lap winding, which is also used in single phase to perform the conversion. The rewinding process is widely used for reconstruction of industrial and residential electric motors that have suffered damage or present flaws with use. Therefore, many three-phase electric motors that are discarded or disposed of could be recovered by the method described in this work for a purpose that contributes to energy efficiency or simply saving resources in single-phase uses.

**KEYWORDS:** Electrical motors windings. Winding scheme. Lap and wave windings. Three-phase and single phase electric motors.

## SUMÁRIO

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                          | <b>9</b>  |
| 1.1 MOTORES DE INDUÇÃO .....                                                        | 9         |
| 1.2 MOTIVAÇÃO .....                                                                 | 9         |
| 1.3 OBJETIVO.....                                                                   | 10        |
| 1.4 METODOLOGIA DO TRABALHO.....                                                    | 10        |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                                      | 11        |
| <b>2. CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE MÁQUINAS ELÉTRICAS .....</b>                         | <b>13</b> |
| 2.1 DEFINIÇÃO .....                                                                 | 13        |
| 2.2 CLASSIFICAÇÃO .....                                                             | 13        |
| 2.3 HISTÓRICO E CONCEITOS SOBRE ELETROMAGNETISMO .....                              | 17        |
| <b>3. O MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA .....</b>                                        | <b>26</b> |
| 3.1 ASPECTOS FUNCIONAIS.....                                                        | 27        |
| 3.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....                                                     | 30        |
| 3.3 ENROLAMENTOS DE ARMADURA.....                                                   | 33        |
| <b>3.3.1 Passos dos enrolamentos .....</b>                                          | <b>40</b> |
| <b>3.3.2 Metodologia para cálculo de enrolamento imbricado .....</b>                | <b>45</b> |
| <b>3.3.3 Metodologia para cálculo de enrolamento ondulado.....</b>                  | <b>52</b> |
| <b>4. O MOTOR DE INDUÇÃO.....</b>                                                   | <b>57</b> |
| 4.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....                                                     | 58        |
| 4.2 ASPECTOS FUNCIONAIS.....                                                        | 59        |
| <b>4.2.1 Motor de indução monofásico com partida por fase dividida .....</b>        | <b>65</b> |
| <b>4.2.2 Motor de indução monofásico com partida por capacitor .....</b>            | <b>66</b> |
| <b>4.2.3 Motor de indução monofásico com partida por capacitor permanente .....</b> | <b>67</b> |
| <b>4.2.4 Motor de indução monofásico com partida por duplo capacitor .....</b>      | <b>68</b> |
| <b>5. METODOLOGIA.....</b>                                                          | <b>70</b> |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b> | <b>77</b> |
| <b>7. CONCLUSÕES.....</b>           | <b>78</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>            | <b>79</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores de indução monofásicos e trifásicos estão presentes em larga escala nos diversos tipos de atividades domésticas e industriais, por terem vantagens econômicas em termos de custo, manutenção e vida útil em relação aos demais.

Esses motores não possuem comutador, escovas, porta-escovas, nem contatos entre rotor e estator e, por isso, são relativamente mais simples para construir e possuem menores taxas de manutenção, o que proporciona maior vida útil ao motor.

A principal utilização de motores de indução monofásicos é residencial e pode incluir cortadores de grama, máquinas de lavar, bombas de pressurização hidráulica, entre outros. No caso dos motores de indução trifásicos, a principal utilização é industrial e pode envolver aplicações em locais remotos, sendo também indicados para situações severas de trabalho como poeira e outros materiais abrasivos.

O rotor de uma máquina deste tipo não possui contato elétrico externo, pois a corrente em seus condutores é gerada totalmente pelo fenômeno da indução, explicando assim seu nome. Também são conhecidos como motores assíncronos, denotando a diferença em relação aos motores síncronos, uma vez que a velocidade do campo magnético criado pelas correntes do estator e a velocidade de giro do rotor não estão em sincronia.

Os motores de indução, tanto polifásicos quanto monofásicos, são muito simples e fáceis de operar, porém a tecnologia envolvida no princípio de funcionamento se apresenta um nível de sofisticação maior quando comparada com outros motores.

### 1.2 MOTIVAÇÃO

A principal motivação deste trabalho, pela perspectiva do aluno, é a construção e/ou reiteração didática de alguns aspectos teóricos concebidos durante o processo de graduação em

engenharia elétrica, especificamente relacionados aos termos de conversão energética utilizando máquinas elétricas rotativas. O estímulo pertinente ao estudo está associado ao esclarecimento alguns conceitos básicos – como classificação de máquinas elétricas – e também de aspectos mais aprofundados – como seu funcionamento e construção – focando-se continuamente no tipo de máquina especificada como resultado deste trabalho.

Motiva-se também com proporcional consideração, o fato de que muitas máquinas desgastadas pelo uso são julgadas impróprias a este fim e descartadas em “lixões” ou “ferros-velhos”, onde são desmontadas para revenda dos valiosos materiais metálicos, ou deixados para serem corroídos pelas ferrugens do tempo. Ao invés de serem inutilizadas, ora pelo processo de desmanche ora pelo de oxidação, estas engenhosas criações poderiam ser adaptadas através de processos de bobinagem e posteriormente reaproveitadas.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que possibilite o cálculo dos parâmetros envolvidos no processo de rebobinamento dos enrolamentos presentes nos motores de indução trifásicos, a fim de torná-los monofásicos.

Logo, o resultado final apresenta um processo, ou uma lógica, que possibilite essa conversão utilizando somente o rebobinamento do motor.

### 1.4 METODOLOGIA DO TRABALHO

O trabalho faz uso da reiteração de conceitos básicos e fatos históricos do eletromagnetismo abordados durante o curso de engenharia elétrica como método didático para conduzir o leitor a entender o princípio de funcionamento dos motores elétricos em geral. Explica-se o funcionamento de motores de corrente contínua, dando ênfase aos cálculos envolvidos para a execução dos dois tipos de enrolamentos mais utilizados em seu rotor.

Como será exposto mais adiante, os tipos de enrolamento possíveis para o estator dos motores de indução são os mesmos para o rotor dos motores de corrente contínua. Apesar disto, o funcionamento dos primeiros motores requer um nível de abstração maior em comparação com o dos últimos, dificultando a assimilação da teoria envolvida nos enrolamentos de seu estator. Por isto, a compreensão destes enrolamentos para o motor de corrente contínua neste momento específico é fundamental, visto que é mais intuitivo ao leitor compreender os tipos de enrolamentos para máquinas mais simples.

Após os motores de corrente contínua, apresenta-se os principais conceitos funcionais dos motores de indução trifásicos e monofásico. Prosseguindo, explica-se o método para a rebobinagem do estator de um motor elétrico trifásico convertendo-o em monofásico. Por fim, são discutidas algumas considerações finais e conclusões obtidas durante o estudo para este trabalho.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é apresentado em 8 Capítulos cujos conteúdos são sucintamente descritos nesta seção.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução do tema, explica de forma sucinta e clara os objetivos do trabalho e sua motivação, e elucida a estrutura do trabalho dividida em capítulos, explicando brevemente o assunto abordado em cada um.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos iniciais a respeito das máquinas elétricas, tais como definição clássica e classificação, bem como um resumo do histórico e explicação da indução eletromagnética, o fenômeno que possibilita a existência das máquinas elétricas.

O Capítulo 3 explica o funcionamento do motor de corrente contínua, suas partes constituintes e os possíveis enrolamentos para este tipo de motor. Aborda-se também os cálculos envolvidos nos enrolamentos imbricado e ondulado para rotores de motores de corrente contínua.

O Capítulo 4 explica o funcionamento dos motores de indução trifásico e monofásico, suas respectivas partes constituintes e os tipos de partida para motores monofásicos.

O Capítulo 5 propõe um método para rebobinar o estator de um motor de indução trifásico com o intuito de transforma-lo em monofásico.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho.

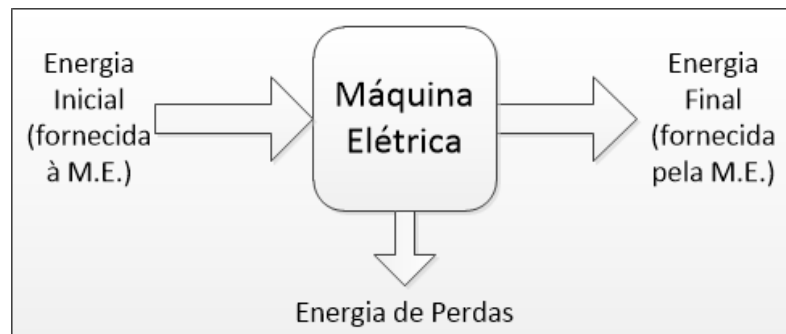
O Capítulo 8 mostra todas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

## 2. CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE MÁQUINAS ELÉTRICAS

### 2.1 DEFINIÇÃO

As máquinas elétricas, pela definição clássica, são dispositivos ou sistemas eletromecânicos destinados a efetuar uma conversão de energia através do fenômeno eletromagnético conhecido como indução, de maneira que pelo menos uma das formas de energia envolvida na transformação seja elétrica (BRANDÃO, 1984), conforme a Figura 1.

Figura 1 – Conceito de máquina elétrica.



Fonte própria

Assim, é razoável iniciar a classificação das máquinas quanto à sua conversão de energia, ou seja, em relação às diferentes propriedades energéticas fornecidas à máquina e recebidas dela.

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO

A Figura 2 apresenta uma classificação generalizada dos diversos tipos de máquinas elétricas, tendo em vista a transformação de energia e seu princípio de funcionamento, conforme as três principais categorias de máquinas:

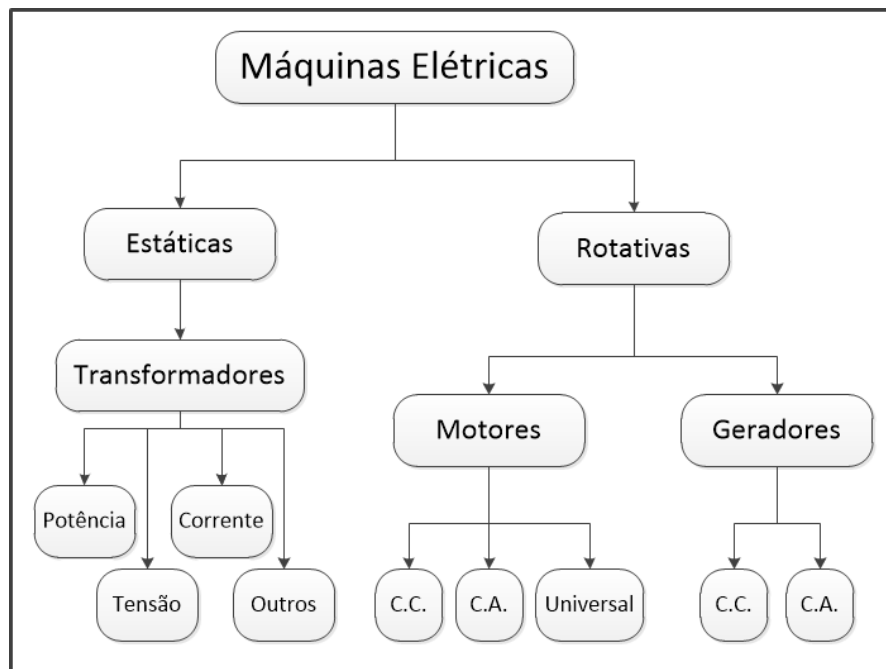
- Motores Elétricos

- Geradores Elétricos
- Transformadores

As máquinas elétricas que transformam energia elétrica em mecânica são chamadas de motores elétricos, enquanto as que transformam energia mecânica em elétrica são chamadas de geradores elétricos (CHAPMAN, 2012). Os motores e geradores elétricos são geralmente classificados como máquinas elétricas rotativas e possuem a propriedade de serem reversíveis, ou seja, uma única máquina deste tipo operar tanto como motor quanto gerador (SEIXAS, 2012).

Os transformadores são máquinas elétricas classificadas como estáticas que transformam a energia elétrica de um circuito de corrente alternada em energia elétrica a outro circuito. São caracterizadas como máquinas elétricas, pois, apesar de não possuírem partes girantes (não constitui um dispositivo eletromecânico), também utilizam o princípio de indução eletromagnética para transformação de energia (FITZGERALD, 2006).

Figura 2 – Classificação básica das máquinas elétricas.



Fonte própria

A Figura 2 tem o intuito de situar basicamente as diversas configurações possíveis para conversão de energia envolvendo eletricidade, uma das formas mais simples e comum de classifica-las, na qual cada ramo pode ser discriminado amplamente de acordo com as diferentes

configurações, aspectos construtivos e parâmetros específicos de cada máquina. Uma forma de especificação é realizada na Figura 3, que aborda com maiores detalhes as classificações dos motores elétricos mais utilizados (não são relacionados os motores de aplicações reduzidas) de acordo com sua fonte de alimentação.

A Figura 3 também pretende categorizar os motores de acordo com um critério frequentemente utilizado – a fonte de alimentação – omitindo assim o universo tecnológico dos motores determinado por configurações específicas, como por exemplo, aspectos construtivos do rotor, configurações de ímãs permanentes, tipos de enrolamento, métodos de resfriamento, entre outros.

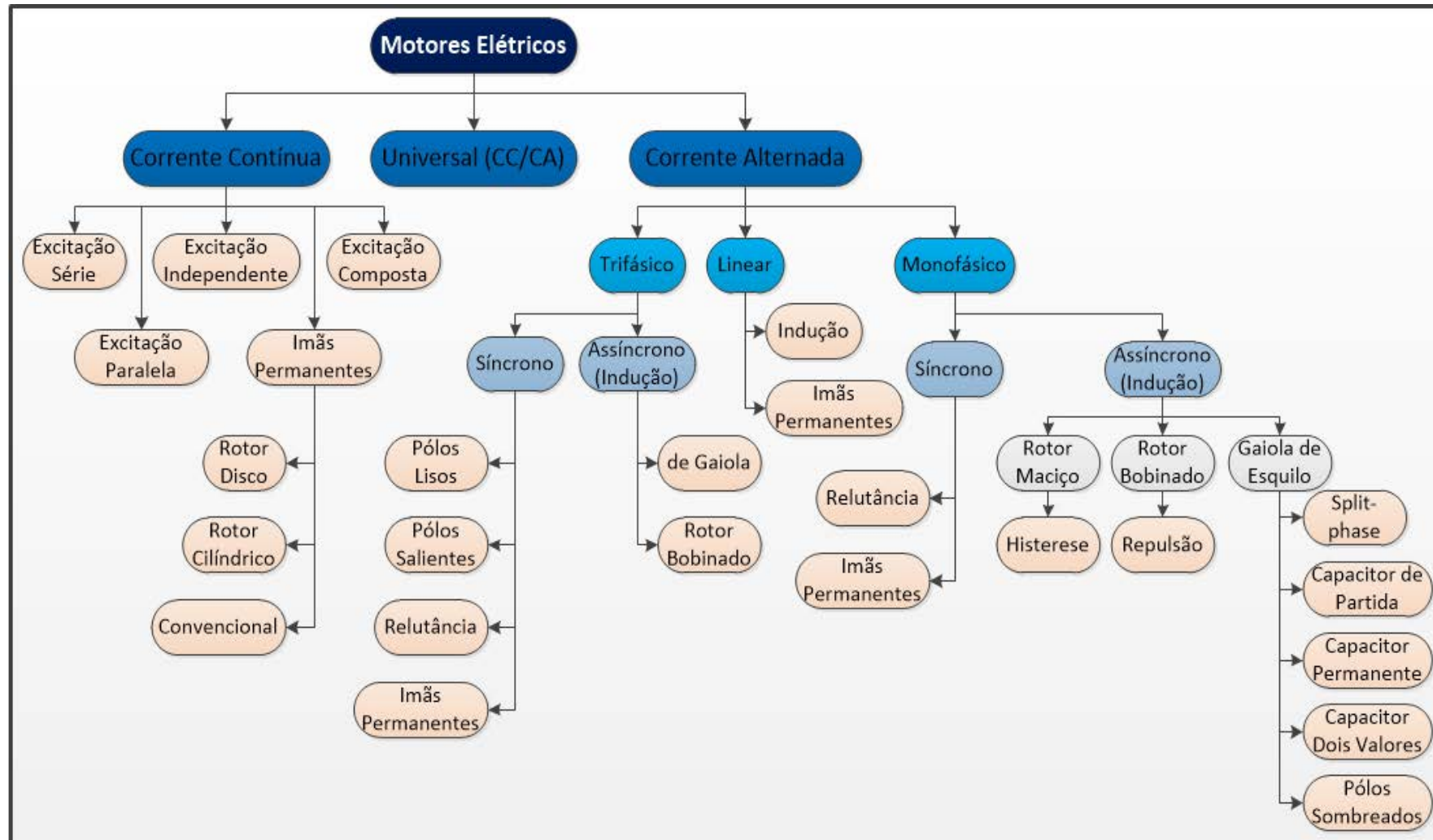
Motores de corrente contínua, popularmente denominados MCC, representam um custo de instalação e manutenção mais elevado em relação aos de corrente alternada e requerem uma fonte de corrente contínua ou um conversor AC/DC para seu funcionamento. Sua velocidade pode ser ajustada entre limites abrangentes e pode ser controlada com flexibilidade e precisão (WEG, 2014). Entretanto, segundo a Ohio Electric Motor (2011), a maior parte dos motores DC são construídos com escovas e comutadores, que contribuem para a alta recorrência de manutenção, limitação da velocidade máxima e redução da expectativa de vida útil do motor.

Motores de corrente alternada são utilizados em maior escala devido ao baixo custo e ao fato de que, normalmente, a distribuição de energia elétrica é feita em corrente alternada. Basicamente, existem dois tipos de motores de corrente alternada: síncronos e assíncronos (frequentemente chamados de motores de indução). Motores síncronos mantêm sua velocidade constante apesar da variação da carga, enquanto os assíncronos possuem velocidade dependente da variação da carga a ela submetida (WEG, 2013).

Motores universais são aqueles que funcionam tanto com corrente alternada quanto com corrente contínua e não entrarão no escopo deste trabalho.

Observa-se que, embora seja grande a variedade de geradores e motores de CC e CA, o funcionamento de todos estes equipamentos depende basicamente da interação de campos magnéticos e condutores percorridos por corrente elétrica (VILLAR, 2006). Assim, dependendo da aplicação desejada, definem-se as diversas configurações e especificações do motor ou gerador a ser utilizado.

Figura 3 – Classificação dos principais motores elétricos.



Fonte: (WEG, 2014).

Uma vez que o escopo deste estudo envolve o cálculo de bobinagem de motores elétricos trifásicos, será dado maior enfoque aos motores de corrente alternada, mais especificamente ao motor de indução trifásico. Contudo, as próximas seções apresentarão uma revisão conceitual de motores CC, porquanto os conceitos como funcionamento, configurações e bobinagem do motor CC serão requisitados durante o prosseguimento do estudo.

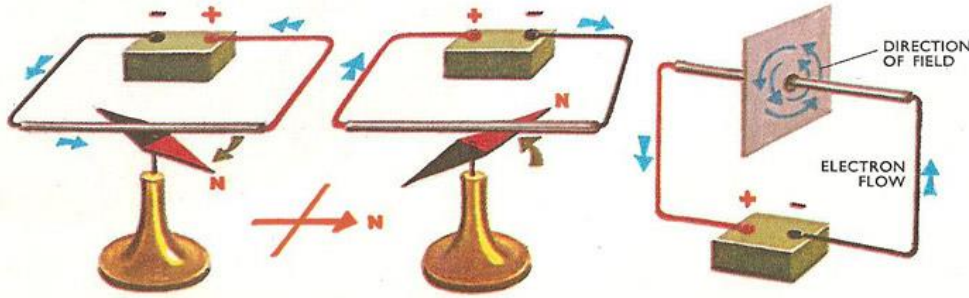
## 2.3 HISTÓRICO E CONCEITOS SOBRE ELETROMAGNETISMO

Conforme dito no final do item anterior, os motores elétricos utilizam o mesmo princípio eletromagnético para conversão de energia elétrica em mecânica – a indução eletromagnética. Portanto, será feita aqui uma revisão histórica dos conceitos envolvidos neste princípio e através dela será possível entender como estes conceitos são utilizados para gerar movimento rotacional em uma bobina condutora de energia elétrica.

Inserido na corrente filosófica germânica *Naturphilosophie*, a qual via um universo que buscava a unificação dos fenômenos da natureza como um todo integrante, o dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) já suspeitava que uma corrente elétrica pudesse interagir com ímãs antes de ter descoberto o eletromagnetismo.

Ao forçar uma corrente elétrica constante através de um fio condutor paralelo a uma agulha magnética que estava orientada ao longo de um meridiano magnético terrestre, Oersted observou que a agulha era defletida de sua posição original. Tal descoberta foi descrita na Academia Real de Ciências da França em 4 de Setembro de 1820, estabelecendo assim a primeira relação entre eletricidade e magnetismo (CHAIB; ASSIS, 2007). Este fenômeno observado por Oersted na agulha sugere a presença de um campo magnético gerado pela passagem de corrente no fio metálico, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Experiência de Oersted.



Fonte: (Darling ,1999).

Esta descoberta desencadeou grande interesse na comunidade científica da época e, rapidamente, muitos outros pesquisadores passaram a se aprofundar no tema. Mais tarde no mesmo ano, Jean-Baptiste Biot e Félix Savart propuseram uma fórmula matemática para calcular a intensidade do campo magnético em um determinado ponto no espaço através de um elemento diferencial de corrente, a lei de Biot-Savart. Esta pode ser descrita pela equação (1), que representa a forma diferencial da lei de Biot-Savart, ou seja, é possível integrá-la para encontrar o valor da densidade do campo magnético  $B$ . Na equação (1),  $d\vec{B}$  representa o elemento diferencial de campo eletromagnético,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo,  $I$  a corrente elétrica,  $d\vec{L}$  o elemento diferencial de comprimento ao longo do trajeto da corrente  $I$ ,  $\hat{a}_r$  o versor que representa a distância  $r$  entre o elemento diferencial de comprimento  $d\vec{L}$  ao ponto de atuação do campo eletromagnético (ponto onde  $d\vec{B}$  será calculado).

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{L} \times \hat{a}_r}{r^2} \quad (1)$$

André-Marie Ampère também se entusiasmou com as descobertas de Oersted, pesquisando e desenvolvendo uma fórmula conhecida como a lei circuital de Ampère, que permite calcular o campo magnético associado a uma distribuição estacionária de corrente (invariável no tempo), e pode ser considerada uma aplicação da lei de Biot-Savart para um caso onde há simetria (por exemplo, um círculo ao redor de um fio condutor).

A lei circuital de Ampère, descrita pela equação (2), estabelece que a integral de linha da densidade de fluxo magnético ao longo de uma curva plana fechada (circunferência) é igual à permeabilidade no vácuo vezes a corrente total atravessando a área limitada por este círculo

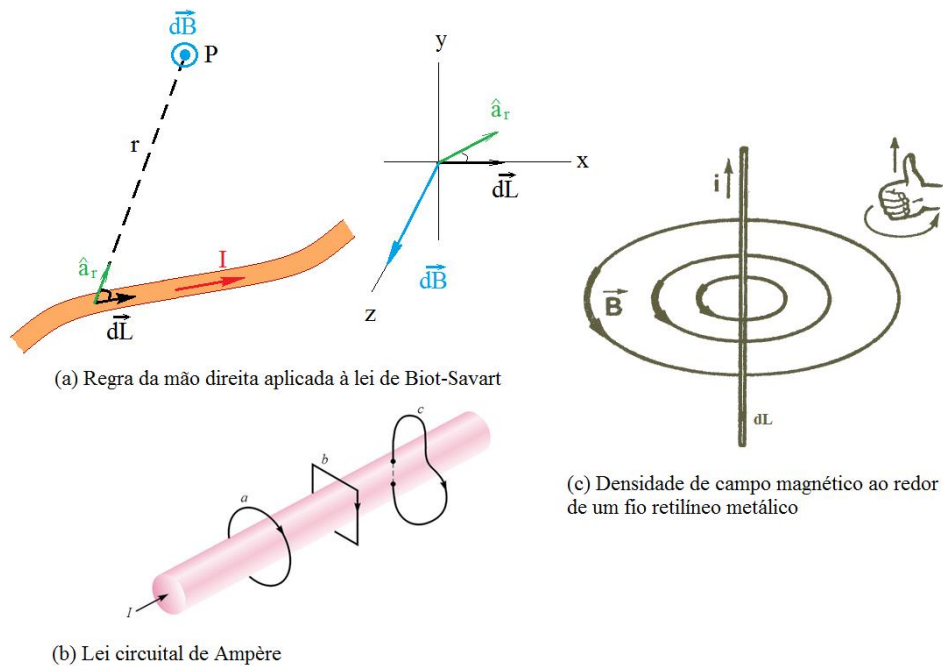
(HAYT; BUCK, 2003). Algum tempo mais tarde, Maxwell generalizou esta lei, tornando-a válida também para campos elétricos variantes. Nessa equação,  $B$  representa o campo eletromagnético,  $dL$  o elemento diferencial de comprimento,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo, e  $I$  a corrente elétrica.

$$\oint B \cdot dL = \mu_0 \cdot I \quad (2)$$

As leis de Biot-Savat e Ampère, em conjunto, comprovam matematicamente os resultados de Oersted com a agulha magnética e ainda propõem que o campo magnético  $B$  em um determinado ponto P a uma distância  $r$  ao redor de um fio condutor longo retilíneo e percorrido por uma corrente  $I$  seja representado pela equação (3). A Figura 5 ilustra o significado físico estas três equações.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \quad (3)$$

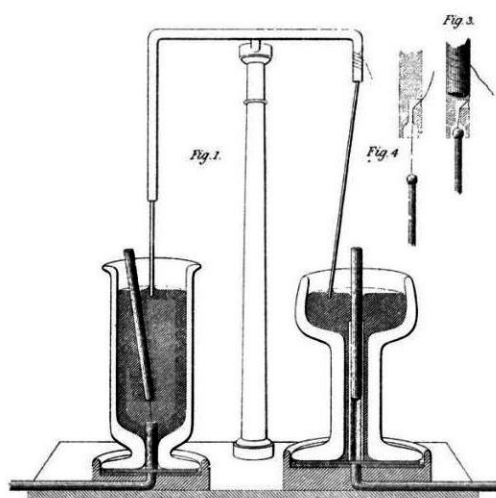
Figura 5 – Primeiras formalizações pertinentes às relações entre eletricidade e magnetismo .



Fonte: (Hayt; Buck, 2003).

Em 1844, o inglês Michael Faraday (1791-1867) publicou um artigo sobre seu experimento que mostrava a conversão de energia elétrica em mecânica através do eletromagnetismo. A Figura 6 mostra a montagem deste ensaio, no qual um fio pendurado livremente é mergulhado em uma taça de mercúrio (metal condutor líquido), onde um ímã permanente foi colocado. Ao receber um estímulo de uma corrente elétrica, o fio rodava em torno do ímã, evidenciando a geração de um campo magnético circular ao redor do fio.

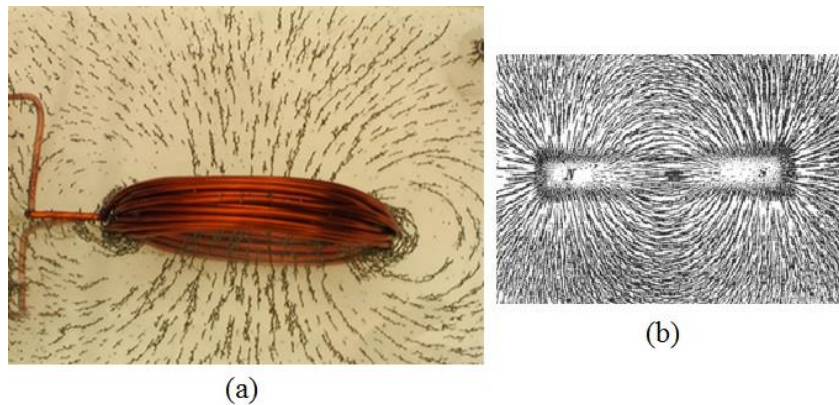
Figura 6 – Experimento de Faraday demonstrando rotação eletromagnética.



Fonte (Faraday ,1844).

Faraday também observou que uma bobina percorrida por corrente elétrica se comporta como um dipolo magnético, de forma que, ao aproximá-la de um ímã, este se posicionaria adaptando-se às linhas de campo magnético gerado por aquela. Tal comportamento de dipolo magnético (ou de ímã) da bobina e as linhas de campo geradas por ela são mostrados na Figura 7.

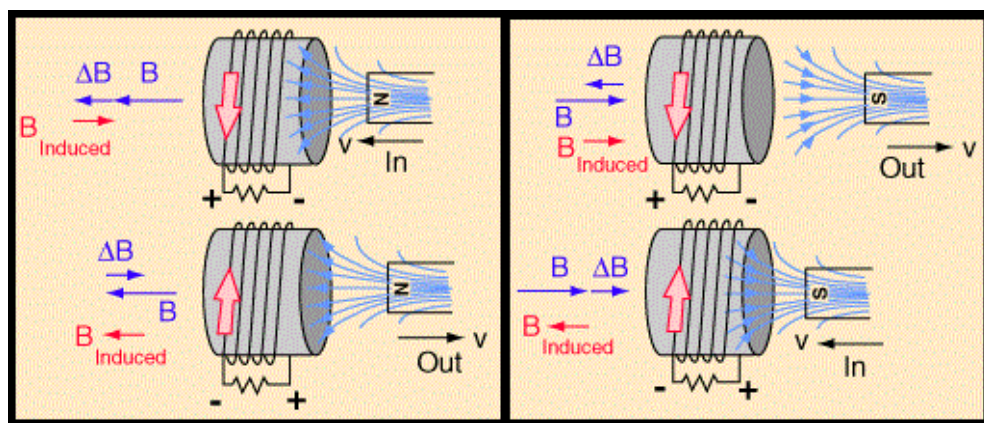
Figura 7 – Limalhas de ferro alinhadas ao campo magnético de (a) Espiras percorridas por corrente elétrica e (b) Imã.



Fontes: (Silva, 2014); (Black; Davis, 1922).

Além disso, percebeu que, ao variar um campo magnético no interior de uma bobina não alimentada, era gerada uma corrente elétrica em suas espiras. A Figura 8 apresenta este fenômeno que recebeu o nome de indução eletromagnética e pode ser descrito para uma bobina com  $N$  espiras pela equação (4). Esta equação ficou conhecida como a lei de Faraday-Neumann-Lenz, proposta por Faraday, complementada por Lenz (sentido da indução eletromagnética) e formulada matematicamente por Neumann, sendo que  $N$  representa o número de espiras e  $\phi_B$  o fluxo magnético passando através da bobina.

Figura 8 – Lei de Faraday-Neumann-Lenz aplicada a uma bobina.



Fonte: (Nave, 2012).

$$\varepsilon = -N \cdot \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t} = -N \cdot \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4)$$

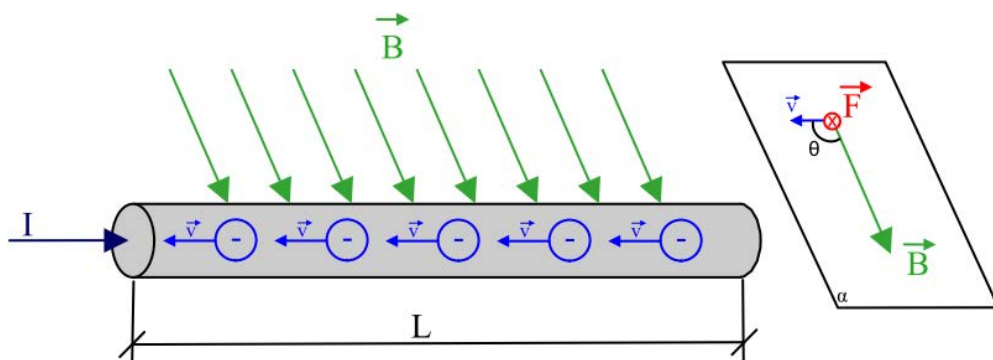
De maneira geral, a lei afirma que a corrente elétrica em um circuito fechado induzida por um campo magnético variante no tempo é proporcional ao número de linhas de campo magnético que atravessa a área envolvida no circuito por unidade de tempo. O sentido da corrente induzida tende a compensar a variação do fluxo de linhas de campo, ou seja, se opondo à variação: se o número de linhas de campo por unidade de tempo aumenta, a corrente induzida no circuito deve gerar uma quantidade de linhas de campo no sentido oposto para tentar anular o aumento, e vice-versa.

Em 1892, o físico neerlandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) escreveu a equação da força  $\vec{F}$  que inclui as contribuições simultâneas do campo elétrico e magnético atuando sobre uma carga pontual, e é descrita de forma simplificada pela equação (5), sendo que  $q$  representa a carga elétrica,  $\vec{E}$  o campo elétrico,  $\vec{v}$  a velocidade da partícula e  $\vec{B}$  o campo eletromagnético.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (5)$$

A equação da força de Lorentz pode ser simplificada ainda mais e adaptada para considerar apenas a atuação de um campo magnético com densidade  $B$  sobre um fio de comprimento  $L$  percorrido por uma corrente  $I$ , conforme a Figura 9, que apresenta um fio condutor percorrido por cargas negativas com as direções de velocidade e campo indicadas.

Figura 9 – Aplicação da equação da força de Lorentz considerando apenas a atuação do campo magnético sobre cargas se movendo em um condutor.



Fonte própria.

O sentido e a direção da força resultante são obtidos de acordo com o sinal da carga e o resultado do produto vetorial na equação. Desta forma, a direção da força resultante será sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores velocidade da carga e densidade do campo magnético, respeitando o produto vetorial entre eles, enquanto seu sentido será determinado de acordo com a polaridade da carga.

A equação (5) pode ser modificada substituindo as equações (6) e (7) e considerando um elemento diferencial de força  $d\vec{F}$  sendo gerado por um elemento diferencial de carga  $dQ$ , resultando na equação (8). As equações (6), (7) e (8) consideram os mesmos parâmetros já descritos pelas equações anteriores.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (6)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{L} \times \vec{B} = I \cdot \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ dL_x & dL_y & dL_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (8)$$

É possível utilizá-la na forma escalar, lembrando que o módulo de um produto vetorial é igual ao produto dos módulos dos vetores  $d\vec{L}$  e  $\vec{B}$  multiplicado pelo seno do menor ângulo  $\theta$  entre eles, conforme a equação (9).

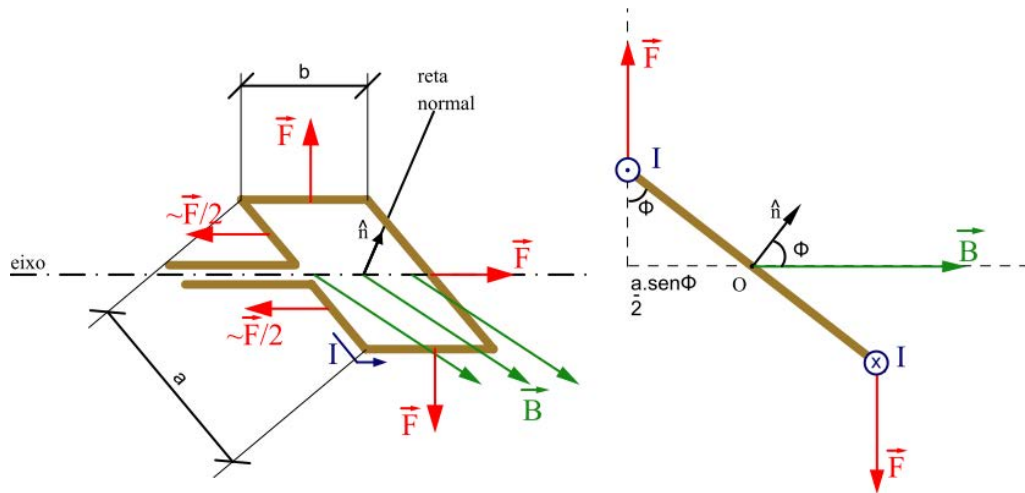
$$|d\vec{L} \times \vec{B}| = |d\vec{L}| \cdot |\vec{B}| \cdot \text{sen } \theta \quad (9)$$

Assim, substituindo a equação (9) na (8) e integrando a equação resultante, a forma escalar, ou o módulo da força de Lorentz simplificada será dada pela equação (10).

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen } \theta \quad (10)$$

A relevância destes conceitos consiste na possibilidade de transformação da energia eletromagnética em cinética rotacional, através da geração de torque, resultado da atuação de uma componente perpendicular da força agindo em um elemento ao redor de um eixo. A Figura 10 apresenta uma espira quadrada feita de material eletricamente condutor imersa em um campo magnético uniforme e percorrida por uma corrente elétrica. A equação (11) descreve o torque desenvolvido pela espira nas condições determinadas pela Figura 10, sendo que  $a$  é o comprimento transversal da bobina e  $\phi$  é o ângulo entre o vetor normal à face da espira e o campo eletromagnético  $B$  atravessando-a.

Figura 10 – Vistas de uma espira quadrada percorrida por uma corrente  $I$  e sujeita a um campo uniforme.



Fonte própria.

$$\tau = F \cdot \frac{a}{2} \cdot \sin \phi + 0 + F \cdot \frac{a}{2} \cdot \sin \phi + 0 = F \cdot a \cdot \sin \phi \quad (11)$$

Considerando um campo magnético perpendicular à corrente, a força magnética aplicada ao condutor será máxima ( $\sin 90^\circ = 1$ ), e o torque total desenvolvido por uma bobina retangular de área  $A$  com  $n$  espiras pode ser dado pela equação (12).

$$\tau = n \cdot A \cdot I \cdot B \cdot \sin \phi \quad (12)$$

O sentido do torque tende a alinhar o campo magnético externo ao dipolo magnético gerado pela corrente nas espiras, ou seja, sua direção e sentido serão determinados pelo produto vetorial entre raio – distância do eixo de rotação ao ponto de aplicação da força – e a força aplicada ao condutor ( $\vec{r} \times \vec{F}$ ).

Se, no instante em que o torque for anulado, o sentido da corrente for invertido, a configuração das forças magnéticas geradas nos condutores da bobina desenvolverá um torque movendo-a novamente buscando alinhar o campo magnético externo ao novo dipolo magnético gerado por esta inversão de corrente. Se esta inversão de corrente ocorrer regularmente, a cada vez que o torque é anulado, a bobina descreverá um movimento rotacional contínuo, constituindo assim o princípio do funcionamento de um motor elétrico.

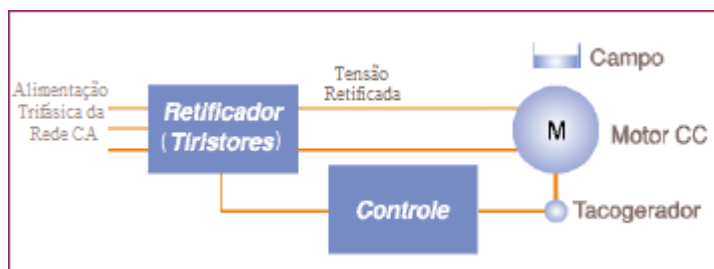
Os avanços científico e tecnológico nas áreas de eletromagnetismo, geração de energia elétrica (geradores de tensão alternada), microeletrônica e eletrônica de potência que sucederam estas descobertas proporcionaram a criação dos motores elétricos, o desenvolvimento de diversos aperfeiçoamentos para estas máquinas, e a ampliação de seus usos na indústria e inclusive em aplicações domésticas.

### 3. O MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Sabe-se que máquinas rotativas podem ser utilizadas na configuração de motor ou de gerador, mas as de corrente contínua – devido aos desenvolvimentos da eletrônica de potência na construção de retificadores capazes de gerar tensão contínua controladamente – são utilizadas na maior parte do tempo com função de motor, de forma que a operação de gerador limita-se geralmente aos instantes de frenagem e reversão do motor (SIEMENS, 2006).

Conforme mencionado anteriormente, devido à tensões normalmente alternadas na distribuição de energia elétrica, faz-se necessária a utilização de um conversor de corrente alternada em corrente contínua – os referidos retificadores – que, além de conversor CA-CC para alimentação do motor de corrente contínua, realiza o controle da sua velocidade de rotação, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Conversor CA/CC utilizado para alimentação e controle da velocidade do MCC.



Fonte: (Ottoboni, 2012).

A ilustração dada pela Figura 11 mostra um diagrama de blocos simples para o controle da velocidade do motor de corrente contínua, formado por um circuito retificador de tensão controlado (pontes retificadoras) e um circuito para controle central da sequência dos disparos dos tiristores, constituindo um sistema em malha fechada realimentado por um sensor de velocidade (tacogerador), que permite sua estabilidade em termos de controle. O valor médio da tensão retificada deve variar dentro de um intervalo preestabelecido, de forma que o controlador permitirá atuação sobre este valor, alterando assim a velocidade de rotação do motor.

Devido a esta facilidade no controle de sua velocidade através da eletrônica, o motor de corrente contínua aparece em uma infinidade de aplicações não somente industriais – como extrusoras, bobinadoras e desbobinadoras –, mas também residenciais – como gravadores,

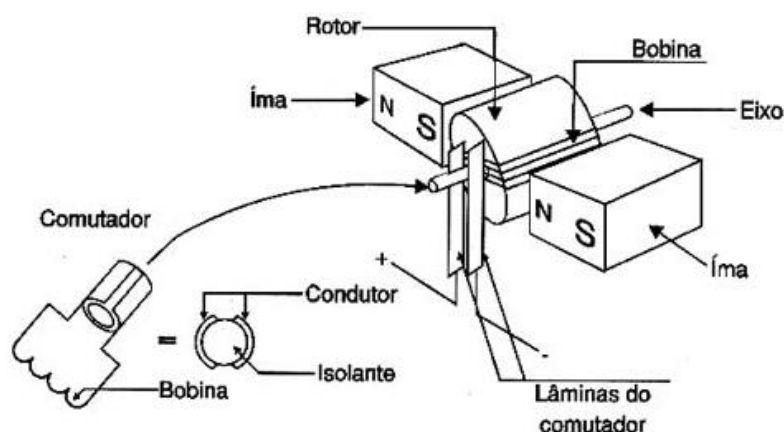
aparelhos de som, brinquedos, máquinas de impressão, elevadores – ou até mesmo em aplicações diferenciadas – como veículos elétricos. Esta seção apresenta um panorama sobre o funcionamento e os elementos construtivos dos motores de corrente contínua.

### 3.1 ASPECTOS FUNCIONAIS

O princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua é o de indução eletromagnética descrito no item 2.3, no qual uma peça chamada comutador executa a inversão da corrente nos terminais da bobina girante. O campo magnético externo que influi sobre a bobina pode ser gerado por um ímã permanente ou por uma bobina fixa que funcione como tal.

Um motor de corrente contínua possui uma bobina montada entre os polos de um campo magnético externo (ímãs permanentes ou bobina energizada), e ao redor de um núcleo feito com material de alta permeabilidade magnética – que permite um caminho de baixa relutância magnética –, pois o sentido dos dipolos no interior do núcleo será alterado regularmente. Nas extremidades da bobina está o comutador, que é acoplado ao eixo e conectado às escovas que promovem a energização da bobina, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Estrutura básica de um motor de corrente contínua.

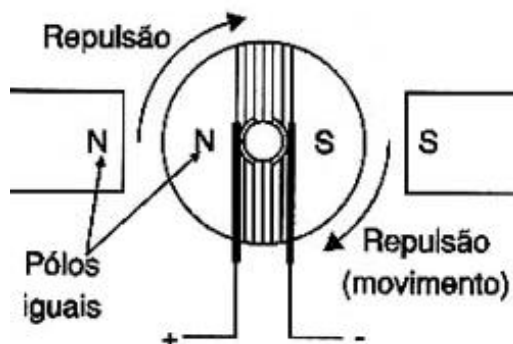


Fonte: (Braga, 2014).

Supondo que, ao ser percorrida por uma corrente, a bobina girante crie dois polos magnéticos que, no primeiro momento, estão alinhados com o campo magnético externo, porém

de maneira oposta às linhas de campo. Nesta condição, revela-se uma força de repulsão levando o conjunto móvel a um movimento rotacional, conforme indicado na Figura 13.

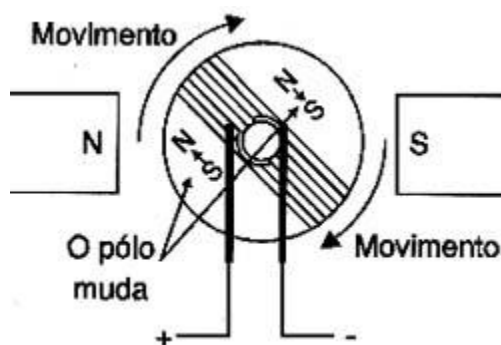
Figura 13 – Tendência de giro do rotor devido à repulsão magnética.



Fonte: (Braga, 2014).

O rotor tende a girar  $180^\circ$  para que as linhas de campo dos polos gerados no núcleo estejam adjacentes às do campo magnético externo, ou seja, que os polos norte se aproximem dos polos sul. Entretanto, no instante em que esta situação está prestes a ocorrer, o comutador inverte o sentido da corrente, fazendo com que os polos no núcleo se invertam gerando uma nova força de repulsão, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Inversão do sentido da corrente na bobina do rotor.



Fonte: (Braga, 2014).

Esta força agirá de forma a mover o rotor novamente para a posição em que estava no primeiro momento. Uma vez que a bobina já possui uma velocidade angular e uma determinada inércia rotacional, o rotor passará diretamente pelo ponto em que seria o de equilíbrio, no

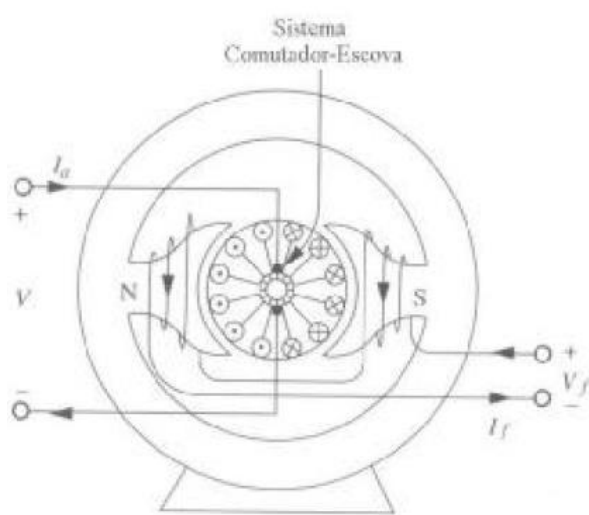
primeiro momento, para girar outros  $180^\circ$  e chegar à sua nova posição de equilíbrio, concluindo então uma volta completa.

Sua nova posição de equilíbrio seria em mais meia volta, mas nesta posição o comutador inverte novamente o sentido da corrente e, com isso, os polos se invertem outra vez, fazendo o rotor girar mais  $180^\circ$ . Desta forma, o rotor não para de girar no mesmo sentido, buscando sempre a posição de equilíbrio que é constantemente alterada pelo comutador, de modo que passa a rotacionar continuamente seguindo um mesmo sentido.

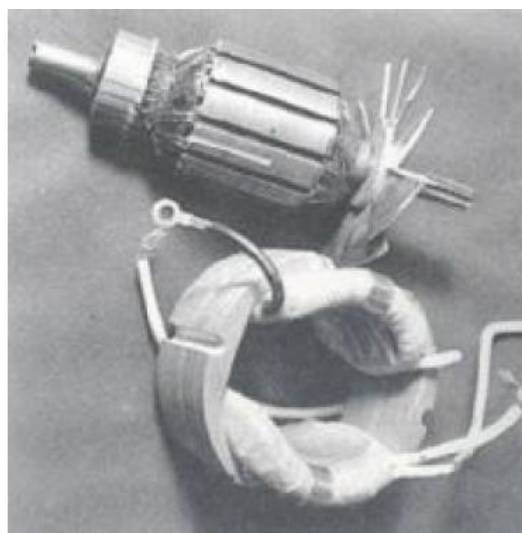
Normalmente, os motores de corrente contínua possuem diversas ranhuras, onde são colocadas bobinas com um número  $n$  de espiras, de forma que o movimento ocorra de forma mais contínua, ou seja, com menos desacelerações. Portanto, os comutadores possuem mais de duas segmentações e a comutação permite a ligação de duas bobinas em série, causando entre elas um curto-circuito momentâneo, o que ajuda a liberar energia armazenada, antes de a corrente fluir no sentido oposto.

A Figura 15 apresenta um desenho e uma foto de um motor de corrente contínua de 2 polos, contendo o esquema de ligação dos enrolamentos de armadura.

Figura 15 – Desenho (a) e foto (b) de um motor de corrente contínua de 2 polos.



(a)



(b)

Fonte: (Siemens, 2006).

### 3.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Pode-se considerar que um motor de corrente contínua possui uma parte fixa, ou estática, com polos salientes chamada de estator e uma parte móvel chamada de rotor, as quais constituem a estrutura física do motor. Há ainda uma terceira peça física chamada de carcaça, que serve como suporte para o estator formando parte de seu circuito magnético do estator.

Já do ponto de vista eletromagnético, é possível considerar esta divisão em indutor ou campo e induzido ou armadura. O indutor é responsável pela magnetização do circuito magnético do motor e, neste caso, representa a parte fixa, ou seja, o estator. O induzido é o local onde ocorre a conversão eletromecânica de energia e, neste caso, representa a parte móvel, ou seja, o rotor (SEIXAS, 2012).

A Figura 16 mostra as duas principais partes físicas constituintes do motor de corrente contínua descritas acima.

Figura 16 – Rotor e estator do motor de corrente contínua.



Fonte: (Fuentes,2005).

Segundo Kosow (1994), o rotor de um motor de corrente contínua possui quatro componentes físicos principais, a saber: eixo, núcleo, enrolamentos e comutador. A Figura 17 apresenta um rotor contendo estes componentes.

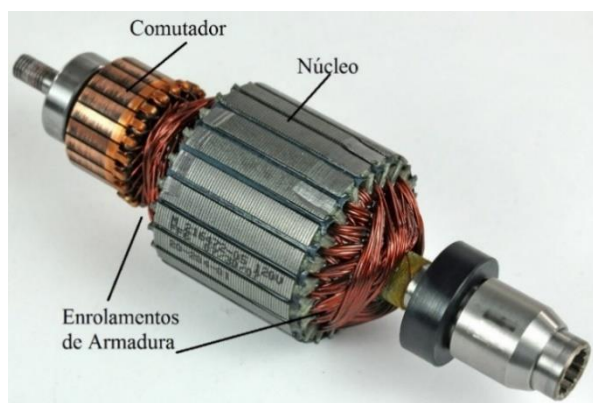
O eixo é o elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor a uma carga a ele conectada e os outros componentes do rotor estão mecanicamente acoplados em torno dele.

O *núcleo* é constituído de um pacote de aço laminado (a laminação colabora na redução de correntes parasitas) e contém ranhuras axiais na sua periferia para alojar os enrolamentos de armadura.

Os *enrolamentos da armadura* são um grande número de bobinas isoladas eletricamente do núcleo e entre si. Estão inseridas nas ranhuras do núcleo e são conectadas ao comutador.

O *comutador* é um componente que providencia o chaveamento entre os circuitos dos enrolamentos através da rotação do motor e é constituído de um anel de cobre (ou um material condutor) segmentado por lâminas de mica (ou um material isolante).

Figura 17 – Partes constituintes do rotor de um motor de corrente contínua.



Fonte: (Djuric, 2009).

O autor Kosow (1994) também aponta que o estator de um motor de corrente contínua é composto, basicamente, por uma carcaça, enrolamentos de campo, polos, interpólos, enrolamentos de compensação (opcionais), escovas e detalhes mecânicos.

A *carcaça* é uma estrutura de aço, ferro fundido ou ferro laminado, na qual os polos são soldados ou parafusados e não só promove suporte aos itens descritos acima, mas também conduz o fluxo magnético de um polo a outro.

Os *enrolamentos de campo* são espiras bobinadas sobre os polos de excitação principais e funcionam, essencialmente, como eletroímãs interagindo com a armadura para criar movimento rotacional. Os dois tipos principais de enrolamentos de campo são os enrolamentos em série e em paralelo (também conhecido como Shunt), conforme apresentado pela Figura 18.

Os *polos principais* são constituídos de chapas laminadas justapostas e são acoplados à carcaça, além de funcionarem como um caminho para o fluxo magnético. Uma de suas extremidades, curvada e mais larga que o núcleo, recebe o nome de sapata polar e tem com esse

formato a utilidade de espalhar o fluxo mais uniformemente. No caso de motores de ímãs permanentes, os ímãs permanentes substituem o polo principal e seus enrolamentos de campo.

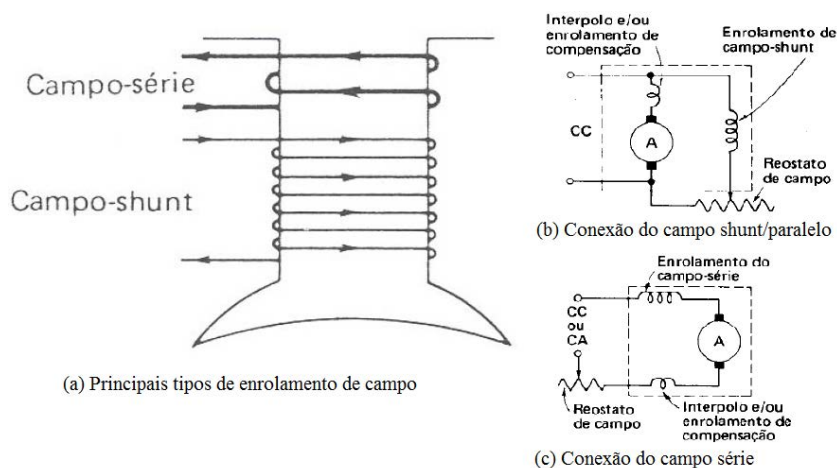
Os *interpólos* e seus enrolamentos também são acoplados à carcaça entre os polos principais, normalmente possuem dimensões um pouco menores e sua finalidade é compensar a reação da armadura, reforçando o campo principal.

Os *enrolamentos de compensação* são enrolamentos opcionais colocados em ranhuras axiais da sapata polar e são ligados da mesma forma que os enrolamentos do interpolo.

As *escovas* são feitas de carvão e grafite e são pressionadas por molas contra os contatos do comutador de forma que estão a todo o instante conectando o circuito externo da máquina ao enrolamento da armadura e realizando contato com uma bobina na região interpolar. Apesar de serem considerados como partes do estator (campo), as escovas e seus anéis de suporte, bem como os interpólos e enrolamentos de compensação, fazem parte do circuito elétrico da armadura.

Alguns *detalhes mecânicos* como pedestal, mancais, anéis de suporte para as escovas em algumas máquinas, entre outros são conectados mecanicamente à carcaça.

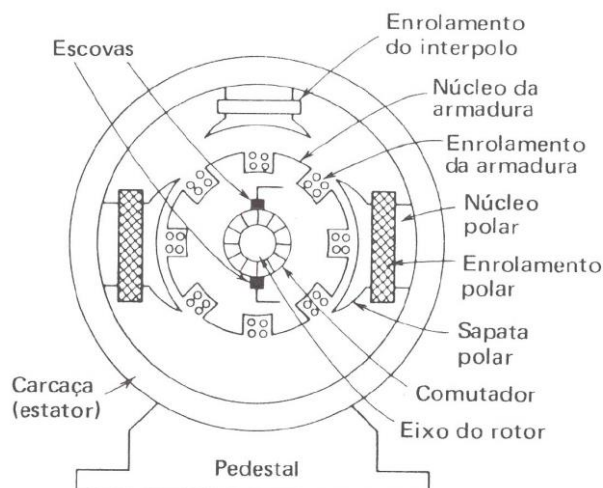
Figura 18 – Dois tipos principais de enrolamento de campo e seus circuitos equivalentes.



Fontes: (Villar, 2006); (Kosow, 1994).

A Figura 19 mostra uma vista do corte transversal do motor de corrente contínua indicando todos os seus componentes, de acordo com a descrição dada anteriormente.

Figura 19 – Vista em corte de um motor de corrente contínua comercial típico simplificado.



Fonte: Kosow (1994).

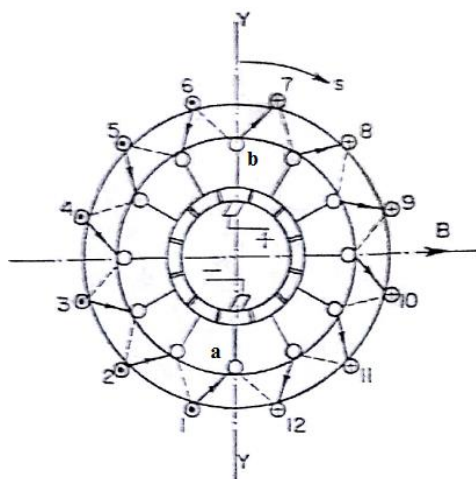
### 3.3 ENROLAMENTOS DE ARMADURA

Em motores de corrente contínua, os enrolamentos do induzido são distribuídos através de bobinas em ranhuras do núcleo de ferro, de forma a garantir resistência mecânica – fixação – aos condutores contra o efeito da rotação. Cada bobina é formada por diversas espiras individualmente isoladas por seda, algodão ou esmalte e isoladas das ranhuras por verniz. Cada uma delas é formada por dois condutores ativos sendo que todas devem ser iguais em número de espiras e em comprimento.

Para estes motores, há três tipos mais usuais de enrolamentos: o enrolamento tipo anel, o tipo tambor imbricado (ou paralelo) e o tipo tambor ondulado (ou em série).

O enrolamento tipo anel é feito colocando um número determinado de espiras que possuem início e término no mesmo ponto sobre um anel de ferro, de forma que o enrolamento constitua um circuito elétrico fechado.

Figura 20 – Enrolamento tipo anel com 12 espiras.



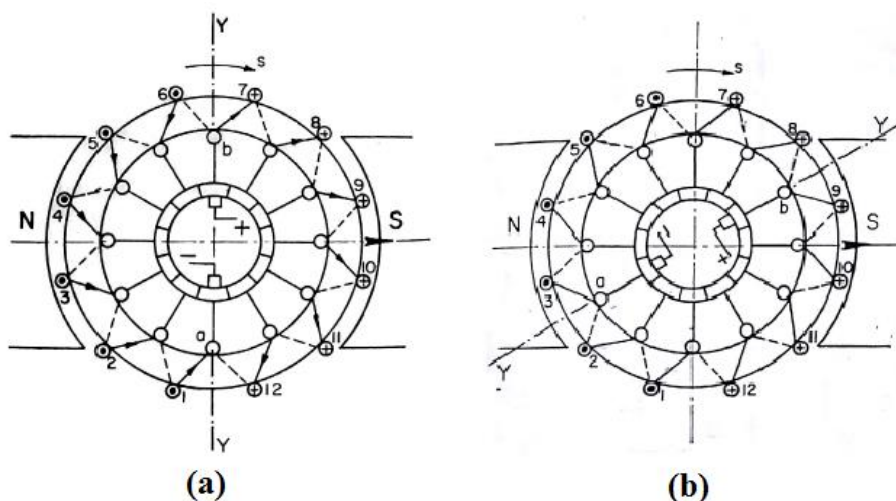
Fonte: (Martignoni, 1967).

A Figura 20 mostra o enrolamento tipo anel com 12 espiras, no qual as espiras devem ser situadas ao redor do anel de ferro e partir do ponto 'a', passando pelo ponto 'b' e finalmente retornando ao ponto 'a'. Ao submeter o anel a um campo magnético externo, o seu interior não possuirá linhas de força, pois estarão concentradas no entreferro e, portanto, os condutores internos das espiras não participarão do fenômeno de indução eletromagnética.

Considerando este campo magnético no sentido de B, geram-se f.e.m. induzidas iguais e em sentidos opostos nos condutores externos das espiras à medida em que atravessam as linhas de força do campo, conforme indicado na Figura 20. Dessa forma, nos condutores 6,5,4,3,2,1 são geradas f.e.m. induzidas de mesmo módulo mas sentidos opostos em relação aos condutores 7,8,9,10,11 e 12, respectivamente.

A máxima diferença de potencial obtida entre as escovas seria verificada quando elas estão posicionadas em comunicação com os condutores na região de inversão magnética, ou seja, exatamente na intermediação dos polos magnéticos, conforme a Figura 21 (a). Ao deslocar as escovas desta região, conforme a Figura 21 (b), alguns dos condutores carregam f.e.m. induzida no sentido contrário das demais, de forma que seus efeitos serão subtraídos, e a diferença de potencial resultante nas escovas será menor que no primeiro caso. Dessa forma, quando as escovas estão em paralelo com o campo, a diferença de potencial entre elas será nula, pois exatamente metade dos condutores terão f.e.m. induzida no sentido oposto ao da outra metade.

Figura 21 – Comparação entre o posicionamento perpendicular (a) e deslocado (b) das escovas no comutador em relação ao dipolo magnético.



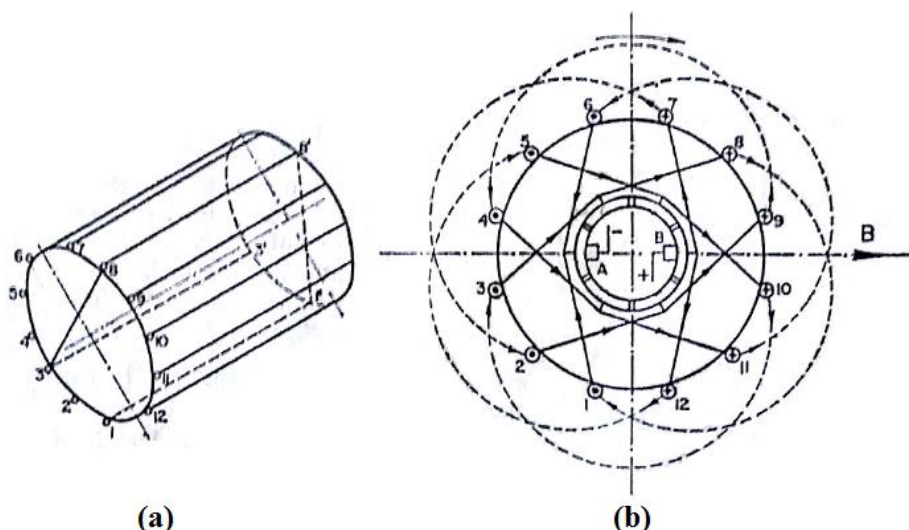
Fonte: (Martignoni, 1967).

Este tipo de enrolamento não é mais utilizado devido aos condutores internos inativos do anel, que geram maior resistência elétrica da armadura, maior queda de tensão e maior produção de perdas por efeito Joule (MARTIGNONI, 1967). Com o intuito de evitar estas condições indesejadas em um motor elétrico, utiliza-se uma das formas de enrolamento do tipo tambor, onde todas as ligações são distribuídas pela periferia de um cilindro de ferro, como mostra a Figura 22 (a).

Os condutores são conectados na parte dianteira e traseira do “tambor” utilizando passos determinados para constituir um circuito fechado sobre o exterior do cilindro, garantindo a participação de todos os condutores no fenômeno de indução eletromagnética. Configura-se, assim, a principal diferença em relação ao enrolamento tipo anel.

Apesar da Figura 22 (b) apresentar as escovas montadas sobre o eixo do dipolo magnético, os condutores a elas conectados se encontram perpendiculares às linhas de força do campo magnético, promovendo, com esta configuração, a máxima diferença de potencial entre as escovas.

Figura 22 – Vista simplificada (a) e vista esquemática (b) do enrolamento tipo tambor de 6 espiras.



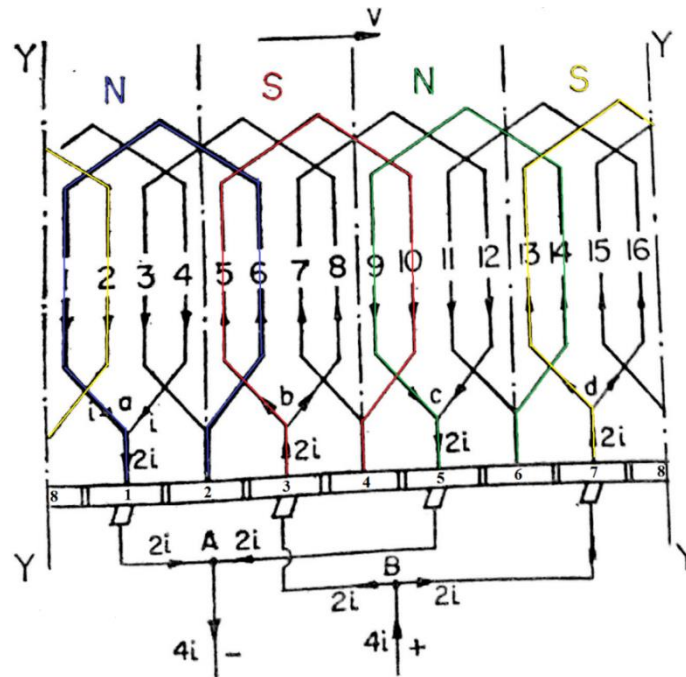
Fonte: Martignoni (1967).

Uma forma muito usual do enrolamento do tipo tambor é o tipo imbricado, também conhecido como paralelo. A palavra *imbricado* provém do latim *imbricatu* e significa “telhado” ou “com telhas sobrepostas”. A escolha da denominação se deve à configuração desse enrolamento, no qual os terminais das bobinas são ligados às barras vizinhas do comutador, resultando em espiras exatamente iguais e sobrepostas parcialmente umas às outras. Para isto ser possível, as bobinas são construídas dando passos para frente e para trás, alternadamente.

A Figura 23 mostra um esquema planificado para o enrolamento imbricado com 16 condutores induzidos e 8 espiras para uma máquina de quatro polos. Em azul, constitui-se a primeira espira, saindo do primeiro segmento do comutador e terminando no segundo. Do segundo segmento sai um segundo condutor, formando uma nova espira e terminando no terceiro segmento. Isto ocorre sucessivamente para todos os segmentos do comutador, até a última espira, que se inicia no segmento 8 e termina no primeiro segmento.

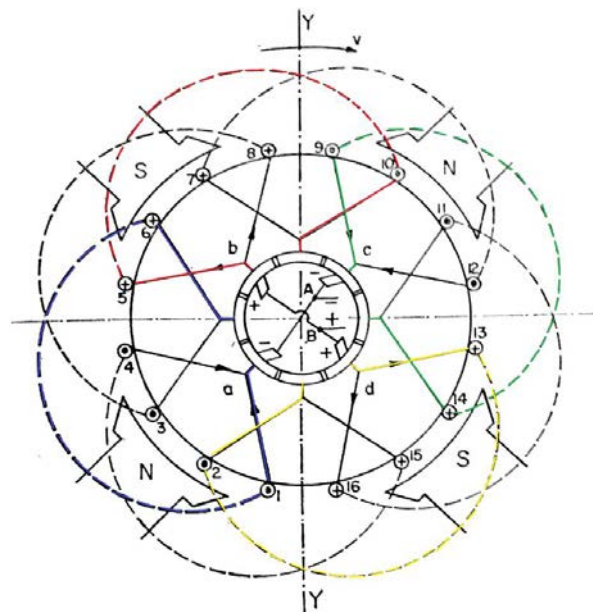
A Figura 24 representa o diagrama esquemático frontal do eixo referente ao motor apresentado pela Figura 23. Nessas duas figuras o sentido de rotação é representado pela seta e pela letra V.

Figura 23 – Vista planificada de um enrolamento imbricado para uma máquina de 4 polos e 8 espiras.



Fonte: (Martignoni, 1967).

Figura 24 – Esquemático da vista frontal para o enrolamento imbricado em uma máquina de 4 polos e 8 espiras.



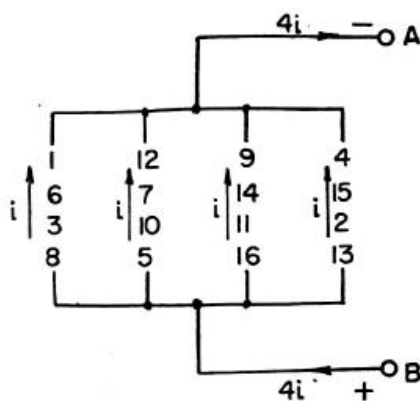
Fonte: (Martignoni, 1967).

Percebe-se que os condutores 1,3,6 e 8 estão conectados entre os pontos “a” e “b”, ou, entre as lâminas 1, 2 e 3 do comutador. A f.e.m. induzida em cada um destes condutores é igual e direcionada de “b” para “a”. Os condutores 5, 7, 10 e 12 estão conectados entre os pontos “b”

e “c”, ou, entre as lâminas 3, 4 e 5 do comutador, de forma que a f.e.m. em cada condutor possui o mesmo módulo e é direcionada de b para c.

Isto ocorre sucessivamente para todos os condutores – gerando quatro vias internas – de modo que o ponto “a” possui o mesmo potencial que “c”, e o ponto “b” o mesmo que “d”. O potencial das escovas tem polaridade alternada, permitindo o agrupamento em dois bornes: A (negativo) e B (positivo), conforme a Figura 25. A diferença de potencial gerada entre os bornes é equivalente à f.e.m. gerada em uma das vias internas (pois todas as vias internas possuem f.e.m. com o mesmo módulo, mesmo que em diferentes sentidos), e sua corrente é a soma das correntes paralelas em cada uma das vias internas, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Agrupamento das quatro vias internas para o enrolamento imbricado apresentado

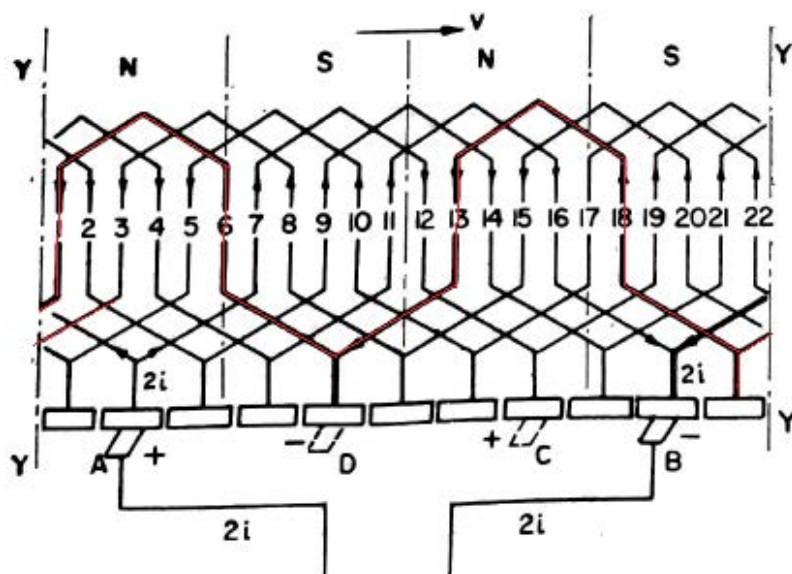


. Fonte: (Martignoni, 1967).

O número de vias internas é determinado pelo número de polos da máquina, e os condutores são distribuídos de forma igualitária, ou seja, cada via possui o mesmo número de condutores localizados embaixo de dois polos vizinhos. O número de escovas apoiadas ao comutador também é determinado pelo número de polos da máquina.

Enquanto no enrolamento imbricado as bobinas possuem seus terminais conectados as barras vizinhas do comutador, no enrolamento ondulado os terminais das bobinas são deslocados entre si por um determinado número de graus elétricos, formando, visualmente, uma espécie de onda, conforme a Figura 26.

Figura 26 – Vista planificada de um enrolamento ondulado para uma máquina de 4 polos, 22 condutores e 11 espiras.



Fonte: (Martignoni, 1967).

A Figura 26 apresenta o esquema planificado do enrolamento tipo ondulado. Nesse tipo de enrolamento, também conhecido como enrolamento em série, a ligação dos condutores é arranjada de maneira a sempre dar passos à frente e, após efetuar diversas voltas em torno da armadura, reestabelecer a conexão com o primeiro condutor, fechando o circuito elétrico.

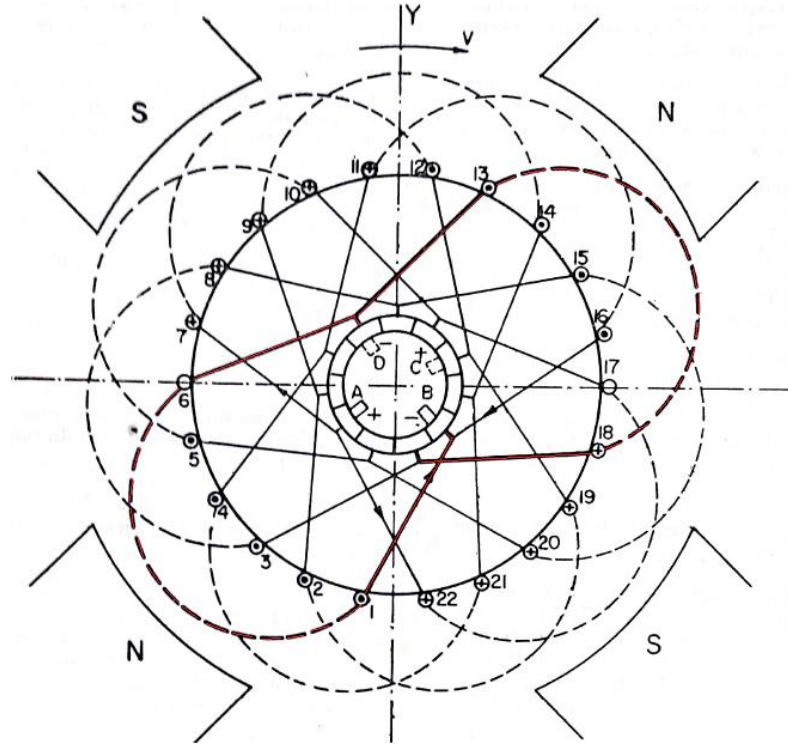
Neste tipo de enrolamento são necessárias apenas duas escovas de polaridades opostas, independentemente do número de polos da máquina. Entretanto, o número de escovas que podem ser utilizadas na máquina é o mesmo que o número de polos – conforme a necessidade em termos de intensidade de corrente elétrica – para evitar a utilização de escovas maiores, que obrigam um comutador muito comprido e de alto custo. Isso quer dizer que, em uma máquina de 4 polos, podem ser utilizadas 2 ou 4 escovas, de acordo com a corrente utilizada. No caso da utilização de mais do que duas escovas, elas são agrupadas de modo a formarem os bornes positivo e negativo da máquina.

Este enrolamento possui sempre duas vias internas, cada qual com a metade dos condutores induzidos, sem se sujeitar ao número de polos conforme ocorria no enrolamento imbricado. A primeira via possui f.e.m. induzida no sentido em que suas correntes se afastam da primeira lâmina (A) e por isto recebe a escova positiva. Analogamente, a segunda via possui correntes em seus condutores se afastando da segunda lâmina (B) e por isto recebe a escova negativa.

A Figura 27 representa a visão frontal do eixo do induzido contendo um panorama esquemático do enrolamento ondulado apresentado. Em vermelho, está representada a primeira

volta ao redor do induzido, de forma que, partindo da primeira lâmina do comutador, o condutor somente é conectado à lâmina adjacente após uma volta completa em torno do eixo.

Figura 27 – Esquemático da vista frontal para o enrolamento ondulado apresentado.



Fonte: (Martignoni, 1967).

As correntes  $I_C$  das vias internas, tanto do enrolamento imbricado quanto do ondulado, se somam nas escovas definindo a corrente de armadura externa  $I_A$ . Assim, esta corrente é dada pelo produto entre o número de vias internas e a corrente  $I_C$  – operação que resulta no somatório das correntes nas vias internas. As equações (13) e (14) fornecem o número  $a$  de *vias internas* para o enrolamento imbricado e ondulado, respectivamente, sendo  $p$  o *número de polos* e  $m$  a *multiplicidade das bobinas* no enrolamento.

$$a = m \cdot p \quad (13)$$

$$a = 2 \cdot m \quad (14)$$

### 3.3.1 Passos dos enrolamentos

Neste trabalho, define-se como passo uma distância entre dois elementos referentes ao enrolamento, sejam eles condutores, ranhuras, lâminas ou polos. Esta distância é dada, usualmente, em termos do número de chanfros ou ranhuras do núcleo de ferro, ou em número de lâminas do comutador do rotor. A seguir estão descritas as principais definições a serem consideradas no cálculo de enrolamento e bobinagem do induzido de motores, informações consolidadas de acordo com os autores Roldán (2002) e Martignoni (1967).

O *número de polos* ( $p$ ) é a quantidade de polos no motor, geralmente dado pelo fabricante em pares de polos.

O *número de ranhuras* ( $r$ ) é determinado, geralmente, pelo fabricante, assim como o *número de bobinas* ( $C$ ).

O *número de lâminas do comutador* ( $D$ ) é igual ao *número de bobinas* ( $C$ ).

O *número de lados da bobina por ranhura* ( $F$ ) é determinado pela equação (15), dado pelo número total de condutores ativos do enrolamento – os lados da bobina – dividido pelo número total de ranhuras. Este parâmetro é importante pois podem ser utilizadas várias camadas de enrolamentos por ranhura.

$$F = \frac{2 \times C}{r} \quad (15)$$

O *passo polar* ( $\tau$ ) é a distância, normalmente em número de ranhuras, entre dois eixos polares, ou seja, quantas ranhuras compreendem um polo da máquina. Pode ser dado tanto pela equação (16), em número de ranhuras por polos, quanto pela equação (17) em número de lados da bobina (condutores ativos totais) por polos.

$$\tau = \frac{r}{p} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{2 \times C}{p} \quad (17)$$

O *passo posterior* ( $Y_1$ ), também denominado *largura de seção*, representa a amplitude da bobina, medindo a distância, em ranhuras, entre os lados da bobina. Tal parâmetro define quantas ranhuras existem entre os lados da bobina na conexão posterior (lado oposto do comutador)

O **passo anterior** ( $Y_2$ ), também denominado *passo de conexão*, representa a quantidade de ranhuras existentes entre os lados das bobinas na conexão frontal (lado adjacente ao comutador).

O **passo resultante** ( $Y$ ) representa o número de ranhuras necessárias para ir do início de uma seção ativa ao início da seguinte. Em um enrolamento imbricado é dado pela diferença entre os passos posterior ( $Y_1$ ) e anterior ( $Y_2$ ), enquanto que em um enrolamento ondulado é dado pela soma desses valores. Os passos resultantes para os enrolamentos imbricado e ondulado são dados pelas equações (18) e (19), respectivamente.

$$Y = Y_1 - Y_2 \quad (18)$$

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad (19)$$

O **passo às ranhuras** ( $Y_r$ ) determina em quais ranhuras estão colocados os lados de uma bobina; seu valor é dado pela equação (20).

$$Y_r = \frac{Y_1 - 1}{F} \quad (20)$$

O **passo ao comutador** ( $Y_c$ ) é o número de lâminas que separa o início e o fim de uma bobina; seu valor é dado pela equação (21).

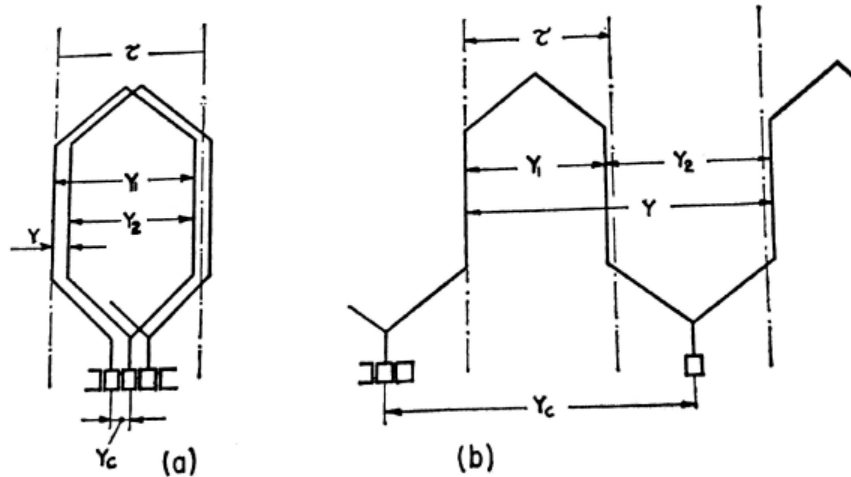
$$Y_c = \frac{Y}{2} \quad (21)$$

O **passo de escovas** ( $Y_{esc}$ ) representa o número de lâminas que separa as escovas a serem apoiadas no comutador; é calculado pela equação (22). Como, geralmente, o *número de escovas* ( $B$ ) é igual ao *número de polos* ( $p$ ), ambos os parâmetros podem ser utilizados na equação (22) sem alteração do resultado.

$$Y_{esc} = \frac{D}{B} \quad (22)$$

As Figuras 28 (a) e (b) apresentam, respectivamente, os principais passos descritos nos enrolamentos tipo tambor imbricado e ondulado.

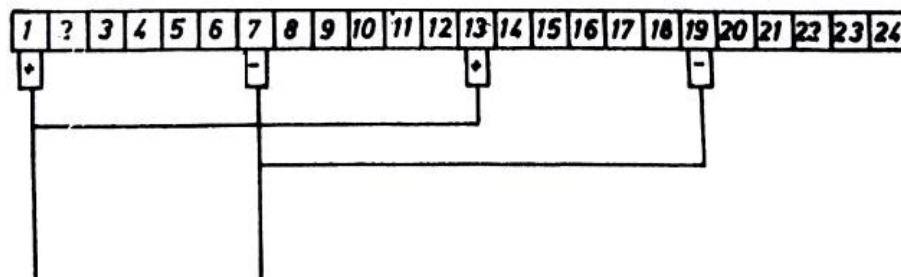
Figura 28 – Representação gráfica dos principais passos nos enrolamentos imbricado (a) e ondulado (b).



Fonte: (Martignoni, 1967).

A Figura 29 representa a vista planificada de um comutador de 24 lâminas em uma máquina de 4 polos (neste caso, também terá 4 escovas), na qual o passo de escovas será igual a 6, de acordo com a equação (22).

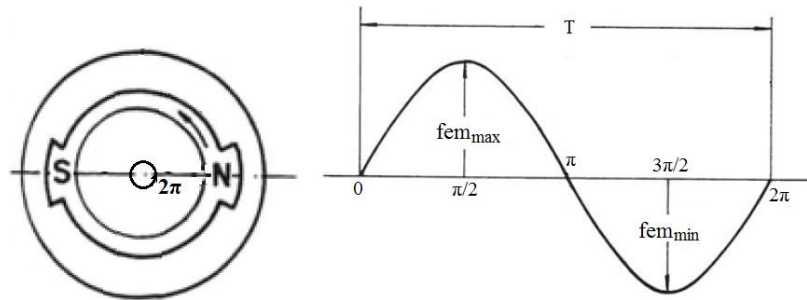
Figura 29 – Representação gráfica de um motor com passo de escovas igual a 6.



Fonte: (Roldán, 2002).

É necessário definir também a diferença entre **ângulo mecânico** ( $\theta_{MEC}$ ) e **ângulo elétrico** ( $\theta_{ELE}$ ) do motor: o primeiro representa o ângulo geométrico de giro do rotor ao longo do seu eixo; o segundo representa o ângulo da f.e.m. induzida nos terminais da armadura. A relação entre estes ângulos está associada com o número de polos ( $p$ ) da máquina, pois uma rotação completa ( $360^\circ$ ) do rotor de máquina com dois polos produz um ciclo completo de tensão induzida, conforme a Figura 30.

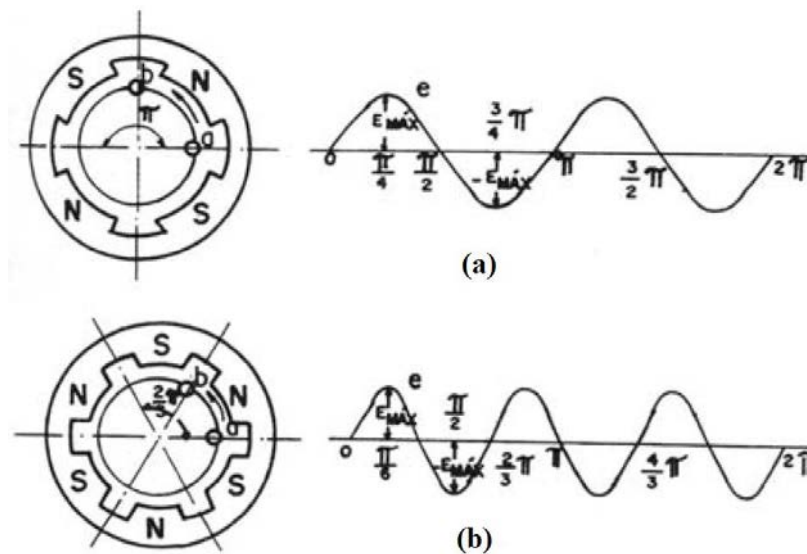
Figura 30 – Motor de dois polos gerando um ciclo completo em uma rotação do rotor.



Fonte própria.

Assim, um motor de 4 polos gerará uma onda de 2 ciclos e um motor de 6 polos gerará uma onda de 3 ciclos, conforme as Figuras 31 (a) e (b), respectivamente. É possível, então definir, a relação entre estes dois ângulos através da equação (23).

Figura 31 – Motor de quatro (a) e seis (b) polos gerando dois e três ciclos completos, respectivamente, em uma rotação do rotor.



Fonte própria.

$$\theta_{ELE} = \frac{p}{2} (\theta_{MEC}) \quad (23)$$

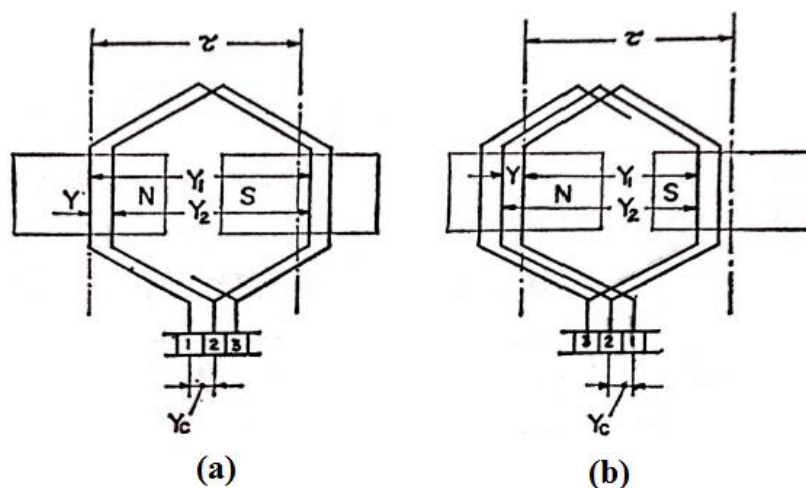
Nos enrolamentos em geral, as bobinas possuem um de seus lados em um polo e o outro num polo oposto vizinho, ou seja, são afastados de  $180^\circ$  elétricos. Quando isto ocorre, a força

eletromotriz induzida é máxima e diz-se que a bobina possui passo pleno, enquanto que, nos casos em que seus lados estão afastados por menos do que  $180^\circ$  elétricos, ela é denominada bobina de passo fracionário.

### 3.3.2 Metodologia para cálculo de enrolamento imbricado

Este enrolamento é feito dando um passo para frente e outro passo para trás exigindo, portanto, que os passos posterior e anterior sejam diferentes entre si, caso contrário o esquema constituiria um curto circuito. Quando o passo posterior é maior que o anterior ( $Y_1 > Y_2$ ) diz-se que o enrolamento é progressivo e as bobinas caminham para a direita, conforme a Figura 32 (a). Já quando o anterior é maior que o posterior ( $Y_2 > Y_1$ ), diz-se que o enrolamento é regressivo e as bobinas caminham para a esquerda, conforme a Figura 32 (b).

Figura 32 – Representação dos enrolamentos imbricados progressivo (a) e regressivo (b).



Fonte: (Martignoni, 1967).

O passo resultante para enrolamentos imbricados é fornecido pela diferença entre o passo posterior e anterior, conforme a equação (18). O passo resultante para enrolamentos imbricados progressivos será sempre  $+2$ , enquanto que para regressivos será sempre  $-2$ .

Como os passos ao comutador são sempre a metade dos passos resultantes, de acordo com a equação (21), em enrolamentos imbricados progressivos o passo ao comutador será sempre  $+1$ , enquanto em regressivos será sempre  $-1$ .

Para determinar os passos anterior e posterior basta verificar a razão entre o número de lados das bobinas e o número de polos – valor também obtido pela razão entre o dobro do número de ranhuras e o número de polos. Os passos devem possuir valores próximos a esta razão, pois dessa forma se obtém o melhor aproveitamento das forças eletromotrizes induzidas nos condutores.

Assim, os passos posterior e anterior para enrolamentos imbricados progressivos são próximos a esta razão, de acordo com as equações (24) e (25), respectivamente.

$$Y_1 = \left( \frac{2 \times C}{p} \right) + 1 \quad (24)$$

$$Y_2 = \left( \frac{2 \times C}{p} \right) - 1 \quad (25)$$

Para enrolamentos imbricados regressivos os passos posterior e anterior são dados pelas equações (26) e (27), respectivamente.

$$Y_1 = \left( \frac{2 \times C}{p} \right) - 1 \quad (26)$$

$$Y_2 = \left( \frac{2 \times C}{p} \right) + 1 \quad (27)$$

Seguindo este raciocínio, os passos posterior e anterior serão sempre ímpares, caso a relação  $\left( \frac{2 \times C}{p} \right)$  seja par, e os lados ímpares da bobina serão sempre conectados aos lados pares, garantindo que os passos posteriores representem passos para a frente (sentido horário) e os anteriores para trás (sentido anti-horário). Caso a relação  $\left( \frac{2 \times C}{p} \right)$  seja ímpar, subtrai-se o menor número inteiro  $\alpha$  de forma que a equação (28) resulte em um número inteiro par e o raciocínio possa seguir da forma descrita acima, porém com as devidas alterações, conforme as equações (29), (30), (31) e (32).

$$\beta = \left( \frac{2 \times C - \alpha}{p} \right) \quad (28)$$

$$Y_1 = \beta \pm 1 \quad (29)$$

$$Y_2 = \beta \mp 1 \quad (30)$$

$$Y = Y_1 - Y_2 = \pm 2 \quad (31)$$

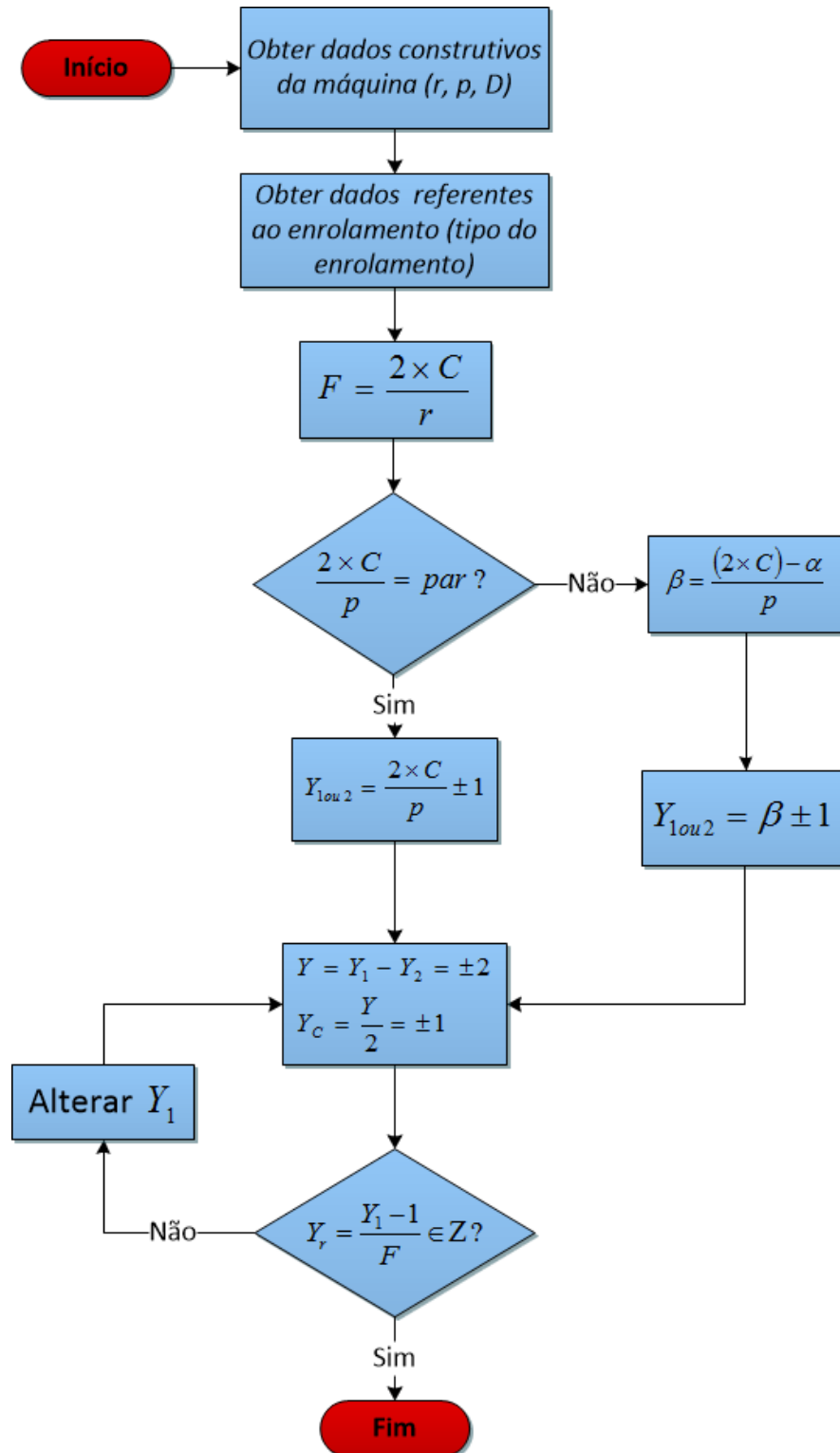
$$Y_c = \frac{Y}{2} = \pm 1 \quad (32)$$

Formalizando a metodologia na forma de um processo, pode-se definir sete etapas para o cálculo de enrolamento imbricado:

- 1º. Determinar os dados relevantes ao enrolamento imbricado:
  - a. Número de ranhuras no núcleo
  - b. Número de lâminas no comutador.
  - c. Número de polos da máquina.
  - d. Tipo de enrolamento (progressivo ou regressivo).
- 2º. Calcular o número de lados da bobina por ranhura, através da equação (15).
- 3º. Verificar se a relação  $\left( \frac{2 \times C}{p} \right)$  resulta em um número inteiro par.
- 4º. Se a etapa anterior resultar em um número par, seguir as equações (24) e (25) ou (26) e (27), conforme o tipo de enrolamento. Caso resulte em ímpar, seguir as equações (28) a (30).
- 5º. Calcular o passo resultante e o passo ao comutador, conforme as equações (31) e (32), respectivamente.
- 6º. Determinar a possibilidade de execução do enrolamento, calculando o passo às ranhuras pela equação (20).
- 7º. Caso a etapa anterior resulte em um número fracionário, é necessário modificar o passo posterior para obter um valor inteiro de passo às ranhuras e depois refazer os passos 6 ao 9. Caso resulte em um número inteiro, o cálculo pode ser dado como finalizado. Deve-se observar que, para  $F = 2$  lados de bobina por ranhura, o passo às ranhuras sempre resultará em um número inteiro.

A Figura 33 mostra um fluxograma que representa o procedimento utilizado para o cálculo do enrolamento imbricado, conforme as sete etapas definidas anteriormente.

Figura 33 – Fluxograma para o procedimento do cálculo do enrolamento imbricado.

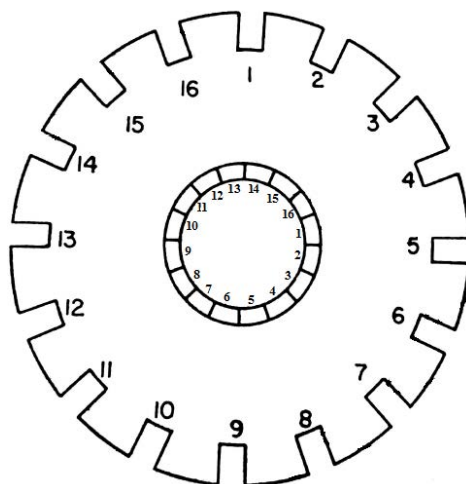


Fonte própria.

Com o propósito didático de demonstrar esse método, calcula-se o enrolamento imbricado *regressivo* de um motor de corrente contínua com 2 polos cujo núcleo possui 16

ranhuras e o comutador 16 lâminas – conforme representado na Figura 34, na qual foram apenas omitidos os polos.

Figura 34 – Exemplo de aplicação: núcleo de 16 ranhuras e comutador de 16 lâminas.



Fonte: (Martignoni, 1967).

As etapas 1, 2 e 3 já são determinadas pelo enunciado do exemplo, e as etapas do processo para o cálculo ocorrem conforme segue:

1º. *Número de ranhuras:*  $r = 16$

*Número de lâminas:*  $D = C = 16$

Observa-se que, a partir do número de lâminas ( $D$ ), pode-se obter também o número de bobinas ( $C$ ).

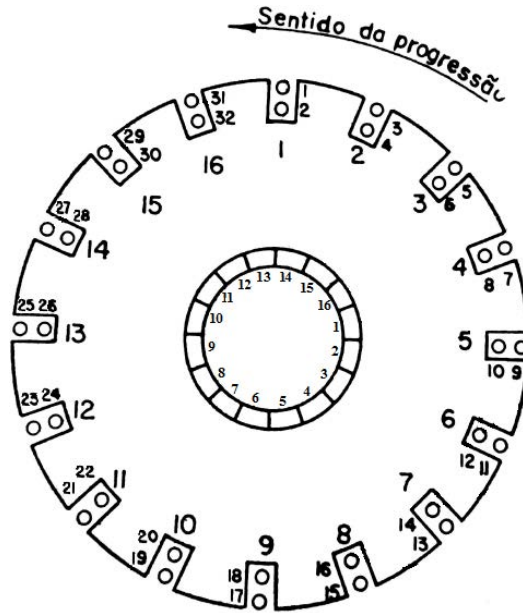
*Número de polos:*  $p = 2$

*Tipo de enrolamento:* imbricado regressivo

2º. *Número de lados da bobina por ranhura:*  $F = \frac{2 \times C}{r} = \frac{2 \times 16}{16} = 2$

A Figura 34 apresenta o sentido da progressão e a distribuição das bobinas nas ranhuras do núcleo do motor, de acordo com os resultados das etapas 3 e 4. Os lados ímpares das bobinas serão colocados na região mais externa da ranhura (camada superior), enquanto os lados pares colocados na região mais interna (camada inferior), conforme a numeração apresentada na Figura 35.

Figura 35 – Distribuição das bobinas nas ranhuras e sentido da progressão.



Fonte: (Martignoni, 1967).

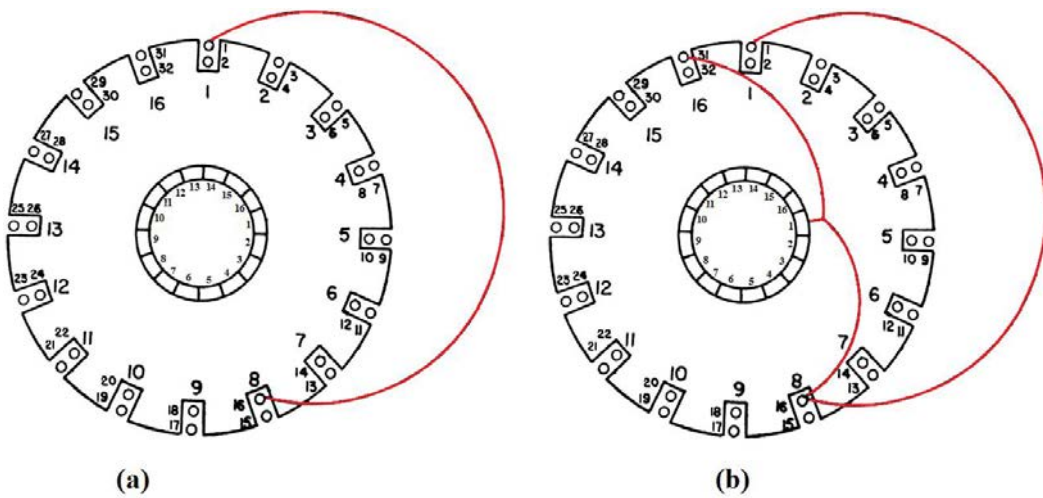
3°. Verificar se a relação  $\left(\frac{2 \times C}{p}\right)$  é par:  $\left(\frac{2 \times C}{p}\right) = \frac{2 \times 16}{2} = 16 \rightarrow \text{par}$

4°. Passo posterior:  $Y_1 = \left(\frac{2 \times C}{p}\right) - 1 = \left(\frac{2 \times 16}{2}\right) - 1 = 15$

Passo anterior:  $Y_2 = \left(\frac{2 \times C}{p}\right) + 1 = \left(\frac{2 \times 16}{2}\right) + 1 = 17$

A Figura 36 apresenta as primeiras ligações do enrolamento, sendo que a Figura 36 (a) representa o passo posterior – caminhando 15 lados de bobina no sentido horário (passo para frente) e chegando ao lado 16 da bobina, na ranhura 8 – enquanto a Figura 36 (b) representa o passo anterior – caminhando 17 lados de bobina no sentido anti-horário (passo para trás) e chegando ao lado 31 da bobina, na ranhura 16. Obviamente, a primeira bobina é conectada à primeira lâmina do comutador pelo passo anterior.

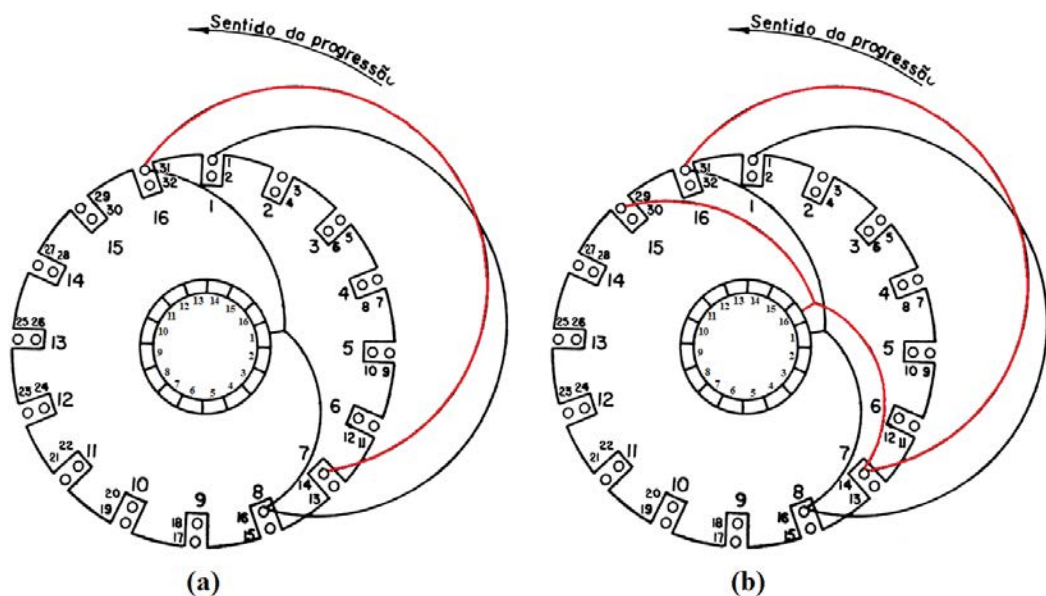
Figura 36 – Representação das primeiras ligações posterior (a) e anterior (b) do enrolamento imbricado apresentado.



Fonte: (Martignoni, 1967).

As Figuras 37 (a) e (b) mostram as segundas ligações posterior e anterior, respectivamente, dando prosseguimento ao enrolamento. As ligações subsequentes são realizadas de forma análoga, garantindo que cada bobina seja conectada a uma lâmina anterior do comutador e provocando o sentido anti-horário da progressão do enrolamento.

Figura 37 – Representação das segundas ligações posterior (a) e anterior (b) do enrolamento imbricado apresentado.



Fonte: (Martignoni, 1967).

5°. *Passo resultante:*  $Y = Y_1 - Y_2 = 15 - 17 = -2$

*Passo ao comutador:*  $Y_C = \frac{Y}{2} = \frac{-2}{2} = -1$

6°. *Passo às ranhuras:*  $Y_r = \frac{Y_1-1}{F} = \frac{15-1}{2} = \frac{14}{2} = 7$

7°. *Como  $Y_r = 7$  (número inteiro), é possível executar o enrolamento.*

Observa-se, por esse exemplo, que o procedimento para o cálculo do enrolamento imbricado pode representar etapas muito simples e de pouco esforço prático. Entretanto, é necessário salientar que, nos casos em que o processo de rebobinagem será realizado, devem ser devidamente observados e registrados, além das demais características construtivas do motor, o tipo do enrolamento – regressivo ou progressivo.

O tipo de enrolamento deve ser considerado, pois alterando-se um enrolamento progressivo para um regressivo, ou vice-versa, é invertida a polaridade do circuito, uma vez que cada uma das bobinas será construída em um polo com nome oposto em relação ao original. Portanto, ao inverter-se o sentido de progressão das bobinas em uma rebobinagem, o motor de corrente contínua terá sua rotação invertida ou, se a máquina estiver sendo utilizada como um gerador ou dínamo ao invés de um motor, terá sua polaridade invertida.

### 3.3.3 Metodologia para cálculo de enrolamento ondulado

Conforme mencionado anteriormente, o enrolamento ondulado difere do imbricado pelo fato de que os lados de suas bobinas dão passos sempre para frente, de forma que os passos posterior ( $Y_1$ ) e anterior ( $Y_2$ ) podem ser iguais. Logo, a condição para que o enrolamento ondulado seja progressivo ou regressivo não depende mais da relação entre os passos posterior e anterior, mas sim do passo resultante.

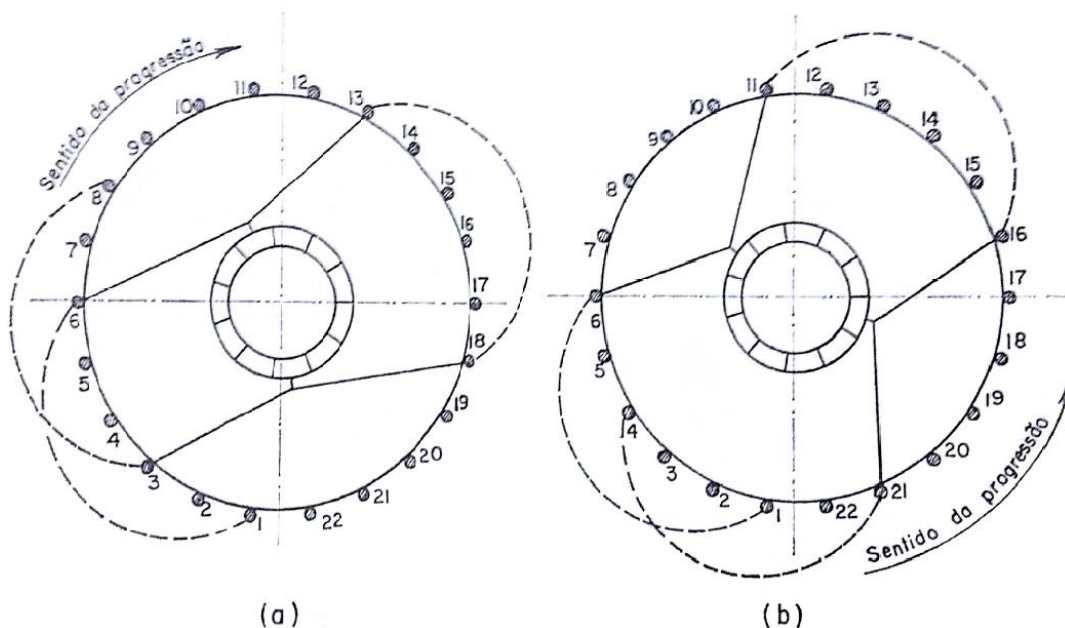
Se o passo resultante, ou seja, a soma dos passos posterior e anterior, for maior que o dobro do passo polar, dado pela equação (16) em termos de lados da bobina, o enrolamento progride no sentido horário, e portanto, este enrolamento é progressivo. Caso contrário, o enrolamento progride no sentido anti-horário, e será regressivo. As equações (33) e (34) mostram as condições para os enrolamentos progressivo e regressivo, nessa ordem.

$$Y > 2\tau \Rightarrow Y_1 + Y_2 > 2 \times \frac{(2 \times C)}{p} \quad (33)$$

$$Y < 2\tau \Rightarrow Y_1 + Y_2 < 2 \times \frac{(2 \times C)}{p} \quad (34)$$

A Figura 37 representa um motor bipolar, com os polos omitidos e cujo núcleo possui 22 condutores induzidos constituindo enrolamentos ondulados progressivo (a) e regressivo (b). Através das Figuras 38 (a) e (b), observa-se que os enrolamentos progridem ou regridem, com passos de dois lados de bobina, apenas após a primeira volta completa em torno do núcleo, ou seja, logo após ou ligeiramente antes de um duplo passo polar.

Figura 38 – Representação dos enrolamentos ondulados progressivo (a) e regressivo (b).



Fonte: (Martignoni, 1967).

O passo resultante deve ser diferente do duplo passo polar para evitar que o enrolamento se feche sobre o início após uma volta completa, gerando um curto circuito. A diferença deve ser tênue, tanto para enrolamentos progressivos quanto regressivos, para que o passo possa acompanhar o movimento rotacional do motor e, dessa forma, obter o melhor aproveitamento das f.e.m. induzidas nos condutores.

Visto que o enrolamento deve ser fechado apenas no primeiro lado da bobina, ou seja, sem que haja repetições, dando várias voltas no induzido, é possível deduzir que os passos posterior e anterior seja ímpares. O passo resultante, portanto deve ser par e dois lados de bobina a mais ou a menos que o número de lados total, dependendo do tipo de enrolamento, conforme a equação (35), onde o sinal de positivo representa a fórmula para enrolamentos progressivos e o sinal negativo para regressivos.

$$Y \sim 2\tau \Rightarrow Y = Y_1 + Y_2 = 2 \times \frac{(2 \times C) \pm 2}{p} \quad (35)$$

O passo ao comutador e o passo às ranhuras serão obtidos utilizando as mesmas equações (21) e (22) respectivamente, como nos enrolamentos imbricados, e a possibilidade de execução do enrolamento ondulado também será determinada por passos às ranhuras inteiros, condição sempre satisfeita por  $F = 2$  lados de bobina por ranhura, mas para múltiplos deste número há a possibilidade de a condição não ser satisfeita e os passos posterior e anterior precisarem de alterações.

Observa-se que, em alguns motores com enrolamento ondulado, surge a necessidade de utilizar um número ímpar de lâminas do comutador, como em máquinas tetrapolares, por exemplo. Sabe-se que o número de lâminas ( $D$ ) é igual ao número de bobinas ( $C$ ), que podemos substituir na equação (21) para obter a equação (36), no caso de  $p = 4$  (máquina tetrapolar).

$$Y_C = \frac{Y}{2} = \frac{2 \times \frac{(2 \times C) \pm 2}{p}}{2} = \frac{(2 \times D) \pm 2}{4} = \frac{D \pm 1}{2} \quad (36)$$

A equação (36) pode ser escrita em função do passo ao comutador, isolando a variável  $D$ , para verificar o valor do número de lâminas do comutador, conforme a equação (37), onde

o sinal de positivo representa a fórmula para enrolamentos regressivos e o sinal negativo para progressivos.

$$D = (2 \times Y_C) \mp 1 \quad (37)$$

A equação (37) mostra que, neste caso do motor tetrapolar, o número de lâminas será ímpar e, conseqüentemente, o número de bobinas também será ímpar. Neste caso, o fechamento apenas será possível se o número de ranhuras for ímpar e o número de lados da bobina por ranhura for adequado para tal finalidade.

Se o enrolamento possuir, por exemplo, quatro lados de bobina por ranhura, significa que haverá duas bobinas para cada ranhura, resultando em um número par de bobinas seja qual for o número de ranhuras, obrigando o projetista a excluir eletricamente uma bobina do enrolamento. Segundo Martignoni (1967), esta bobina isolada do enrolamento recebe o nome de “bobina morta”.

Uma alternativa muito recorrida pelos projetistas para a utilização da bobina morta seria adicionar uma “espira de compensação”. Esta espira comporta-se como uma bobina adicional, tornando ímpar o número de bobinas equivalentes do circuito e permitindo a execução do enrolamento. Ela conecta duas lâminas do comutador através de um condutor de mesma seção transversal dos condutores induzidos do enrolamento, e utiliza o mesmo passo ao comutador do enrolamento.

Formalizando a metodologia na forma de um processo, pode-se definir nove etapas para o cálculo de enrolamento ondulado:

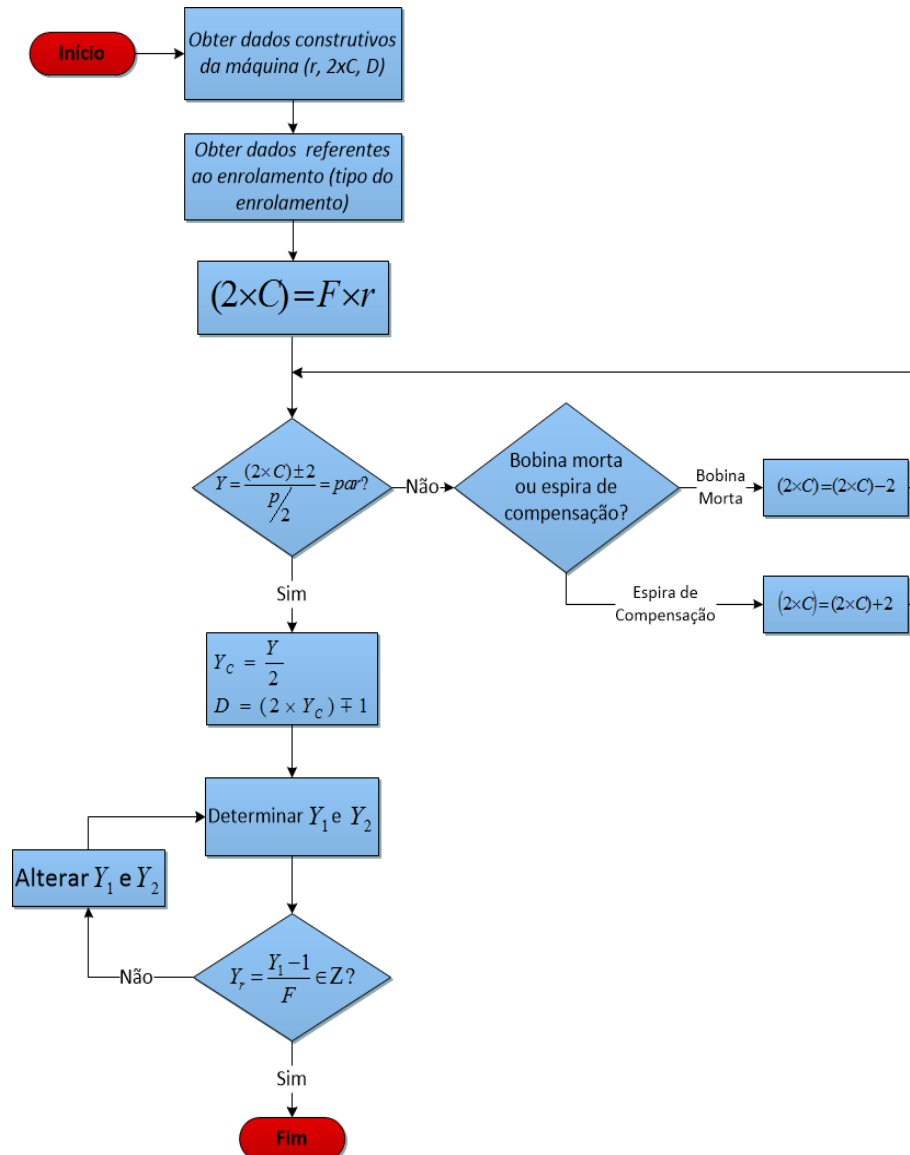
- 1º. Determinar os dados relevantes ao enrolamento ondulado:
  - a. Número de ranhuras no núcleo.
  - b. Número de lados de bobinas por ranhura.
  - c. Número de polos.
  - d. Tipo de enrolamento (progressivo ou regressivo).
- 2º. Calcular o número total de lados da bobina ( $2 \times C$ ) a ser utilizado no enrolamento, através da equação (38), obtida pela alteração da equação (15).

$$(2 \times C) = F \times r \quad (38)$$

- 3°. Verificar se passo resultante, determinado pela equação (35), constitui um número inteiro par para determinar a possibilidade de execução do enrolamento.
- 4°. Se a etapa anterior resultar em um número par, esta etapa não será necessária, pois o enrolamento será possível. Caso contrário, determinar se a correção da imparidade será feita através de uma bobina morta (corrigir o número total de lados das bobinas para  $[(2 \times C) - 2]$ ) ou através de uma espira de compensação (corrigir o número total de lados das bobinas para  $[(2 \times C) + 2]$ ), antes de seguir para as próximas etapas.
- 5°. Recalcular o passo resultante, utilizando o número total de lados de bobinas já alterado, conforme a etapa anterior, e verificar se o resultado obtido é par. Esta etapa também deve ser desconsiderada se a etapa 3 resultar em número par.
- 6°. Calcular o passo ao comutador e o número de lâminas do comutador, conforme as equações (36) e (37), respectivamente.
- 7°. Determinar os passos posterior e anterior, de forma que sejam ambos ímpares e possuam valores muito próximos (se possível, valores iguais).
- 8°. Determinar a possibilidade de execução do enrolamento, calculando o passo às ranhuras pela equação (20).
- 9°. Caso a etapa anterior resulte em um número fracionário, é necessário modificar o passo posterior para obter um valor inteiro de passo às ranhuras e depois refazer as etapas 7 a 9. Caso resulte em um número inteiro, o cálculo pode ser dado como finalizado. Observar que, para  $F = 2$  lados de bobina por ranhura, o passo às ranhuras sempre resultará em um número inteiro.

A Figura 39 mostra um fluxograma que representa o procedimento utilizado para o cálculo do enrolamento imbricado, conforme as nove etapas definidas anteriormente.

Figura 39 – Fluxograma do procedimento para cálculo de enrolamento ondulado.



Fonte própria.

#### 4. O MOTOR DE INDUÇÃO

Os motores de indução são motores de corrente alternada assíncronos, e podem ser classificados, basicamente como, motores polifásicos, monofásicos, motores com rotor gaiola de esquilo e motores de rotor bobinado, de acordo com sua construção, pois o estator é construído de forma semelhante aos motores síncronos.

Os condutores do estator são percorridos por correntes alternadas senoidais defasadas entre si, que geram um campo magnético resultante no interior do rotor. Este campo possui

módulo e velocidade angular constantes, executando rotações com eixo concêntrico ao do rotor e à mesma frequência das correntes alternadas senoidais, considerando um motor de dois polos.

O fluxo magnético variante induz correntes nos condutores do rotor que tendem a anular tal variação do campo magnético, segundo a lei de indução eletromagnética de Faraday-Neumann-Lenz, dando origem à força magnetomotriz necessária para a rotação do motor e explicando seu nome.

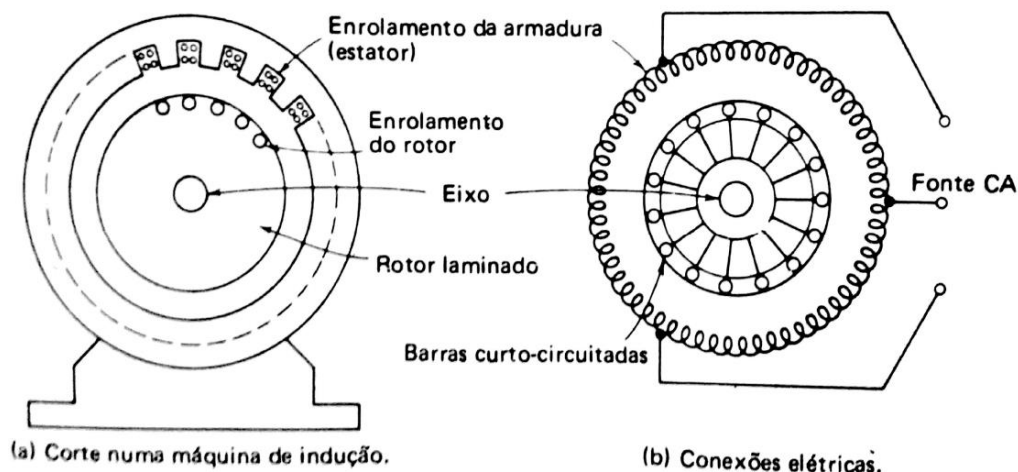
#### 4.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A construção deste motor utiliza, basicamente, o circuito magnético estático (estator), enrolamentos do estator, rotor, enrolamentos do rotor e a carcaça para sustentação do estator.

Conforme foi mencionado, a construção do estator (armadura) é igual à utilizada no induzido fixo em motores síncronos, composto de chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si. O rotor (campo) é um cilindro formado por material ferromagnético laminado com ranhuras paralelas ou quase paralelas, onde são enroladas as bobinas do rotor. As bobinas do rotor, inseridas em ranhuras, são alimentadas por corrente alternada e, dependendo de sua configuração, caracterizam o motor em mono ou trifásico.

A Figura 40 (a) apresenta os elementos construtivos de um motor de indução, enquanto a Figura 40 (b) representa suas conexões elétricas.

Figura 40 – Vista em corte de um motor de indução típico simplificado (a) e suas conexões (b).



Fonte: (Kosow, 1994).

Os motores gaiola de esquilo representam a maior utilização dentre os motores de indução devido à sua construção de menor custo e maior facilidade de manutenção. Estes motores possuem barras condutoras encrustadas em seus rotores e conectadas eletricamente através de anéis, geralmente soldados aos terminais dos condutores.

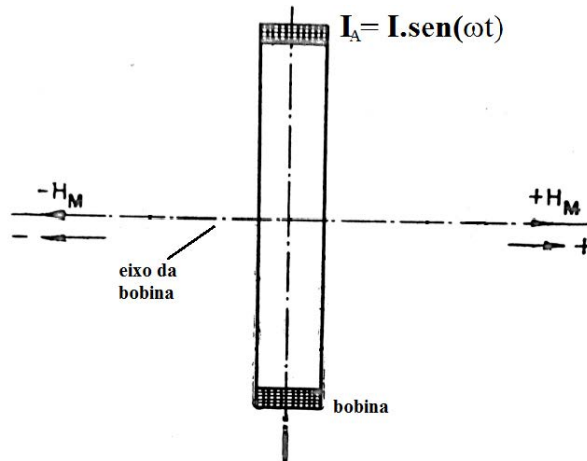
Já em motores de rotor bobinado, os condutores são enrolados em delta ou estrela, dependendo do número de fases do motor, o que aumenta o custo e manutenção, limitando a utilização deste motor para aplicações específicas.

## 4.2 ASPECTOS FUNCIONAIS

O princípio de funcionamento do motor assíncrono baseia-se na geração de um campo eletromagnético variável dentro de uma bobina condutora, conforme a descoberta de Faraday-Newman-Lenz. O campo variante em uma bobina fixa produzirá um efeito semelhante a um ímã girando ao redor do eixo desta bobina.

Assim, considerando uma bobina fixa percorrida por uma corrente alternada senoidal, o campo resultante gerado em seu interior e dirigida ao longo de seu eixo será variante entre dois valores máximos  $+H_M$  e  $-H_M$ , conforme a Figura 41.

Figura 41 – Campo variante sendo gerado por corrente senoidal em bobina.



Fonte: (Martignoni, 1987).

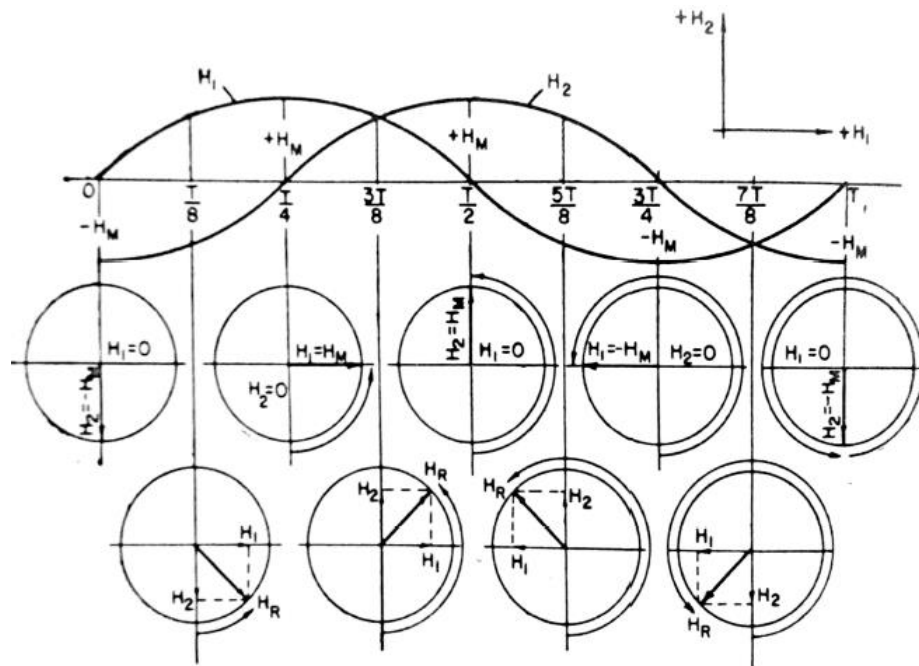
Ao adicionar uma segunda bobina idêntica, perpendicular e alimentada por uma corrente defasada de  $90^\circ$  em relação a esta, teremos dois campos,  $H_1$  e  $H_2$ , perpendiculares (defasados de  $90^\circ$ ) e iguais em módulo que se somarão vetorialmente gerando um campo resultante  $H_R$ . Este campo resultante será sempre igual a um valor máximo  $H_M$  determinado pela equação (39), onde através de substituição trigonométrica pode se encontrar a equação (40), que representa o valor do campo, sendo que  $w$  representa a frequência da oscilação dos campos multiplicada por  $2\pi$ .

$$H_R = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = \sqrt{H_M^2 \cdot \sin^2 wt + H_M^2 \cdot \sin^2(wt - 90^\circ)} \quad (39)$$

$$H_R = H_M \sqrt{\sin^2 wt + \cos^2 wt} = H_M \quad (40)$$

Isto significa que o campo resultante possui sempre um valor de módulo constante e igual ao valor máximo do campo obtido em cada bobina separadamente. Além disso, ele está continuamente girando ao redor do eixo das bobinas, onde a cada oitavo de período (ciclo completo da corrente) o campo desloca-se  $45^\circ$ , conforme mostra a Figura 42.

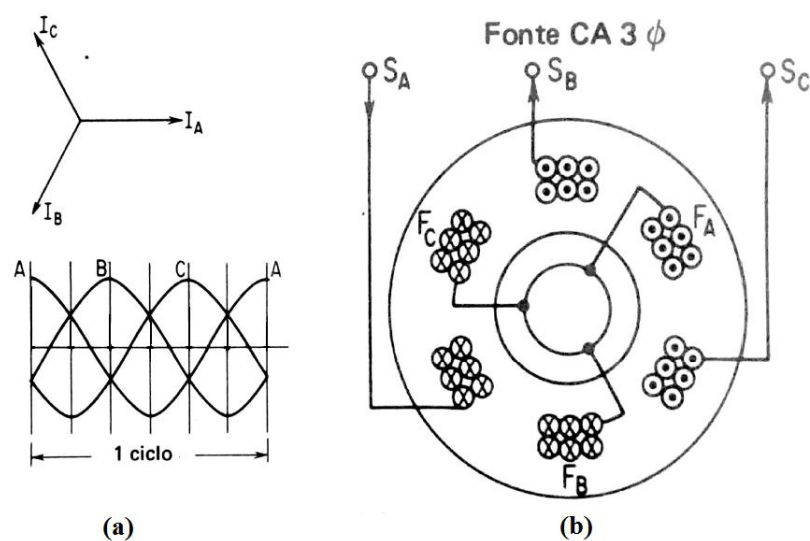
Figura 42 – Campo girante criado por correntes senoidais nas bobinas.



Fonte: (Martignoni, 1987).

O mesmo raciocínio pode ser utilizado para o caso onde, ao invés de duas bobinas, o motor possui três bobinas, ou três fases. Neste caso, as três bobinas são defasadas de  $120^\circ$  entre si e as correntes são atrasadas em  $120^\circ$  umas das outras, conforme indica a Figura 43.

Figura 43 – Correntes defasadas de  $120^\circ$  (a) e disposição das bobinas (b) num enrolamento de armadura trifásico.



Fonte: (Kosow, 1994).

Uma vez que o sistema é alimentado por uma tensão trifásica equilibrada, as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$  gerarão os campos  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ , que também oscilarão a uma frequência  $w$  e serão determinados pelas equações (41), (42) e (43).

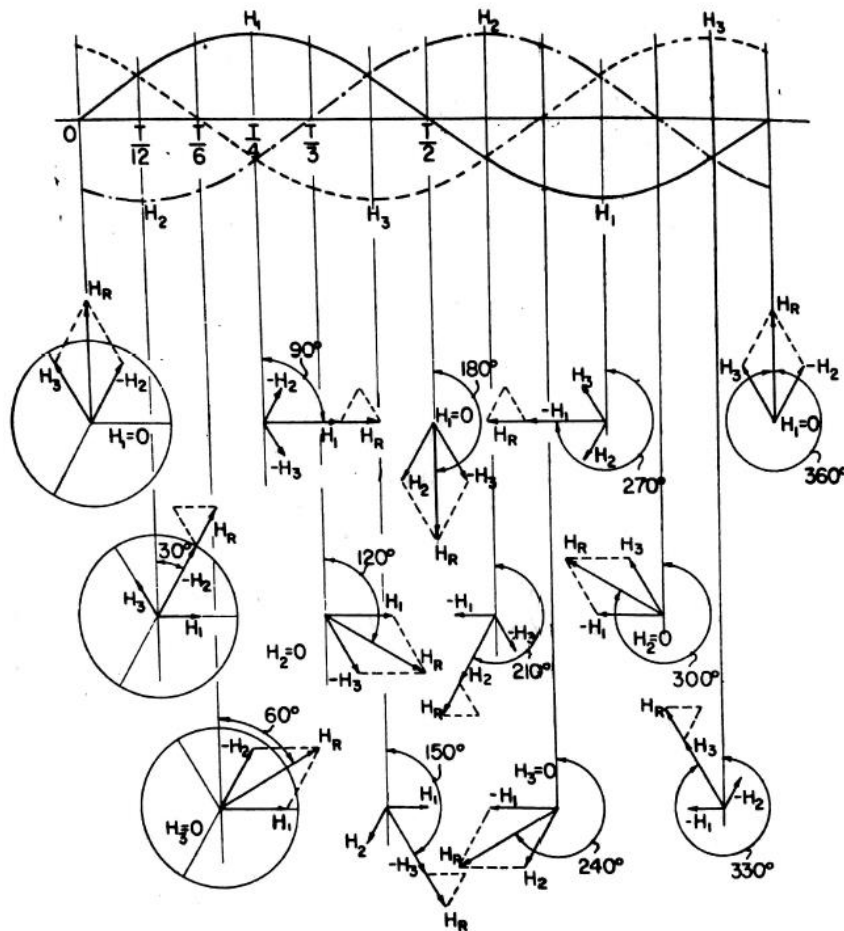
$$I_A \rightarrow H_1 = H_M \text{ sen } wt \quad (41)$$

$$I_B \rightarrow H_2 = H_M \text{ sen}(wt - 120^\circ) \quad (42)$$

$$I_C \rightarrow H_3 = H_M \text{ sen}(wt + 120^\circ) \quad (43)$$

O campo resultante será obtido pela soma vetorial destes três campos, de forma que a composição resultante possui módulo sempre constante e igual a  $1,5 \times H_M$ , e seu sentido desloca-se periodicamente de modo angular, ou seja, girando constantemente ao redor do eixo, conforme mostra a Figura 44.

Figura 44 – Campo girante criado por correntes senoidais nas bobinas.



Fonte: (Martignoni, 1987).

A velocidade do campo resultante girante é proporcional à frequência da rede ( $f$ ) e recebe o nome de velocidade síncrona ( $N_S$ ), podendo ser definida pela equação (44). A velocidade do rotor ( $N$ ) será sempre menor que a síncrona, sendo que a diferença entre elas é chamada de escorregamento ( $s$ ), determinado pela equação (45). Quanto maior a carga acionada pelo motor, maior a diferença entre as velocidades, de forma que o escorregamento é quase nulo quando o motor opera em vazio.

$$N_S = \frac{120 \times f}{p} \quad (44)$$

$$s = \frac{N_S - N}{N_S} \quad (45)$$

A equação (46) expressa a relação entre a velocidade do motor, frequência da rede, número de polos e escorregamento.

$$N = \frac{120 \times f}{p} \times (1 - s) \quad (46)$$

Sendo assim, a velocidade do motor é constante, dependendo apenas de um parâmetro construtivo do motor (número de polos), de um parâmetro externo (frequência da rede) e de um parâmetro dependente da carga acionada pelo motor. Portanto, para controlar a velocidade deste motor, é necessário alterar um destes parâmetros: o número de polos, ou a frequência da rede de alimentação, ou o torque do motor.

Para variar o número de polos de um motor, é necessário alterar as configurações de enrolamento do estator, o que exige uma estrutura que acomode os enrolamentos específicos e possibilite manobras (chaveamento) exigindo, portanto, uma carcaça maior.

A alternativa seria alterar as condições exigidas pela carga, como resistência rotórica ou tensão do estator, para variar a velocidade do rotor mantendo a velocidade síncrona constante. A variação de qualquer uma ou ambas as condições resulta no aumento das perdas do rotor, o que limita a utilização deste artifício (WEG, 2014).

Outra opção eficaz que vem sendo amplamente utilizada na indústria para controlar a velocidade do motor seria alimentá-lo através de um inversor de frequência. Contudo, isto envolveria o alto custo do aparelho e um dimensionamento adequado, visando a eficiência energética por meio da redução de componentes harmônicas.

Apesar de ser um assunto muito recorrido e amplamente presente nas literaturas, o controle da velocidade não entra no escopo deste trabalho, portanto a questão não será aprofundada. Contudo, é interessante observar os parâmetros que influenciam na velocidade do campo girante antes de executar a rebobinagem, para determinar o número de polos adequados à aplicação.

Em suma, o princípio do funcionamento de motores de indução polifásicos é a indução de um campo resultante girante através de duas ou mais bobinas sendo percorridas por correntes alternadas (senoidais) defasadas de tantos graus elétricos quanto as bobinas estão defasadas fisicamente, de acordo com o número de polos.

Assim sendo, não é possível criar um campo resultante girante com apenas um par de bobinas, pois o campo gerado não é rotativo. Em outras palavras, os condutores do estator de um motor de indução monofásico não cria um campo magnético girante em seu rotor mas sim um pulsante, alinhado ao campo do estator. Por esta razão, estes motores não possuem torque de partida inerente e, portanto, empregam diferentes métodos para serem capaz de iniciar a rotação.

O rotor de qualquer motor de indução monofásico pode ser igual ao rotor gaiola de esquilo polifásico, sem ligações físicas entre ele e o estator. As ranhuras do estator devem ser distribuídas de forma uniforme em sua superfície interna e seus enrolamentos são, geralmente, divididos em duas partes, cada uma delas deslocada no espaço e ligadas em série à mesma fonte de corrente alternada monofásica.

Uma parte dos enrolamentos do estator é chamado de principal e está associado ao funcionamento rotativo do motor, enquanto o outro é chamado de enrolamento auxiliar, associado à partida do motor. O enrolamento principal possui reatância indutiva mais elevada para manter a corrente de funcionamento mais atrasada em relação à tensão de alimentação, e o auxiliar é construído de forma a constituir uma defasagem de  $90^\circ$  elétricos no espaço em relação ao enrolamento principal. A corrente que percorre o enrolamento auxiliar deve ser adiantada o suficiente para que haja uma defasagem no tempo em relação à primária, não necessariamente de  $90^\circ$ .

As classificações para este tipo de motor variam de acordo com a construção e o método utilizado para se obter o torque da partida, conforme apresentado a seguir.

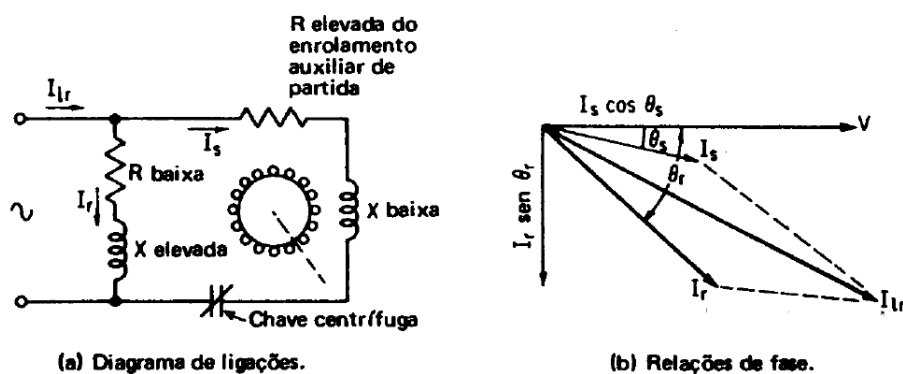
#### 4.2.1 Motor de indução monofásico com partida por fase dividida

Este tipo de motor possui seu estator enrolado com os dois enrolamentos, o principal e o auxiliar, defasados  $90^\circ$  no espaço e a corrente no auxiliar está adiantada de menos que  $90^\circ$  do principal. Esta construção e as componentes das correntes permitem a criação de um campo magnético girante equivalente, que gera o torque de partida suficiente para acelerar o motor no sentido do campo girante.

O enrolamento primário possui característica indutiva mais substancial, com baixa resistência, e impedância resultante menor que a do auxiliar, resultando numa corrente maior e atrasada de um valor levemente mais próximo de  $90^\circ$  em relação à tensão de alimentação (geralmente, o valor deste atraso é menor que  $90^\circ$ ). O enrolamento auxiliar, por outro lado, possui característica resistiva mais pronunciada, com reatância indutiva menos acentuada, resultando numa corrente menor em relação à do primário e com defasamento menor em relação à tensão de alimentação. Empiricamente, a defasagem entre a corrente de funcionamento e a de partida está em torno de  $25^\circ$ .

A Figura 45 apresenta o diagrama das ligações elétricas e um exemplo de diagrama fasorial das correntes para este tipo de motor. A chave centrífuga abre o circuito auxiliar quando o motor atinge cerca de 15 por cento de escorregamento para evitar as perdas devido ao aquecimento dos enrolamentos.

Figura 45 – Diagrama equivalente elétrico das ligações (a) e diagrama fasorial das correntes (b) para o motor de indução monofásico de fase dividida.



Fonte: (Kosow,1994).

Para inverter o sentido de rotação, é necessário inverter os terminais do enrolamento auxiliar, o que criará um campo girante no sentido oposto. Entretanto, como o torque de funcionamento monofásico é maior que o de campo girante, inverter esta ligação não resultaria na inversão da rotação do motor e, por isto, ele é classificado como não reversível.

Para possibilitar a inversão do motor, seria necessário desligá-lo e, após sua parada, religá-lo com o enrolamento auxiliar invertido. Além disso, o controle da velocidade deste motor é bastante limitada e pouco utilizada, principalmente para cargas mais pesadas, pois resulta em redução do torque.

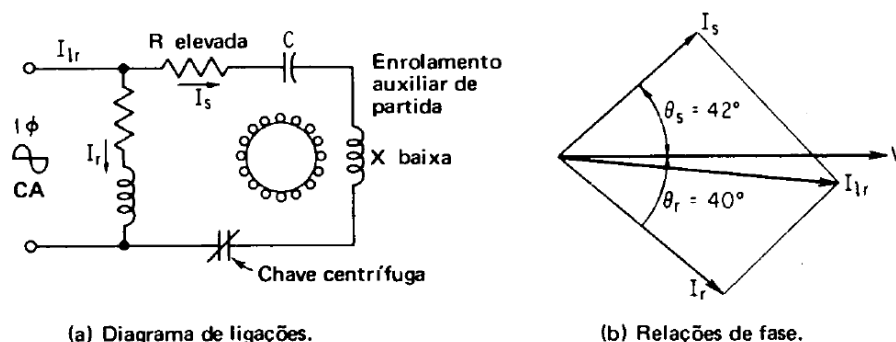
#### 4.2.2 Motor de indução monofásico com partida por capacitor

Como foi visto, a defasagem das correntes nos motores mencionados no item anterior raramente chega a  $90^\circ$ , o que gera um torque de partida relativamente baixo. Para aumentar esta defasagem e, conseqüentemente o torque de partida, um capacitor é adicionado em série ao enrolamento auxiliar, de forma que o adiantamento de sua corrente em relação à corrente do primário atinja um valor mais próximo de  $90^\circ$  (empiricamente em torno dos  $82^\circ$ ).

O princípio de funcionamento é semelhante, mas o uso do capacitor tende a reduzir a corrente de partida e melhorar seu fator de potência. Além disso, este motor é classificado como reversível a velocidades relativamente mais baixas, pois o torque associado ao campo girante bifásico é maior que o torque associado ao funcionamento monofásico do motor. Dessa forma, ao inverter a polaridade do enrolamento auxiliar, sua velocidade diminui lentamente até que pare e gire no sentido oposto.

A Figura 46 apresenta o diagrama das ligações elétricas e um exemplo de diagrama fasorial das correntes para este tipo de motor.

Figura 46 – Diagrama equivalente elétrico das ligações (a) e diagrama fasorial das correntes (b) para o motor de indução monofásico com capacitor



Fonte: (Kosow,1994).

#### 4.2.3 Motor de indução monofásico com partida por capacitor permanente

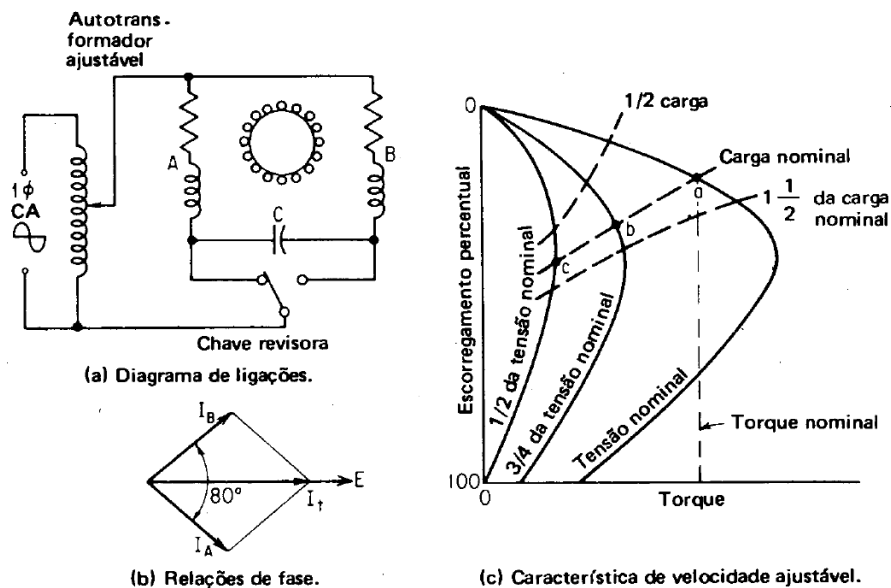
Neste motor, o enrolamento auxiliar contendo o capacitor permanente fica ligado durante a partida e o funcionamento monofásico. Normalmente, os enrolamentos principal e auxiliar são idênticos e o capacitor utilizado é do tipo a óleo. Como o enrolamento auxiliar será alimentado durante todo o tempo de operação, o capacitor é projetado para este fim e não para a partida e, portanto, seu projeto requer uma análise bastante sofisticada no que diz respeito ao fator de potência, dimensionamento dos condutores, componentes harmônicas, etc.

O campo magnético girante obtido por esta configuração é satisfatoriamente uniforme, razão pela qual o motor não possui característica pulsante, além de reduzir sensivelmente seu ruído.

Mesmo possuindo torque de partida menor, cerca de 50 a 100 por cento do valor nominal, este motor continua sendo uma escolha bastante conveniente para certas aplicações. Isto ocorre devido a sua maior facilidade no controle de velocidade, obtido através da variação da tensão de linha, conforme se observa na Figura 47 (c).

A Figura 47 (a) apresenta o circuito elétrico equivalente do motor de indução monofásico com partida por fase dividida e capacitor permanente sendo alimentada por um autotransformador para controlar a tensão e, como consequência, sua velocidade. A Figura 47 (b) mostra o diagrama fasorial das correntes em relação à tensão de alimentação, onde se observa correntes de funcionamento iguais e defasadas de um valor próximo a  $90^\circ$ .

Figura 47 – Diagrama equivalente elétrico das ligações (a), diagrama fasorial das correntes (b) e características de tensão (c) para o motor com capacitor permanente.



Fonte: (Kosow,1994).

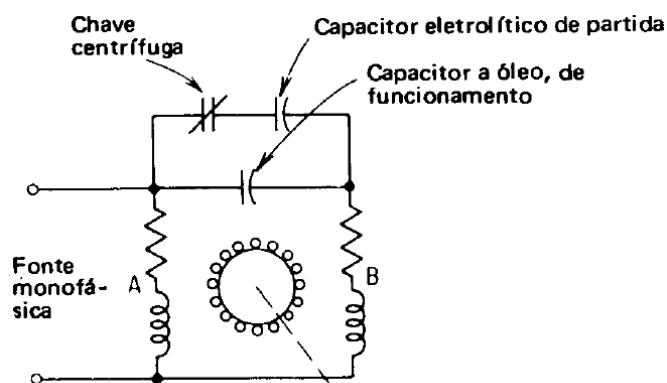
#### 4.2.4 Motor de indução monofásico com partida por duplo capacitor

Consiste no tipo de motor monofásico mais completo, pois utiliza uma combinação das vantagens dos dois anteriores, partindo com alto torque (como um motor de partida a capacitor), e funcionando em regime com operação silenciosa, velocidade controlada, alta eficiência e fator de potência elevado (como um motor de partida a capacitor permanente).

Como se observa na Figura 48, o capacitor de partida é do tipo eletrolítico e possui capacitância mais elevada que o capacitor de funcionamento, que é do tipo a óleo. Uma chave centrífuga desliga o ramo onde se encontra o capacitor de partida quando o motor atinge cerca de 25 por cento do escorregamento.

Devido ao seu custo elevado e aos refinados cálculos para otimização dos capacitores, este tipo de motor normalmente é fabricado apenas para potências superiores a 1 cv.

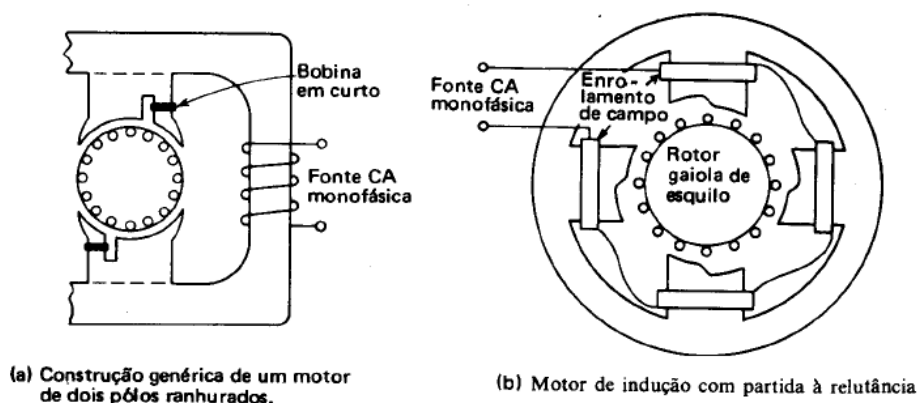
Figura 48 – Diagrama equivalente elétrico das ligações para o motor com duplo capacitor.



Fonte: (Kosow,1994).

Outras construções de motores de indução monofásicos consideram a não uniformidade de seus estatores ou ainda a utilização de escovas e comutador para a obtenção do torque de partida necessário. Entre eles estão o motor de indução de pólo ranhurado, o com partida à relutância – apresentados na Figura 49 – e também o motor com partida à repulsão, que não entram no escopo deste trabalho.

Figura 49 – Aspectos construtivos de motores de indução monofásicos com dois polos ranhurados (a) e com partida a relutância (b).



Fonte: (Kosow,1994).

Em vista do exposto, este trabalho considera apenas motores monofásicos de fase dividida, ou seja, cujos enrolamentos do estator são constituídos por uma fase principal e outra auxiliar.

## 5. METODOLOGIA

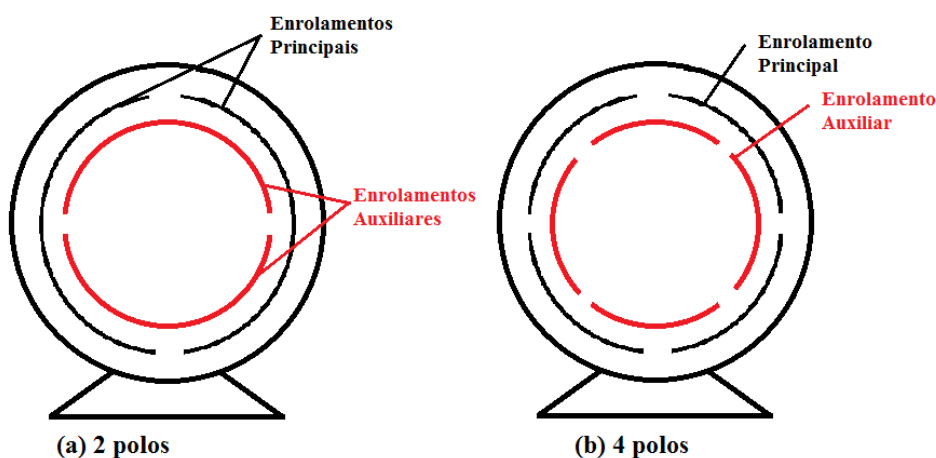
A princípio, deve-se ter em mente que o processo de rebobinagem envolve cuidadosos procedimentos técnicos de limpeza, isolamento e dimensionamento dos condutores, que não estão no escopo deste trabalho. Em seguida, deve-se definir qual método de partida do motor monofásico e realizar o correto dimensionamento dos componentes reativos para reduzir componentes harmônicas e melhorar o fator de potência.

Devem ser determinados também quais serão as especificações dos condutores utilizados nos enrolamentos principal e auxiliar, o número de polos e a quantidade de ranhuras do estator. Para o enrolamento principal, o dimensionamento dos condutores é calculado através de normas técnicas específicas, mas os condutores do auxiliar são obtidos de maneira empírica e seus valores são dados em relação aos do principal. Neste trabalho, considera-se que o enrolamento auxiliar seja idêntico ao principal.

A partir de então, deve ser definido qual o tipo de enrolamento será utilizado para iniciar o cálculo. Em processos de rebobinagem de estatores, geralmente são utilizados enrolamentos concêntricos devido à maior facilidade para construção do molde das bobinas e sua inserção nas ranhuras (processos bastante artesanais). Contudo, não apresenta vantagens ou propriedades específicas ao motor, diferente dos enrolamentos imbricados, que possibilitam a utilização de passo fracionário, economizando condutor e reduzindo componentes harmônicas. Logo, será considerado apenas o enrolamento do tipo imbricado.

O processo é análogo ao explicado no Capítulo 3, diferindo, basicamente, que o enrolamento de motores de indução é realizado no estator e não no rotor, e seus condutores não são conectados a um comutador. Portanto, ao determinar o número de polos, é necessário observar a construção conforme a Figura 50, que apresenta as configurações dos enrolamentos principal e auxiliar para dois e quatro polos (o raciocínio para motores com mais polos é o mesmo).

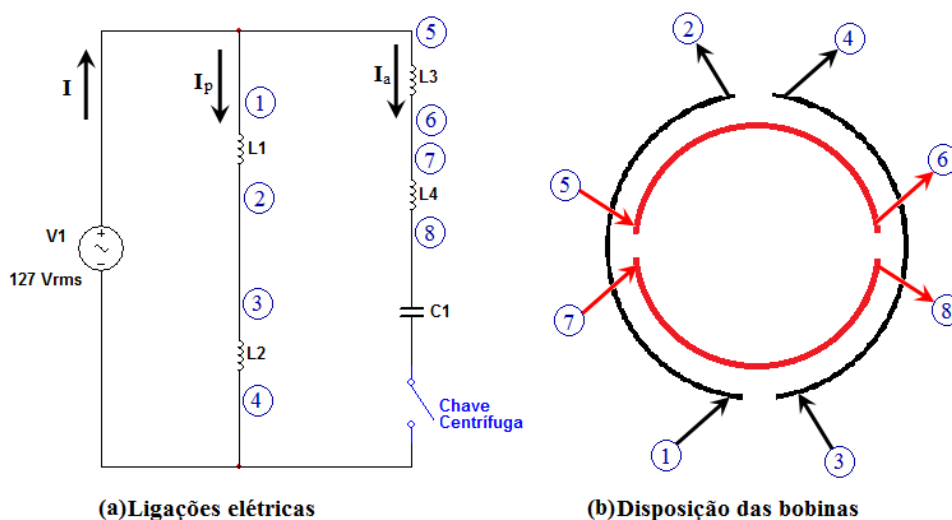
Figura 50 – Disposição espacial para enrolamentos primário e secundário de dois (a) e quatro (b) polos.



Fonte própria

Considerando o motor de dois polos, duas bobinas em série constituirão o enrolamento principal e outras duas bobinas em série o auxiliar. A Figura 51 apresenta o circuito esquemático para as ligações elétricas e a disposição espacial dos enrolamentos para um motor de dois polos. O polo principal é constituído pelas bobinas L1 e L2, e o polo auxiliar pelas bobinas L3 e L4, conectados de acordo com as indicações numéricas (em azul) da Figura 51, de forma que o cabo (1) está eletricamente conectado ao (5).

Figura 51 – Esquema de ligação elétrica (a) e disposição das bobinas (b) para o motor de dois polos.



Fonte própria.

Inicialmente, considera-se que os enrolamentos principal e auxiliar serão ambos do tipo imbricado de camada simples, ou seja, apenas um lado de cada bobina estará presente a cada ranhura. Dessa forma, qualquer ranhura deve possuir um lado da bobina principal e um lado da bobina auxiliar, formando, juntos, um enrolamento de camada dupla. Dependendo do tamanho da ranhura e do dimensionamento dos condutores, podem-se utilizar mais camadas por ranhura, permitindo assim a utilização do passo fracionário para reduzir os harmônicos.

É possível realizar o enrolamento progressivo ou regressivo, tomando os cuidados explicados no Capítulo 3, item 3.2, a respeito da relação entre a progressão do enrolamento e a polaridade da tensão sobre a bobina.

Definido o número de polos, verifica-se a quantidade de ranhuras por polo, para realizar corretamente a distribuição das bobinas. É necessário que o número de ranhuras por polo seja par, pois, caso contrário, alguma ranhura ficará vazia.

As equações (47) e (48) determinam os passos posterior e anterior para os enrolamentos progressivo e regressivo, respectivamente, quando o número de ranhuras por polo é par. Neste caso, o passo posterior é sempre a metade do passo polar, enquanto o passo anterior é uma unidade menor (para enrolamentos progressivos) ou maior (para enrolamentos regressivos) que o passo anterior.

$$Y_1 = \frac{\tau}{2} \quad e \quad Y_2 = Y_1 - 1 \quad (47)$$

$$Y_1 = \frac{\tau}{2} \quad e \quad Y_2 = Y_1 + 1 \quad (48)$$

Quando o número de ranhuras por polos for ímpar os passos posterior ( $Y_1$ ) e anterior ( $Y_2$ ) para enrolamentos progressivos e regressivos são determinados pelas equações (49) e (50), respectivamente.

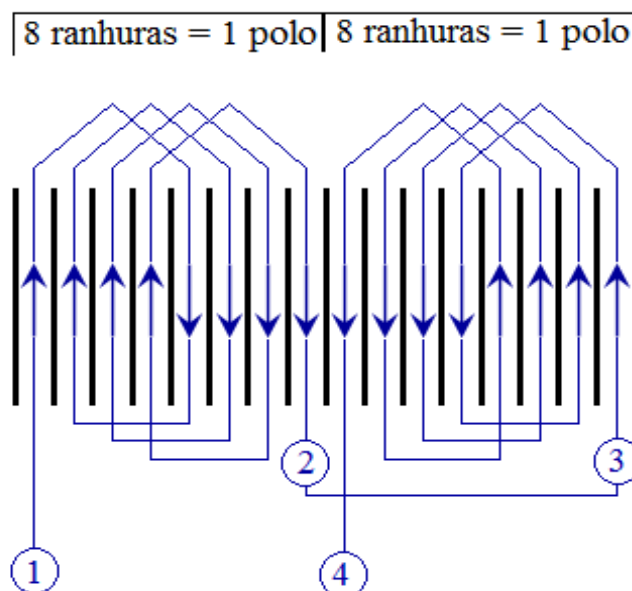
$$Y_1 = \frac{\tau-1}{2} + 1 \quad e \quad Y_2 = \frac{\tau-1}{2} \quad (49)$$

$$Y_1 = \frac{\tau-1}{2} + 1 \quad e \quad Y_2 = \frac{\tau-1}{2} + 2 \quad (50)$$

Os polos seguintes devem ser enrolados utilizando os mesmos passos posterior e anterior, porém alternando as polaridades a cada polo consecutivo.

Para demonstrar este procedimento, supõe-se que o motor de dois polos da Figura 51 possua 16 ranhuras. Calcula-se o passo polar, através da equação (16) encontrando um passo de 8 ranhuras por polo. Para que o enrolamento seja progressivo, utiliza-se a equação (47) para encontrar os passos posterior e anterior ( $Y_1 = 4$  e  $Y_2 = 3$ ). A Figura 52 mostra o esquema planificado para o enrolamento imbricado progressivo das bobinas principais L1 e L2, no qual as setas indicam o sentido do enrolamento e as indicações numéricas representam as mesmas ligações da Figura 51.

Figura 52 – Esquema planificado do enrolamento principal – imbricado progressivo – para um motor monofásico de dois polos.

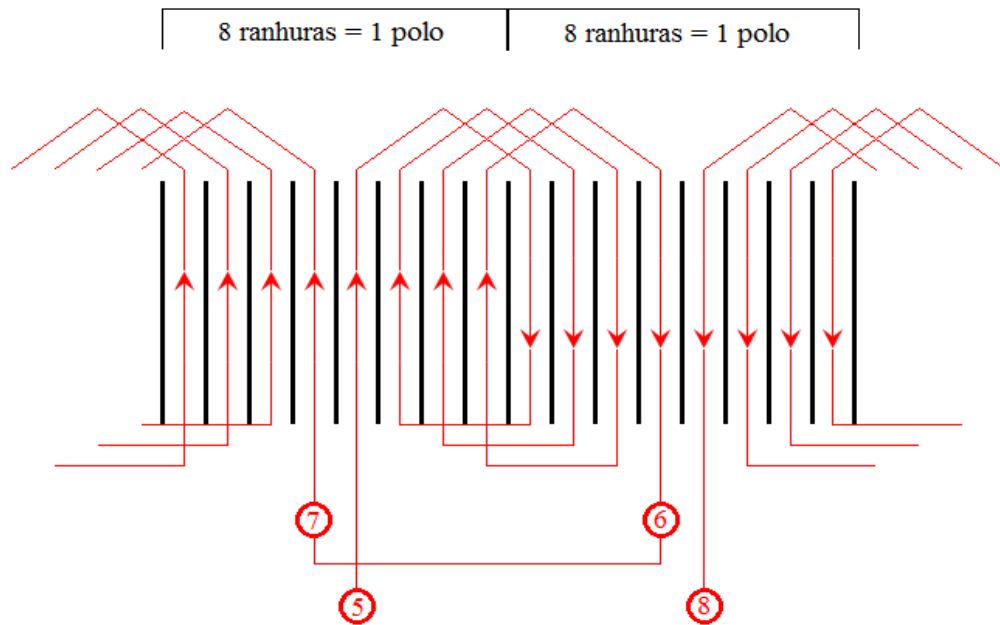


Fonte própria.

O enrolamento auxiliar deve ser enrolado da mesma forma e seguindo as mesmas equações (47) a (50) de acordo com as especificações do motor e do enrolamento, porém deslocado fisicamente de  $90^\circ$  elétricos – neste caso  $90^\circ$  mecânicos, segundo a equação (23). O deslocamento pode ser tanto adiantado quanto atrasado, visto que esta alteração resulta na inversão do sentido de rotação do motor.

A Figura 53 apresenta esquema planificado para o enrolamento imbricado das bobinas auxiliares L3 e L4, que deverá ser sobreposto ao enrolamento principal e adiantado fisicamente  $90^\circ$  em relação a ele. As setas indicam o sentido do enrolamento e as indicações numéricas são referentes às ligações representadas na Figura 51.

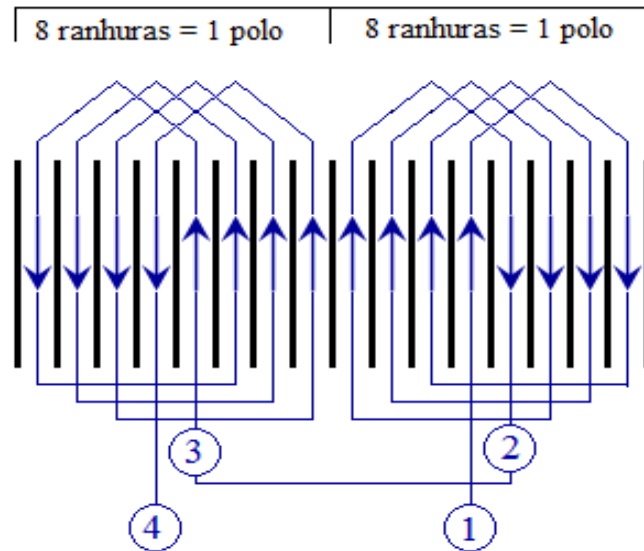
Figura 53 – Esquema planificado do enrolamento auxiliar – imbricado progressivo – para um motor monofásico de dois polos.



Fonte própria.

Caso este mesmo motor fosse enrolado de forma regressiva, a equação (48) deveria ser utilizada para encontrar os passos posterior e anterior ( $Y_1 = 4$  e  $Y_2 = 5$ ). A Figura 54 mostra o esquema planificado para o enrolamento imbricado regressivo das bobinas principais L1 e L2 deste motor. As setas apontam o sentido do enrolamento, indicando que cada polo possui sentidos opostos. As referências numéricas representam as mesmas ligações da Figura 51.

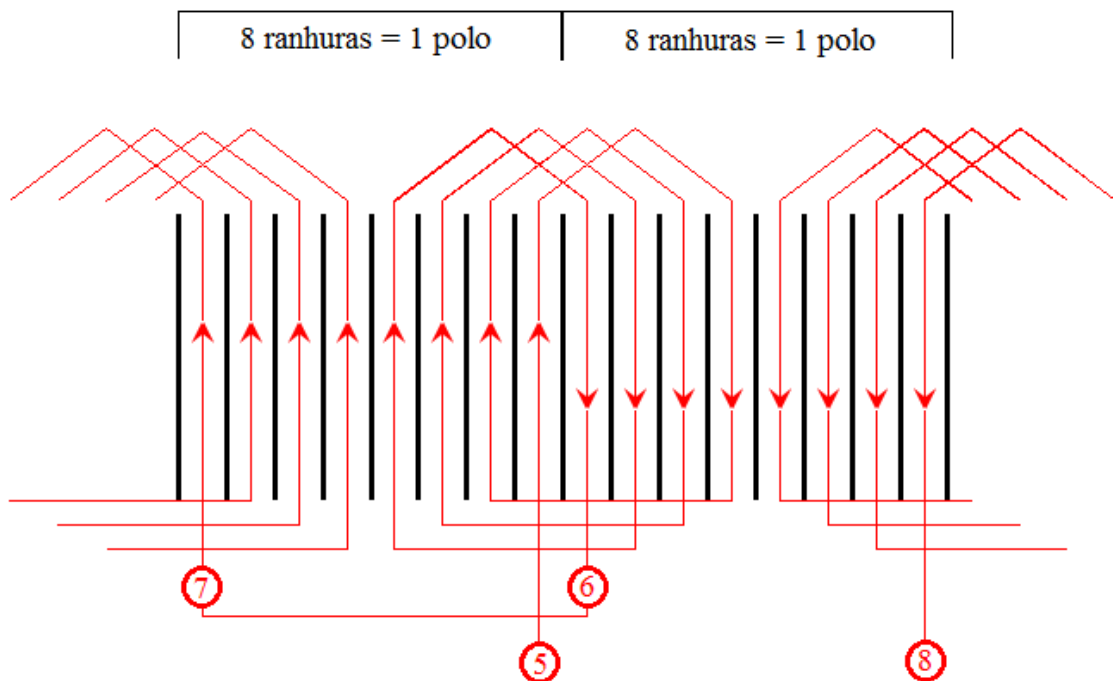
Figura 54 – Esquema planificado do enrolamento principal imbricado regressivo para um motor monofásico de dois polos.



Fonte própria.

Analogamente, o enrolamento auxiliar também pode ser construído de forma regressiva, conforme a Figura 55.

Figura 55 – Esquema planificado do enrolamento auxiliar – imbricado regressivo – para um motor monofásico de dois polos.



Fonte própria.

Para motores com passo polar ímpar, deve-se admitir que cada enrolamento possuirá uma ranhura vazia por polo, contanto que haja simetria.

O método pode ser consolidado em forma de um processo contendo sete etapas:

- 1º. Determinar os dados relevantes ao enrolamento imbricado:
  - a. Número de ranhuras no núcleo.
  - b. Número de polos.
  - c. Tipo de enrolamento (progressivo ou regressivo).
- 2º. Determinar a disposição física dos enrolamentos no estator, ou seja, determinar a posição dos polos. Para facilitar, é sugerido que se faça um diagrama semelhante ao da Figura 50.
- 3º. Determinar o método de partida desejado e as ligações elétricas entre as bobinas. Para melhor visualização, é sugerido que se faça um desenho do circuito elétrico e um diagrama das ligações elétricas entre as bobinas, conforme a Figura 51.
- 4º. Dimensionar os componentes reativos e os condutores das bobinas.
- 5º. Determinar o passo polar através da equação (16).
- 6º. Se o passo polar resultar em um número par, utilizar a equação (47) ou (48) para calcular os passos anterior e posterior. Caso contrário, utilizar a equação (49) ou (50).
- 7º. Fazer um esquema planificado para o enrolamento principal e outro para o auxiliar, indicando as ligações e o sentido de enrolamento, conforme as Figuras 51 a 55.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mencionado no Capítulo 5, o processo de rebobinagem envolve diversas técnicas para remover as bobinas antigas, limpar o núcleo, dimensionar corretamente os condutores para cada ranhura, isolar devidamente todos os condutores, bobinas e ranhuras, e realizar o fechamento do circuito elétrico dos enrolamentos. Essas técnicas estão descritas em diversos manuais de bobinagem, além de estarem presentes em fontes ainda mais descritivas como vídeos disponibilizados na internet. Devido a isso, o trabalho não considerou esses pormenores, designando a incumbência aos futuros acadêmicos interessados pelo tema.

O procedimento também não leva em consideração a utilização de passos fracionários para reduzir o efeito das componentes harmônicas sobre o enrolamento do motor. Esse assunto deve ser abordado em trabalhos posteriores para que o processo de bobinagem do motor monofásico seja o mais abrangente possível. Ademais, sugere-se que a metodologia seja testada, de forma a corrigir ou confirmar de forma prática os resultados apresentados neste trabalho. Outra sugestão válida para trabalhos futuros seria criar um script em determinada linguagem de programação para determinar os parâmetros de enrolamento, uma vez que os fluxogramas já foram definidos.

A principal consequência da conversão do motor trifásico em monofásico é a perda de rendimento devido ao campo girante ser, em média, menos intenso em comparação com o trifásico. Isso ocorre devido à dificuldade em ajustar o valor das impedâncias principal e auxiliar para que os valores das correntes possuam módulos iguais e a defasagem entre eles seja de  $90^\circ$ . Além disso, as componentes harmônicas influenciam no valor desse campo, causando variações indesejadas e até mesmo trepidações mecânicas ao motor.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um procedimento para o cálculo de rebobinagem de motor trifásico convertendo-o em monofásico e, como exemplo de aplicação, o procedimento foi executado para converter uma máquina trifásica de 4 polos, 16 ranhuras no estator em um motor monofásico de 2 polos e 16 ranhuras.

O procedimento apresentado em sua primeira versão apresenta pouca sofisticação na sua concepção, não considerando, por exemplo, a correção de harmônicos utilizando enrolamentos de passo fracionário. Contudo, os conceitos envolvidos no princípio de funcionamento apresentado previamente no trabalho são bastante apurados e necessários para a compreensão do método.

Utilizando-se esta metodologia pode-se propor outras opções de rebobinamento com os quais a supressão de harmônicos possa ser objetivada. Outros assuntos que não foram abordados neste trabalho foram o dimensionamento dos condutores das bobinas e do capacitor que funcionará em série com o enrolamento auxiliar, etapas que são muito importantes e que ficam como sugestão de trabalhos subsequentes à execução deste.

Utilizando a proposta descrita neste trabalho, é possível, a partir da carcaça de um motor que seria descartada, desenvolver um enrolamento de estator que possibilite a criação de um campo resultante girante em seu rotor para reaproveitar esta carcaça como um motor monofásico, evitando assim o seu descarte.

## REFERÊNCIAS

BLACK, Newton Henry; DAVIS, Harvey Nathaniel. **Practical Physics: Fundamental Principles and Applications to Daily Life**. New York, Ny: The Macmillan Co., 1922. 555 p. Fig.280. Disponível em: <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnet0873.png>>. Acesso em: 22 out. 2014.

BRAGA, Newton C.. **Como funciona o motor de corrente contínua: ART476**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/3414-art476a>>. Acesso em: 27 out. 2014.

BRANDÃO, Diogo Paiva de Leite. Generalidades sobre Máquinas Eléctricas. In: \_\_\_\_\_. **Máquinas Eléctricas: Introdução a Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua**. Lisboa: Fundação Calouste Gilbenkian, 1984. Cap. 1. p. 1-20.

CHAIB, J. P. M. C.; ASSIS, A. K. T.. Experiência de Oersted em Sala de Aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Campinas, Sp, v. 29, n. 1, p.41-51, mar. 2007. Disponível em: <[http://www.ifl.unicamp.br/~assis/Revista-Bras-Ens-Fis-V29-p41-51\(2007\).pdf](http://www.ifl.unicamp.br/~assis/Revista-Bras-Ens-Fis-V29-p41-51(2007).pdf)>. Acesso em: 20 out. 2014.

CHAPMAN, Stephen J.. **Electric Machinery Fundamentals**. 5. ed. New York, NY: Mcgraw-hill, 2012. 680 p.

DARLING, David J.. **Encyclopedia of Science: Oersted, Hans Christian (1777-1851)**. 1999. Disponível em: <<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/O/Oersted.html>>. Acesso em: 20 out. 2014.

DJURIC, Miroslav. **Blendtec Total Blender Teardown**. 2009. Disponível em: <<https://www.ifixit.com/Teardown/Blendtec+Total+Blender+Teardown/1128>>. Acesso em: 20 out. 2014.

FARADAY, Michael. Experimental Researches in Electricity. **Quarterly Journal Of Science And Philosophical Magazine**. London, p. 306-306. jan. 1844. Disponível em: <[http://docs.lib.noaa.gov/rescue/Rarebook\\_treasures/QC503F211839\\_PDF/QC503F211839v2.pdf](http://docs.lib.noaa.gov/rescue/Rarebook_treasures/QC503F211839_PDF/QC503F211839v2.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2014.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles Jr.; UMANS, Stephen D.. **Máquinas Eléctricas: Com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

FUENTES, Rodrigo Cardozo. **Apostila de Automação Industrial**. 2005. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em:  
<[http://w3.ufsm.br/fuentes/index\\_arquivos/CA05.pdf](http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/CA05.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2014.

HAYT, William H., Jr; BUCK, John A.. **Eletromagnetismo**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2003. 339 p. Tradução de: Antônio Romeiro Sapienza.

KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 10. ed. Porto Alegre: Globo, 1994. 667 p. Tradução de: Felipe L. R. Daiello e Percy A. P. Soares.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas Elétricas de Corrente Contínua**. São Paulo: Edart – Livraria Editora, 1967. 179 p. Série de Manuais Técnicos vol. 5.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de Corrente Alternada**. 5. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 410 p.

NAVE, Carl Rod. **Lenz's Law**. 2012. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/farlaw.html>>. Acesso em: 20 out. 2014.

OHIO ELECTRIC MOTORS. **What is the difference between an AC motor and a DC motor?**. Barnardsville, NC, 2011. Q&A. Disponível em:  
<<http://www.ohioelectricmotors.com/what-is-the-difference-between-an-ac-motor-and-a-dc-motor-673>>. Acesso em: 13 oct. 2014.

OTTOBONI, Augusto. Comparativo entre os Motores Elétricos CA e CC: Vantagens e Desvantagens dessas duas tecnologias. **Saber Eletrônica**, São Paulo, v. 48, n. 461, p.52-58, maio/junho 2012. Bimestral. Disponível em:  
<[http://www.sabereletronica.com.br/files/file/SE461\\_web.pdf](http://www.sabereletronica.com.br/files/file/SE461_web.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2014.

ROLDÁN, José. **Manual de Bobinagem**: Guia prático de enrolamento de máquinas elétricas e rebobinagem de motores para bobinadores eletricitistas e todos os interessados no ramo. Curitiba, Pr: Hemus, 2002. 268 p. Tradução de: Joshuah de Bragança Soares.

SEIXAS, Falcondes José Mendes de. **Máquinas Elétricas II**. 2012. Apostila de Máquinas Elétricas II – Unesp, Campus de Ilha Solteira. Disponível em:  
<<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/maquinas-eletricas--ii-2a-ed---prof-falcondes.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2014.

SIEMENS. **Motores de Corrente Contínua:** Guia Rápido para uma Especificação Precisa. 2006. Publicação Técnica. Disponível em: <[http://www.siemens.com.br/medias/FILES/2910\\_20060412165714.pdf](http://www.siemens.com.br/medias/FILES/2910_20060412165714.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2014.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Campo Magnético de um Solenóide.** Disponível em: <<http://www.alunosonline.com.br/fisica/campo-magnetico-um-solenoides.html>>. Acesso em: 22 out. 2014.

VILLAR, Gileno José de Vasconcelos. **Geradores e Motores CC (Máquinas de Corrente Contínua).** 2006. Apostila de Máquinas e Acionamentos Elétricos - CEFETR, Unidade de Ensino Descentralizada de Mossoró. Disponível em: <<http://www.liceutec.com.br/novo/liceutec/autoindex/Downloads/Apostila%20do%20Professor/Prof.%20Luciano/4%C2%BA%20modulo/Apostila%20de%20Maquinas%20CC.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2014.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos.** São Paulo: Weg, 2014. 68 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2014.

WEG. **Guia Prático de Treinamento Técnico Comercial: Motor Elétrico.** 2013. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-pratico-de-treinamento-de-motores-eletricos-50009256-guia-rapido-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2014.