



GUIA INTERATIVO NA SELEÇÃO E CÁLCULO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

JOANA FILIPA RIBEIRO MAGALHÃES

novembro de 2018

GUIA INTERATIVO NA SELEÇÃO E CÁLCULO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Joana Filipa Ribeiro Magalhães



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Joana Filipa Ribeiro Magalhães, N° 1100323, 1100323@isep.ipp.pt

Orientação científica: Prof. Doutor José António Beleza Carvalho, jbc@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

À minha mãe, aos meus avós,
Arlindo e Luciana, à minha
irmã, aos meus tios, Jorge e
Paula, aos meus primos, à
minha sobrinha Carolina...

Agradecimentos

Em primeiro lugar não poderia deixar de agradecer à minha mãe, Carolina Ribeiro, à minha irmã, Ana Magalhães, aos meus avós, Arlindo e Luciana, e aos meus tios, Jorge e Paula, pelo o apoio incondicional que me deram ao longo todo o tempo e por me ajudarem nos momentos em que me apeteceu desistir de tudo. Sem vós eu não seria o que sou hoje.

Agradeço ao meu orientador, ao Prof. Doutor José António Beleza Carvalho, por todo o apoio e ajuda durante a execução da dissertação.

Aos meus amigos que me ajudaram durante todo o meu percurso, que estiveram sempre nos bons e melhores momentos, que me ajudaram a erguer a cabeça nos momentos mais difíceis.

A todos um Muito Obrigada por me ajudarem e apoiarem.

Resumo

Atualmente, os motores elétricos de indução trifásicos são os mais utilizados na indústria.

São motores de elevada eficiência e baixo custo, permitidos em zonas com atmosferas perigosas e conseguem variar a velocidade através da utilização de aparelhos eletrónicos específicos para esse efeito.

Com a evolução que se verifica atualmente da indústria a nível mundial, o mercado tornou-se cada vez mais competitivo e produz cada vez mais, melhores motores, com classes de eficiência cada vez mais elevadas.

Neste trabalho apresenta-se uma ferramenta informática que consiste num guia interativo de seleção e cálculo do motor de indução trifásico, tendo como objetivo ajudar quem necessite de tomar decisões na seleção de um motor de indução para determinada utilização.

Através da introdução de alguns dados, a ferramenta interativa fornece todas as indicações necessárias relativamente a três motores para cada caso mediante os valores apresentados em catálogo.

Palavras-Chave

Motor de Indução Trifásico, Guia Interativo, Energia, Potência, Estator, Rótor

Abstract

Today, three-phase induction electric motors are the most used in the industry.

They are high efficiency and low-cost motors, allowed in areas with dangerous atmospheres and can vary the speed through the use of specific electronic devices for this purpose.

With the current evolution of industry worldwide, the market has become increasingly competitive and increasingly produces better engines with ever higher efficiency ratings.

This work presents a computer tool that consists of an interactive guide for selection and calculation of the three-phase induction motor, aiming to help those who need to make decisions in the selection of an induction motor for final use.

Through the introduction of some data, the interactive tool provides all the necessary information regarding three motors for each case using the values presented in the catalog.

KeyWords:

Three-phase Induction Motor, Interactive Guide Energy, Power, Stator, Rotor

Índice

Agradecimentos	III
Resumo	V
Abstract.....	VI
1 . Introdução.....	1
1.1. Enquadramento Geral.....	1
1.2. Objetivos do Trabalho.....	3
1.3. Organização da Dissertação	4
2 . Noções Fundamentais	7
2.1. Indutância.....	12
2.2. Indução Eletromagnética.....	16
2.3. Síntese	17
3 . Motor Assíncrono de Indução	19
3.1. Constituição do Motor.....	19
3.2. Princípio de Funcionamento.....	21
3.3. Arranque do Motor Assíncrono.....	23
3.4. Circuito Equivalente por Fase do Motor	25
3.5. Fluxo Energético e Rendimento.....	29
3.6. Controlo da Velocidade.....	31
3.7. Binário do Motor e o Circuito Equivalente de Thevenin	33
3.8. Síntese	39
4 . Análise das Classes de Eficiência dos Motores	41
4.1. Síntese	45
5 . Guia Interativo na Seleção e Cálculo de Motores de Indução Trifásico	47
6 . Conclusões	57
6.1. Proposta de Continuidade do Trabalho	58
Referências Bibliográficas.....	59

Índice de Figuras

Figura 1 - Gerador vs Motor [14]	2
Figura 2 - Diferentes tipos de motores elétricos existentes	4
Figura 3 - Triângulo das Potências [9]	11
Figura 4 – Figura que traduz a Lei de Ampere [19]	13
Figura 5 - Rótor em Gaiola de Esquilo [15]	20
Figura 6 - Rótor Bobinado [16]	21
Figura 7 - Arranque Estrela-Triângulo [5].....	24
Figura 8 - Motor de indução trifásico com rotor-bobinado em curto-circuito [5].....	25
Figura 9 - Circuito Equivalente à Frequência do Estator [17].....	27
Figura 10 - Circuito Equivalente do Motor de Indução [2].....	28
Figura 11 - Fluxo de Potências do motor de indução [18]	29
Figura 12 - Equivalente de Thevenin aos terminais a e b [2].....	33
Figura 13 - Circuitos equivalentes da resistência R_c do entreferro [2]	33
Figura 14 - Circuito equivalente simplificado de Thevenin do motor de indução	34
Figura 15 - Curva da velocidade da máquina de indução na zona de travagem, na zona do motor e na zona do gerador [2].....	36

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Definição das diversas classes de eficiência. Standard de 1996 [11].....	42
Tabela 2 - Folha de Excel com os valores de ensaio	48

Acrónimos

IEC – International Electrotechnical Commission

EUA – Estados Unidos da América

NEMA – National Electrical Manufacturers Association

CEMEP – European Committee of Manufacturers of Electrical and Power Electronics

LA – Lado Acionado

LOA – Lado não Acionado

AC – Corrente Alternada

F.E.M. – Força Eletromotriz

DC – Corrente Contínua

d.d.p. – Diferença de Potencial

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

As máquinas elétricas convertem energia, baseando-se o seu funcionamento nos fenómenos da indução eletromagnética.

Estas máquinas encontram-se divididas em dois grandes grupos, as estáticas e as rotativas. No que diz respeito às máquinas elétricas estáticas tem-se o exemplo dos transformadores cujo funcionamento não implica o movimento de nenhuma parte constituinte.

As máquinas rotativas são aquelas cuja constituição tem alguma parte móvel e o seu movimento é tipicamente do tipo rotacional. Os motores e os geradores são exemplos deste tipo de máquinas.

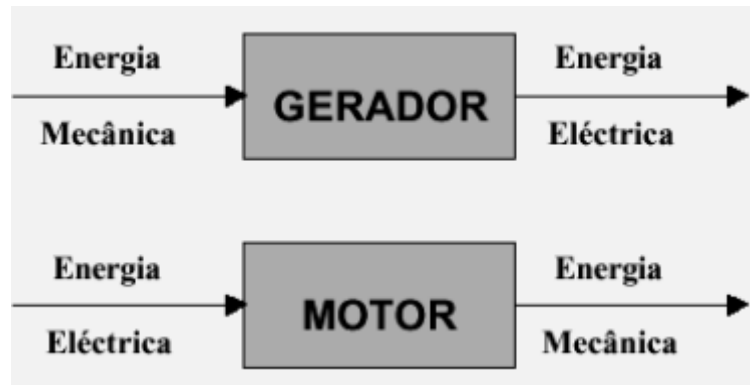


Figura 1 - Gerador vs Motor [14]

O gerador elétrico converte a energia mecânica em energia elétrica enquanto que o motor elétrico transforma a energia elétrica em mecânica.

Os transformadores elétricos são considerados máquinas elétricas porque o seu funcionamento baseia-se nos fenômenos da indução eletromagnética. Estes transformam energia elétrica que alimenta o seu lado primário, de forma a elevar ou baixar as tensões e as correntes, para alimentar a carga aos terminais do seu lado secundário.

Os motores podem ser divididos em motores de corrente contínua e motores de corrente alternada.

No caso dos motores de corrente contínua, estes necessitam de uma fonte de alimentação de corrente contínua, podendo ser necessário um retificador para converter a corrente alternada em corrente contínua. A velocidade deste motor pode ser ajustável dentro de certos limites. Estes motores possuem um custo muito elevado a nível de instalação e a nível de manutenção, que é necessária com muita frequência às escovas e coletores e por este motivo só é utilizado em casos muito especiais. Não se pode utilizar este tipo de motores em zonas com atmosferas perigosas.

O motor de corrente alternada é muito mais barato que o motor de corrente contínua. Além disso, é mais robusto e não possui escovas nem anéis coletores o que faz com que este motor não necessite de uma manutenção tão frequente como os motores anteriores. Ao contrário dos motores DC estes motores são permitidos em zonas que possuam atmosferas perigosas. [9]

Os motores AC são os mais utilizados, pois a distribuição de energia elétrica é feita, normalmente, em corrente alternada. Os motores AC podem ser divididos em dois tipos: os motores síncronos e os motores de indução.

Os motores síncronos funcionam a com uma velocidade fixa, não sofrendo a influência do deslizamento. São utilizados em situações em que é necessário obter potências elevadas a velocidades constantes.

Os tipos de máquinas mais utilizadas na indústria são os motores assíncronos de indução trifásicos. Estes motores funcionam a velocidade aproximadamente constante, que varia muito pouco com o regime de carga presente no veio. São simples, robustos e fiáveis [21], possuem um baixo custo, sendo, por isso, o motor mais utilizado. Nos dias de hoje, o problema de o motor assíncrono só trabalhar apenas a uma só velocidade já não se verifica, visto que existem conversores eletrónicos de velocidade que permitem que o motor adapte a sua velocidade à necessidade da sua utilização. [7]

Um motor assíncrono é um conversor eletromecânico, sendo a sua bobinagem estatórica alimentada pela rede de energia elétrica, transformando-a em energia mecânica, que vai ser fornecida a uma carga através da rotação e binário disponíveis no veio rotórico. [21]

Estes motores consomem cerca de 40% a 50% de toda a energia elétrica produzida mundialmente

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

No âmbito desta dissertação de mestrado em engenharia eletrotécnica – sistemas elétricos de energia, foi desenvolvido um guia interativo de seleção e cálculo de motores de indução trifásicos.

Este guia foi desenvolvido de modo a que, perante a escolha de valores de alguns parâmetros do motor desejado, o utilizador possa obter todas as informações necessárias dos motores disponíveis que mais se adequam à sua necessidade.

O utilizador ainda vai poder conhecer as dimensões do motor selecionado.

Este guia vai facilitar ao utilizador a escolha do motor pretendido, reduzindo o tempo que normalmente é gasto na pesquisa dos motores existentes no mercado, já que este é muito vasto. Vai buscar as informações introduzidas no Excel a nível dos motores que existem no mercado

e vai fazer uma pesquisa ao longo da folha de cálculo para ir procurar quais os motores que se podem adequar melhor a cada caso.

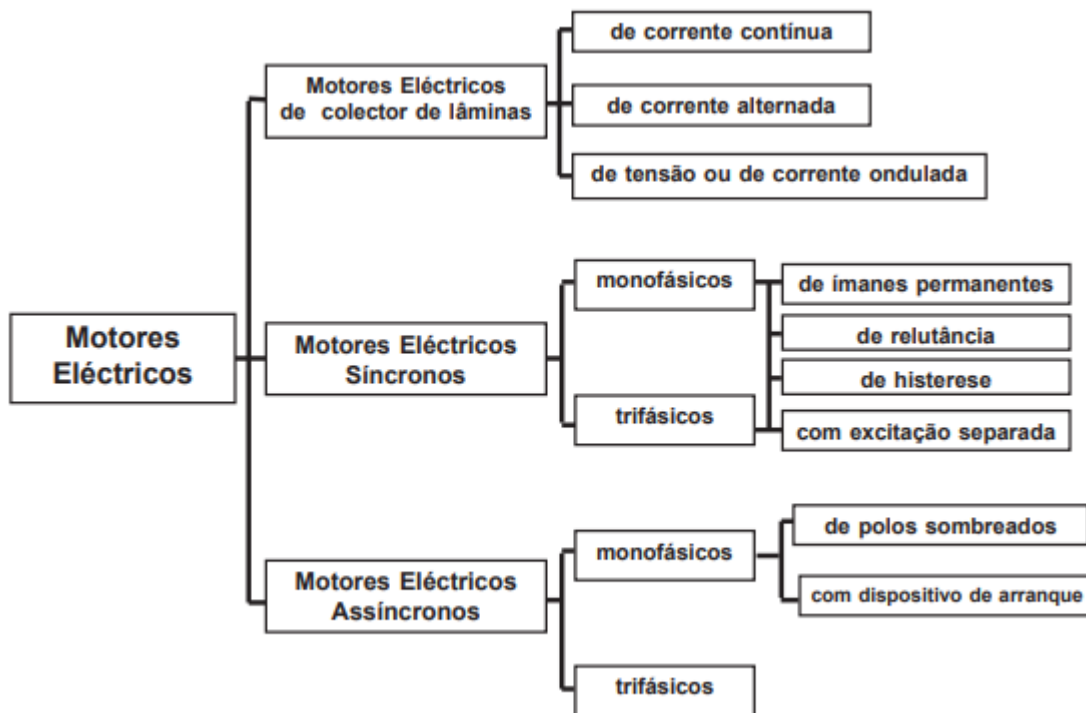


Figura 2 - Diferentes tipos de motores elétricos existentes

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação apresenta-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro capítulo destina-se à introdução e descrição do tema escolhido e à definição dos seus objetivos.

No capítulo dois é feita uma abordagem aos conceitos que são necessários para compreender o funcionamento dos motores elétricos, como os fenómenos relacionados com a indução eletromagnética e as potências em jogo no funcionamento da máquina.

No terceiro capítulo, faz-se uma análise do motor de indução trifásico descrevendo os seus elementos constituintes como o estator e o rotor, o seu princípio de funcionamento, o seu circuito equivalente, o seu rendimento e o binário desenvolvido pelo mesmo.

No quarto capítulo, são abordados os vários tipos de eficiência do motor de indução que são aceites pela IEC e que foram adaptados de forma a que estes fossem validados a nível mundial, após a criação da NEMA.

No quinto capítulo é apresentada a ferramenta informática desenvolvida no âmbito desta dissertação, para servir de guia interativo na seleção e cálculo do motor de indução trifásico. São apresentadas todas as partes constituintes do guia, como este deve ser preenchido e a informação que vai disponibilizar.

No último capítulo estão apresentadas as conclusões finais, com indicações de possíveis desenvolvimentos futuros para este trabalho.

2. NOÇÕES FUNDAMENTAIS

Existem diferentes formas de energia que incluem a energia cinética, a potencial, a eletromagnética, entre outras.

A potência determina a quantidade de energia que é concedida por uma fonte por unidade de tempo. Pode-se dizer que a potência é a rapidez com a qual uma certa quantidade de energia é transformada ou a rapidez com que o trabalho é realizado.

Existem dois tipos de corrente elétrica, a corrente alternada e a corrente contínua. Quando se tem uma corrente alternada trifásica, e esta encontrando-se em equilíbrio, a potência ativa vai ser calculada pela seguinte fórmula:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \text{ (kW)} \quad (1)$$

Em que U é a tensão em Volts (V), e I é a corrente em Amperes (A)

O $\cos \varphi$ representa o fator de potência.

Ao ser percorrido por uma corrente, vão ocorrer choques dos elétrons livres com partículas estacionárias, no condutor. Estes elétrons livres vão-se movimentar por ação de um campo elétrico exterior.

O campo elétrico fornece aos elétrons livres energia cinética no momento do choque, fazendo com que estes se movam. Quando ocorre um choque, esta energia vai ser anulada e convertida em calor, e, como consequência, o condutor aquece. Neste caso tem-se uma transformação da energia do campo elétrico em calor.

A quantidade de calor que é libertada pelo condutor, é expressa através da queda de tensão entre os seus extremos e da corrente que o percorre.

Sabe-se que V vai corresponder à queda de tensão entre os extremos do condutor e que Q é a carga que se move através do condutor. Então,

$$Q = I \times t \quad (2)$$

A d.d.p. é definida pela seguinte expressão:

$$V = \frac{W}{Q} \quad (3)$$

Em que W representa o trabalho realizado. [14]

Quando se fala em termos científicos, os termos energia e trabalho são considerados sinónimos. Ao se elevar um corpo a uma certa altura, este vai possuir uma energia potencial que, pelo facto de existir um movimento a elevar o corpo, é igual ao trabalho realizado para o elevar a uma altura. A energia cinética que um corpo possui, por causa da sua velocidade, é o trabalho realizado pela força que impulsiona essa velocidade. Então, pode-se afirmar que o trabalho potencial tem o mesmo significado que a energia potencial.

Para fazer circular uma corrente de I amperes através de um circuito cuja resistência é R em Ohms, é necessário existir uma tensão de,

$$U = I \times R \text{ (V)} \quad (4)$$

Sabe-se que,

$$P = U \times I = (I \times R) \times I = I^2 \times R \text{ (W)} \quad (5)$$

A energia elétrica é convertida em calor.

Segundo Joule, a quantidade de energia elétrica transformada em calor por unidade de tempo numa resistência elétrica $I^2 \times R$ watts. Joule utilizou bobinas de resistência bastante elevada,

imersu-as na água, e ligou-as aos terminais de pilhas voltaicas. Mediu a f.e.m. e a intensidade de corrente bem como a quantidade de calor que foi produzida em cada segundo. Repetiu o processo para outras resistências de valores diferentes e para várias intensidades de corrente para comprovar que a quantidade de energia elétrica transformada em calor numa resistência elétrica, por unidade de tempo, é $I^2 \times R$ watts. [20]

Quando os circuitos de corrente alternada são puramente resistivos, as ondas de tensão e da corrente elétrica encontram-se em fase, mudando a sua polaridade no mesmo instante em cada ciclo.

Quando existem cargas resistivas, como os condensadores ou os indutores, os armazenamentos de energia nestas cargas resultam numa diferença de fase entre as ondas da tensão e as ondas da corrente, mudando de polaridade em instantes diferentes.

A energia que é armazenada nos componentes do circuito volta, de forma cíclica à fonte, o que não vai produzir nenhuma forma de trabalho útil, apresentando um baixo fator de potência, o que, conseqüentemente, fará com que sejam necessárias correntes elétricas maiores para realizar o trabalho que um circuito com um valor elevado de fator de potência possui.

Para calcular o fator de potência é necessário saber qual é a potência aparente, qual é a potência ativa e qual é a potência reativa.

A potência aparente, que é representada pela letra S, é o resultado da multiplicação da tensão pela corrente. Para os sistemas trifásicos a potência aparente é calculada por:

$$S = \sqrt{3} \times U \times I \text{ (VA)} \quad (6)$$

Em que U é a tensão e I é a corrente.

A potência aparente também pode ser representada pela seguinte equação,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (7)$$

Que na sua forma complexa é dada por,

$$\bar{S} = \bar{U} \times \bar{I}^* = U \times I \times \cos \varphi + j \times U \times I \times \sin \varphi = P + j \times Q \quad (8)$$

Sendo que a parte real de S corresponde à potência ativa P e a parte imaginária corresponde à potência reativa Q.

Esta potência aparente corresponde à potência aparente que existiria se não houvesse desfasamento da corrente. Este desfasamento não existiria se a carga só fosse composta por resistências.

Para o cálculo desta potência, serão consideradas quer cargas resistivas quer cargas indutivas. Então, calcula-se a potência aparente a partir de:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \text{ (kVA)} \quad (9)$$

Em que o φ é o ângulo de desfasamento da tensão em relação à corrente e a relação entre S e P.

A potência ativa é também conhecida por trabalho, sendo que esta realiza o trabalho, transformando a potência em energia. A potência ativa pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \text{ (kW)} \quad (10)$$

Que pode ser substituída por:

$$P = S \times \cos \varphi \text{ (kW)} \quad (11)$$

Esta potência é a capacidade de o circuito produzir trabalho num determinado período de tempo. Devido à existência de elementos que são reativos na carga, a potência aparente vai ser igual ou maior que a potência ativa.

Já a potência reativa, que se representa pela letra Q, é a potência que é transferida e armazenada nos elementos passivos do circuito, isto é, os elementos capacitivos e os indutivos, não realizando trabalho.

Pode ser calculada através de:

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi \text{ (kVAr)} \quad (12)$$

Equivalente a,

$$Q = S \times \sin \varphi \text{ (kVAr)} \quad (13)$$

Esta potência é traduzida como a medida da energia armazenada e que é devolvida à fonte durante cada ciclo de corrente alternada. É utilizada para produzir os campos elétricos e magnéticos que vão permitir que os motores funcionem.

A relação destas potências pode ser observada a partir do triângulo das potências.

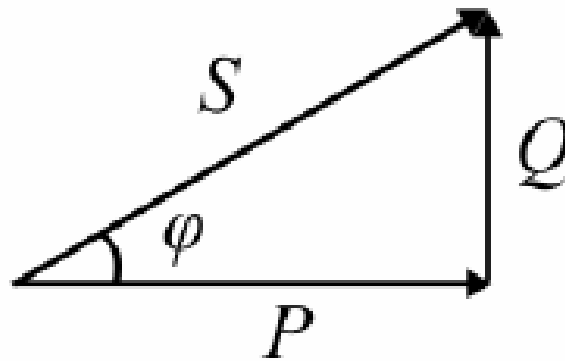


Figura 3 - Triângulo das Potências [9]

A relação entre a potência ativa e reativa pode-se traduzir no fator de potência. Este fator indica a eficiência da energia que se encontra a ser usada e opera em corrente alternada. Pode ser representado como a razão entre a potência aparente e a potência ativa, como se pode verificar na equação seguinte:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (14)$$

Quando se obtém um fator de potência alto, isto indica que a energia está a ser usada de uma forma eficaz, sendo que grande parte da energia que é utilizada pelo motor é transformada em trabalho, enquanto que um baixo fator de potência indica uma má utilização dessa energia.

O fator de potência é um número adimensional que se encontra entre o 0 e o 1, sendo que quando este é igual a 0, o fluxo de energia é totalmente reativo e a energia que é utilizada é totalmente devolvida à fonte. Quando se apresenta um fator de potência igual 1 a energia vai ser totalmente consumida pela carga.

Com o objetivo de se indicar qual é o sinal do ângulo de fase entre as ondas da corrente e da tensão, o fator de potência é denominado como atrasado ou adiantado.

As cargas que se encontram ligadas ao sistema elétrico podem ser de três tipos: resistiva, indutiva e capacitiva.

Se uma carga é puramente resistiva, a corrente e a tensão vão mudar de polaridade em fase e o fator de potência apresentará o valor 1 e a energia elétrica vai fluir numa mesma direção através do sistema em cada ciclo.

Caso o sistema possua cargas indutivas, como o caso dos motores e dos transformadores, estas cargas vão produzir potência reativa e a onda de corrente vai atrasar-se em relação à tensão.

Relativamente às cargas capacitivas, como os cabos elétricos enterrados, produzem potência reativa e a corrente encontra-se adiantada em relação à tensão.

A correção do fator de potência, com o objetivo de se atingir um valor próximo de 1, consegue-se ao acoplar elementos capacitivos e indutivos, em que o valor da sua potência reativa seja oposto à carga. [2]

2.1. INDUTÂNCIA

Nos circuitos elétricos é usada frequentemente uma bobina que possui um núcleo composto por material ferromagnético. Esta bobina é representada por uma indutância caracterizada como o elemento ideal de um circuito elétrico.

Esta indutância é representada pela letra L, e é definida como a relação entre o fluxo produzido que atravessa a bobina, representado pela letra grega λ e a corrente que a percorre.

O fluxo que atravessa a bobina é calculado pela equação seguinte,

$$\lambda = N \times \phi \text{ (Wb)} \quad (15)$$

Em que N é a quantidade de espiras da bobina e ϕ o fluxo magnético, sendo que este fluxo é calculado através de:

$$\phi = B \times A \text{ (Wb)} \quad (16)$$

Em que B é a indução média no ferro, em T, e A é a área da secção toroidal, em m².

A indução média no ferro pode ser calculada através da relação entre a grandeza da excitação magnética H e a permeabilidade do meio, μ . A equação da indução magnética pode ser escrita como:

$$B = \mu \times H \quad (17)$$

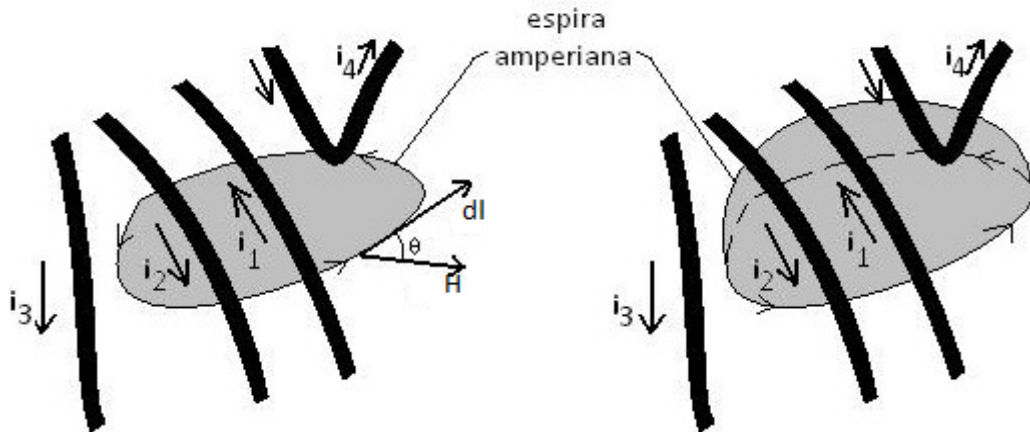


Figura 4 – Figura que traduz a Lei de Ampere [19]

A indutância do circuito elétrico é calculada por:

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (18)$$

Substituindo na equação da indutância o fluxo que atravessa a bobina pela sua expressão, tem-se:

$$L = \frac{N \times \phi}{i} = \frac{N \times \phi}{i} = \frac{N \times B \times A}{i} = \frac{N \times \mu \times H \times A}{i} \quad (19)$$

Ao percorrer um condutor, a corrente produz um campo magnético na periferia do mesmo. A intensidade desta corrente elétrica, pela lei de Ampere, vai ser igual à corrente total da linha que vai atravessar. Esta corrente vai-se relacionar com a excitação magnética através do seu integral de linha.

Então,

$$\oint H dl = \sum i = i_1 + i_2 - i_3 \quad (20)$$

Onde dl vai ser o incremento de comprimento de linha no ponto de linha fechada onde ocorre a excitação magnética.

Θ é o ângulo entre os vetores H e dl , então:

$$\oint H dl \cos \Theta = \sum i \quad (21)$$

H e dl são vetores coincidentes ao longo de cada ponto da linha circular que é representada por um círculo de raio r . Neste caso Θ vai ser igual a zero e H terá o mesmo valor em todos os pontos da linha, por causa da simetria. Neste caso o condutor vai ser percorrido por uma corrente i e a expressão da grandeza H será dada por:

$$\oint H dl = i \quad (22)$$

Vem que,

$$i = H \times 2 \times \pi \times r \quad (A) \quad (23)$$

Colocando a expressão em função de H tem-se,

$$H = \frac{i}{2 \times \pi \times r} \left(\frac{A}{m} \right) \quad (24)$$

O toroide do circuito magnético simples é o anel de material ferromagnético. Este circuito magnético vai ser constituído, ainda, por uma bobina que envolve todo o anel. Esta bobina, com N espiras, vai ser percorrida por uma corrente i e o fluxo magnético vai atravessar o material ferromagnético. Existindo uma linha média do anel com um raio de r , aplica-se a lei de Ampere para se obter a excitação magnética.

Aplicando, então, a lei de Ampere, tem-se que,

$$\oint H dl = N \times i \quad (25)$$

Então,

$$H \times l = N \times i \quad (26)$$

Substituindo nesta equação o l por $2\pi r$, obtém-se:

$$H \times 2 \times \pi \times r = N \times i \quad (27)$$

A força eletromotriz F vai ser igual ao número de espiras a multiplicar pela corrente do circuito magnético, $F = N \times i$ (A.espira) que vai ser igual a $H \times l$.

Então,

$$H = \frac{N}{l} x i \left(A \cdot \frac{esp}{m} \right) \quad (28)$$

Juntando as equações (15) e (26), vem,

$$B = \frac{\mu x N x i}{l} (T) \quad (29)$$

A força eletromotriz vai produzir um fluxo ϕ através de um circuito magnético com a relutância R.

Substituindo a indução média B na equação (16) pela equação (27), obtém-se a equação seguinte:

$$\phi = \frac{\mu x N x i}{l} x A = \frac{N x i}{\frac{l}{\mu x A}} = \frac{N x i}{R} = \frac{F}{R} (Wb) \quad (30)$$

Onde,

$$R = \frac{l}{\mu x A} = \frac{1}{P} (H^{-1}) \quad (31)$$

Em que P é a permeância magnética.

Depois de se saber as equações relativas a todas as variáveis presentes no circuito equivalente, obtém-se,

$$L = \frac{N x \mu x H x A}{i} = \frac{N x \mu x H x A}{\frac{H x l}{N}} = \frac{N^2}{\frac{l}{\mu x A}} \quad (32)$$

Como se pode observar na equação (27), R vai ser igual ao denominador da equação (32). Finalmente chega-se neste ponto à equação da indutância que pode ser calculada como,

$$L = \frac{N^2}{R} (\mu F) \quad (33)$$

A indutância do circuito vai relacionar os aspetos físicos com o número de espiras que existem no núcleo de ferro, assim como a área e o comprimento deste. [6]

2.2. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A indução eletromagnética é um fenómeno que se caracteriza por originar a produção de uma força eletromotriz num circuito fechado originada pela variação no tempo de um fluxo magnético. É um fenómeno que facilmente se pode verificar experimentalmente e que faz parte do grupo de fenómenos magnéticos variáveis no tempo.

Esta força eletromotriz induzida dá origem a uma corrente induzida no circuito fechado. Esta corrente vai indicar que uma certa quantidade de energia é transferida para um segundo circuito e dissipada como calor na sua resistência.

Quando uma bobine se desloca, isto ocorre devido ao trabalho mecânico que é produzido através da energia desenvolvida com a introdução de uma fonte de alimentação, por exemplo.

A indução eletromagnética foi desenvolvida por Faraday, que descobriu que um campo magnético variável pode produzir uma corrente num circuito elétrico fechado.

Sempre que há uma variação de fluxo magnético, surge uma força eletromotriz induzida no circuito fechado. Esta força deve-se ao facto de o fluxo magnético ser diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo no tempo.

Os campos elétricos produzidos por fluxo magnético variável são campos elétricos não conservativos e $\int E|dl$ ao longo de um percurso fechado é igual à força eletromotriz induzida no circuito considerado, sendo este igual à força eletromotriz induzida. [13]

Sabe-se que a f.e.m é:

$$e_{ind} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (34)$$

Então,

$$\int_{\text{percurso}} E|dl = - \frac{d\phi}{dt} \quad (35)$$

E sabe-se que,

$$\frac{d\phi}{dt} = \int_{\text{aberta}}^{sup.} B|S \quad (36)$$

Então, assim obtém-se a Lei de Faraday,

$$\int_{\text{percurso}} E |dl = \frac{d\phi}{dt} = \int_{\text{sup. aberta}} B |S \quad (37)$$

2.3. SÍNTESE

Neste capítulo foram abordadas algumas noções fundamentais para a compreensão do funcionamento do motor elétrico.

Inicialmente foram comparados os conceitos de energia e potência, a forma como se relacionam e o seu desenvolvimento. Abordou-se a Lei de Joule que iguala o conceito de energia e de trabalho.

Desenvolveu-se os conceitos de potência aparente, de potência ativa e de potência reativa. Ainda se referenciou o conceito de fator de potência relacionado com os conceitos anteriores.

Sendo a bobina um elemento fundamental do motor, foram abordados os termos indutância e indução eletromagnética.

A indutância relaciona-se com a bobina que possui um núcleo composto por material ferromagnético.

A indução eletromagnética é o fenômeno que origina a produção de uma força eletromotriz que, no motor elétrico, vai criar o campo magnético girante, fazendo com que o motor funcione.

Estes conceitos são fundamentados através de modelos matemáticos.

3. MOTOR ASSÍNCRONO DE INDUÇÃO

3.1. CONSTITUIÇÃO DO MOTOR

O motor assíncrono de indução é constituído, essencialmente, por um estator e um rotor. O estator é a parte fixa do motor que recebe toda a alimentação da rede elétrica, podendo estar ligado a uma fonte monofásica ou polifásica em CA, e o rotor a parte girante que está ligada ao eixo que vai acionar uma carga mecânica, devido ao efeito do campo magnético que é produzido pela alimentação das bobinas da armadura ou estator.

O estator e o rotor são formados pelo empilhamento de chapas magnéticas de ferro magnético silicioso, em forma de coroa circular, revestidas com um verniz isolante que impede o contato entre si, formando um circuito magnético no estator. [5]

As chapas possuem ranhuras que são semifechadas, onde estão contidos os condutores do circuito elétrico do estator. Este circuito é formado por um enrolamento com três bobinas afastadas de $2\pi/3$ rad, sendo que estas são destinadas a serem alimentadas por cada uma das fases do sistema trifásico.

Os condutores elétricos que fazem parte das ranhuras das chapas formam diversas espiras das bobinas e são isolados a esmalte. Estão organizados em duas camadas na ranhura estando isolados por um material de plástico do restante material magnético, pela parte interior da ranhura e encontram-se travados por réguas plásticas.

O enrolamento do rotor, conduz a corrente alternada produzida pela indução à volta do enrolamento do estator, que se encontra ligado à fonte. Este enrolamento consiste em condutores de cobre ou de alumínio fundidos no rotor de ferro ou de aço laminado.

O rotor pode ser de dois tipos. Um dos tipos é a gaiola de esquilo em que na sua bobinagem o rotor é constituído por um núcleo ferromagnético laminado com ranhuras onde barras condutoras que o integram se encaixam, e são curto-circuitadas nas extremidades por anéis que são constituídos por cobre ou por alumínio. Neste tipo de bobinagem, o rotor pode ser monofásico, exigindo um dispositivo de partida, sendo o conjugado do motor nulo nas condições iniciais, e podem ser trifásicos, sendo estes os mais práticos e os mais utilizados.

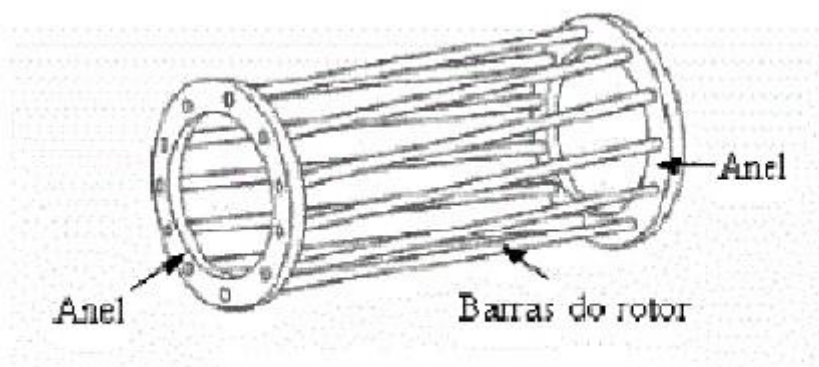


Figura 5 - Rotor em Gaiola de Esquilo [15]

O outro tipo é o rotor bobinado. Os terminais da bobinagem do estator são ligados a três anéis coletores. As bobinas dos motores trifásicos estão conectadas a uma resistência variável e trifásica cuja ligação é em estrela, sendo que a corrente de arranque do motor é alta tendo que ser controlada.

O valor inicial da resistência variável é máximo, diminuindo ao longo do movimento do rotor, até se atingir a plena carga, que é quando se estabelece o curto-circuito, tornando-se a resistência nula. [15]

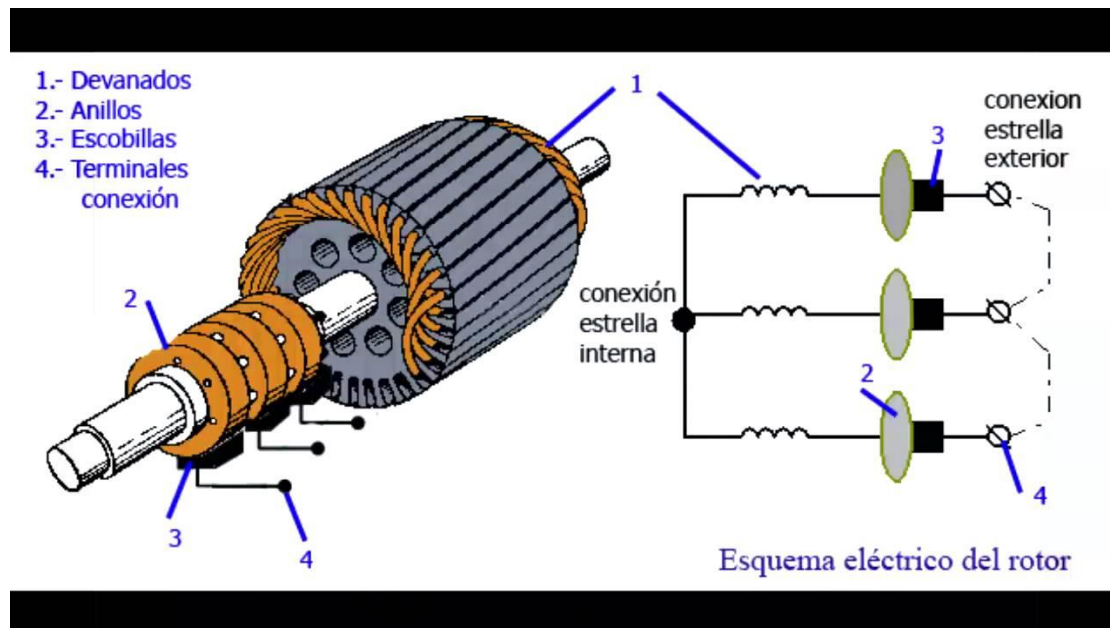


Figura 6 - Rótor Bobinado [16]

3.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um sistema de tensões trifásicos alimenta o circuito elétrico do estator que vai provocar a circulação da corrente elétrica nos condutores que se encontram nas bobines das fases do enrolamento. Vai ser criado um campo girante de força eletromotriz provocada pela passagem das correntes nas espiras de cada bobine de cada enrolamento, rodando este campo à volta do entreferro à velocidade de sincronismo n_s .

$$n_s = \frac{f}{p} \times 60 \quad (38)$$

Em que f é a frequência das grandezas elétricas de alimentação e p é o número de pares de pólos que o motor possui, pode ser 2, 4, 6 ou 8 pólos.

Este campo girante vai criar um campo magnético girante que vai atuar no circuito magnético do motor, rodando, este à velocidade de sincronismo.

O rotor vai rodar a uma velocidade que é inferior à velocidade do campo magnético girante, pois a relação entre a velocidade de rotação da máquina e a frequência das grandezas elétricas da alimentação não vai ser constante. O rotor vai rodar para acionar uma carga mecânica que vai fazer com que o motor trabalhe.

O deslizamento s é determinado pela velocidade do rotor e a velocidade síncrona n_s do campo girante,

$$s = \left(\frac{n_s - n}{n_s} \right) \quad (39)$$

Este fenómeno deve-se ao facto de que o rotor vai deslizar em relação ao campo magnético, devido à diferença entre a velocidade de sincronismo e à velocidade de rotação inicial, sendo o valor do deslizamento $n_s - n = n_s \times s = rpm$.

A velocidade relativa entre o campo girante e a bobinagem do rotor corresponde a este deslizamento em rpm que é representado pela frequência f' da f.e.m:

$$f' = \frac{(n_s - n) \times p}{60} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f' = \frac{s \times n_s \times p}{s} \quad \Leftrightarrow \quad (40)$$

$$\Leftrightarrow f' = s \times f$$

Esta frequência f' é a frequência de deslizamento do circuito rotórico.

A bobinagem trifásica do rotor possui correntes induzidas que também vão ser capazes de induzir um campo girante. A velocidade do campo girante vai ser representada pela grandeza n_2 que vai ser calculada através da seguinte equação:

$$n_2 = \frac{60 \times f'}{p} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow n_2 = \frac{60 \times s \times f}{p} \quad \Leftrightarrow \quad (41)$$

$$\Leftrightarrow n_2 = s \times n_s$$

O campo girante que é produzido pela bobinagem do rotor gira à velocidade n_s no entreferro, sendo que o próprio rotor gira a n rpm.

Ambos os campos girantes, o produzido pela bobinagem do rotor e o produzido pela bobinagem do estator, giram no entreferro em sincronismo com a velocidade n_s . A interação entre ambos os campos magnéticos é essencial para a produção do binário além de que estes encontram-se estacionários na relação de um com o outro. [5]

3.3. ARRANQUE DO MOTOR ASSÍNCRONO

Ao aplicar-se diretamente a tensão nominal aos terminais do motor, a intensidade da corrente elétrica é limitada pela impedância do circuito no início. Esta força eletromotriz vai ser induzida no circuito do estator pelo campo girante. Por isso a intensidade da corrente elétrica no arranque vai ser muito elevada, o que vai trazer dois inconvenientes para o arranque do motor.

Um dos inconvenientes é a existência de uma queda de tensão na alimentação a partir da instalação elétrica e o outro inconveniente vai ser o aquecimento do motor e dos condutores que são percorridos pela corrente de arranque.

A queda de tensão vai depender da potência de curto-circuito no ponto de ligação à rede de energia, enquanto que o aquecimento é devido às perdas por efeito de Joule.

Para evitar estes inconvenientes surge a necessidade de reduzir o valor da corrente de arranque do motor, mas esta solução vai criar um novo problema. O binário de arranque diminui, comprometendo o arranque do motor quando se aciona uma carga.

O inconveniente nesta situação é o facto de ser necessário um binário de arranque que tenha um valor elevado para se conseguir um crescimento na velocidade do motor até que este atinja a velocidade de regime. Esta situação é evitada ao construindo-se um motor com um binário de arranque superior ao binário nominal e com uma corrente de arranque superior à intensidade da corrente nominal.

Este tipo de arranque que foi exemplificado até ao momento é o arranque direto do motor, o que nem sempre se pode aplicar em todos os motores, porque este tipo de arranque pode comprometer a instalação elétrica, tendo que analisar caso a caso qual o tipo de arranque é que o motor deve ter.

Como solução para este problema tem-se a diminuição da tensão que se aplica no motor no instante do arranque. A existência de dois valores de tensão num sistema trifásico, tensão simples e a tensão composta, possibilita a diminuição da tensão através da utilização de um transformador que faz com que o valor da tensão evolua ao longo do arranque.

Alimentando-se a bobine de uma fase do motor com o valor da tensão simples no momento do arranque e quando a velocidade atingir um certo valor, provoca-se a alimentação noutra fase com a tensão composta, desligando-se a ligação anterior.

Este tipo de manobra é realizada, na realidade, através da colocação dos três enrolamentos em estrela em que se divide a tensão composta por $\sqrt{3}$ no instante do arranque do motor e, quando a velocidade atinge o valor pretendido mudam-se as ligações para que os enrolamentos fiquem em triângulo, sendo alimentados pela tensão composta.

O arranque descrito anteriormente é o arranque Estrela-Triângulo. [7]

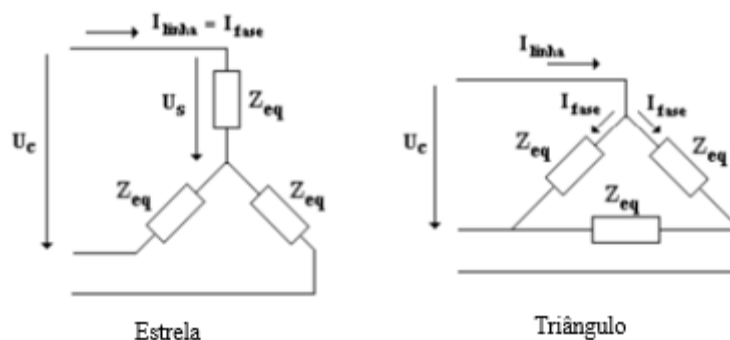


Figura 7 - Arranque Estrela-Triângulo [5]

Representando a montagem em estrela por Y sabe-se,

$$U_c = \sqrt{3} \times U_s \quad (42)$$

$$I_{linha} = I_{fase} = \frac{U_c}{\frac{\sqrt{3}}{Z_{eq}}} \quad (43)$$

E representando-se a montagem em triângulo por Δ , tem-se,

$$I_{linha} = \sqrt{3} \times I_{fase} \quad (44)$$

$$I_{fase} = \frac{U_c}{Z_{eq}} \quad (45)$$

Relacionando as duas montagens e enunciando o arranque estrela- triângulo, obtém-se as seguintes equações,

$$I_{faseY} = \frac{I_{fase\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (46)$$

$$I_{linhaY} = \frac{I_{linha\Delta}}{3}$$

Pode-se utilizar um autotransformador trifásico para auxiliar o arranque por variação da tensão de alimentação. Este método de arranque por autotransformador é utilizado para a velocidade do motor se aproxime da velocidade nominal. Quando se chega a esta velocidade o autotransformador é comutado e é colocado fora do circuito.

Para o arranque do motor de indução pode ser utilizado um conversor eletrónico de estado sólido. Este pode ser utilizado para reduzir a tensão de alimentação no período de arranque e pode determinar qual o declive de aceleração do motor. Pode ser utilizado para controlo da velocidade do motor. [5]

3.4. CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO MOTOR

Para o estudo e avaliação de uma máquina de indução com uma razoável precisão pode-se utilizar o circuito equivalente por fase do motor. Este terá de se encontrar em regime permanente. Considera-se uma máquina de indução de rotor bobinado, pois no caso em que o rotor se encontra em gaiola-de esquilo, o circuito do rotor pode ser representado da mesma maneira o circuito do rotor bobinado.

Os campos girantes do rotor e do estator vão ser notados no entreferro, espaço que se encontra entre o rotor e o estator, se a corrente percorrer ambas as bobinagens. Estando os campos magnéticos girantes a girar à mesma velocidade, então a velocidade induzida no entreferro será a velocidade síncrona, o que vai provocar uma f.e.m. em ambas as bobinagens. A frequência do estator vai ser f_1 e a frequência da fonte do rotor será f_2 .

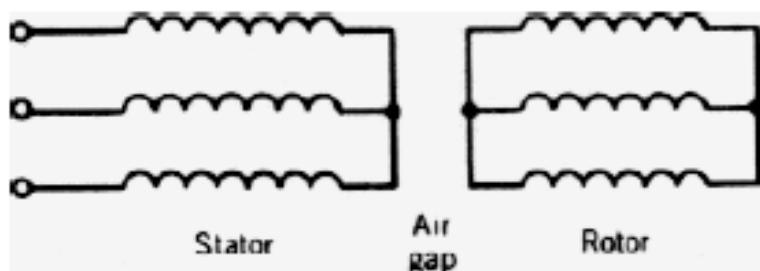


Figura 8 - Motor de indução trifásico com rotor-bobinado em curto-circuito [5]

No circuito equivalente do rotor tem que se ter em conta o deslizamento, encontrando-se este circuito à frequência f_2 . Através da seguinte fórmula obtém-se a corrente que vai percorrer o rotor:

$$I_2 = \frac{s \times E_2}{R_2 + j s \times X_2} \quad (48)$$

Neste caso tem-se que a corrente na fase I_2 é à frequência de deslizamento f_2 .

A equação anterior pode ser desenvolvida, e, nesse caso I_2 deixa de estar à frequência de deslizamento passando a estar à frequência de linha f_1 . Então, a expressão que vai representar este valor de corrente vai ser:

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + j \times X_2} \quad (49)$$

As perdas no cobre por fase vão ser representadas pela potência que se encontra no circuito do rotor. Esta potência é obtida através da seguinte equação:

$$P_2 = I_2^2 \times R_2 \quad (50)$$

Na primeira equação de I_2 a reatância de fugas do rotor sX_2 vai variar com a velocidade enquanto que a resistência R_2 vai-se manter fixa. Na segunda equação a resistência R_2/s vai assim variar com a velocidade e X_2 vai passar a ser fixa.

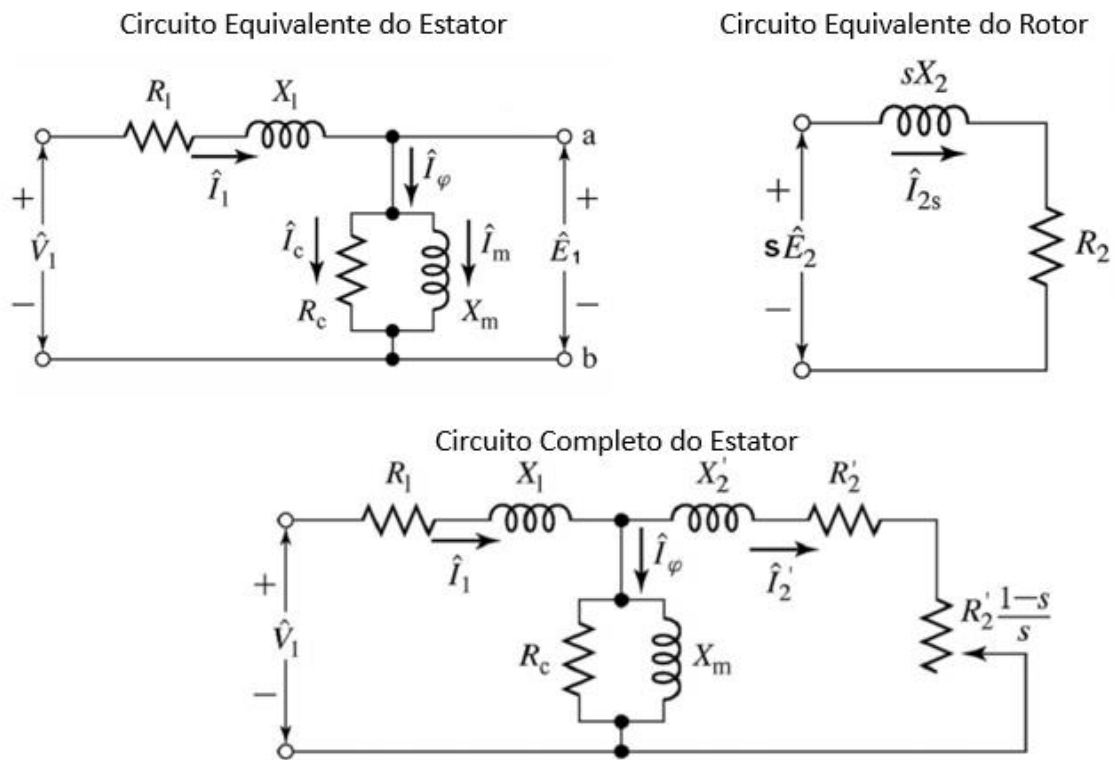


Figura 9 - Circuito Equivalente à Frequência do Estator [17]

Na figura anterior é possível observar-se o circuito equivalente à frequência do estator. A potência por fase associada a este circuito é calculada a partir de:

$$P = I_2^2 \times \frac{R_2}{s} = \frac{P_2}{s} \quad (51)$$

Nesta equação, a potência é a transferida pelo entreferro podendo-se traduzir esta equação para:

$$P = P_{ag} = I_2^2 \times \left[R_2 + \frac{R_2}{s} \times (1 - s) \right] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P = I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \quad (52)$$

A resistência vai depender da velocidade. Então, a potência mecânica vai ser calculada através de:

$$P_{mec} = I_2^2 \times R_2 \times \frac{(1-s)}{s} \Leftrightarrow \quad (53)$$

$$\Leftrightarrow P_{mec} = (1 - s) \times P_{ag} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_{mec} = \frac{1 - s}{s} \times P_2$$

Como,

$$P_2 = I_2^2 \times R_2 \quad (54)$$

Tem-se que,

$$P_{ag} : P_2 : P_{mec} = 1 : s : 1 - s \quad (55)$$

Concluindo, a potência total transferida para o rotor, uma fração s é dissipada na resistência do circuito do rotor e uma fração $1-s$ é convertida em potência mecânica.

É necessário que o motor de indução funcione com um baixo deslizamento de forma a que o motor funcione eficientemente, sendo a maior parte da potência transferida pelo entreferro transformada em potência mecânica. [5]

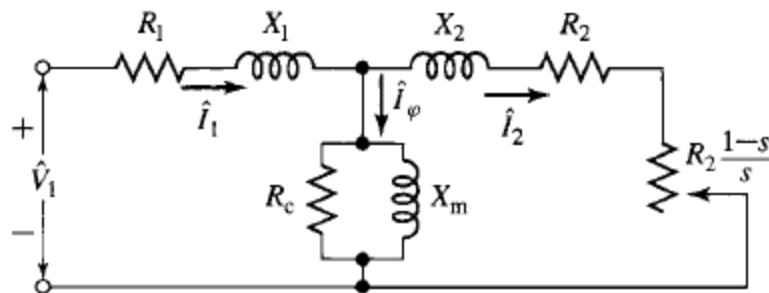


Figura 10 - Circuito Equivalente do Motor de Indução [2]

3.5. FLUXO ENERGÉTICO E RENDIMENTO

O rendimento do motor de indução determina-se através das várias perdas deste. Na imagem 11 pode-se visualizar o fluxo de potências do motor de indução

Neste diagrama pode-se verificar as perdas que ocorrem no motor de indução quer no rotor quer no estator.

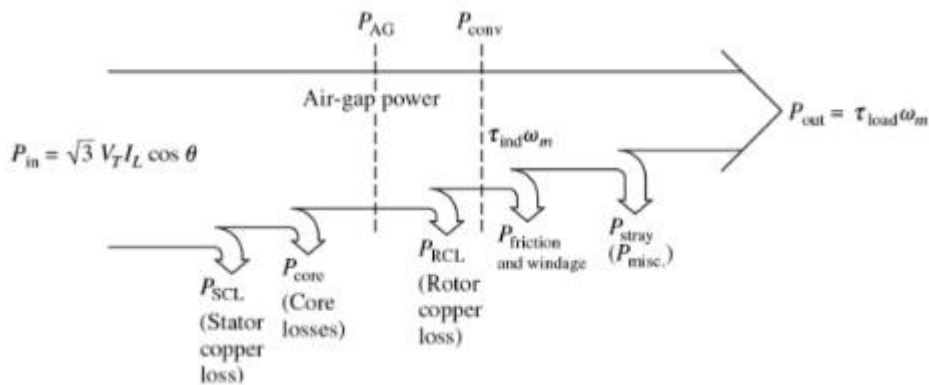


Figura 11 - Fluxo de Potências do motor de indução [18]

A potência absorvida pelo estator do motor trifásico é:

$$P_{in} = 3 \times V_1 \times I_1 \times \cos \Theta \quad (56)$$

As perdas na bobinagem do estator são representadas por:

$$P_1 = 3 \times R_1 \times I_1^2 \quad (57)$$

Em que R_1 é a resistência da bobinagem em cada fase do estator à temperatura e frequência de funcionamento.

Ainda existe uma potência, P_{ag} , que atravessa o entreferro e que é transferida para o rotor.

$$P_2 = 3 \times R_2 \times I_2^2 \quad (58)$$

Neste caso, R_2 corresponde à resistência da bobinagem do rotor. Esta resistência vai incluir a resistência exterior do contato entre as escovas e os anéis coletores quando o motor for de rotor-bobinado.

As potências de perdas magnéticas no rotor são dependentes da frequência do rotor f_2 . Por este motivo, à velocidade nominal, as perdas são desprezáveis.

No caso da potência restante, esta vai ser convertida em potência mecânica, que por sua vez vai ser distribuída. Uma parte desta potência vai ser dissipada através da ventilação e dos atritos que são dependentes da velocidade. A outra parte será convertida em potência mecânica útil no veio do motor.

A partir desta distribuição da potência vai-se conseguir calcular o rendimento do motor de indução através da seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (59)$$

Onde P_{in} é a potência útil do motor e P_{out} é a potência mecânica que se vai dissipar ao longo do funcionamento do motor.

Sabe-se que o rendimento depende, em grande percentagem, do deslizamento do motor. Ao se desprezar todas as perdas do motor menos a resistência do circuito do rotor tem-se:

$$P_{out} = P_{mec} = 1 - s \quad (60)$$

Porque,

$$P_{ag} = P_{in} \quad (61)$$

E,

$$P_2 = s \times P_{ag} \quad (62)$$

Podendo-se, assim, obter o rendimento ideal pela seguinte fórmula:

$$\eta_{ideal} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - s \quad (63)$$

Este rendimento pode ser chamado de rendimento interno, representando a relação da potência do veio com a potência no entreferro.

Para se conseguir obter um rendimento elevado é necessário que o motor funcione com uma velocidade próxima da velocidade de sincronismo, o que provoca o baixo deslizamento do motor de indução no seu regime de funcionamento. [14]

Estando à plena carga, o motor de indução pode chegar a ter valores de rendimento superiores a 95%.

3.6. CONTROLO DA VELOCIDADE

Num motor de indução a alimentação deste é feita por uma fonte de energia elétrica a tensão e frequência constante e a sua velocidade é normalmente constante.

Ao aumentar o binário da carga, a velocidade do motor vai diminuir, sendo que a velocidade do motor é quase igual à velocidade síncrona deste.

Para equipamentos que exijam velocidades constantes, pensa-se logo que seja necessário a utilização de motores que trabalhem a corrente contínua. Mas um motor DC, como já foi referenciado, é um motor muito caro, que necessita de uma manutenção muito frequente às suas escovas e aos seus coletores. Além disso não se podem utilizar estes motores em sítios com atmosferas perigosas.

Por outro lado, o motor AC, como é o caso do motor de indução de rotor em gaiola de esquilo, é um motor muito mais barato que o motor DC, são robustos e não possuem escovas nem coletor. Estes motores podem ser utilizados a altas velocidades e podem ser utilizados em locais com atmosferas perigosas, sendo uma boa escolha para qualquer tipo de aplicação. A única restrição destes motores é o facto de não conseguirem trabalhar sozinhos com aplicações em que seja necessário um ajusto contínuo de velocidade.

Há atualmente dispositivos eletrónicos que controlam a variação da tensão e da frequência com os quais se pode controlar a variação da velocidade dos motores AC.

Esta variação de velocidade vai ser influenciada diretamente pelas variáveis da frequência e do deslizamento pela seguinte fórmula:

$$V_{el} = (1 - s) \times \frac{f}{p} \quad (64)$$

Ao alterar as ligações da bobinagem do estator consegue-se fazer esta variação de velocidade, sendo os pólos alterados numa razão de 2 para 1, permitindo obter duas velocidades diferentes de sincronismo.

Um dos métodos de variação de velocidade é pela tensão de alimentação. Neste caso a amplitude do campo indutor pode ser alterada através do valor da tensão de alimentação ao estator, variando o binário e a velocidade do motor.

Este processo vai criar no motor características mecânicas que são desfavoráveis para controlar a velocidade, mas que vão ser favoráveis quando é necessário fazer uma variação na fase de arranque.

Este método é utilizado no controlo de velocidade em pequenos motores em gaiola que têm como objetivo colocar em funcionamento os ventiladores.

Provocando uma variação na resistência do circuito do rotor consegue-se variar a velocidade do motor de indução. Quando o arranque do motor possui fases de arranque prolongadas utiliza-se o método de variação da corrente do rotor. Este método permite que a corrente de arranque se mantenha com valores baixos, ao realizar um arranque progressivo e dissipando a energia em resistências que se encontrem na parte externa e não no interior do rotor.

Este método, como permite que a corrente de arranque se mantenha com valores baixos, vai provocar um baixo rendimento com velocidades reduzidas e, quando a carga variar, vai trazer uma má regulação da velocidade. Estas características são as mais desfavoráveis presentes neste método.

Um outro método de variação da velocidade é a variação da frequência da fonte de alimentação do estator. Neste método a velocidade angular do campo girante vai ser modificada através do movimento de rotação do rotor ao tentar anular o movimento entre o campo girante do estator e a velocidade do rotor o que contraria a causa que originou o seu movimento. Neste caso a velocidade do motor vai ser diferente para vários valores da frequência da alimentação. [5]

3.7. BINÁRIO DO MOTOR E O CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN

Quando o binário e a relação das potências são enfatizadas, consideram-se resultados de simplificação para a aplicação do teorema de Thevenin para o circuito equivalente do motor de indução. Este teorema permite que se substituam vários componentes do circuito linear e várias fontes de tensão complexas vistas pelos terminais a e b por uma fonte de tensão V_{eq} em série com uma impedância única Z_{eq} , como se pode verificar na figura seguinte:

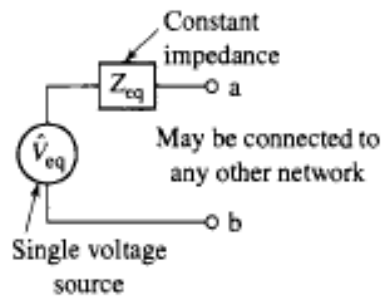


Figura 12 - Equivalente de Thevenin aos terminais a e b [2]

A tensão equivalente aparece ao longo dos terminais a e b quando os terminais se encontram em aberto, a impedância que é medida pelos terminais quando todas as fontes fora do circuito são iguais a zero.

Aplicando ao circuito equivalente do motor de indução, os pontos a e b são os mesmos que os representados nos circuitos equivalentes representados na figura seguinte.

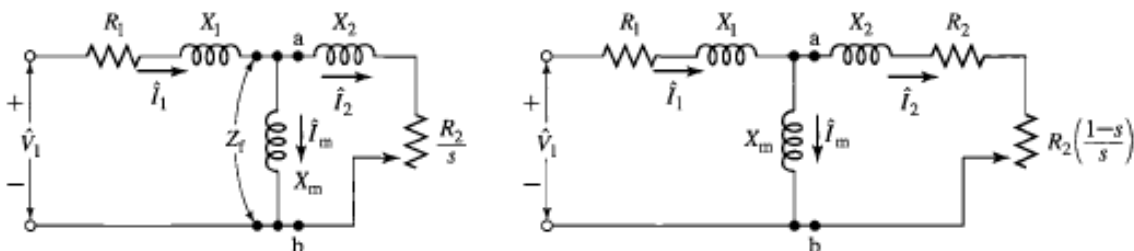


Figura 13 - Circuitos equivalentes da resistência R_c do entreferro [2]

O circuito equivalente de Thevenin vai assumir a seguinte forma:

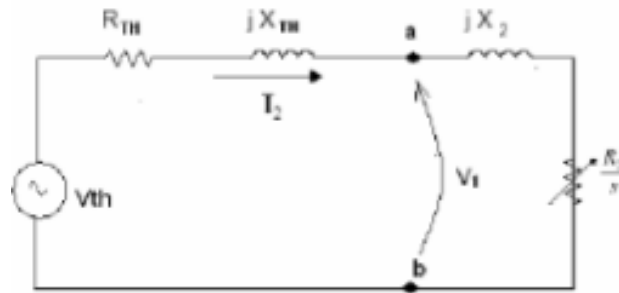


Figura 14 - Circuito equivalente simplificado de Thevenin do motor de indução

Nesta figura pode-se observar que o teorema de Thevenin serviu para transformar o circuito aberto entre os pontos a e b num equivalente em que aparece uma fonte de tensão V_{th} em série com a impedância equivalente $Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$.

De acordo com este teorema, a fonte de tensão equivalente V_{th} é a tensão que aparece através dos terminais a e b quando o circuito do rotor se encontra em aberto.

A equação simplificada é a divisão da tensão simples:

$$V_{th} = V_1 \times \left(\frac{jX_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} \right) (V) \quad (65)$$

Sabe-se que $R^2 \ll (X_1 + X_m)^2$, então

$$V_{th} \approx V_1 \times \frac{X_m}{1 + X_m} (V) \quad (66)$$

$$V_{th} = K_{th} \times V_1 (V)$$

A impedância equivalente de Thevenin do estator é a impedância entre os terminais a e b vista na direção da fonte com a fonte de tensão igual a zero:

$$Z_{th} = \frac{jX_m \times (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} (V) \quad (67)$$

Se $R^2 \ll (X_1 + X_m)^2$,

$$R_{th} \approx R_1 \times \left(\frac{X_m}{1+X_m} \right)^2 (\Omega) \quad (68)$$

$$R_{th} = K_{th}^2 \times V_1 (\Omega)$$

E se $X_1 \ll X_m$, então

$$X_{th} = X_1 \quad (69)$$

É muito comum que se usem aproximações. Este efeito pode ser incorporado nas derivações presentes onde, substituindo a reactância magnética jX_m pela impedância magnética Z_m é igual à combinação da resistência R_c do entreferro e da reactância magnética jX_m .

Do circuito equivalente de Thevenin,

$$I_2 = \frac{V_{th}}{Z_{th} + jX_2 + R_2/s} (V) \quad (70)$$

O binário mecânico desenvolvido T_{mec} , por fase, é dado por:

$$P_{mec} = T_{mec} \times w_{mec} = I_2^2 \times \frac{1-s}{s} \times R_2 \quad (71)$$

$$w_{mec} = \frac{2 \times \pi}{60} \times n$$

Em que w_{mec} é a rotação mecânica que se relaciona com a rotação síncrono através de,

$$w_{mec} = (1-s) \times w_s \quad (72)$$

$$w_{mec} = \frac{2 \times \pi}{60} \times (1-s) \times n_s$$

E,

$$w_s = \frac{2 \times \pi}{60} \times f_1 \quad (73)$$

Quando se observa as equações (71), (72) e a equação (49), consegue-se observar uma relação entre elas. Então,

$$T_{mec} \times w_s = I_2^2 \times \frac{R_2}{s} = P_{ag} \quad (74)$$

$$T_{mec} = \frac{P_{ag}}{w_s} \quad (75)$$

$$T_{mec} = \frac{I_2^2 \times \frac{R_2}{s}}{w_s} \quad (76)$$

$$T_{mec} = \frac{I'2^2 \times \frac{R'2}{s}}{w_s} \quad (77)$$

A equação do binário mecânico do circuito equivalente apresentado na figura 14 é apresentada como,

$$T_{mec} = \frac{V_{th}^2 \times R'2}{w_s \times \left[\left(R_{th} + \frac{R'2}{s} \right) + (X_{th} + X'2)^2 \right] \times s} \quad (78)$$

Onde w_s é a velocidade angular da máquina síncrona.

A curva da velocidade do binário com o motor conectado a uma fonte de tensão e frequência constante está representada na seguinte figura. [2]

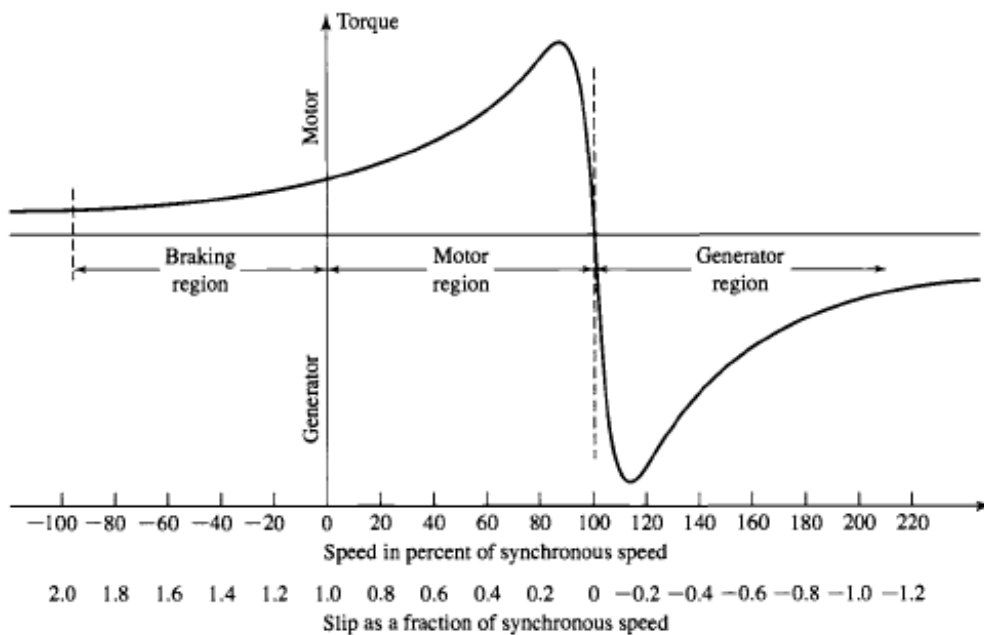


Figura 15 - Curva da velocidade da máquina de indução na zona de travagem, na zona do motor e na zona do gerador [2]

No caso de se tratar de uma máquina trifásica, a equação (75) deve ser multiplicada por três para se obter o binário total desenvolvido pela máquina.

Para valores de deslizamento baixos, onde,

$$R_{th} + \frac{R'_2}{s} \ll X_{th} + X'_2 \text{ e } \frac{R'_2}{s} \gg R_{th} \quad (79)$$

É apresentada a equação seguinte,

$$T_{mec} = \frac{s}{w_s \times R'_s} \times V_{th}^2 \quad (80)$$

Por outro lado, quando a máquina apresenta um valor de deslizamento é elevado, tem-se,

$$R_{th} + \frac{R'_2}{s} \ll X_{th} + X'_2 \quad (81)$$

E,

$$T_{mec} = \left[\frac{R'_2}{w_s \times (X_{th} + X'_2)^2 \times s} \right] \times V_{th}^2 \quad (82)$$

No arranque normal do motor, o rotor roda na direção do campo magnético produzido pelas correntes do estator, a velocidade encontra-se entre 0 e a velocidade síncrona, e o deslizamento correspondente encontram-se entre 1.0 e 0. As condições do motor começam quando $s = 1.0$.

Para se obter arranque na região onde s é maior que 1, o que corresponde a uma velocidade negativa do motor, este deve ser dirigido para o lado contrário da rotação do seu campo magnético, por uma fonte de potência mecânica capaz de contrariar o binário eletromecânico T_{mec} .

A máquina de indução vai funcionar como gerador se os terminais do estator forem conectados a uma fonte de tensão polifásica, então o rotor é dirigido com a velocidade síncrona no movimento principal.

A fonte, fixa a velocidade síncrona e produz potência reativa à entrada que é necessária para excitar o campo magnético do entreferro.

O binário eletromecânico máximo, T_{max} , pode ser facilmente obtido a partir de considerações do circuito. Como observado anteriormente, o binário eletromecânico, quando a potência é entregue a R_2/s , é máximo, e esta potência será maior quando a impedância de R_2/s for igual à magnitude da impedância $R_{th} + j(X_{th} + X_2)$ entre este e a tensão equivalente constante V_{th} . Então, o binário eletromecânico máximo vai ocorrer a um valor de deslizamento s_{Tmax} onde,

$$\frac{R'_2}{s_{Tmax}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \quad (83)$$

O deslizamento s_{Tmax} do binário máximo é,

$$s_{Tmax} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}} \quad (84)$$

Sendo o binário máximo por fase correspondente,

$$T_{max} = \frac{V_{th}^2}{2 \times w_s \times R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_{th})^2}} \quad (85)$$

A velocidade do motor aumenta. Este aumento vai fazer com que a resistência interna suba gradualmente até que esta se encontre fora de serviço.

Dependendo da função a que o motor de indução se destina, em alguns casos é necessário que o máximo binário seja desenvolvido no arranque. Se o máximo binário tem que ser desenvolvido, isto significa que a velocidade no arranque vai ser zero. O valor da resistência do estator, R_1 , apresenta um valor pequeno, o que implica que R_{th} é desprezável, e, então, pelas equações (72) e (73), chega-se a,

$$s_{Tmax} \approx \frac{R'_2}{X_{th} + X'_2} \quad (86)$$

$$T_{max} \approx \frac{V_{th}}{2 \times w_s \times (X_{th} + X'_2)} \quad (87)$$

Na equação anterior, é possível observar que o máximo binário que é desenvolvido nas máquinas de indução é inversamente proporcional à soma das reactâncias de fugas.

A relação entre o máximo binário e o binário nominal, capacidade de sobrecarga mecânica, para qualquer velocidade tem-se,

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{s \times \left[\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]}{s_{Tmax} \times \left[\left(R_{th} + \frac{R'_2}{s_{Tmax}} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]} \quad (88)$$

Sendo R_1 também desprezável, obtém-se,

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{s \times \left[\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]}{s_{Tmax} \times \left[\left(\frac{R'_2}{s_{Tmax}} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]} \quad (89)$$

Se se aplicar a equação (74) a esta última equação (76), obtém-se a relação que existe entre o binário máximo e o binário nominal, para qualquer velocidade, em função dos valores do deslizamento correspondente. [2]

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{s \times \left[\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R'_2}{s_{Tmax}} \right)^2 \right]}{2 \times s_{Tmax} \times s} \quad (90)$$

$$\frac{T_{max}}{T} = \frac{s_{Tmax}^2 + s^2}{2 \times s_{Tmax} \times s} \quad (91)$$

3.8. SÍNTESE

Neste capítulo, estudou-se o motor de indução trifásico e as suas características.

No início do capítulo, foram apresentados os constituintes do motor, isto é, o estator e o rotor, assim como a sua composição. De seguida foi abordado o princípio de funcionamento deste motor. Neste subcapítulo, foram descritos a forma como o motor é alimentado, como é criado o campo girante e apresentou-se as equações da velocidade de sincronismo, assim como, a frequência da f.e.m.

Foram apresentadas as formas de arranque do motor, desde o arranque estrela-triângulo, o arranque feito através de um autotransformador e o arranque através de um conversor eletrónico em estado sólido.

Relacionou-se o fluxo de energético do motor e o seu rendimento e foi descrito como é feito o controlo da velocidade.

Ainda, neste capítulo, descreveu-se o circuito equivalente do motor de indução trifásico, seguindo-se para a relação entre o circuito equivalente de Thevenin e o binário do motor.

Neste capítulo, sempre que necessário, fundamentaram-se os temas com expressões matemáticas adequadas.

4. ANÁLISE DAS CLASSES DE EFICIÊNCIA DOS MOTORES

Para se conseguir um menor consumo de energia dos Motores Elétricos e, como consequência, reduzir as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, a União Europeia criou o regulamento CE 640/2009, existindo atualizações na regulamentação 4/2014, com o objetivo de melhorar o desempenho dos produtos e evitar imprevistos no mercado.

Existem vários níveis standard de eficiência que se encontram regularizados na norma IEC 60034-30-2008 que define classes de rendimentos para motores trifásicos.

Para motores com potência entre 0,75 kW – 375 kW, com 2, 4 ou 6 pólos existem as seguintes classes:

- IE1 – Rendimento standard;
- IE2 – Alto rendimento;
- IE3 – Rendimento premium;
- IE4 – Rendimento super premium.

Existe ainda a classe de rendimento IE5 (rendimento ultra premium), mas esta ainda se encontra por parametrizar qual a potência e o número de pólos que irá abranger.

Estas classes foram criadas pela IEC com o objetivo de criar uma norma internacional comum. Esta necessidade apareceu depois de outros países como os EUA criarem os seus próprios sistemas, como é o caso da NEMA.

Com a criação da nova norma, deixaram de estar em vigor as anteriores classificações dos níveis de rendimento energético, que tinham sido estabelecidos em 1999 pela CEMEP e a Comissão Europeia.

Tabela 1 - Definição das diversas classes de eficiência. Standard de 1996 [11]

kW	EFF3 2 e 4 pólos η_n (%)	EFF2 2 e 4 pólos η_n (%)	EFF1 2 pólos η_n (%)	EFF1 4 pólos η_n (%)
1,1	<76,2	≥76,2	≥82,2	≥83,8
1,5	<78,5	≥78,5	≥84,1	≥85,0
2,2	<81,0	≥81,0	≥85,6	≥86,4
3	<82,6	≥82,6	≥86,7	≥87,4
4	<84,2	≥84,2	≥87,6	≥88,3
5,5	<85,7	≥85,7	≥88,6	≥89,3
7,5	<87,0	≥87,0	≥89,5	≥90,1
11	<88,4	≥88,4	≥90,5	≥91,0
15	<89,4	≥89,4	≥91,3	≥91,8
18,5	<90,0	≥90,0	≥91,8	≥92,2
22	<90,5	≥90,5	≥92,2	≥92,6
30	<91,4	≥91,4	≥92,9	≥93,2
37	<92,0	≥92,0	≥93,3	≥93,6
45	<92,5	≥92,5	≥93,7	≥93,9
55	<93,0	≥93,0	≥94,0	≥94,2
75	<93,6	≥93,6	≥94,6	≥94,7
90	<93,9	≥93,9	≥95,0	≥95,0

Os anteriores níveis eram limitados nos motores elétricos com potência entre os 1.1 kW e os 90 kW e com 2 ou 4 pólos.

Estas alterações nas normas levaram a que as chapas de características dos motores fossem também alteradas.

Estas alterações à norma fizeram com que os utilizadores do motor obtivessem informação de uma forma mais clara, mais transparente e mais fácil de entender.

As chapas de características devem conter as informações essenciais sobre a eficiência a 100%, a 75% e a 50% da potência nominal para motores grandes e pequenos. Como a chapa de

características dos motores pequenos é menor, tem que conter pelo menos a informação de 100%. Tem ainda que identificar:

- O nível de rendimento;
- O número de fases;
- A tensão nominal;
- O regime de serviço;
- A altura do eixo;
- O grau de proteção;
- A classe de isolamento;
- O aumento da temperatura;
- A frequência nominal;
- A velocidade de rotação nominal;
- A corrente nominal;
- O fator de potência;
- A temperatura ambiente;
- O fator de serviço;
- A altitude a que este vai ser instalado;
- O peso do motor;
- O tipo de rolamento LA e quantidade de massa (quando aplicável);
- O tipo de rolamento LOA e quantidade de massa (quando aplicável);
- O tipo de massa para os enrolamentos;
- Os enrolamentos de lubrificação (em horas);
- O esquema de ligações;
- As certificações;
- A data de fabrico;
- O número de série.

Os níveis mínimos de rendimentos para motores de indução trifásicos de baixa tensão estão representados na figura seguinte:

16 Junho 2011	Motores 2, 4 e 6 pólos 0.75kW a 375kW	IE1	✗
1 Janeiro 2015	Motores 2, 4 e 6 pólos 7.5kW a 375kW	IE2	✗
	Motores 2, 4 e 6 pólos 7.5kW a 375kW	IE3	✓
1 Janeiro 2017	Motores 2, 4 e 6 pólos 7.5kW a 375kW	IE2 + VSD	✓
	Motores 2, 4 e 6 pólos 0.75kW a 375kW	IE2	✗
	Motores 2, 4 e 6 pólos 0.75kW a 375kW	IE3	✓
	Motores 2, 4 e 6 pólos 0.75kW a 375kW	IE2 + VSD	✓
		IE4	✓

Figura 16 - Regulamento 640/2009 (EC) e aditamento 04/2014 (UE) sobre os níveis mínimos dos rendimentos para motores de indução trifásicos de baixa tensão. [12]

De acordo com os regulamentos existentes, tem que de cumprir níveis mínimos de eficiência, não sendo permitido em alguns países usar, por exemplo, o nível IE1. [12]

Na União Europeia e na Suíça, o requisito mínimo de nível de eficiência é o IE3, sendo que são permitidos os motores IE2 entre 0,75 a 375 kW alimentados por um inversor de frequência, desde que estes sejam identificados apenas para uso como inversor.

Este mínimo imposto é aplicável a motores com potências de 0.75 até 375 kW, com 2, 4 ou 6 polos com frequência 50 e 50/60 Hz, com tensões até 1000 V e com invólucro aberto e fechado.

Por outro lado, não aplicável a:

- Motores de 2 velocidades;
- Motores com regime de serviço intermitente;
- Motores projetados para operar completamente imersos em líquido;
- Motores completamente integrados no equipamento;
- Altitude acima de 4000 m;
- Temperatura ambiente abaixo de -30 °C ou acima de 60 °C;
- Motores especificados para operar exclusivamente acima de 400 °C;

- Motores para atmosferas explosivas;
- Motofreio. [11]

4.1. SÍNTESE

A classificação das classes de eficiência era dividida em três níveis de eficiência, a EFF1 (alto rendimento), a EFF2 (rendimento melhorado) e a EFF3 (baixo rendimento). Estas classes referiam-se a motores elétricos com potência entre 1,1 kW a 90 kW, de 2 e 4 pólos, e foram definidas através de um acordo entre a CEMEP e a IEC.

O desenvolvimento de sistemas próprios de outros países, como é o caso dos EUA que criaram a NEMA, foi necessário a uniformização das classes de eficiência a nível mundial, o que obrigou a IEC a desenvolver a norma IEC 60034-30-2008, substituindo o que existia anteriormente, e criando novas classes de rendimento, IE1, IE2, IE3, IE4, IE5.

Neste capítulo abordaram-se as classes de rendimento do motor, quais as características que estes devem apresentar na sua chapa de características e qual a classe de eficiência mínima exigida pela União Europeia e pela Suíça.

5. GUIA INTERATIVO NA SELEÇÃO E CÁLCULO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Para facilitar a escolha de um motor de indução trifásico a um utilizador, foi proposta a execução de uma ferramenta informática que possa servir de guia interativo para uma escolha do motor que se adeque a cada utilização.

Para a execução dessa ferramenta recorreu-se ao Excel e dentro do Excel ao Visual Basic.

No Excel criou-se uma tabela com as características dos motores de indução. Utilizou-se o Visual Basic para a criação do guia interativo, utilizando o Visual Basic como uma linguagem de programação, indo buscar os dados necessários dos motores à tabela de Excel.

Guia Interativo na Seleção e Cálculo de Motores de Indução Trifásicos

Iniciar

Mestrado Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia
Dissertação

Aluna: Joana Filipa Ribeiro Magalhães, 1100323
Orientador: José Beleza de Carvalho, JBC

Dimensões Externas do Motor Elétrico

Figura 17–Guia Interativo - Primeira página do guia interativo

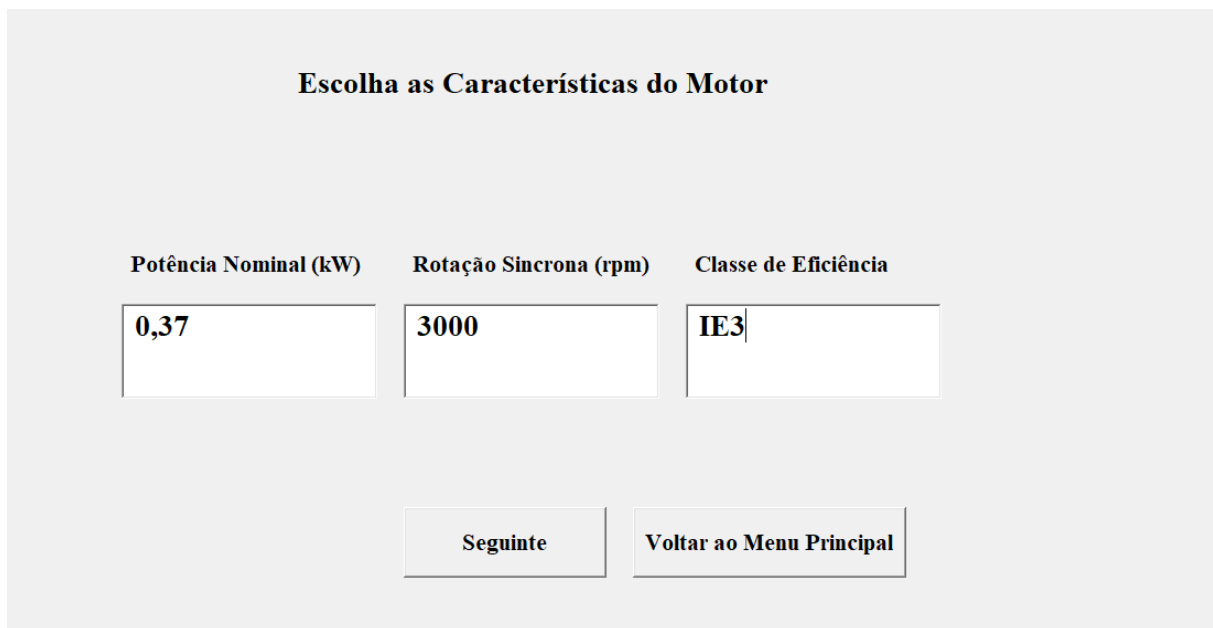
Como, a nível de ensaios em vazio e em carga só se conseguiu encontrar dados de motores antigos pertencentes à EFACEC e estes só eram referentes a uma tensão de 380V e 415V optou-se por converter esses valores para os novos motores pertencentes à WEG para o valor de 400V. Para isso utilizaram-se vários parâmetros quer dos motores a 415V quer dos motores a 400V, convertendo os valores para esta última tensão, chegando-se, assim, aos valores de ensaio a 400V.

Tabela 2 - Folha de Excel com os valores de ensaio

Ensaio de Motores de Indução										
I _o (A) - 400V	I _o (A) - 415V	P _o (W) - 400V	P _o (W) - 415V	u _{cc} (V) - 400V	u _{cc} (V) - 415V	I _n (A) - 400V	I _n (A) - 415V	P _{cc} (W) - 400V	P _{cc} (W) - 415V	η (%) - 4/4 - 400V
0,5	0,5	62,86	65	90,90	94,00	0,85	0,88	101,54	105	73,8
0,9	1,1	102,12	121	87,77	104,00	1,19	1,41	172,17	204	77,8
0,9	0,9	92,57	92	79,49	79,00	1,63	1,62	161,99	161	81
1,5	1,6	142,81	152	79,86	85,00	2,33	2,48	267,76	285	83
1,5	1,5	143,72	140	83,15	81,00	3,09	3,01	310,03	302	84,5
2,1	2,1	181,04	179	78,89	78,00	4,43	4,38	404,57	400	86,3
3,0	3,1	285,61	296	62,72	65,00	5,77	5,98	439,99	456	87,3
3,7	3,8	340,58	350	62,28	64,00	7,59	7,80	524,49	539	88,4
3,9	3,7	421,90	402	69,27	66,00	10,60	10,10	717,86	684	89,4
4,7	4,5	474,56	451	72,60	69,00	14,10	13,40	903,87	859	90,3
11,6	11,7	671,73	679	97,94	99,00	27,70	28,00	1830,18	1850	92,1
10,9	10,4	747,27	712	83,96	80,00	33,90	32,30	2009,86	1915	92,6
12,7	11,9	1236,40	1157	97,25	91,00	54,50	51,00	2823,31	2642	93,5
16,7	15,6	1448,26	1350	93,01	86,70	67,80	63,20	4282,56	3992	93,8
24,5	24,4	1310,38	1307	81,21	81,00	77,50	77,30	3637,39	3628	94,2
21,5	20,3	2338,18	2211	78,26	74,00	95,60	90,40	3950,90	3736	94,4
34,5	32,9	2601,05	2481	69,19	66,00	130,00	124,00	4575,16	4364	94,9
47,5	47,2	3077,17	3056	91,63	91,00	189,00	187,70	8095,68	8040	95,4

Ao se abrir o guia interativo vão aparecer duas opções que o utilizador pode escolher, uma para iniciar a escolha do motor e outra para se obter as dimensões que o motor vai ter.

Ao se escolher a opção iniciar, o guia vai direcionar o utilizador para a janela que aparece na figura seguinte. Nesta janela, o utilizador vai ter que escolher quais os valores que pretender que o motor tenha. Vai ter que preencher os campos com os valores da potência nominal, da rotação síncrona e a classe de eficiência. A classe de eficiência que neste momento se vai escolher é a classe IE3, pois esta é a classe de eficiência mínima que é permitida em Portugal e os valores foram retirados do catálogo da WEG da tabela que pertencia a esta classe.



Escolha as Características do Motor

Potência Nominal (kW)	Rotação Síncrona (rpm)	Classe de Eficiência
0,37	3000	IE3

Figura 18 - Guia interativo - Escolha dos valores

Ao carregar no botão seguinte, se o utilizador não preencher todos os campos, vai aparecer a mensagem "Preencha os dados". Sem o preenchimento dos dados não é possível continuar para a próxima janela.

Na próxima janela são apresentados os resultados. O programa vai calcular, através das escolhas anteriores, quais os três motores de indução que melhor se poderão adaptar a cada caso. Vai ser apresentado em primeiro lugar o modelo do motor a ser escolhido. Nesta janela vão ser apresentadas as perdas em carga, as perdas em vazio, o número de pólos e o ruído que o motor vai apresentar.

Modelo	Perdas em Carga (W)	Perdas em Vazio (W)	Nº de Pólos	Ruído (dB)
BF5 71 M42	101,54	62,86	2	56
BF5 71 M42	172,17	102,12	2	56
BF5 80 M22	161,99	92,57	2	59

Figura 19 - Guia Interativo - Apresentação de resultados

Após a apresentação dos resultados o utilizador tem três opções que pode escolher. Pode fazer uma nova pesquisa para outros valores, pode continuar para a próxima janela ou pode voltar para a janela principal.

Se o utilizador escolher a opção de continuar no guia, este vai apresentar o circuito equivalente. Neste circuito vão ser apresentados os valores da carga mecânica, da reatância magnética, da resistência em vazio da resistência e reatância equivalentes.

Nas tabelas que foram utilizadas para a execução do guia interativo, são fornecidos alguns os valores como os da corrente nominal, da corrente em vazio, das perdas em carga, das perdas em vazio e da impedância de curto-circuito. Para se chegar aos valores dos componentes do circuito equivalente foi necessária a realização de alguns cálculos. Para esses cálculos foram utilizadas as seguintes fórmulas,

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{3 \times I_n^2} \quad (91)$$

Que fornece o valor da resistência equivalente do circuito. Para se calcular a reatância equivalente do circuito é necessário o cálculo prévio da sua impedância equivalente,

$$Z_{eq} = \frac{u_{cc}}{\frac{\sqrt{3}}{I_n}} \quad (92)$$

Obtendo-se, por fim, a reatância equivalente do circuito a partir de,

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (93)$$

No circuito equivalente ainda são apresentadas as componentes da resistência equivalente em vazio, da reatância magnética e da carga mecânica.

Para o cálculo da resistência equivalente em vazio obteve-se através da relação entre a tensão composta de 400V e o valor das perdas em vazio.

$$R_0 = \frac{400^2}{P_0} \quad (94)$$

Para o cálculo da reatância magnética recorreu-se aos valores da corrente que passa naquela parcela de circuit, que é a corrente da resistência em vazio,

$$I_{R_0} = \frac{400}{\sqrt{3} \times R_0} \quad (95)$$

Além desta corrente foi necessário o cálculo de φ_0 , a partir de,

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{R_0}}{I_0} \quad (96)$$

$$\varphi_0 = \arccos(\cos \varphi_0) \quad (97)$$

Assim, calcula-se a reatância de magnetização a partir de,

$$X_m = P_0 \times \tan \varphi_0 \quad (98)$$

Por fim, calculou-se a carga mecânica que é dada por,

$$R_2 \times \frac{1-s}{s} \quad (99)$$

Em que o deslizamento é dado pela relação entre a velocidade de sincronismo e a velocidade de rotação, como foi explicado anteriormente,

$$s = \left(\frac{n_s - n}{n_s} \right) \quad (100)$$

E R_2 é dada por,

$$R_2 = \frac{\frac{1}{s} - 1}{R_0} \quad (101)$$

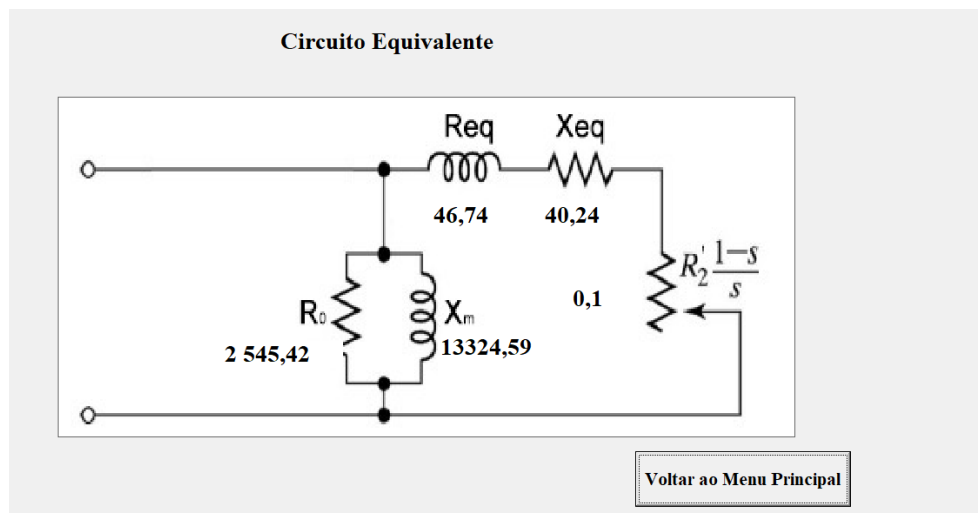


Figura 20 - Guia Interativo - Circuito Equivalente

Na última janela vai ser possível consultar as dimensões do motor de indução trifásico de Baixa Tensão e a sua flange que está de acordo com as normas DIN.

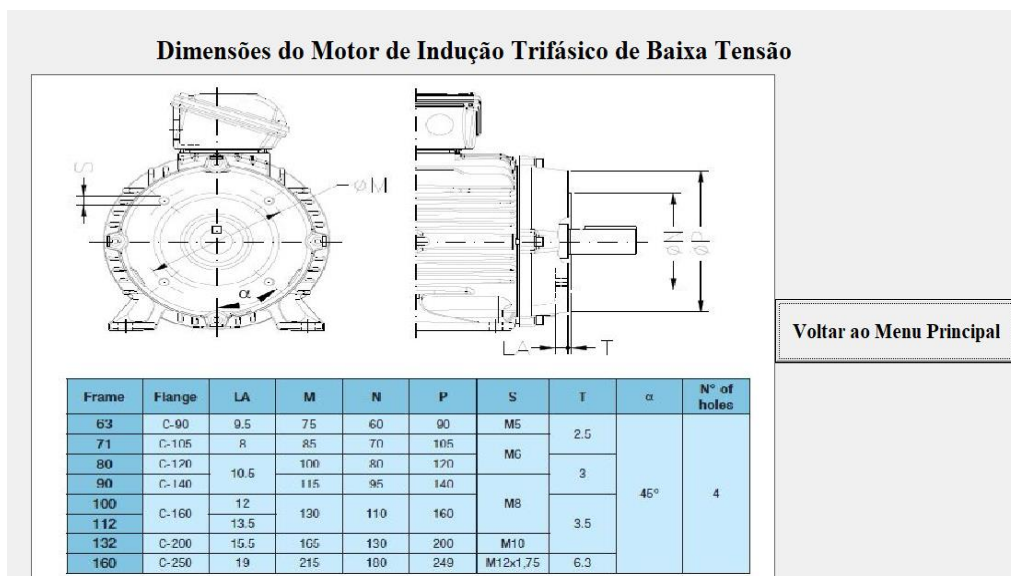


Figura 21 - Guia Interativo - Dimensões do Motor

No Visual Basic utilizou-se a seguinte programação,

```
Public aux, contador As Integer
```

```
Public diffp, diffr, diff As Double
```

Defenindo-se as variáveis como números inteiros como é o caso do contador e como decimais (As Double) como o caso das diferenças da potência e da rotação síncrona e da diferença entre elas.

```
Private Sub CommandButton4_Click()
```

```
Me.Hide
```

```
UserForm7.Show
```

```
End Sub
```

Neste caso ao clicar no commandButton4 vai abrir o ecrã correspondente à UserForm7

```
diffp = Abs(potencia - ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(aux, "C").Value)
```

```
diffr = Abs(rotacao - ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(aux, "D").Value)
```

```
diff = diffp + diffr
```

Diffp é a diferença da potência que o utilizador vai escolher as potências na coluna C em cada célula.

Diffr é a diferença da rotação de sincronismo que o utilizador vai escolher a as rotações de sincronismo na coluna D em cada célula.

```
Do While aux < contador
```

```
If classe = ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(aux, "AU").Value Then
```

tempp = Abs(potencia - ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(aux, "C").Value)

tempr = Abs(rotacao - ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(aux, "D").Value)

tempdiff = tempp + tempr

If tempdiff <= diferenca(1) Then

diferenca(3) = diferenca(2)

diferenca(1) = tempdiff

melhorlinha(3) = melhorlinha(2)

melhorlinha(1) = aux

ElseIf tempdiff < diferenca(2) Then

diferenca(3) = diferenca(2)

diferenca(2) = tempdiff

melhorlinha(3) = melhorlinha(2)

melhorlinha(2) = aux

ElseIf tempdiff < diferenca(3) Then

diferenca(3) = tempdiff

melhorlinha(3) = aux

End If

Neste caso, depois de $\text{diff} = \text{diffp} + \text{diffr}$, este código vai calcular qual a diferença melhor e fica na primeira linha da UserForm dos resultados.

Se a diferença 2 for melhor que a diferença 1 então a diferença 2 passa a ser a melhor passando para a melhor linha 1 que vai ser a primeira linha a apresentar e assim sucessivamente até serem apresentadas as 3 melhores linhas para o utilizador.

TextBox36.Text = ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(melhorlinha(1), "A").Value

TextBox37.Text = Format(ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(melhorlinha(1), "AA").Value, "#,##0.00")

Na TextBox36.Text vai ser apresentado o valor da melhorlinha(1) que vai corresponder ao modelo do motor, como é com letras não é necessário colocar mais nada depois de value, no caso da TextBox37.Text coloca-se "#,##0.00" por ser um número decimal permitindo apresentar duas casas decimais.

rzero = Format(ThisWorkbook.Sheets(1).Cells(melhorlinha(1), "N").Value, "#,##0.00")

Este caso é igual ao da TextBox37.Text mas chamei-lhe rzero que é apresentado no circuito equivalente.

6. CONCLUSÕES

Na indústria, os motores mais utilizados são os assíncronos de indução trifásicos. Este tipo de motores, são bastante robustos, não necessitam de manutenção muito frequente, podem ser usados em atmosferas perigosas e são mais baratos em relação aos motores de corrente contínua.

Dentro dos motores de corrente alternada, existem os motores síncronos e assíncronos.

Optou-se pelo estudo do motor assíncrono de indução porque é de longe o mais utilizado na indústria. É um motor muito robusto, com elevado desempenho energético, e de custo muito acessível, comparativamente a outros motores de igual potência. Além disto, atualmente já é possível controlar e variar a sua velocidade eletronicamente com muita elevada fiabilidade.

Estaram-se as características que influenciam o motor, como, o seu modo de funcionamento, os seus campos girantes e o fluxo energético que vai percorrer o motor assim como o seu rendimento, que é obtido através da relação entre a sua potência útil e a sua potência elétrica absorvida ao longo do funcionamento do motor.

Após estudo aprofundado dos motores de indução trifásicos, e dado existirem vários modelos dos mesmos, verificou-se a necessidade de criar um guia interativo que de uma forma simples e rápida, atendendo à potência, à rotação síncrona e à classe de eficiência, consiga proporcionar

ao utilizador a escolha adequada do modelo que melhor se adapta à função e às características pretendidas.

Um dos problemas encontrados ao realizar o guia interativo foi a falta de valores de ensaio para os atuais motores, tendo de adaptar os valores utilizados nos motores antigos para os novos.

O objetivo focou-se na apresentação dos três motores que se adequaram melhor a cada caso disponíveis no mercado, perante a escolha da potência nominal, da velocidade de sincronismo e da classe de eficiência. A partir desta escolha, a ferramenta disponibiliza ao utilizador todas as informações necessárias sobre as características dos motores disponíveis adequados para a utilização pretendida.

6.1. PROPOSTA DE CONTINUIDADE DO TRABALHO

No guia interativo desenvolvido no âmbito desta dissertação, foram analisados os dados para a classe de eficiência IE3.

No futuro propõe-se alargar à classe IE4, não referenciando as classes IE1 e IE2, porque estas não podem ser usadas na União Europeia. Mais tarde, quando a classe de eficiência IE5 estiver completamente definida em relação à potência e pólos do motor que irá abranger, também se poderá incluir neste guia.

Outra sugestão é atualizar os valores dos ensaios, tanto em vazio como em carga, para os novos motores que venham a ser inseridos na base de dados.

Referências Bibliográficas

- [1] Chapman, S. J. (2012), *Electric Machinery Fundamentals*, Editor – Mc Graw
- [2] Fitzgerald, A. E. & Kingsley, Charles Jr (2003), *Electric Machinery*, Editor – McGraw Hill Book Company, Inc
- [3] Hothari, D. P. Nagrath, I. J. (2010), *Electric Machines*, Editor –McGraw Hill Book Company, Inc
- [4] ABB, *Low Voltage Motors*
- [5] Carvalho, José António Beleza, *Máquinas Assíncronas de Indução*
- [6] Carvalho, José António Beleza, *Electromagnetismo*
- [7] Kosow, Irving L., (1962), *Electric Machinery and Transformers*, Editor – Editora Globo
- [8] WEG, *Motores Elétricos – Guia de Especificação*
- [9] WEG, *W22 – Three-Phase Electric Motor*
- [10] Carvalho, José António Beleza, *Eficiência Energética em Equipamentos de Força- Motriz*, artigo científico retirado de “Neutro à Terra”
- [11] WEG, *Eficiência Energética – EU MEPS: Requisitos de Eficiência para Motores de Baixa Tensão*
- [12] WEG, *Regulamentações Globais de Eficiência para Motores Elétricos de Baixa Tensão*
- [13] Abreu, M. I., (2007), *Noções de Electromagnetismo e Estudo de Circuitos Magnéticos*
- [14] Carvalho, José António Beleza, *Máquinas Elétricas de Corrente Contínua*
- [15] Guedes, M. V., (1993), *O Motor de Indução Trifásico – Modelização*
- [16] *Apontamentos Científicos*, <http://apuntescientificos.org/motores.html>, último acesso 5/10/2018
- [17] Monilson Salles, <https://www.slideshare.net/monilsonsalles/sel0437-aula08-motores012017>, último acesso 5/10/2018
- [18] Angelo Hafner, <https://pt.slideshare.net/angeloahafner/induction-motors-casa>, último acesso 5/10/2018
- [19] Infoescola, <https://www.infoescola.com/fisica/lei-de-ampere/>, último acesso 5/10/2018

- [20] Gray, A & Wallace, G. A. (1959), Principles and Practice of Electrical Engineering, Editor – McGraw Hill Book Company, Inc
- [21] Sucena Paiva, J. P. (2015), Redes de Energia Elétrica – Uma Análise Sistemática, Editor – IST Press