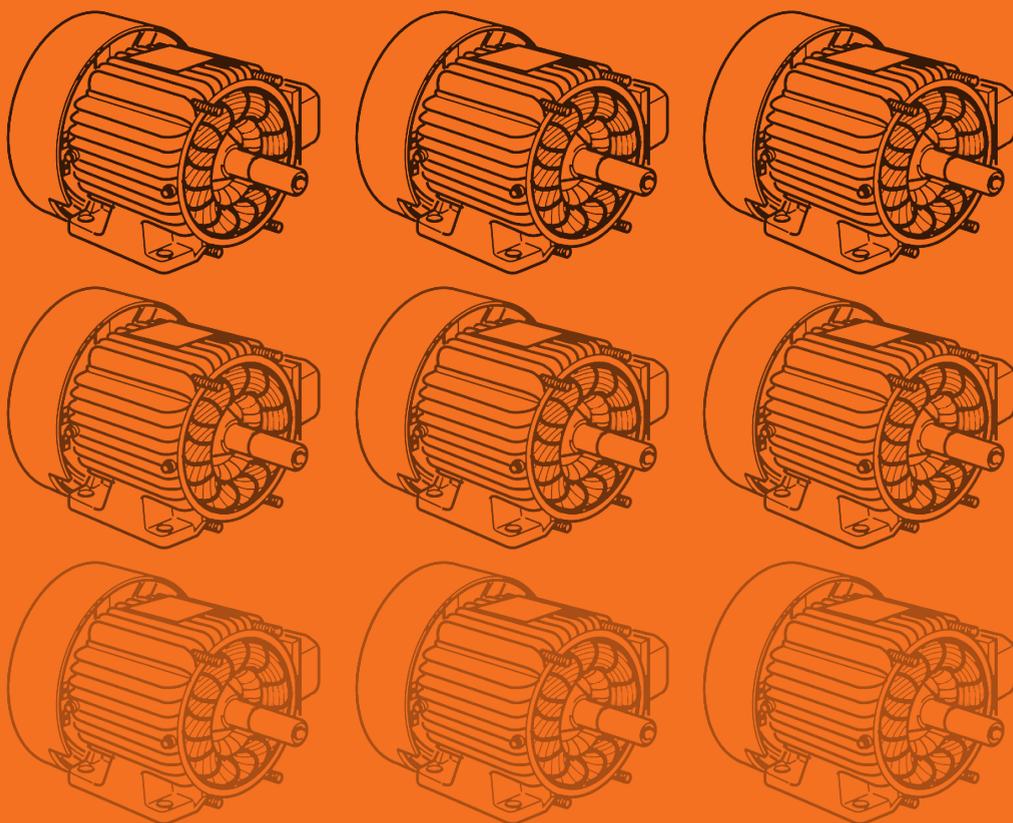


André F. R. Sá e António E. P. C. Barbosa

# Máquinas Elétricas e Alguns Engenhos

2.<sup>a</sup> Edição



#### AUTORES

André Fernando Ribeiro de Sá e António Eduardo Pereira Coutinho Barbosa

#### TÍTULO

Máquinas Elétricas e Alguns Engenhos - 2.ª Edição

#### EDIÇÃO

Publindústria, Edições Técnicas

Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

www.publindustria.pt

#### DISTRIBUIÇÃO

Engebook – Conteúdos de Engenharia e Gestão

Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: apolcliente@engebook.com · www.engebook.com

#### REVISÃO

Diogo Resende

Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

#### DESIGN

Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

#### COORDENAÇÃO EDITORIAL

Instituto Superior de Engenharia do Porto

António Augusto Araújo Gomes

#### IMPRESSÃO

Espanha

Julho, 2017

#### DEPÓSITO LEGAL

427960/17



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2017 | Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Todos os direitos reservados a Publindústria, Produção de Comunicação, Lda. para a língua portuguesa.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

621.3      Engenharia Elétrica

ISBN

Papel:      978-989-723-244-2

E-book:     978-989-723-245-9

Engebook – Catalogação da publicação

Família:     Eletrotecnia

Subfamília: Máquinas Elétricas

# Índice

<b>1</b>	<b>Conceitos básicos de circuitos elétricos de potência</b>	
<b>1.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Diagramas de fasores</b>	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Relações analíticas em circuitos de corrente alternada</b>	<b>6</b>
<b>1.4</b>	<b>Polaridade. Notação do sentido das grandezas</b>	<b>7</b>
<b>1.5</b>	<b>Sistemas trifásicos</b>	<b>8</b>
1.5.1	<i>Introdução</i>	8
1.5.2	<i>Ligação em triângulo</i>	10
1.5.3	<i>Ligação em estrela</i>	13
1.5.4	<i>Sequência de fases</i>	17
<b>1.6</b>	<b>Potências</b>	<b>17</b>
1.6.1	<i>Introdução</i>	17
1.6.2	<i>Potência complexa</i>	19
1.6.3	<i>Triângulo de potências</i>	20
1.6.4	<i>Fluxo de potência</i>	23
1.6.5	<i>Potências em sistemas trifásicos equilibrados</i>	24
<b>1.7</b>	<b>Questões de estudo</b>	<b>25</b>
1.8	Exercícios	25
1.8.1	Exercício 1	25
1.8.2	Exercício 2	25
1.8.3	Exercício 3	26
1.8.4	Exercício 4	26
1.8.5	Exercício 5	27
1.8.6	Exercício 6	28
1.8.7	Exercício 7	28
1.8.8	Exercício 8	29
1.8.9	Exercício 9	30
1.8.10	Exercício 10	31
1.8.11	Exercício 11	32
1.8.12	Exercício 12	34
<b>2</b>	<b>Alguns conceitos fundamentais de mecânica</b>	
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>37</b>
<b>2.2</b>	<b>Força mecânica</b>	<b>37</b>
<b>2.3</b>	<b>Binário mecânico</b>	<b>37</b>
<b>2.4</b>	<b>Energia mecânica (trabalho)</b>	<b>38</b>
<b>2.5</b>	<b>Potência mecânica</b>	<b>39</b>

<b>2.6</b>	<b>Potência de um motor rotativo</b>	<b>40</b>
<b>2.7</b>	<b>Transformação de energia</b>	<b>41</b>
<b>2.8</b>	<b>Rendimento de uma máquina elétrica</b>	<b>41</b>
<b>2.9</b>	<b>A energia cinética com o movimento linear</b>	<b>42</b>
<b>2.10</b>	<b>A energia cinética numa massa com o movimento de rotação</b>	<b>43</b>
<b>2.11</b>	<b>Variação de velocidade</b>	<b>45</b>
<b>2.12</b>	<b>Velocidade de um sistema mecânico, velocidade de um motor</b>	<b>46</b>
<b>2.13</b>	<b>Fluxo de potência mecânica num sistema acoplado</b>	<b>47</b>
<b>2.14</b>	<b>Análise de um motor acionando uma carga considerando a inércia</b>	<b>47</b>
<b>2.15</b>	<b>Acionamento de cargas com movimentos lineares com motores elétricos</b>	<b>48</b>
<b>2.16</b>	<b>Índices de proteção (IP)</b>	<b>50</b>
<b>2.17</b>	<b>Tipos de regime</b>	<b>52</b>
<b>2.18</b>	<b>Classes térmicas</b>	<b>56</b>
<b>2.19</b>	<b>Proteções térmicas</b>	<b>57</b>
<b>2.20</b>	<b>Temperatura ambiente e altitude da instalação</b>	<b>61</b>
<b>2.21</b>	<b>Formas construtivas normalizadas</b>	<b>62</b>
<b>2.22</b>	<b>Altura do eixo</b>	<b>66</b>
<b>2.23</b>	<b>Atmosferas explosivas</b>	<b>66</b>
<b>2.24</b>	<b>Exercícios resolvidos</b>	<b>69</b>
2.24.1	Exercício 1	69
2.24.2	Exercício 2	70
2.24.3	Exercício 3	70
2.24.4	Exercício 4	70
2.24.5	Exercício 5	70
2.24.6	Exercício 6	70
2.24.7	Exercício 7	71
2.24.8	Exercício 8	71

### **3 Conceitos fundamentais da conversão de energia em eletrotecnia**

<b>3.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>75</b>
<b>3.2</b>	<b>A força mecânica num condensador</b>	<b>76</b>
<b>3.3</b>	<b>O campo magnético num toro</b>	<b>79</b>
<b>3.4</b>	<b>Circuitos magnéticos série e paralelo</b>	<b>80</b>
<b>3.5</b>	<b>Materiais ferromagnéticos</b>	<b>83</b>
<b>3.6</b>	<b>Circuitos magnéticos em materiais ferromagnéticos e no ar</b>	<b>85</b>
<b>3.7</b>	<b>O Fluxo magnético de fugas</b>	<b>85</b>
<b>3.8</b>	<b>Potência de perdas no núcleo de ferro</b>	<b>89</b>
<b>3.9</b>	<b>Fluxo magnético de ligação</b>	<b>94</b>
<b>3.10</b>	<b>Força e energia armazenada em campos magnéticos</b>	<b>94</b>
<b>3.11</b>	<b>Coefficiente de autoindução e indutância mútua</b>	<b>95</b>
	<b>Questões de estudo</b>	<b>97</b>

<b>4</b>	<b>Máquinas de corrente contínua</b>	
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>101</b>
<b>4.2</b>	<b>Gerador de corrente contínua (dínamo)</b>	<b>101</b>
4.2.1	<i>A produção de uma tensão</i>	101
4.2.2	<i>Força eletromotriz (fem)</i>	104
4.2.3	<i>Binário eletromagnético</i>	104
4.2.4	<i>Tipos de bobinagem</i>	104
4.2.5	<i>Constituição</i>	104
4.2.6	<i>Configurações</i>	106
4.2.7	<i>Curvas características</i>	110
<b>4.3</b>	<b>Exercícios sobre dínamos</b>	<b>112</b>
4.3.1	Exercício 1	112
4.3.2	Exercício 2	113
4.3.3	Exercício 3	114
<b>4.4</b>	<b>Motor de corrente contínua</b>	<b>115</b>
4.4.1	<i>Princípio de funcionamento</i>	115
4.4.2	<i>Constituição</i>	117
4.4.3	<i>A força contra eletromotriz</i>	117
4.4.4	<i>Corrente de arranque</i>	117
4.4.5	<i>Potência mecânica</i>	118
4.4.6	<i>Balanco energético</i>	118
4.4.7	<i>Controlo de velocidade (motor de excitação independente)</i>	119
4.4.8	<i>Configurações</i>	120
<b>4.5</b>	<b>Exercícios resolvidos sobre motores DC convencionais</b>	<b>123</b>
4.5.1	Exercício 1	123
4.5.2	Exercício 2	124
4.5.3	Exercício 3	124
4.5.4	Exercício 4	125
4.5.5	Exercício 5	126
4.5.6	Exercício 6	127
<b>4.6</b>	<b>Máquinas DC não convencionais (de íman permanente)</b>	<b>127</b>
4.6.1	<i>Íman permanente convencional</i>	127
4.6.2	<i>Sem núcleo (coreless)</i>	128
4.6.3	<i>Sem escovas (brushless)</i>	128
<b>5</b>	<b>Transformador monofásico</b>	
<b>5.1</b>	<b>Aspetos gerais</b>	<b>135</b>
<b>5.2</b>	<b>A necessidade de utilização de transformadores</b>	<b>136</b>
<b>5.3</b>	<b>O transformador monofásico ideal</b>	<b>136</b>
5.3.1	<i>Funcionamento em vazio</i>	137

5.3.2	<i>Fluxo de dispersão</i>	141
5.3.3	<i>Funcionamento em carga</i>	143
<b>5.4</b>	<b>Obtenção do circuito equivalente</b>	<b>144</b>
5.4.1	<i>Redução do secundário ao primário</i>	144
5.4.2	<i>Circuito equivalente simplificado reduzido ao primário</i>	146
5.4.3	<i>Ensaio em vazio</i>	147
5.4.4	<i>Ensaio em curto-circuito</i>	148
<b>5.5</b>	<b>Corrente de curto-circuito à tensão nominal</b>	<b>149</b>
5.5.1	<i>Corrente de curto-circuito no secundário</i>	149
5.5.2	<i>Corrente de curto-circuito no primário</i>	150
<b>5.6</b>	<b>Corrente de ligação</b>	<b>150</b>
<b>5.7</b>	<b>Queda de tensão em carga</b>	<b>151</b>
5.7.1	<i>Aproximação de Kapp</i>	152
5.7.2	<i>Regulação</i>	152
<b>5.8</b>	<b>Constante de tempo térmica</b>	<b>153</b>
<b>5.9</b>	<b>Perdas</b>	<b>155</b>
5.9.1	<i>Perdas no cobre</i>	155
5.9.2	<i>Perdas no ferro</i>	156
<b>5.10</b>	<b>Balanco Energético</b>	<b>156</b>
5.10.1	<i>Potências ativas</i>	156
5.10.2	<i>Potências reativas</i>	156
5.10.3	<i>Rendimento</i>	158
5.10.4	<i>Algumas oportunidades de redução do consumo de energia</i>	160
<b>5.11</b>	<b>Magnetostricção</b>	<b>160</b>
<b>5.12</b>	<b>Elementos constitutivos</b>	<b>161</b>
5.12.1	<i>Contituição geral</i>	161
5.12.2	<i>Núcleo</i>	161
5.12.3	<i>Enrolamentos</i>	163
<b>5.13</b>	<b>Exercícios resolvidos</b>	<b>165</b>
5.13.1	Exercício 1	165
5.13.2	Exercício 2	166
5.13.3	Exercício 3	166
5.13.4	Exercício 4	166
5.13.5	Exercício 5	166
5.13.6	Exercício 6	167
5.13.7	Exercício 7	168
<b>6</b>	<b>Transformador trifásico</b>	
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>175</b>
<b>6.2</b>	<b>Exemplo de utilização</b>	<b>175</b>
<b>6.3</b>	<b>Constituição</b>	<b>176</b>

<b>6.4</b>	<b>Tipos de Ligações</b>	<b>177</b>
<b>6.5</b>	<b>Exemplos de aplicações dos tipos de ligação</b>	<b>179</b>
<b>6.6</b>	<b>Tipos de núcleo de transformadores trifásicos</b>	<b>180</b>
<b>6.7</b>	<b>Designações dos terminais</b>	<b>180</b>
<b>6.8</b>	<b>Potências e rendimento</b>	<b>181</b>
<b>6.9</b>	<b>Relação de transformação e relação do número de espiras</b>	<b>181</b>
<b>6.10</b>	<b>Índice Horário</b>	<b>182</b>
<b>6.11</b>	<b>Paralelo de transformadores</b>	<b>187</b>
<b>6.12</b>	<b>Ensaio</b>	<b>188</b>
6.12.1	<i>Ensaio em vazio</i>	188
6.12.2	<i>Ensaio em curto-circuito</i>	188
<b>6.13</b>	<b>Transformadores de distribuição MT/BT</b>	<b>189</b>
6.13.1	<i>Introdução</i>	189
6.13.2	<i>Classes de temperatura mais utilizadas</i>	191
6.13.3	<i>Proteções</i>	192
6.13.4	<i>Códigos de refrigeração</i>	193
6.13.5	<i>Colocação em serviço</i>	195
6.13.6	<i>Manutenção</i>	195
6.13.7	<i>Algumas oportunidades de melhoria no consumo de energia</i>	195
<b>6.14</b>	<b>Exercícios resolvidos</b>	<b>195</b>
6.14.1	Exercício 1	195
6.14.2	Exercício 2	196
6.14.3	Exercício 3	197
<b>7</b>	<b>Transformadores especiais</b>	
<b>7.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>203</b>
<b>7.2</b>	<b>Autotransformador</b>	<b>203</b>
7.2.1	<i>Autotransformador monofásico</i>	203
7.2.2	<i>Autotransformador trifásico</i>	205
<b>7.3</b>	<b>Transformadores de medida</b>	<b>206</b>
7.3.1	<i>Introdução</i>	206
7.3.2	<i>Transformadores de Tensão (TT)</i>	206
7.3.3	<i>Transformadores de Corrente (TC ou TI)</i>	209
7.3.4	<i>Transformador de corrente somador</i>	212
<b>7.4</b>	<b>Transformadores trifásicos usando apenas dois transformadores</b>	<b>213</b>
7.4.1	<i>Transformador com ligação V – V (ou <math>\Delta</math> aberto)</i>	213
7.4.2	<i>Transformador com ligação Scott</i>	213
7.4.3	<i>Transformador com ligação Le Blanc</i>	214
<b>7.5</b>	<b>Transformadores de número de fases</b>	<b>214</b>
7.5.1	<i>Transformador trifásico – hexafásico</i>	214
<b>7.6</b>	<b>Exercícios resolvidos</b>	<b>217</b>

7.6.1	Exercício 1	217
7.6.2	Exercício 2	217
7.6.3	Exercício 3	218
7.6.4	Exercício 4	218

## **8 Máquinas de indução**

<b>8.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>223</b>
<b>8.2</b>	<b>Aspetos construtivos</b>	<b>223</b>
<b>8.3</b>	<b>Campo magnético girante</b>	<b>225</b>
<b>8.4</b>	<b>A máquina em serviço</b>	<b>228</b>
<b>8.5</b>	<b>Os três modos de serviço</b>	<b>229</b>
8.5.1	<i>Serviço motor</i>	229
8.5.2	<i>Serviço gerador</i>	230
8.5.3	<i>Serviço freio</i>	231
<b>8.6</b>	<b>Modelo. O circuito equivalente.</b>	<b>231</b>
8.6.1	<i>Introdução</i>	231
8.6.2	<i>O sistema do estator</i>	232
8.6.3	<i>O sistema do rotor</i>	232
8.6.4	<i>O circuito equivalente completo</i>	234
8.6.5	<i>Várias configurações de circuitos equivalentes simplificados</i>	235
<b>8.7</b>	<b>Ensaio em vazio, ensaios com o rotor bloqueado e os parâmetros do circuito equivalente</b>	<b>237</b>
8.7.1	<i>Ensaio em vazio</i>	238
8.7.2	<i>Ensaio de rotor bloqueado</i>	239
8.7.3	<i>Exemplo</i>	240
<b>8.8</b>	<b>Características de desempenho</b>	<b>243</b>
<b>8.9</b>	<b>Fluxos de potência nos três modos de serviço</b>	<b>245</b>
8.9.1	<i>Introdução</i>	245
8.9.2	<i>Fluxo de potência como motor</i>	246
8.9.3	<i>Fluxo de potência como gerador</i>	249
8.9.4	<i>Fluxo de potência como freio</i>	251
<b>8.10</b>	<b>Efeitos da resistência do rotor</b>	<b>252</b>
<b>8.11</b>	<b>Técnicas de estimativa de carga</b>	<b>254</b>
8.11.1	<i>Métodos gráficos</i>	254
8.11.2	<i>Método baseado na medição da potência elétrica</i>	255
8.11.3	<i>Método baseado na medição do deslizamento (método menos preciso)</i>	255
8.11.4	<i>Método baseado na medição do deslizamento (método mais preciso)</i>	255
<b>8.12</b>	<b>Motor de indução de elevado rendimento</b>	<b>256</b>
8.12.1	<i>Classificação do desempenho energético de motores</i>	258
8.12.2	<i>Avaliação económica do investimento</i>	260
8.12.3	<i>Metodologia dos Custos de Ciclo de Vida</i>	262

<b>8.13</b>	<b>Arranque de sistemas mecânicos com motores de indução</b>	<b>263</b>
8.13.1	<i>Introdução</i>	263
8.13.2	<i>Arranque direto</i>	265
8.13.3	<i>Arranque estrela – triângulo (Y - D)</i>	267
8.13.4	<i>Arranque por impedâncias no estator</i>	270
8.13.5	<i>Arranque por resistências no rotor</i>	271
8.13.6	<i>Arranque em motores de enrolamentos divididos (“part-winding”)</i>	272
8.13.7	<i>Arranque com autotransformador</i>	273
8.13.8	<i>Arranque eletrônico por variação da tensão</i>	274
8.13.9	<i>Resumo de tipos de arranque</i>	276
<b>8.14</b>	<b>Variação de velocidade</b>	<b>277</b>
8.14.1	<i>Introdução</i>	277
8.14.2	<i>Enrolamentos no estator separados</i>	277
8.14.3	<i>Variação da amplitude da tensão</i>	279
8.14.4	<i>Variação eletrônica de velocidade (conversores de frequência)</i>	280
8.14.5	<i>Outros sistemas eletromecânicos de variação de velocidade</i>	283
<b>8.15</b>	<b>Frenagem elétrica</b>	<b>283</b>
8.15.1	<i>Frenagem por recuperação de energia</i>	284
8.15.2	<i>Frenagem por inversão do campo girante</i>	284
8.15.3	<i>Frenagem por injeção de corrente contínua</i>	286
<b>8.16</b>	<b>Motores trifásicos alimentados em monofásico</b>	<b>287</b>
<b>8.17</b>	<b>Desempenho do motor de indução monofásico</b>	<b>288</b>
8.17.1	<i>Introdução</i>	288
8.17.2	<i>Motor de indução monofásico com fase auxiliar</i>	290
8.17.3	<i>Motor de indução monofásico com condensador de arranque</i>	291
8.17.4	<i>Motor de indução monofásico com condensador permanente</i>	292
8.17.5	<i>Motor de indução monofásico com dois condensadores</i>	292
8.17.6	<i>Motor de indução monofásico com polos sombreados</i>	292
<b>8.18</b>	<b>Exercícios resolvidos</b>	<b>293</b>
8.18.1	Exercício 1	293
8.18.2	Exercício 2	293
8.18.3	Exercício 3	294
8.18.4	Exercício 4	296
8.18.5	Exercício 5	296
8.18.6	Exercício 6	297
8.18.7	Exercício 7	297
8.18.8	Exercício 8	298
8.18.9	Exercício 9	298
8.18.10	Exercício 10	300
8.18.11	Exercício 11	300
8.18.12	Exercício 12	302
8.18.13	Exercício 13	304
8.18.14	Exercício 14	306

8.18.15	Exercício 15	309
8.18.16	Exercício 16	314

## **9 Máquinas síncronas**

<b>9.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>319</b>
<b>9.2</b>	<b>Máquina síncrona convencional</b>	<b>319</b>
9.2.1	<i>Introdução</i>	319
9.2.2	<i>Configuração geral de um alternador</i>	319
9.2.3	<i>Princípio de funcionamento</i>	320
9.2.4	<i>Campo magnético girante</i>	320
9.2.5	<i>Número de polos</i>	321
9.2.6	<i>Força eletromotriz</i>	322
9.2.7	<i>Estator</i>	323
9.2.8	<i>Rotor</i>	323
9.2.9	<i>Sistemas de excitação</i>	325
9.2.10	<i>Alternador Lundell</i>	326
9.2.11	<i>Exemplo de integração em unidade de produção</i>	326
9.2.12	<i>Curva de tensão em vazio (característica em vazio)</i>	327
9.2.13	<i>Curva de corrente em curto-circuito (característica em curto-circuito)</i>	328
9.2.14	<i>Reatância síncrona</i>	329
9.2.15	<i>Característica em carga</i>	330
9.2.16	<i>O alternador alimentando uma carga isolada</i>	330
9.2.17	<i>Paralelo com a rede</i>	333
<b>9.3</b>	<b>Máquina síncrona convencional como motor</b>	<b>334</b>
9.3.1	<i>Introdução</i>	334
9.3.2	<i>Curvas em V ou de Mordey</i>	335
9.3.3	<i>Funcionamento como compensador síncrono</i>	336
9.3.4	<i>Exemplo de um alternador a alimentar um motor síncrono</i>	337
9.3.5	<i>Comparação</i>	337
<b>9.4</b>	<b>Motor passo-a-passo</b>	<b>338</b>
<b>9.5</b>	<b>Motor de síncrono de íman permanente ou motor de relutância síncrono</b>	<b>338</b>
<b>9.6</b>	<b>Exercícios resolvidos</b>	<b>339</b>
9.6.1	Exercício 1	339
9.6.2	Exercício 2	342
	<b>Algumas Referências</b>	<b>344</b>

## 1.1 Introdução

O técnico eletrotécnico que trabalha com máquinas elétricas, seja como utilizador, seja como projetista da máquina ou de equipamentos associados, necessita muitas vezes de recorrer à análise de circuitos elétricos de potência e aplicar conceitos de análise em regime estabilizado e perante transitórios. Dos circuitos, é fundamental estar familiarizado com a análise de circuitos de corrente alternada sejam monofásicos sejam trifásicos.

Neste capítulo revê-se os aspetos fundamentais associados a circuitos de corrente alternada que serão utilizados ao longo do texto. A notação utilizada é aqui apresentada juntamente com os conceitos de circuitos trifásicos e de potências elétricas complexas.

## 1.2 Diagramas de fasores

Circuitos elétricos de corrente alternada têm, em geral, ondas com formas sinusoidais. Estas, quando têm a mesma frequência, podem ser representadas por fasores, que podem ser adicionados e subtraídos de modo em tudo idêntico aos vetores. Os fasores facilitam a análise de grandezas que variam sinusoidalmente em ordem ao tempo, tal como acontece com tensões e correntes alternadas de amplitude e frequência constante, ou que variam ao longo do espaço, tal como acontece com forças magneto motrizes (fmm em ampere espira [A]) ou densidades de fluxo (B em tesla [T]) ao longo de um corte transversal do entreferro de uma máquina, sendo de constante amplitude e frequência.

O valor instantâneo da tensão elétrica (unidade volt [V]), quando sinusoidal, pode ser representado por  $u(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t$ , sendo  $U$  o valor eficaz<sup>1</sup> da tensão,  $\omega$  a pulsação ou velocidade angular ( $2\pi f$ ) e  $t$  o tempo. A tensão variável no tempo pode ser caracterizada como um número complexo ou um fasor num plano que roda no sentido oposto ao dos ponteiros do relógio, com igual velocidade angular  $\omega$  como se esquematiza na figura seguinte e com o valor eficaz  $U$ .

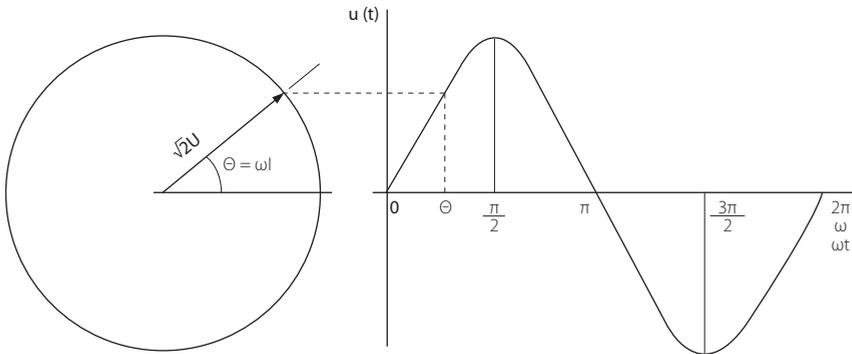


Figura 1.1. Realização de uma grandeza sinusoidal.

Considere-se dois fasores que representam duas grandezas A e B de diferentes amplitudes, que se

<sup>1</sup> Recordar-se que valor eficaz (ou valor médio quadrático) não é mais do que a raiz quadrada do quadrado dos valores instantâneos. Utiliza-se, por vezes, com o índice rms, da designação anglo-saxónica "root mean square", ou simplesmente utilizando a sigla em minúsculas. São os valores eficazes que, habitualmente, os voltímetros e os amperímetros utilizados em corrente alternada apresentam nas suas medições.

As equações anteriores mostram que num sistema trifásico em triângulo com tensões de alimentação equilibradas e, com cargas equilibradas, a amplitude da corrente de linha é superior por raiz de três vezes a corrente no lado do triângulo e apresenta um desfaseamento de  $30^\circ$ .

A figura seguinte ilustra o diagrama fasorial das correntes em coerência com as deduções anteriormente efetuadas:

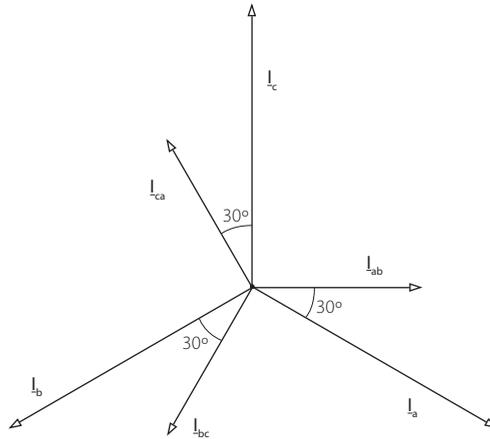


Figura 1.9. Diagrama fasorial de correntes nas fases e nas linhas de um sistema trifásico em triângulo.

Neste caso poderemos afirmar que:

$$\begin{aligned} U_{linha} &= U_{fase} \\ I_{linha} &= \sqrt{3} \cdot I_{fase} \end{aligned} \tag{1.20}$$

Quando as impedâncias são iguais, para tensões iguais teremos correntes iguais em módulo:

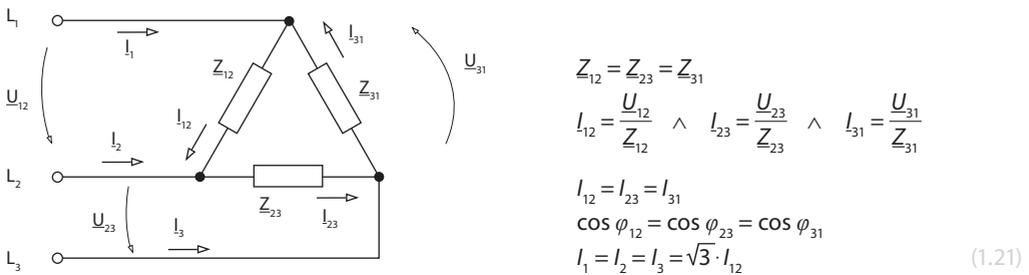


Figura 1.10. Esquema elétrico de uma carga em triângulo com a representação das tensões e das correntes.

### 1.5.2.3. Cargas não equilibradas em triângulo

Quando as impedâncias não são iguais, em geral, teremos correntes diferentes:

Se as cargas estiverem ligadas em **estrela** poderemos também calcular pelas seguintes fórmulas:

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 = U_{1N} \cdot I_1 + U_{2N} \cdot I_2 + U_{3N} \cdot I_3$$

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 + S_2 \cdot \cos \varphi_2 + S_3 \cdot \cos \varphi_3$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = S_1 \cdot \sin \varphi_1 + S_2 \cdot \sin \varphi_2 + S_3 \cdot \sin \varphi_3$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_T}{P_T} \quad (1.56)$$

## 1.7 Questões de estudo

1. Definir o que se entende por um fasor em um circuito de corrente alternada. Explique a diferença entre um fasor e um vetor. E a diferença entre um fasor e um número complexo.
2. Liste as razões porque se utilizam circuitos trifásicos na transmissão de energia elétrica e não circuitos monofásicos.
3. Visto os circuitos trifásicos serem mais vantajosos que os monofásicos para a transmissão de energia, explique porque não se utiliza circuitos com mais fases, por exemplo com seis fases, para este fim.
4. Liste as razões que lhe ocorrem para se realizar a compensação do fator de potência num equipamento.

## 1.8 Exercícios

### 1.8.1 Exercício 1

Considere uma tensão e corrente caracterizada com as expressões  $u(t) = 155,6 \cos(\omega t + 60^\circ)$  V e  $i(t) = 14,1 \sin(\omega t + 120^\circ)$  A.

Determine:

- a) O valor máximo da tensão e da corrente.
- b) O valor eficaz da tensão e da corrente.
- c) Desenhe esquematicamente o diagrama de fasores estabelecendo a tensão como referência.
- d) Desenhe esquematicamente o diagrama de fasores estabelecendo a corrente como referência.
- e) O circuito que permite produzir a corrente descrita é indutivo ou capacitivo? Explique.

### 1.8.2 Exercício 2

Considere um equipamento elétrico que consome 2 kW quando alimentado com uma tensão alternada de 230 V, 50 Hz, absorvendo 11 A e corrente em atraso em relação à tensão.

- a) Indique a potência aparente e reativa absorvida pelo aparelho.
- b) Indique o fator de potência
- c) Determine o valor de uma resistência e de uma reatância que realizam um circuito idêntico ao do equipamento elétrico. Designamos a reatância e resistência equivalente.
- d) Pretende-se colocar em paralelo com o equipamento uma capacidade com o fim de se obter um fator de potência igual a 0,99 indutivo. Qual o valor da capacidade que permite obter o referido.

*Resolução:*

A tensão no cabo de elevação é igual à força da gravidade que atua na massa a ser elevada. Como vimos no exemplo 2.3, a força tem o valor de 980 N.

A energia é:

$$E = F \cdot d = 980 \cdot 50 = 49.000 \text{ J}$$

E a potência é:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{49.000}{20} = 2.450 \text{ W} = 2,45 \text{ kW}$$

Notar que se trata de potência e de energia mecânica.

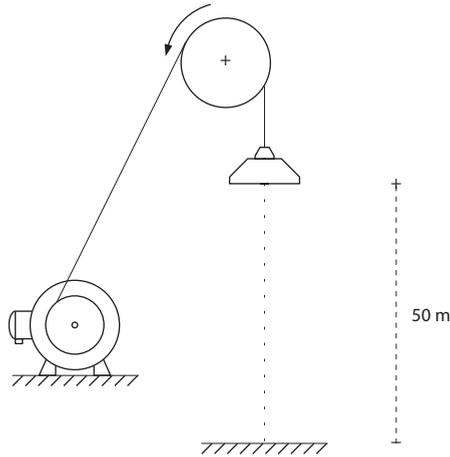


Figura 2.3. Potência na elevação de uma carga relativa ao exemplo anterior.

## 2.6 Potência de um motor rotativo

A potência mecânica de rotação no veio de um motor depende da velocidade angular de rotação e do binário, e é calculada pelo produto de ambas:

$$P = T \cdot \omega \tag{2.5}$$

Onde:

$P$  é a potência mecânica em watt [W];

$\omega$  é a velocidade angular, obtida com o produto  $2\pi n$  em radianos por segundo [rad/s];

$n$  é a velocidade de rotação em rotações por segundo [rps];

$T$  é o binário mecânico em newton metro [Nm].

### Exemplo 2.5

Ensaiou-se um motor elétrico e, através de uma balança, foi lido o binário de 20 Nm produzido com uma certa carga. A velocidade de rotação lida foi de 1.450 rot./min. Calcule a potência mecânica que o motor desenvolve neste regime de carga.

## 2.24 Exercícios resolvidos

### 2.24.1 Exercício 1

Suponha que tem disponível um motor com as seguintes chapas de características

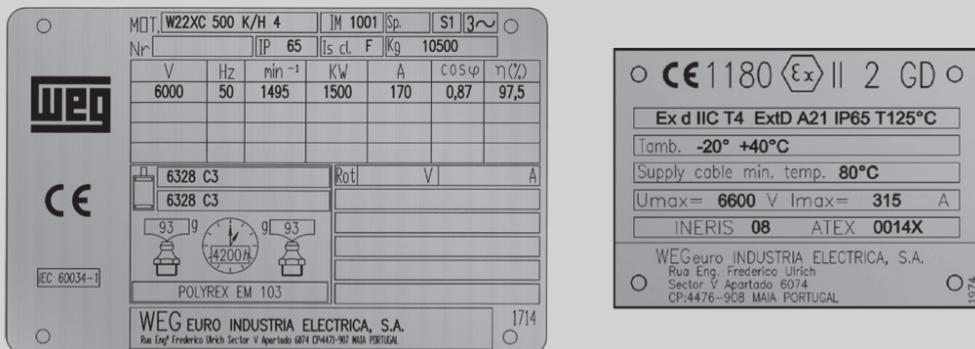


Figura 2.30. Chapas de características de um motor (fonte: WEG 2010).

Mencione ou calcule:

- Potência nominal.
- Potência elétrica absorvida no regime nominal.
- A altura do eixo.
- Tipo de regime.
- Forma construtiva normalizada.
- Índice de proteção.
- Temperatura admissível.
- Tipo de proteção contra explosão.

Resolução:

- Da chapa de características (lado esquerdo):  $P_n = 1.500 \text{ kW}$
- Calculando com os dados da chapa de características:  $P_{n,e} = \frac{P_n}{\eta} = \frac{1.500}{0,975} = 1.538 \text{ W}$  ou  $P_{n,e} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \times 6.000 \times 170 \times 0,87 \cong 1.538 \text{ kW}$
- Da chapa de características: 500. Logo a altura entre a base e o centro do veio é de 500 mm.
- Tipo de regime S1, ou seja, contínuo.
- Montagem IM 1001, ou seja, montado na horizontal, com patas, sem flange, dois rolamentos blindados, fixado sobre estrutura (bases, placas de base, fundações, trilhos, pedestais, etc.).
- IP 65, ou seja, blindagem contra poeiras (6) e proteção contra jatos de água moderados (5).
- Como a classe térmica é F então a temperatura admissível é de 155°C com máxima sobrelevação de temperatura de 100°C.
- Motor a instalar em áreas de ocorrência ocasional de gás ou poeira (II 2 GD), equipado com proteção do invólucro à prova de explosão (d), sendo apropriado zonas com hidrogénio (IIC), com máxima temperatura à superfície do motor de 135 °C (T4), com proteção do invólucro com IP 65 (Ex tD IP 65).

**Resolução:**

O fluxo magnético estabelece-se no ferro e em dois entreferros que se encontram em série. Um com 2,5 mm e outro com 0,2 mm. Resolvendo-se com as unidades do SI, comprimento em metro e área em metro quadrado, a relutância do entreferro de 2,5 mm é de:

$$R = \frac{l_1}{\mu_0 A_1} = \frac{0,25 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \pi (30 \times 10^{-3} / 2)^2} = 2,81 \times 10^6 \text{ H}^{-1}$$

E a relutância de 0,2 mm é:

$$R_2 = \frac{l_2}{\mu_0 A_2} = \frac{0,2 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} 2\pi \left(\frac{30+0,2}{2}\right) 10^{-3} (10) 10^{-3}} = 1,68 \times 10^5 \text{ H}^{-1}$$

A relutância total tem o valor:

$$R_{total} = R_1 + R_2 = (28,14 + 1,68) \times 10^5 = 29,82 \times 10^5 \text{ H}^{-1}$$

O fluxo magnético tem o valor:

$$\Phi = \frac{fmm}{R_{total}} = \frac{3,5 \times 800}{29,82 \times 10^5} = 9,39 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

O valor do fluxo é alto porque se desprezou a relutância do ferro.

### Exemplo 3.2

A figura 3.4 representa um ferro com dois entreferros em paralelo. Desprezando o fluxo de fugas<sup>5</sup> e a relutância do ferro, mas considerando o fluxo de dispersão no entreferro, acrescentando duas dimensões ao comprimento do entreferro, determine o fluxo magnético em cada entreferro e o fluxo magnético total. A bobina tem 900 espiras e é atravessada por uma corrente de 0,2 A.

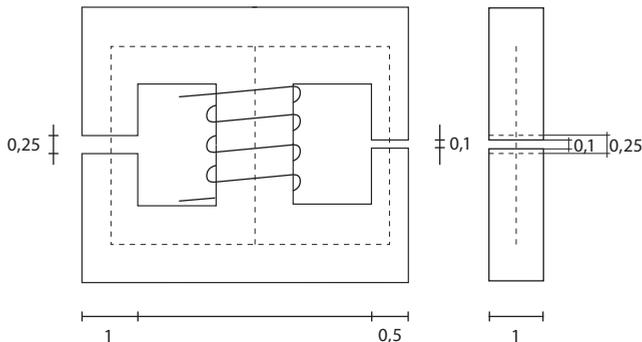


Figura 3.4. Circuito magnético de ferro com dois percursos em paralelo. As dimensões estão em cm.

<sup>5</sup> O fluxo magnético de fugas é a parte do fluxo que não atravessa todos os circuitos magnéticos. Ao restante fluxo, que atravessa todos os circuitos magnéticos, chamamos fluxo comum.

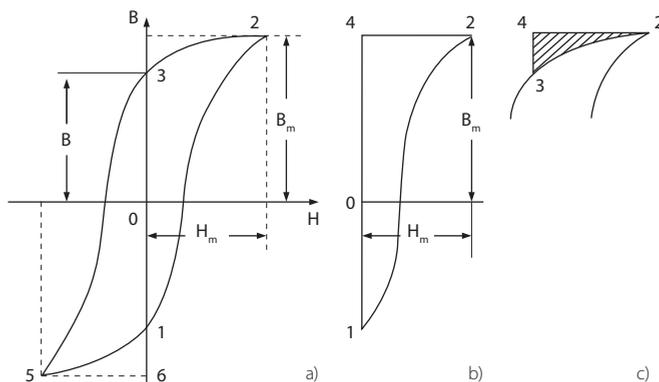


Figura 3.13. a) Ciclo de histerese. b) Energia absorvida. c) Energia cedida pelo ferro.

Uma variação cíclica do fluxo, com a frequência  $f$ , resulta em  $f$  ciclos por segundo, e a potência é:

$$P_h = f W_h = Vol \cdot f \cdot \text{área do ciclo} \quad (3.30)$$

As perdas por histerese são expressas empiricamente com a relação:

$$P_h = \eta Vol f B_{max}^n \quad (3.31)$$

Os valores de  $\eta$  e de  $n$  são específicos de cada material, O expoente  $n$  pode variar de 1,5 a 2,5 e é uma função do valor que se adota para a indução máxima. Contudo, é interessante notar que as perdas por histerese variam diretamente com a frequência para cada valor de  $B_{max}$ .

### Pequeno ciclo histerético

Se após ser atingido o valor  $H_a$  se verificar uma redução até ao valor  $H_b$ , tal como se apresenta na figura seguinte, e depois voltar a  $H_{max}$ , produz-se um pequeno ciclo histerético que origina perdas de potência adicionais à representada com o ciclo principal.

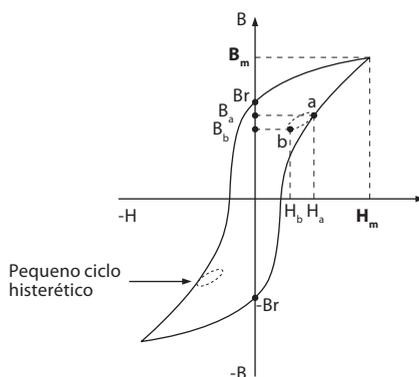


Figura 3.14. Pequeno ciclo histerético.

Onde CA é a espira, B e D são anéis, m e n são escovas, R é o circuito elétrico externo. Neste exemplo, os anéis giram solidários com a espira. Ao conjunto anéis – escovas chama-se coletor que efetuam o interface móvel – fixo. Neste tipo de configuração, ao rodar a espira a uma velocidade constante imposta pelo exterior, é gerada uma tensão alternada (AC). Esta tensão é explicada através da Lei de Faraday. Devido à variação de fluxo magnético temos geração de força eletromotriz (fem):

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \tag{4.1}$$

Onde  $\phi$  é o fluxo magnético que pode ser calculado através do campo magnético (B) e da secção (S):

$$\phi = B \cdot S \tag{4.2}$$

A figura seguinte ilustra a variação de fluxo e a respetiva indução de fem durante um período temporal para uma frequência de 50 Hz ( $t = 1/f = 0,02$  s).

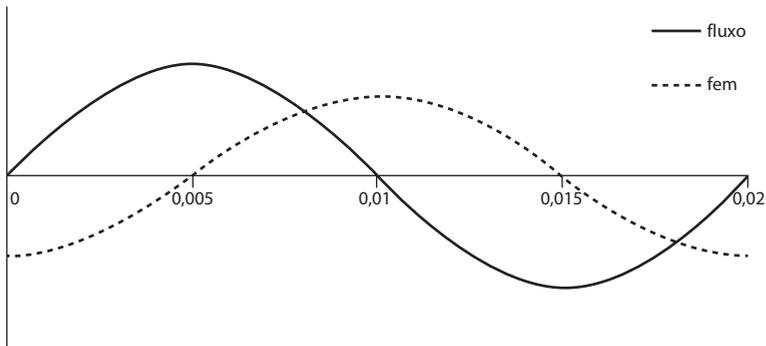


Figura 4.3. Produção de uma tensão AC através da variação de fluxo magnético.

Através da utilização de dois semianéis em alternativa aos dois anéis anteriormente referidos, é possível efetuar retificação da onda sinusoidal obtida anteriormente. A figura seguinte ilustra esta alteração.

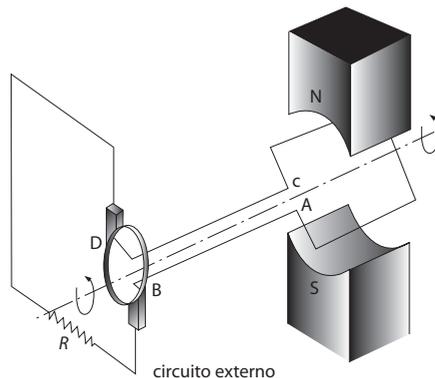


Figura 4.4. Produção de uma tensão retificada (onda completa).

Logo a fem  $E = 250 \text{ V}$ .

b) Em carga e interpretando o enunciado teremos o seguinte esquema elétrico:

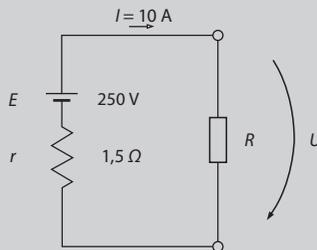


Figura 4.22. Esquema elétrico do circuito elétrico do induzido e da carga – interpretação do enunciado.

Aplicando a lei das malhas, teremos  $U = E - r \cdot I = 250 - 1,5 \times 10 = 235 \text{ V}$

c) Aplicando a lei de Ohm teremos  $\Delta U_r = r \cdot I = 1,5 \times 10 = 15 \text{ V}$

d) Aplicando a lei de Ohm teremos  $R = \frac{U}{I} = \frac{235}{10} = 23,5 \Omega$

e) A potência elétrica gerada pelo dínamo:  $P_E = E \cdot I = 250 \times 10 = 2.500 \text{ W}$

f) A potência útil:  $P_u = U \cdot I = 235 \times 10 = 2.350 \text{ W}$

g) As perdas no induzido:  $P_{\text{perdas}_{\text{ind}}} = P_E - P_u = r \cdot I^2 = 150 \text{ W}$

h) O rendimento elétrico do dínamo:  $\eta_e = \frac{P_u}{P_E} = \frac{2.350}{2.500} = 94\%$

i) O rendimento do dínamo:  $\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{\text{perdas}}} = \frac{2.350}{2.350 + 150 + 200} = 87\%$

### 4.3.2 Exercício 2

Um dínamo hexapolar tem 680 espiras no induzido, roda a uma velocidade de 700 rpm, o fluxo máximo por polo é de 30 mWb, e o tipo de bobinagem do induzido é do tipo ondulado. Calcule:

- A fem induzida.
- O binário interno eletromagnético, quando no induzido circulam 20 A.
- Calcular a potência interna para o caso anterior.

Resolução:

a) A fem pode ser calculada por:  $E = \frac{p}{c} \cdot N \cdot n \cdot \phi = \frac{3}{1} \times 680 \times \frac{700}{60} \times 30 \cdot 10^{-3} = 714 \text{ V}$

b) O binário eletromagnético interno pode ser calculado pela expressão:

$$T_i = \frac{p}{c} \cdot \frac{N \cdot \phi \cdot I}{2\pi} = \frac{3}{1} \times \frac{680 \times 30 \cdot 10^{-3} \times 20}{2\pi} = 195 \text{ Nm}$$

c) A potência interna:  $P_i = T_i \cdot \omega = T_i \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = 195 \times \frac{2\pi \cdot 700}{60} = 14.280 \text{ W}$

A figura seguinte mostra o sistema de comutação do sentido da corrente mencionada anteriormente.

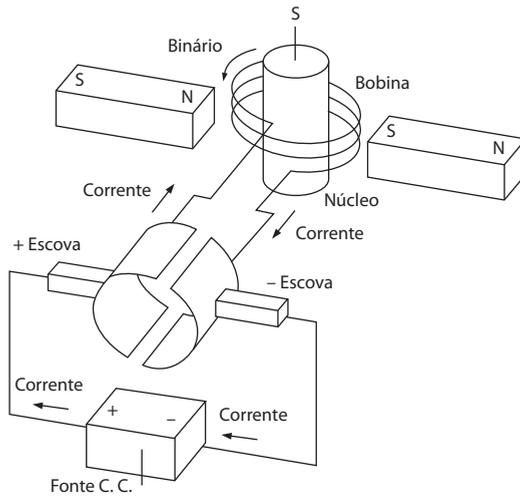


Figura 4.26. Sistema de comutação de um motor DC.

O princípio eletromagnético que justifica o funcionamento do motor DC é a Lei de Laplace: um condutor de comprimento  $\vec{L}$  percorrido por uma corrente  $I$  e sob a ação de um campo magnético  $\vec{B}$  fica sujeito a uma força calculada da seguinte forma:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B} \quad (4.11)$$

No caso de uma espira, teremos um par de forças: uma força em cada segmento perpendicular ao campo magnético (a e b), logo teremos binário motor.

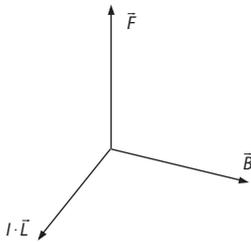


Figura 4.27. Diagrama vetorial associado à aplicação da Lei de Laplace.

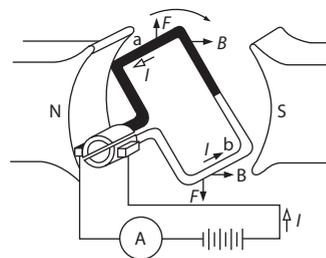
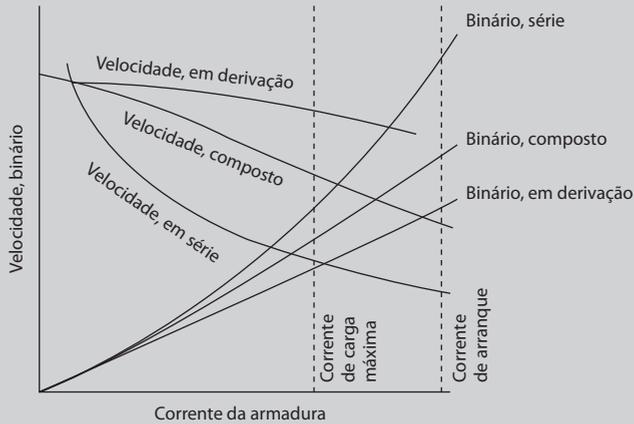


Figura 4.28. Representação do par de forças numa espira.

Para inverter o sentido de rotação, inverte-se o sentido da corrente  $I$  ou o sentido do campo magnético  $B$ . Se tivermos não uma espira mas várias, teremos uma força por cada segmento perpendicular ao campo magnético, ou seja teremos tantos pares de força como número de espiras, que somadas darão um par de forças maior, logo binário maior (considerando a mesma corrente e campo magnético).



Figuras 4.37. Curvas características de velocidade e binário em função da corrente na armadura (induzido).

## 4.5 Exercícios resolvidos sobre motores DC convencionais

### 4.5.1 Exercício 1

Calcule o rendimento no regime de carga nominal de um motor DC com excitação independente que se alimenta diretamente da rede, a sua potência nominal é de 3 kW e a sua fcm é de 220 V. A resistência do induzido é  $1 \Omega$  e a corrente no induzido é de 16 A. A queda de tensão em cada uma das escovas é de 1 V. Considere também que a potência absorvida pelo circuito indutor é de 100 W.

Resolução:

Interpretando os dados do enunciado poderemos desenhar o respetivo esquema elétrico.

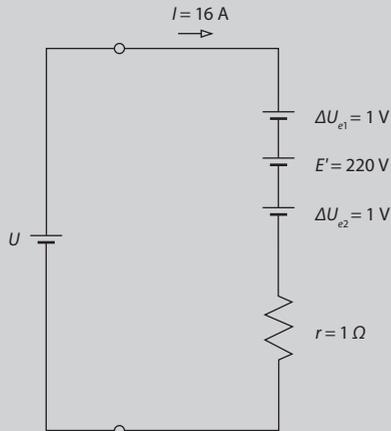


Figura 4.38. Esquema elétrico do induzido após interpretação do enunciado.

Aplicando a lei das malhas poderemos calcular a tensão de alimentação da rede.

$$U = E' + r \cdot I + \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} = 220 + 1 \times 16 + 1 + 1 = 238 \text{ V}$$

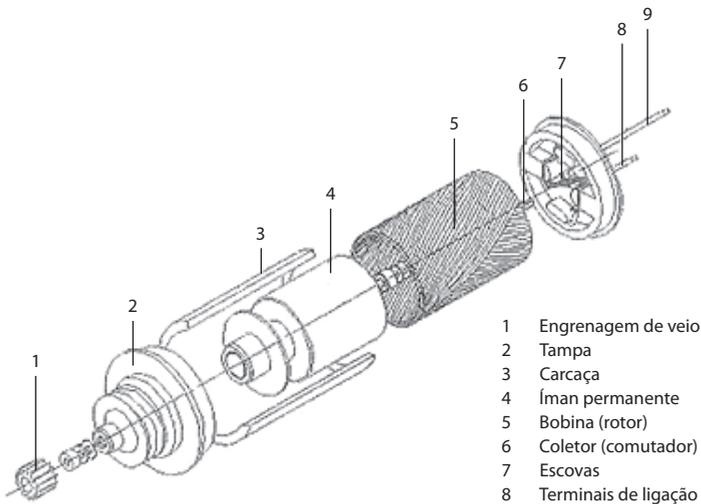
Estas máquinas tem normalmente baixas potências e baixos binários, sendo utilizados em pequenos eletrodomésticos e brinquedos.

#### 4.6.2 Sem núcleo (*coreless*)

Assim designados por o rotor não possuir ferro no núcleo, não sendo desta forma magnético. O estator é constituído por íman permanente, podendo ser colocado no interior ou no exterior do rotor. Máquina para pequenas potências e binários. O funcionamento é idêntico à máquina de íman permanente, ou seja, o campo magnético indutor é criado por íman permanente. Desta forma o estator não tem enrolamento.



Figuras 4.42. Exemplo de máquina DC sem núcleo, com o rotor no interior do estator (fonte: Francisco, A.).



Figuras 4.43. Exemplo de máquina DC sem núcleo, com o rotor no exterior do estator (fonte: Francisco, A.).

#### 4.6.3 Sem escovas (*brushless*)

Assim designados porque não tem escovas nem coletor. O rotor é constituído por ímanes permanentes e o estator tem núcleo ferromagnético com os respetivos enrolamentos. O princípio de funcionamento baseia-se na operação por comutação, que é efetuada eletronicamente, por alteração a alimentação dos enrolamentos, daí este motor não possuir escovas nem coletor. A imagem seguinte ilustra a máquina em corte, o esquema elétrico dos enrolamentos do estator e o tipo de ligação dos sensores de efeito *Hall*. Estas máquinas funcionam apenas como motor, não sendo reversíveis.

$$\underline{U}'_{xd2} = \underline{U}_{xd2} \cdot r_t \quad (5.24)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{r_t} \quad (5.25)$$

A impedância de carga também pode ser referida ao primário:

$$\underline{Z}_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U'_2}{I'_2 r_t} = \frac{U'_2}{I'_2} \cdot \frac{1}{r_t^2} \Rightarrow \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 \cdot r_t^2 \quad (5.26)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot r_t^2 \quad X'_{d2} = X_{d2} \cdot r_t^2 \quad (5.27)$$

As potências, os desfasamentos e o rendimento mantêm-se. A título de exemplo demonstra-se que:

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{U'_2}{r_t} \cdot I'_2 r_t = U'_2 \cdot I'_2 = S'_2 \quad (5.28)$$

O circuito equivalente pode ser obtido agrupando todos os elementos do modelo. A figura seguinte agrega esses elementos, considerando o núcleo sem perdas (transformador ideal).

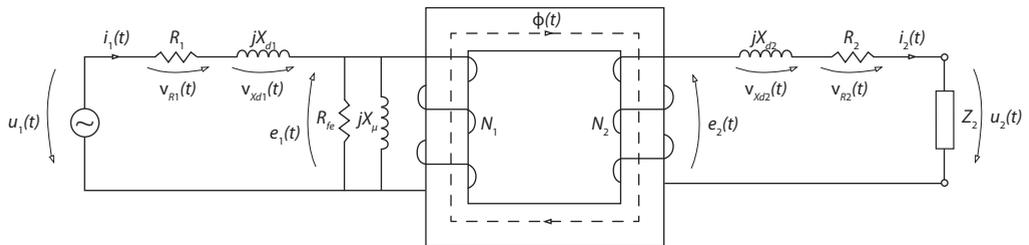


Figura 5.22. Transformador em carga com todas as resistências dos enrolamentos e reatâncias de dispersão.

A figura seguinte ilustra o transformador mas com o secundário referido ao primário. Neste caso o transformador ideal tem a relação 1:1.

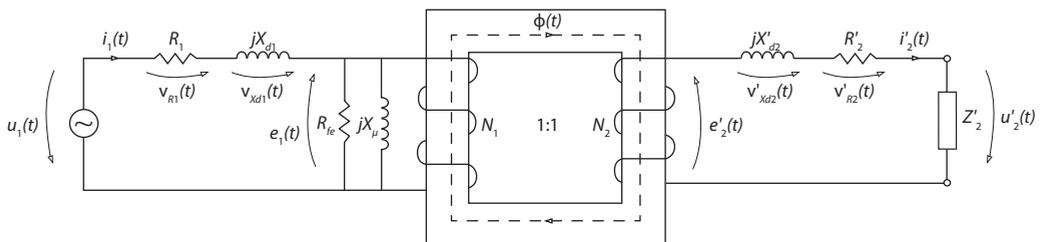


Figura 5.23. Transformador em carga com todas as resistências dos enrolamentos e reatâncias de dispersão, com o secundário referido ao primário.

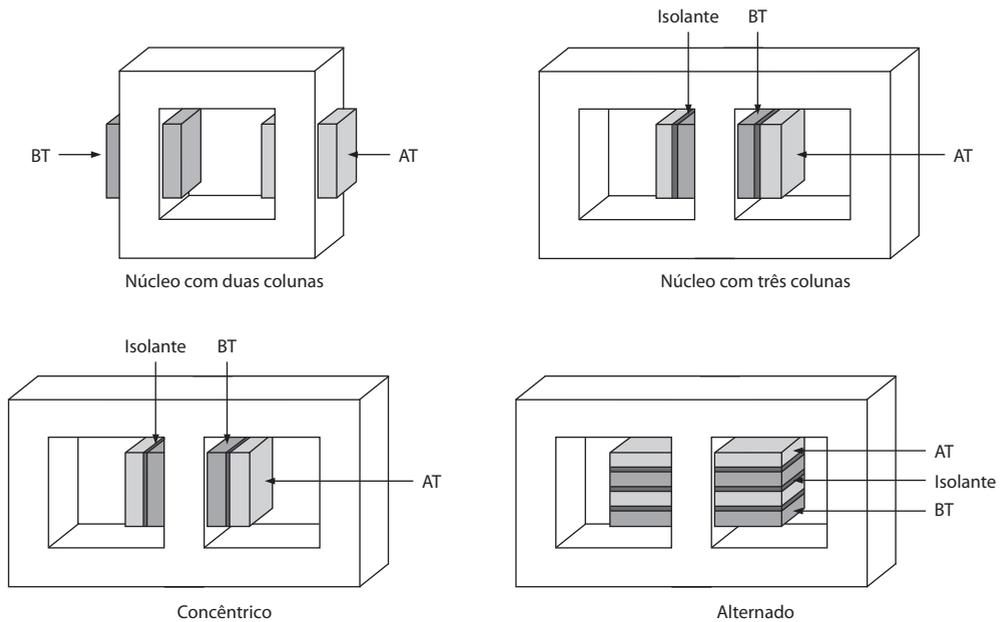


Figura 5.47. Exemplos de estrutura dos enrolamentos.

Os espaços entre enrolamentos e entre o enrolamento e o ferro são preenchidos com materiais de fixação para aumentar a resistência mecânica da máquina em situações de vibração e, sobretudo quando sujeita a esforços mecânicos em situação de curto-circuito. Utiliza-se muitas vezes madeira para realizar estes calços, recorrendo-se a outros materiais quando se necessita de suportar temperaturas elevadas. Por vezes, em máquinas de alguma dimensão, é necessário deixar furações com espaço para circular o ar para arrefecimento tal como se esquematiza na figura seguinte.

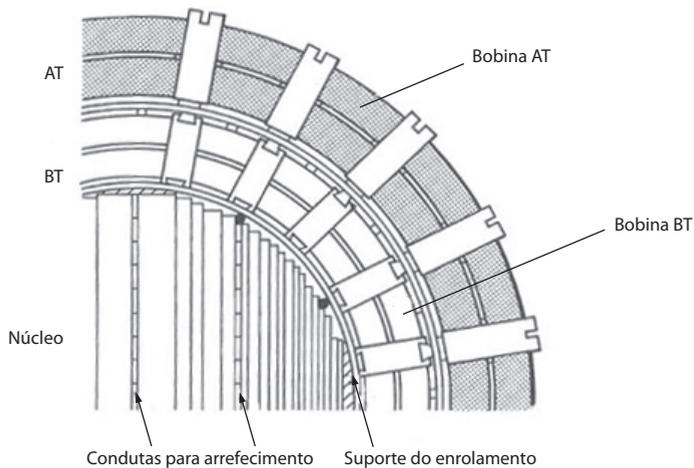


Figura 5.48. Esquema de uma secção circular de um núcleo com os respetivos enrolamentos BT e AT (fonte: adaptado de Barbosa, A., 2011).

$$\eta_{max} = \frac{C_{\eta,max} \cdot S_n \cdot 1}{C_{\eta,max} \cdot S_n \cdot 1 + 2 \cdot P_{ferro}}$$

$$\eta_{max} = \frac{0,53 \cdot 400 \cdot 1}{0,53 \cdot 400 \cdot 1 + 2 \cdot 1,05} = 99,01\%$$

$$C_{\eta,max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{1.050}{3.750}} = 0,53$$

### 5.13.6 Exercício 6

Num transformador monofásico com a potência de 5 kVA, 230 / 110 V efetuaram-se os seguintes ensaios:

Ensaio em vazio:  $P_0 = 55 \text{ W}$ ;  $\cos \varphi_0 = 0,21$ .

Ensaio de curto-circuito:  $P_{cc} = 300 \text{ W}$ ;  $u_{cc} = 8\%$ ;

Supondo que o transformador é alimentado de uma rede 230 V, determine:

- O circuito equivalente aproximado do transformador, referido ao primário, com os respetivos valores (resistências, reatâncias e tensões).
- A tensão no secundário referida ao primário, para a corrente nominal no secundário com  $\cos \varphi$  de 0,8 indutivo. Esboce o diagrama fasorial das tensões e da corrente no secundário, referidos ao primário, com os respetivos valores.

Resolução:

a)

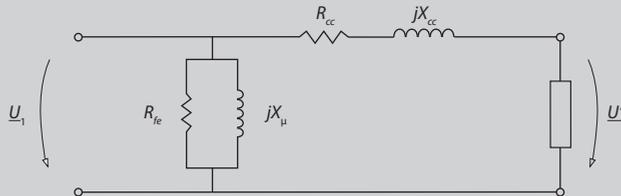


Figura 5.50. Circuito equivalente aproximado referido ao primário (sem os valores).

Do ensaio em vazio:

$$R_{fe} = \frac{U_1^2}{P_0} = \frac{230^2}{55} = 962 \Omega$$

$$X_{\mu} = \frac{U_1^2}{Q_0} = \frac{U_1^2}{P_0 \tan \varphi_0} = \frac{230^2}{55 \tan(\cos^{-1} 0,21)} = 207 \Omega$$

Do ensaio em curto-circuito:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{1n}^2} = \frac{300}{\left(\frac{5.000}{230}\right)^2} = 0,64 \Omega$$

$$Z_{cc} = \frac{S_n u_{cc}}{I_{1n}^2} = \frac{5.000 \times 0,08}{\left(\frac{5.000}{230}\right)^2} = 0,85 \Omega$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = 0,56 \Omega$$

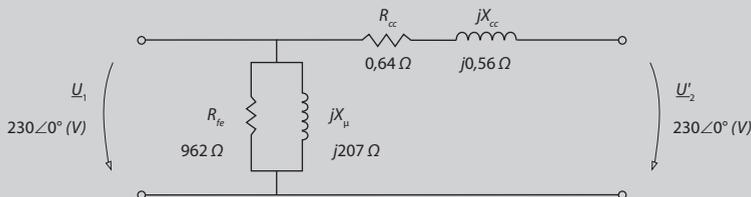


Figura 5.51. Circuito equivalente aproximado referido ao primário (com os valores).

### 6.3 Constituição

A forma mais elementar de transformar um sistema trifásico consiste em transformar cada uma das tensões de fase mediante um transformador monofásico. As imagens seguintes ilustram um exemplo de ligação de um banco trifásico de transformadores monofásicos ligados em estrela com acesso a um ponto comum.

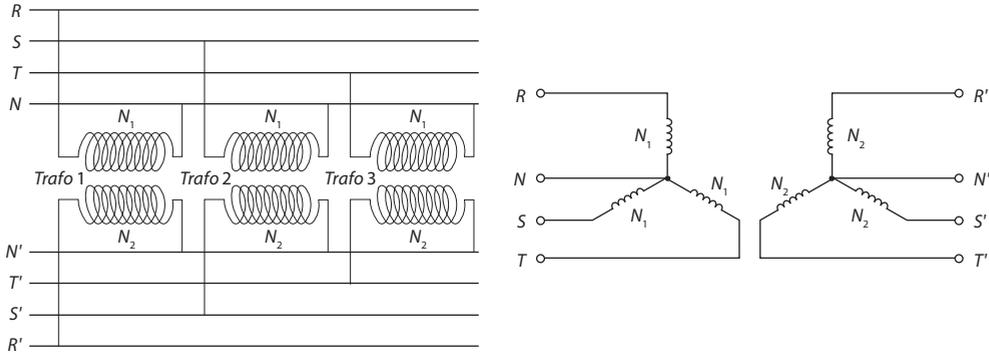


Figura 6.1. Banco trifásico de transformadores monofásicos.

Para o exemplo anterior poderemos construir o diagrama fasorial dos fluxos ( $\phi$ ) e das tensões indutoras ( $U_x$ ) e induzidas ( $E_x$ ).

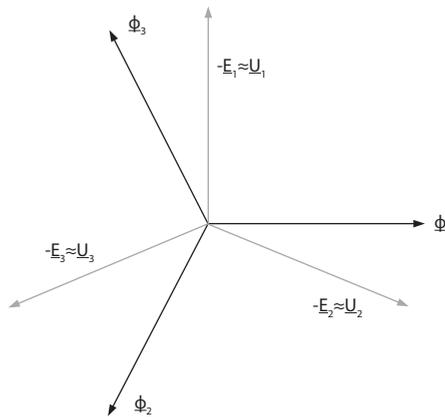


Figura 6.2. Diagrama fasorial de fluxos e tensões do exemplo estrela-estrela mencionado anteriormente.

Para o exemplo anterior poderemos calcular o somatório dos fluxos e das tensões induzidas nos enrolamentos do secundário, sendo possível constatar que num sistema equilibrado o seu somatório é zero.

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0 \tag{6.10}$$

$$E_1 + E_2 + E_3 = 0 \tag{6.11}$$

### 6.13.4 Códigos de refrigeração

Conforme a circulação do fluido refrigerante, se faz por convecção natural ou forçada (impulsionado por uma bomba), se fala em refrigeração natural (N) ou forçada (F).

As normas classificam os sistemas de refrigeração dos transformadores conforme o refrigerante primário (em contacto com as partes ativas) e o secundário (o utilizado para arrefecer o primário). Utiliza-se ar, óleo natural, óleo sintético e água.

Para o código de refrigeração são utilizados quatro dígitos:

- 1.º Dígito: Tipo de refrigerante primário ar (A), óleo mineral (O), óleo sintético (L).
- 2.º Dígito: Tipo de circulação do refrigerante primário natural (N) ou forçada (F).
- 3.º Dígito: Tipo de refrigerante secundário ar (A), água (W).
- 4.º Dígito: Tipo de circulação do refrigerante secundário natural (N) ou forçada (F).

As figuras seguintes ilustram exemplos de transformador tipo ONAN (Óleo Natural / Ar Natural):

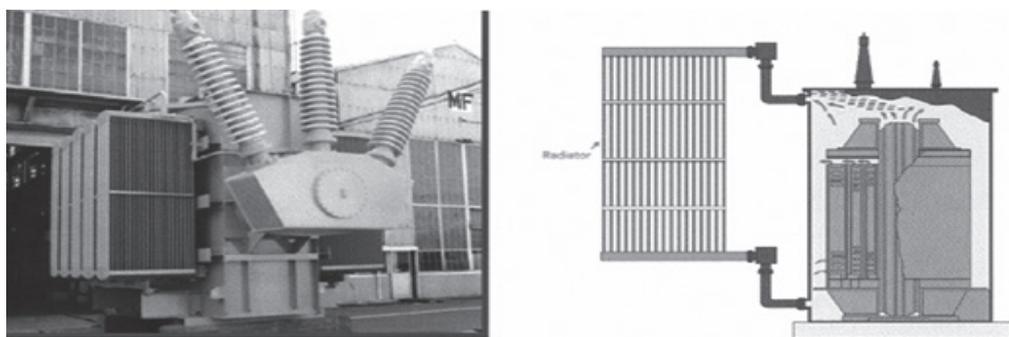


Figura 6.26. Exemplo de transformador tipo ONAN.

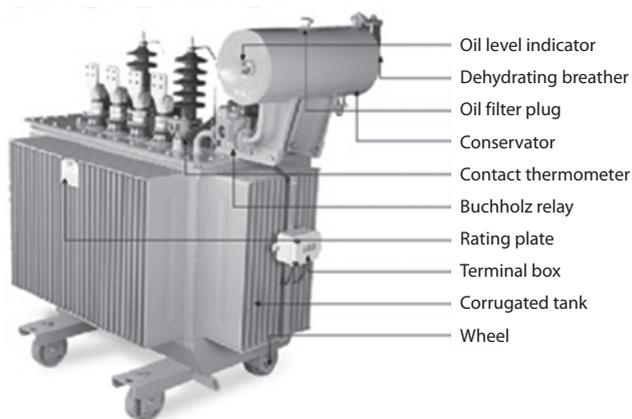


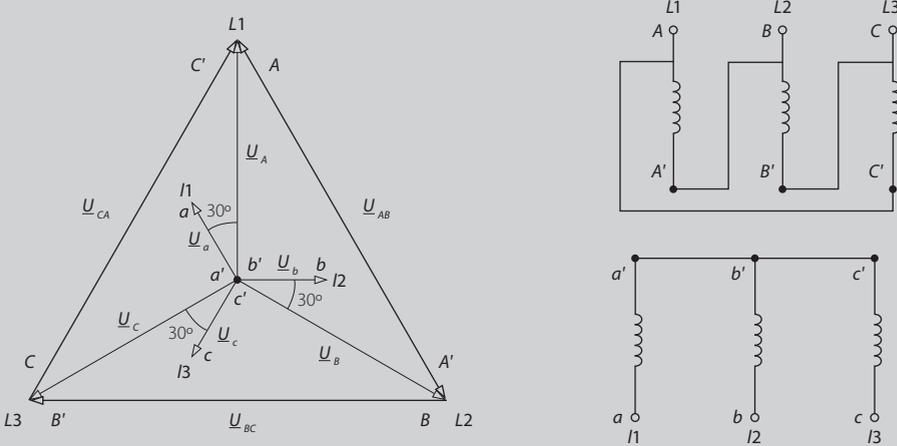
Figura 6.27. Outro exemplo de transformador tipo ONAN.

A figura seguinte ilustra exemplo de transformador tipo ONAF (Óleo Natural / Ar Forçado):

- b) Desenhe o esquema de ligações, incluindo as respetivas alimentações e as marcações dos terminais.
- c) Qual a relação do número de espiras?
- d) Calcule a corrente de curto-circuito do lado BT.

Resolução:

- a) e b)



Figuras 6.31. À esquerda: resposta alínea a) Diagrama fasorial das tensões nos enrolamentos AT e BT; à direita: resposta alínea b) Esquema de ligações.

$$c) a = \frac{N_{AT}}{N_{BT}}$$

$$r_t = \frac{U_{ATLinha}}{U_{BTLinha}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_{AT}}{N_{BT}} \Leftrightarrow \frac{10.000}{420} = \frac{1}{\sqrt{3}} a \Leftrightarrow a = 41,2$$

$$d) I_{2,cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot u_{cc}} = \frac{1.600.000}{\sqrt{3} \cdot 420 \cdot 0,04} = 55 \text{ kA}$$

### 6.14.2 Exercício 2

Suponha um transformador trifásico Yd5, 10.000/420 V 1.600 kVA com u<sub>cc</sub>=4,5%.

- a) Desenhe os diagramas fasoriais das tensões nos enrolamentos AT e BT.
- b) Desenhe o esquema de ligações, incluindo as respetivas alimentações e as marcações dos terminais.
- c) Qual a relação do número de espiras?
- d) Quais as tensões nas linhas e nas fases no primário e no secundário?
- e) Calcule a corrente de curto-circuito do lado BT.

Resolução:

- a) e b)

## 7.1 Introdução

Neste capítulo é objetivo abordar alguns dos outros transformadores, além do transformador monofásico e do transformador trifásico abordados em capítulos anteriores, nomeadamente:

- Autotransformador:
  - Monofásico;
  - Trifásico.
- Transformadores de medida:
  - Transformadores de tensão (TT);
  - Transformadores de corrente (TC ou TI);
  - Transformador de corrente somador.
- Transformadores trifásicos usando apenas dois transformadores:
  - Ligação V-V;
  - Ligação Scott;
  - Ligação *Le Blanc*.
- Transformadores de número de fases:
  - Transformação trifásico – hexafásico.

## 7.2 Autotransformador

### 7.2.1 Autotransformador monofásico

Num autotransformador independente monofásico é apenas utilizado um único enrolamento com o objetivo de variar o nível de tensão, tal como ilustrado na figura seguinte.

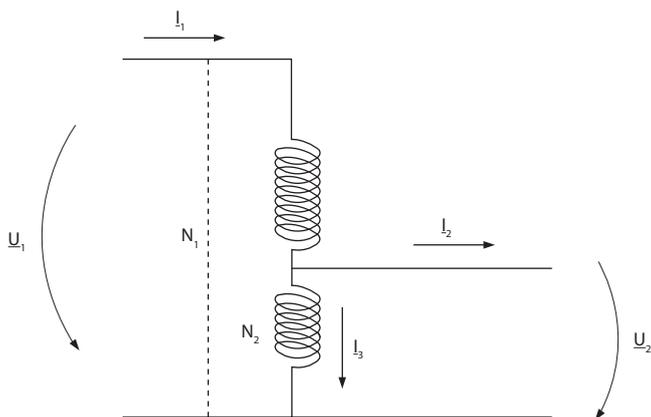


Figura 7.1. Representação esquemática de um autotransformador monofásico com as respetivas tensões e correntes.

Como não há isolamento elétrico entre o primário e o secundário, este deve ser dimensionado em função da maior tensão. No exemplo anterior, o enrolamento parcial ( $N_1$ - $N_2$ ) deverá ter um isolamento dimensionado para a tensão  $U_1$ .

Aplicando a lei das malhas:  $\underline{U}_2 = \frac{N_2}{N_1} \underline{U}_1$

(menores perdas nos enrolamentos). Os autotransformadores são vulgarmente utilizados na elevação e na redução da tensão em redes de distribuição de energia elétrica, na sintonia e adaptação entre antenas e pré-amplificadores em recetores de telecomunicações.

### 7.3 Transformadores de medida

#### 7.3.1 Introdução

Os transformadores de medida servem para lerem as grandezas de tensão e corrente com o objetivo de efetuar a sua medida para contagem e para proteção. A tensão ou a corrente é reduzida de um nível alto para um nível mais baixo adaptado aos circuitos de medida e/ou proteção. Assegura também a separação galvânica entre o primário e o secundário. A figura seguinte ilustra dois exemplos: um de medida de corrente e outro de medida de tensão:

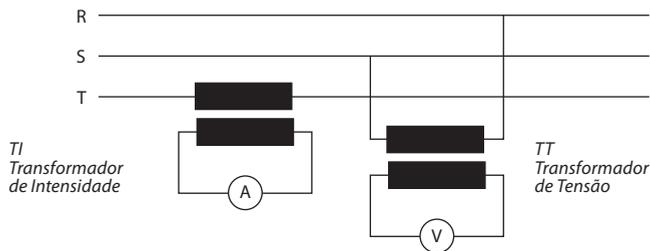


Figura 7.6. Exemplo de ligação de transformadores de medida.

A figura seguinte ilustra uma aplicação de transformadores de medida:

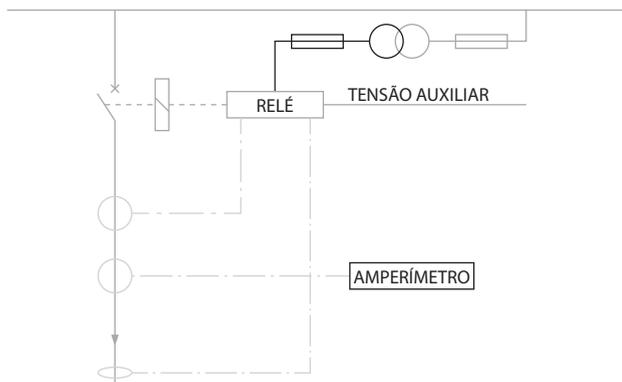


Figura 7.7. Exemplo de aplicação de transformadores de medida (fonte: Schneider Electric).

#### 7.3.2 Transformadores de Tensão (TT)

O transformador de tensão (TT) terá como primário a rede a medir, com ligação em paralelo com a rede (entre fases ou entre fase e neutro), e o secundário ligado em paralelo com voltímetros, frequencímetros e/ou bobinas voltimétricas de diferentes aparelhos de medida e/ou proteção: wattímetros, contadores de energia, fasímetros, relés, entre outros.

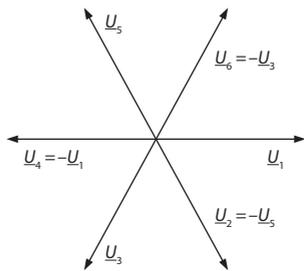


Figura 7.18. Diagrama fasorial do transformador hexafásico mencionado.

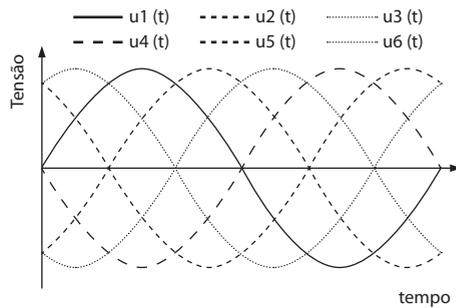


Figura 7.19. Diagrama temporal do transformador hexafásico mencionado.

Além das ligações Y-yy (estrela – dupla estrela) existem outros tipos de ligações, nomeadamente Y-dd (estrela – duplo triângulo), D-dd (triângulo – duplo triângulo), entre outras. A figura seguinte ilustra um exemplo de ligação em duplo triângulo de um secundário de um transformador hexafásico:

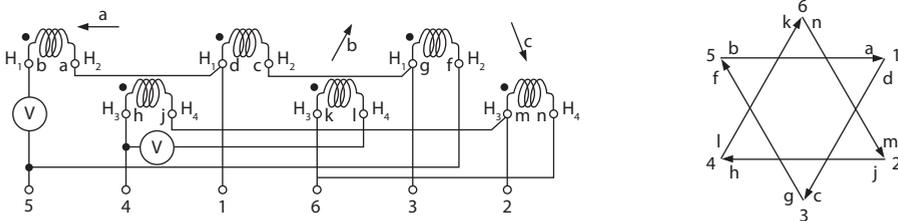
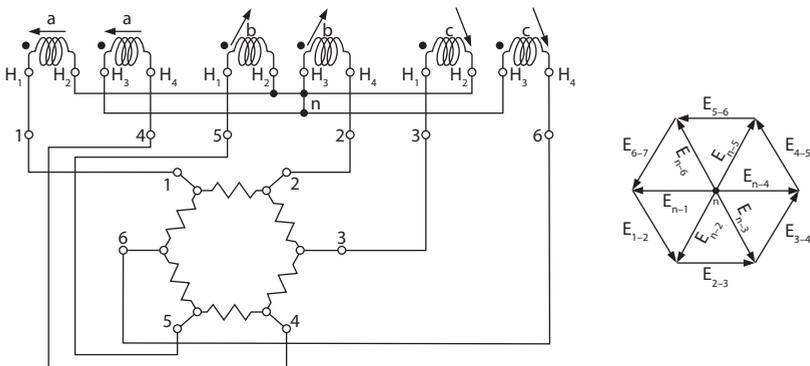


Figura 7.20. Ligações do secundário de um transformador hexafásico em duplo triângulo e respectivo diagrama fasorial (fonte Kosov, I.).

A figura seguinte ilustra um exemplo de ligação dos secundários de um transformador hexafásico (ligação em dupla estrela) a uma carga hexafásica:



Figuras 7.21. Ligação do secundário de um transformador hexafásico (ligado em dupla estrela) a uma carga (ligada em hexágono) e respectivo diagrama fasorial (fonte: Kosov, I.).

A potência total corrigida para a corrente real será de:  $S_{real} = S_n \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1n}}\right)^2 = 12,5 \times \left(\frac{380}{400}\right)^2 = 11,3 \text{ VA}$

Para este caso, o TI deverá ter uma potência de precisão nominal de 15 VA.

### 7.6.3 Exercício 3

Identifique as características do seguinte transformador de medida: 500 / 1 / 1 A 15 VA cl. 0,5 + 15 VA 10P5

Resolução:

- Transformador de corrente;
- Corrente estipulada do primário: 500 A;
- Primeiro secundário (medida):
  - Corrente estipulada do secundário de 1 A;
  - Potência de precisão de 15 VA;
  - Classe de precisão de 0,5, ou seja 0,5% a 15 VA;
- Segundo secundário (proteção):
  - Corrente estipulada do secundário de 1 A;
  - Potência de precisão de 15 VA;
  - Classe de precisão 10P, ou seja 10% a 15 VA;
  - Fator limite de precisão 5, ou seja até  $5 \times 500 = 2.500 \text{ A}$ .

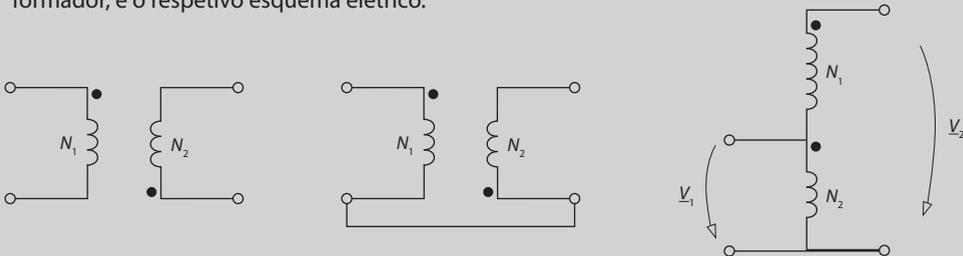
### 7.6.4 Exercício 4

Suponha que tem um transformador monofásico de 2 kVA 230 / 48 V, 50 Hz, e pretende ligar este transformador como autotransformador elevador (máxima tensão teórica possível), sabendo que a tensão da rede é de 230 V, 50 Hz.

- a) Desenhe o esquema elétrico da ligação.
- b) Qual a tensão no secundário do autotransformador (considerando que os isolamentos o permitiriam)?
- c) Qual a máxima potência aparente do autotransformador?
- d) Qual a vantagem de potência de um autotransformador em relação ao transformador?
- e) E se pretendesse a mínima tensão teórica possível, qual seria a máxima potência do autotransformador?

Resolução:

- a) As figuras seguintes ilustram como de um transformador monofásico se converte num autotransformador, e o respetivo esquema elétrico.



Figuras 7.24. Esquemas elétricos e demonstração de como se passa de um transformador para um autotransformador.

## 8.1 Introdução

A máquina de indução é a máquina elétrica mais robusta e mais utilizada em praticamente todo o mundo, daí a enorme importância do seu estudo. Tem um estator e um rotor montado em apoios, em geral de rolamentos, separados pelo entreferro. Distingue-se de qualquer outro tipo de máquina porque no estator e no rotor existem enrolamentos onde circula corrente alternada. Nos enrolamentos do estator, a corrente provém da tensão de alimentação a que estão ligados. No rotor, a corrente é originada pelas tensões induzidas no rotor, daí designar-se por motor de indução.

A máquina de indução pode trabalhar como motor, gerador ou freio, contudo, a utilização como gerador ou freio está condicionada a vários aspetos que veremos posteriormente.

Existem máquinas com uma grande variedade de dimensões, com potências de dezenas de watt a milhares de quilowatt. Os pequenos motores, com potências inferiores a 1 kW, designam-se muitas vezes por motores fracionários. São, em geral, monofásicos e utilizados em aplicações domésticas tais como máquinas de lavar louça e roupa, bombas de utilização doméstica, frigoríficos, etc. As grandes máquinas são utilizadas na indústria, para acionarem, por exemplo, bombas e ventiladores muito diversos.

Este capítulo inicia-se por descrever com muita brevidade os aspetos construtivos deste tipo de máquinas, seguindo-se por estudar com detalhe as características e o seu desempenho. Ensaio muito habituais e utilizações especiais terminam o capítulo.

Apresentam-se algumas fotografias de máquinas de indução na figura seguinte:

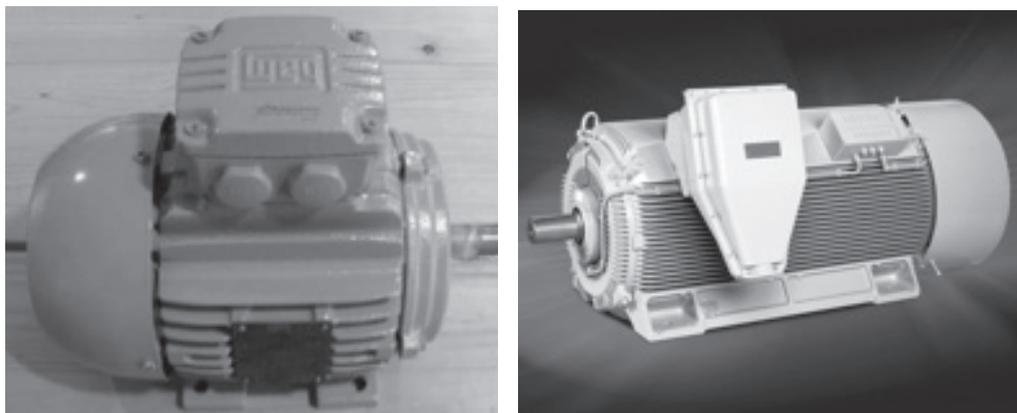


Figura 8.1. Máquina de indução trifásica (fotografias cortesia Weg).

## 8.2 Aspetos construtivos

As máquinas de indução têm o entreferro uniforme, ao contrário das máquinas de corrente contínua e de algumas de corrente alternada síncronas.

O estator destas máquinas é composto por uma pilha de chapas de aço, com ranhuras onde se inserem os enrolamentos. O rotor também é formado por chapas empilhadas com condutores inseridos em ranhuras (ver figura seguinte). O rotor pode ser de dois tipos: rotor em gaiola de esquilo ou rotor bobinado.

Estes dispositivos, os arrancadores suave, em geral, permitem controlar a paragem das cargas. As figuras seguintes ilustram as curvas características de binário – velocidade (à esquerda) e corrente - velocidade (à direita).

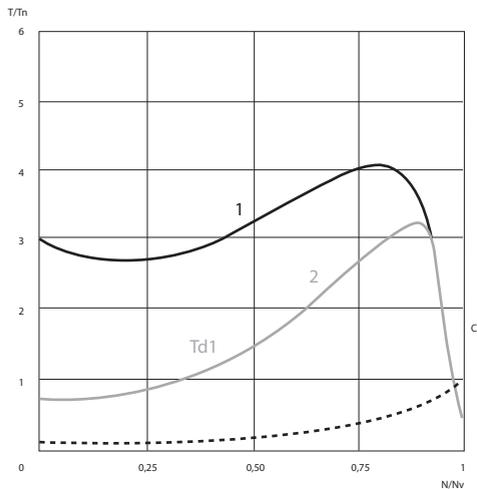


Figura 8.64. Curva binário – velocidade por arranque eletrónico (fonte: Schneider Electric 1999).

1. Binário com arranque direto;
2. Binário de arranque com a corrente limitada através do arrancador suave.

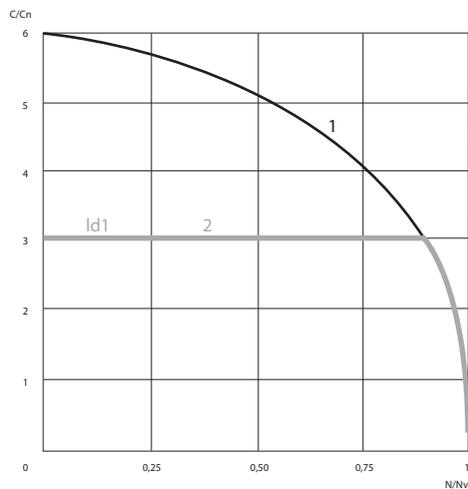


Figura 8.65. Curva corrente – velocidade por arranque eletrónico (fonte: Schneider Electric 2004).

1. Corrente com arranque direto;
2. Corrente de arranque limitada a 3. In.

Foi mencionado anteriormente o arranque mediante variação da amplitude da tensão. O arranque mediante a variação da frequência da tensão é também possível. Nos capítulos seguintes é abordada a variação de frequência com algum detalhe.

### 8.13.9 Resumo de tipos de arranque

A tabela seguinte visa resumir e comparar algumas das características dos métodos de arranque mencionados.

Tabela 8.7. Resumo de algumas características dos vários tipos de métodos de arranque (fonte: adaptado de Schneider Electric 1999).

Método de arranque	Corrente de arranque	Sobre elevação de corrente	Binário	Comando
Direto	100%	4 a 8 In	100%	Tudo ou nada
Estrela – triângulo	33%	1,3 a 2,6 In	33%	Tudo ou nada
Resistências no estator	70%	4,5 In	50%	Uma ou mais do que uma posição fixa
Resistências no rotor	70%	2,5 In	-	Várias posições
Enrolamentos divididos	50%	2 a 4 In	50%	Tudo ou nada
Autotransformador	40 / 65 / 80%	1,7 a 4 In	40 / 65 / 80%	Três posições fixas
Arrancador suave (eletrónico)	25 a 75%	-	10 a 70%	Progressivo

No andar de entrada, a alimentação trifásica é convertida em tensão contínua, seguindo-se um andar de filtragem. No andar de saída, o inversor converte a tensão contínua numa tensão trifásica de frequência e amplitude ajustáveis.

A velocidade do motor é proporcional à frequência de saída, de modo que o ajuste de frequência permite controlar a velocidade do motor. Quando se pretende que o binário máximo permaneça constante quando a velocidade varia, a amplitude da tensão produzida varia linearmente com a frequência,  $U = k \cdot f$  (entre os 5 e os 50 Hz). A baixa velocidade (menor que 5 Hz), a amplitude da tensão sobe para compensar a queda de tensão resistiva do motor. Acima dos 50 Hz, a amplitude da tensão cessa de aumentar e o binário diminui com a velocidade. Estas características não servem só para regular continuamente a velocidade, mas também para efetuar arranques suaves. Os arranques suaves, além de diminuírem substancialmente a corrente de arranque, reduzem também o desgaste no equipamento mecânico acionado.

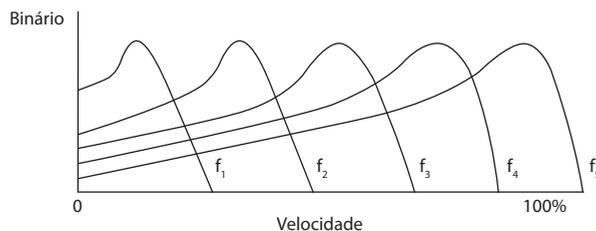


Figura 8.72. Curvas características binário/velocidade a diferentes frequências (Fonte: SÁ, A.).

Um aspeto importante que distingue os inversores da rede trifásica consiste na ausência de caminho de retorno para a energia reativa, que habitualmente oscila entre a fonte e a carga num sistema sinusoidal. Assim, o próprio inversor tem que funcionar como fonte reativa para o motor. O esquema utilizado consiste em proporcionar um caminho para a circulação de corrente entre duas fases do motor, para que estas possam permutar a energia armazenada entre si em vez de cada uma delas o fazer com a rede.

As figuras seguintes ilustram diferentes tipos de características binário – velocidade para várias frequências.

- A figura da esquerda, para velocidades abaixo da velocidade síncrona do motor: a amplitude da tensão varia linearmente com a frequência:  $U(f)$ .
- A figura da direita, para velocidades acima da velocidade síncrona do motor: a amplitude da tensão é constante:  $U = U_n$ .

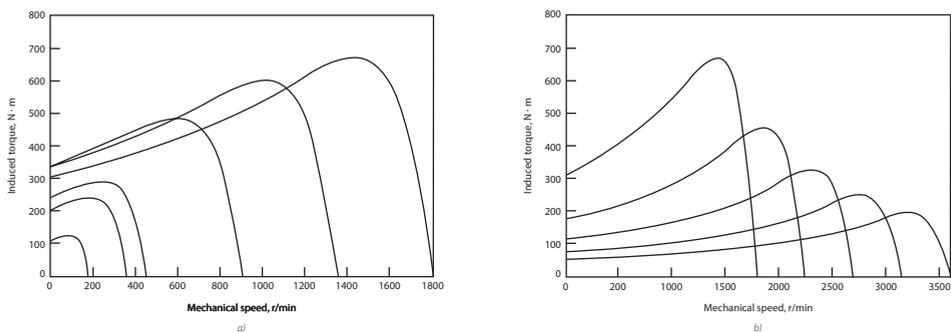


Figura 8.73. Curvas característica binário – velocidade a diferentes frequências (Fonte: Infolytica 2015).

### 8.18.10 Exercício 10

Um motor de indução de 100 kW, 60 Hz, 1.175 rpm, aciona um volante através de uma caixa de velocidades. A energia cinética de todas as partes móveis é de 300 kJ quando o motor roda à velocidade nominal. O motor é frenado por inversão de fases de forma a parar e inverter o sentido de rotação até rodar à velocidade de 1.175 rpm em sentido oposto. Calcule a energia dissipada pelo rotor se o volante for a única carga a considerar.

Resolução:

Inversão de fases equivale a inversão do campo girante logo corresponde a uma frenagem por contracorrente.

$$E_{frenagem} = E_{paragem} + E_{arranque} = 3 \cdot E_{cinética} + E_{cinética} = 4 \cdot E_{cinética} = 4 \times 300 = 1.200 \text{ kJ}$$

### 8.18.11 Exercício 11

Suponha um motor de potência 18,5 kW com as características mencionadas na tabela seguinte, referente a máquinas trifásicas de indução de rotor de gaiola.

Tabela 8.10. Algumas características elétricas de motores de indução trifásicos de dois polos (fonte: WEG).

Potência nominal	Tamanho	Binário nominal (Nm)	Corrente de arranque	Binário de arranque Tl/Tn	Binário máximo Tb/Tn	Inércia J (kgm <sup>2</sup> )	Tempo de rotor bloqueado (s)		Peso (kg)	Som dB(A)	400 V											
							Quente	Frio			Fator de carga (%)						Corrente nominal (A)					
											Rendimento			Fator de potência								
kW	HP																					
2 polos - 3.000 rpm - 50 Hz																						
0,12	0,16	63	0,420	3,8	2,3	2,3	0,00011	27	59	4,3	52,0	2720	45,5	53,5	56,0	0,55	0,68	0,80	0,387			
0,18	0,25	63	0,630	4,2	2,4	2,3	0,00013	30	66	4,7	52,0	2730	50,5	56,5	59,0	0,55	0,69	0,80	0,550			
0,25	0,33	63	0,880	4,3	2,5	2,3	0,00016	25	55	5,1	52,0	2720	52,0	57,0	60,0	0,50	0,65	0,76	0,791			
0,37	0,5	71	1,29	4,6	2,3	2,4	0,00027	16	35	5,5	56,0	2730	62,0	66,5	67,0	0,60	0,75	0,84	0,949			
0,55	0,75	71	1,94	4,5	2,2	2,2	0,00033	13	29	6,5	56,0	2710	65,0	67,0	68,0	0,68	0,81	0,89	1,31			
0,75	1	80	2,60	5,1	2,5	2,6	0,00055	14	31	9,5	59,0	2760	68,5	72,0	72,1	0,62	0,76	0,84	1,79			
1,1	1,5	80	3,9	5,9	2,9	2,9	0,00076	14	31	13,5	59,0	2772	74,0	76,0	76,0	0,65	0,78	0,85	2,46			
1,5	2	90S	5,05	6,3	2,7	2,6	0,0017	7	15	15,0	68,0	2840	77,0	79,5	79,5	0,63	0,76	0,83	3,28			
2,2	3	90L	7,48	6,8	2,8	2,9	0,0022	9	20	16,7	68,0	2810	78,0	80,0	81,5	0,63	0,77	0,85	4,58			
3	4	100L	10,0	6,7	2,3	2,8	0,0052	9	20	23,5	67,0	2870	81,3	83,0	83,5	0,69	0,81	0,87	5,96			
4	5,5	112M	13,3	6,8	2,4	3,0	0,073	9	20	31,0	64,0	2875	82,0	84,0	85,0	0,71	0,82	0,87	7,81			
5,5	7,5	132S	18,1	6,5	2,4	3,0	0,0159	11	24	42,0	68,0	2910	83,5	86,0	86,5	0,71	0,81	0,87	10,5			
7,5	10	132S	24,7	6,4	2,3	2,6	0,0187	11	24	53,0	68,0	2900	86,0	87,5	87,5	0,72	0,82	0,87	14,2			
9,2	12,5	132M	30,2	7,5	2,7	3,1	0,0243	8	18	58,0	68,0	2910	86,5	88,5	88,5	0,70	0,81	0,86	17,4			
11	15	160M	35,9	6,8	2,0	2,7	0,0353	11	24	98,0	67,0	2930	87,8	88,6	88,4	0,70	0,81	0,86	20,9			
15	20	160M	48,9	7,2	2,2	2,8	0,0471	9	20	108	67,0	2930	89,5	89,8	89,5	0,71	0,81	0,86	28,1			
18,5	25	160L	60,1	7,8	2,4	3,1	0,0559	7	15	122	67,0	2940	90,3	90,7	90,3	0,70	0,80	0,86	34,4			
22	30	180M	71,6	7,3	2,0	2,8	0,0965	7	15	156	67,0	2935	90,7	91,0	90,8	0,76	0,84	0,88	39,7			
30	40	200M	96,8	6,3	2,1	2,4	0,1794	18	40	220	72,0	2960	91,6	92,0	91,6	0,76	0,84	0,87	54,3			

- Esboce a curva característica completa binário – velocidade, identificando todas as zonas de funcionamento da máquina e identificado os respetivos valores (velocidades e binários).
- Considere o motor a alimentar uma carga de binário quadrático ( $T = k \cdot n^2$ ) no regime nominal. Se a

## 9.1 Introdução

Existem vários tipos de máquinas síncronas. As máquinas síncronas mais conhecidas são:

- Convencionais;
- Relutância variável;
- Passo-a-passo.

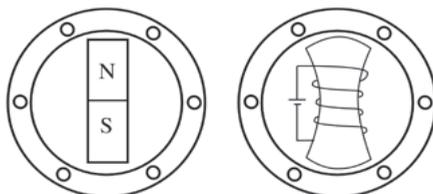
## 9.2 Máquina síncrona convencional

### 9.2.1 Introdução

As máquinas síncronas são bastante utilizadas como geradores de energia elétrica. Tratam-se dos maiores conversores de energia mecânica em energia elétrica existentes e o tipo de máquinas em maior número utilizadas com este fim, com uma grande gama de valores de potência. A máquina síncrona a funcionar como gerador é designada por alternador.

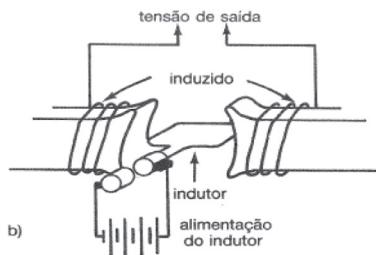
### 9.2.2 Configuração geral de um alternador

Em geral, o alternador têm um estator idêntico ao da máquina de indução. No entanto, o rotor é bastante diferente. No estator são induzidas tensões devido à existência de um campo magnético que se move com o movimento do rotor. As imagens seguintes ilustram simbolicamente o estator (circunferências) e o rotor, representado por um ímã permanente (esquerda) ou um eletroímã (direita):



Figuras 9.1. Representação simbólica de um alternador.

A frequência do rotor e a do estator são as mesmas. Ou seja, as tensões induzidas no estator tem a mesma frequência do movimento do rotor (considerando a existência de um par de polos, i.e.,  $p = 1$ ). A imagem seguinte ilustra a configuração geral de um alternador mais utilizada (indutor móvel e induzido fixo):



Figuras 9.2. Constituição e princípio de funcionamento de um alternador monofásico com indutor móvel e induzido fixo (fonte: Matias, J.).

## 9.4 Motor passo-a-passo

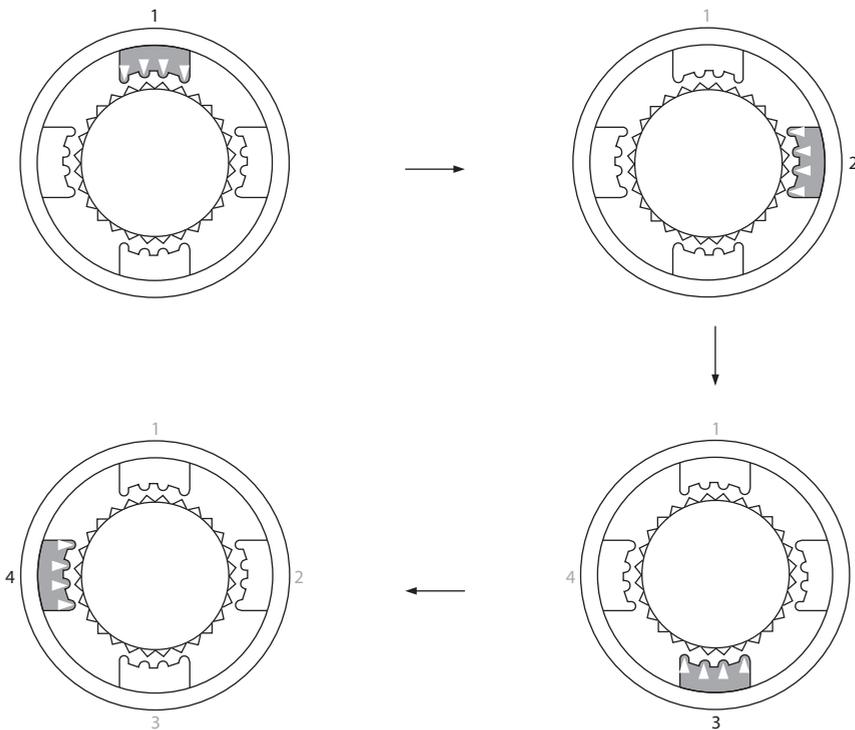
A máquina síncrona passo-a-passo tem um funcionamento baseado na relação entre alimentação sequencial de bobinas e o arranjo geométrico das saliências do rotor. As imagens seguintes ilustram a sequência de alimentação de um motor síncrono passo-a-passo.

Um motor de passo é um tipo de motor elétrico usado quando algo tem que ser posicionado muito precisamente ou rodado em um ângulo exato.

Neste tipo de motor a rotação do balancete é controlado por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente.

Os motores de passo são classificados em relação ao seu tipo construtivo, e podem ser de três tipos:

- Relutância variável;
- Ímã permanente;
- Híbridos.



Figuras 9.37. Sequência de operação de um motor síncrono passo-a-passo.

## 9.5 Motor de síncrono de ímã permanente ou motor de relutância síncrono

Como alternativa ao motor de indução, podemos utilizar o motor síncrono de ímã permanente, que se encontra em expansão. O ímã de Neodímio – Ferro – Boro (NdFeB) possui remanescência e força coerciva elevadas, quando comparado ao ímã de ferrite, resultando em menor consumo de energia.

A figura seguinte ilustra um exemplo de comparação entre um motor de indução e um motor de ímã permanente para a mesma potência.

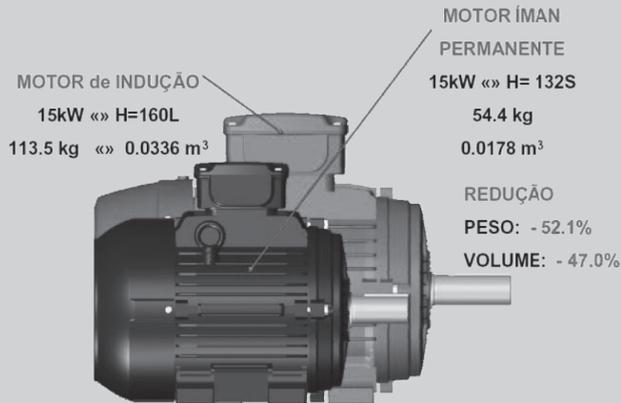


Figura 9.38. Exemplo de comparação entre um motor de indução e um motor de íman permanente para a mesma potência (Fonte: WEG).

O íman permanente está no rotor, enquanto o estator é bobinado. Como desvantagem apresenta a necessidade de variador / controlador específico do fabricante do motor.

As vantagens ao motor síncrono de íman permanente em relação ao motor de indução são:

- Maior eficiência (sem perdas de Joule no rotor);
- Volume mais reduzido (uma a duas carcaças a baixo);
- Peso mais reduzido;
- Baixo ruído e vibração;
- Baixo aquecimento dos rolamentos (reduz intervalos de manutenção e aumenta tempo de vida);
- Ampla faixa de rotação a binário constante.

## 9.6 Exercícios resolvidos

### 9.6.1 Exercício 1

Um alternador trifásico ligado em estrela (neutro distribuído) com potência de 2 MVA, 15 kV, 50 Hz, foi ensaiado, obtendo-se as características em vazio e em curto-circuito ilustradas no gráfico seguinte:

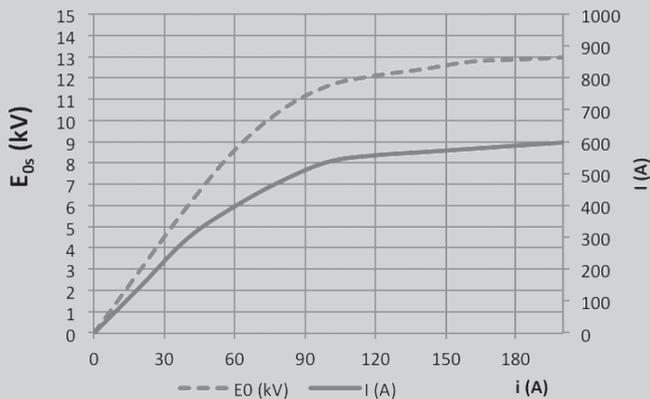


Figura 9.39. Curvas em vazio e em curto-circuito do alternador

André F. R. Sá e António E. P. C. Barbosa

# Máquinas Elétricas e Alguns Engenhos

2.<sup>a</sup> Edição

## SOBRE O LIVRO

Atualmente, as máquinas elétricas desempenham um papel muito importante não só na indústria como no dia a dia da generalidade da população. São muito utilizadas como geradores, para produzir energia elétrica, convertendo energia mecânica em energia elétrica, e para produzir energia mecânica, como motores, convertendo a energia elétrica em energia mecânica, e ainda, como transformadores, transformando o nível de tensão, importante não só na utilização de energia elétrica como na sua distribuição e transporte. Praticamente, em todo o mundo, as máquinas elétricas são ensinadas, e muito justificadamente, em muitas escolas e universidades pelo menos um semestre, e em muitos casos mais do que um semestre. Este livro destina-se a permitir ser utilizado no apoio destes cursos estando previsto que possa ser utilizado parcialmente ou na sua totalidade.

O livro realiza uma abordagem teórica e prática, numa perspetiva multidisciplinar, com o fim de facilitar a compreensão das máquinas elétricas, disciplina aliciante.

## SOBRE OS AUTORES

### André Fernando Ribeiro de Sá

Engenheiro Eletrotécnico e de Computadores, ramo de sistemas de energia, pela FEUP – Licenciatura (2000) e Mestrado (2003). Pós-graduado em gestão de energia – eficiência energética, pelo ISQ (2008). Título de Especialista em Engenharia Eletrotécnica pela Universidade de Aveiro (2012). Nascido em Espinho em 1977, é especialista em gestão de energia e em exploração de instalações elétricas. Técnico reconhecido SGCIE. Membro sénior da Ordem dos Engenheiros (Colégio de Engenharia Eletrotécnica). Docente da ESTGA - Universidade de Aveiro no curso de Engenharia Eletrotécnica, tendo já lecionando várias unidades curriculares como Elementos de Eletromagnetismo, Circuitos Elétricos, Máquinas Elétricas, Conceção de Instalações Elétricas, Dimensionamento de Instalações Elétricas, Projeto de Instalações Elétricas, Instalações Elétricas Especiais, entre outras. Formador do CET de Instalações Elétricas e Automação Industrial e do CET de Energias Renováveis da ESTGA-UA em várias disciplinas: Eletrotecnia, Aparelhagem e Medidas Elétricas. Exerceu cargo de Diretor de curso do CET de Energias Renováveis. Docente da Universidade Lusófona do Porto no curso de Engenharia Eletrotécnica de Sistemas de Energia, tendo já lecionado várias unidades curriculares como Projeto de Instalações Elétricas, Instalações Elétricas e orientação de projetos/estágios. Técnico responsável de várias instalações elétricas de serviço particular em alta, média e baixa tensão. Além do presente livro é autor de vários artigos em diversas revistas na vertente energia e electricidade e autor do livro "Guia de aplicações de gestão de energia e eficiência energética" (3.<sup>a</sup> edição). Tem realizado várias formações de carácter industrial: atuadores elétricos, cogeração, eficiência energética, máquinas elétricas, entre outros. Tem colaborado ou já colaborou, entre outros, com o Grupo Têxtil Riopelle, INESC Porto, Edifícios Saudáveis Consultores, Schneider Electric Portugal, DAPE, GPS, Smartwatt, Pavicentro, Lidergraf, J.O. Agrícola e Aquatlantis.

### António Eduardo Pereira Coutinho Barbosa

Licenciado em 1977 em Engenharia Eletrotécnica, opção Automação e Controlo pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Iniciou a sua atividade profissional onde, durante mais de 30 anos, realizou projetos, fiscalização e ensaios de instalações elétricas de grande dimensão e, muito especialmente, de instalações de produção de energia de pequena e média potência, nomeadamente de instalações de cogeração. Projetou diversas máquinas elétricas, nomeadamente de motores de indução e transformadores.

Simultaneamente, lecionou na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto disciplinas de Eletrotecnia e de Máquinas Elétricas, como assistente estagiário, e, após provas de Aptidão Pedagógica e de Capacidade Científica, como assistente e assistente convidado. Atualmente, leciona no curso de licenciatura em engenharia eletrotécnica como Professor Adjunto convidado na ESTGA - Universidade de Aveiro. É membro sénior da Ordem dos Engenheiros (Colégio de Engenharia Eletrotécnica).

Também disponível em formato e-book



[www.engebook.com](http://www.engebook.com)

**ENGEBOOK**  
ELETRTECNIA