

# **MÁQUINAS ELÉTRICAS E TRANSFORMADORES I**

Prof.<sup>a</sup> Andrea Acunha Martin

**Indaial - 2022**

2<sup>a</sup> Edição

*Elaboração:*  
*Prof.<sup>a</sup> Andrea Acunha Martin*

*Copyright © UNIASSELVI 2022*

*Revisão, Diagramação e Produção:*  
*Equipe Desenvolvimento de Conteúdos EdTech*  
*Centro Universitário Leonardo da Vinci – UNIASSELVI*

*Ficha catalográfica elaborada pela equipe Conteúdos EdTech UNIASSELVI*

M379m

Martin, Andrea Acunha

Máquinas elétricas e transformadores I. / Andrea Acunha Martin  
– Indaial: UNIASSELVI, 2022.

162 p.; il.

ISBN 978-85-515-0477-2

1. Tipos de máquinas. – Brasil. II. Centro Universitário Leonardo  
da Vinci.

CDD 620

# APRESENTAÇÃO

Olá, acadêmico!

Seja bem-vindo ao Livro Didático Máquinas Elétricas e Transformadores II!

O mercado de trabalho, com relação aos assuntos da disciplina Máquinas Elétricas e Transformadores I, é bastante amplo, pois, nas indústrias, por exemplo, há vários tipos de máquinas de tamanhos diferentes e funções variadas. Essas máquinas têm em comum os motores cujas características principais são eficiência, bom custo-benefício, acionamento simples e baixa manutenção. Um engenheiro que trabalhe dentro de uma indústria está rodeado de motores, transformadores, e outras inúmeras máquinas. Esse profissional, se quiser crescer em sua carreira, precisa sem dúvida aprender mais sobre essa área.

Na Unidade 1, veremos sobre os aspectos construtivos do transformador, começando com as características gerais, seguindo com o princípio de funcionamento e finalizando com uma análise do transformador real.

Em seguida, na Unidade 2, estudaremos as perdas, os ensaios e o autotransformador. Dessa forma, começaremos aprendendo sobre o rendimento e a regulação, seguindo entendendo como se realizam os ensaios e as conexões, finalizando com o autotransformador.

Por fim, na Unidade 3, aprenderemos sobre os motores de indução, o princípio de funcionamento, quais são os métodos de partida e, por fim, veremos quanto ao motor de indução monofásico.

Esperamos que este estudo traga muitas informações e seja muito útil para que no futuro você possa desempenhar com muita maestria seu papel como profissional.

Bons estudos!

Prof.<sup>a</sup> Andrea Acunha Martin

# GIO



## Você lembra dos UNIs?

Os UNIs eram blocos com informações adicionais – muitas vezes essenciais para o seu entendimento acadêmico como um todo. Agora,  **você conhecerá a GIO**, que ajudará você a entender melhor o que são essas informações adicionais e por que poderá se beneficiar ao fazer a leitura dessas informações durante o estudo do livro. Ela trará informações adicionais e outras fontes de conhecimento que complementam o assunto estudado em questão.

Na Educação a Distância, o livro impresso, entregue a todos os acadêmicos desde 2005, é o material-base da disciplina. A partir de 2021, além de nossos livros estarem com um novo visual – com um formato mais prático, que cabe na bolsa e facilita a leitura –, prepare-se para uma jornada também digital, em que você pode acompanhar os recursos adicionais disponibilizados através dos QR Codes ao longo deste livro. O conteúdo continua na íntegra, mas a estrutura interna foi aperfeiçoada com uma nova diagramação no texto, aproveitando ao máximo o espaço da página – o que também contribui para diminuir a extração de árvores para produção de folhas de papel, por exemplo. Assim, a UNIASSELVI, preocupando-se com o impacto de ações sobre o meio ambiente, apresenta também este livro no formato digital. Portanto, acadêmico, agora você tem a possibilidade de estudar com versatilidade nas telas do celular, tablet ou computador.

Junto à chegada da **GIO**, preparamos também um novo layout. Diante disso, você verá frequentemente o novo visual adquirido. Todos esses ajustes foram pensados a partir de relatos que recebemos nas pesquisas institucionais sobre os materiais impressos, para que você, nossa maior prioridade, possa continuar os seus estudos com um material atualizado e de qualidade.



## QR CODE

Olá, acadêmico! Para melhorar a qualidade dos materiais ofertados a você – e dinamizar, ainda mais, os seus estudos –, a UNIASSELVI disponibiliza materiais que possuem o código QR Code, um código que permite que você acesse um conteúdo interativo relacionado ao tema que está estudando. Para utilizar essa ferramenta, acesse as lojas de aplicativos e baixe um leitor de QR Code. Depois, é só aproveitar essa facilidade para aprimorar os seus estudos.



# ENADE

Acadêmico, você sabe o que é o ENADE? O Enade é um dos meios avaliativos dos cursos superiores no sistema federal de educação superior. Todos os estudantes estão habilitados a participar do ENADE (ingressantes e concluintes das áreas e cursos a serem avaliados). Diante disso, preparamos um conteúdo simples e objetivo para complementar a sua compreensão acerca do ENADE. Confira, acessando o QR Code a seguir. Boa leitura!



# LEMBRETE



Olá, acadêmico! Iniciamos agora mais uma disciplina e com ela um novo conhecimento.

Com o objetivo de enriquecer seu conhecimento, construímos, além do livro que está em suas mãos, uma rica trilha de aprendizagem, por meio dela você terá contato com o vídeo da disciplina, o objeto de aprendizagem, materiais complementares, entre outros, todos pensados e construídos na intenção de auxiliar seu crescimento.

Acesse o QR Code, que levará ao AVA, e veja as novidades que preparamos para seu estudo.

Conte conosco, estaremos juntos nesta caminhada!





# SUMÁRIO

<b>UNIDADE 1 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>TÓPICO 1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRANSFORMADORES</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>2 APLICAÇÕES PRINCIPAIS</b> .....	<b>4</b>
<b>3 CLASSIFICAÇÃO</b> .....	<b>5</b>
3.1 QUANTO AO MATERIAL DO NÚCLEO.....	5
3.1.1 Núcleo de ar.....	6
3.1.2 Núcleo de material ferromagnético.....	7
3.2 QUANTO AO NÚMERO DE FASES.....	8
3.2.1 Transformador monofásico.....	8
3.2.2 Transformadores polifásicos.....	8
3.2.3 Transformadores trifásicos .....	9
3.3 QUANTO À FORMA DO NÚCLEO.....	14
3.3.1 Tipo envolvido ( <i>core-type</i> ).....	14
3.3.2 Tipo encouraçado ou envolvente ( <i>shell-type</i> ).....	15
3.4 QUANTO À DISPOSIÇÃO RELATIVA DOS ENROLAMENTOS.....	15
3.5 QUANTO À PROTEÇÃO E MANEIRA DE DISSIPACÃO DE CALOR .....	16
3.5.1 Abertos ou a seco .....	16
3.5.2 Blindados.....	18
<b>RESUMO DO TÓPICO 1</b> .....	<b>19</b>
<b>AUTOATIVIDADE</b> .....	<b>20</b>
<b>TÓPICO 2 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO</b> .....	<b>23</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO</b> .....	<b>23</b>
<b>3 MARCAS DE POLARIDADE</b> .....	<b>25</b>
3.1 REGRAS PARA COLOCAR A MARCA DA POLARIDADE.....	27
3.2 ENSAIO DE POLARIDADE .....	28
<b>4 O TRANSFORMADOR IDEAL</b> .....	<b>28</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR IDEAL.....	29
4.2 FORÇAS CONTRAELETROMOTRIZES INDUZIDAS. ....	29
4.3 RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO .....	30
<b>RESUMO DO TÓPICO 2</b> .....	<b>31</b>
<b>AUTOATIVIDADE</b> .....	<b>32</b>
<b>TÓPICO 3 - ANÁLISE DO TRANSFORMADOR REAL</b> .....	<b>35</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>35</b>
<b>2 O TRANSFORMADOR REAL EM VAZIO (SEM CARGA) - CORRENTE DE EXCITAÇÃO ...</b>	<b>35</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	36
2.2 EM UM NÚCLEO LINEAR IDEAL .....	36
2.3 EM UM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO REAL.....	37
<b>3 O TRANSFORMADOR REAL COM CARGA - CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES</b> .....	<b>37</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	37
3.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES EM "L" .....	39
3.3 CIRCUITO IMPEDÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE .....	40
3.4 CIRCUITO REATÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE .....	41

<b>LEITURA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>43</b>
<b>RESUMO DO TÓPICO 3 .....</b>	<b>46</b>
<b>AUTOATIVIDADE .....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>
<b>UNIDADE 2 – ESTUDO DAS PERDAS, ENSAIOS E AUTOTRANSFORMADOR .....</b>	<b>51</b>
<b>TÓPICO 1 – RENDIMENTO E REGULAÇÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>2 RENDIMENTO .....</b>	<b>53</b>
2.1 PERDAS MAGNÉTICAS NO NÚCLEO .....	55
2.2 PERDAS JOULE NAS RESISTÊNCIAS ÔHMICAS DOS ENROLAMENTOS.....	56
2.3 PERDAS SUPLEMENTARES OU ADICIONAIS .....	56
<b>3 REGULAÇÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>4 OS DADOS DE PLACA E A ESCOLHA DE UM TRANSFORMADOR .....</b>	<b>61</b>
<b>RESUMO DO TÓPICO 1 .....</b>	<b>66</b>
<b>AUTOATIVIDADE .....</b>	<b>67</b>
<b>TÓPICO 2 - ENSAIOS E CONEXÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>2 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO .....</b>	<b>69</b>
2.1 OBJETIVOS.....	71
2.2 PROCEDIMENTOS.....	71
<b>3 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO .....</b>	<b>74</b>
3.1 OBJETIVOS .....	75
3.2 PROCEDIMENTOS.....	75
3.3 CONSIDERAÇÕES.....	76
<b>4 CONEXÕES EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS .....</b>	<b>77</b>
4.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO E BANCO TRIFÁSICO .....	77
4.1.1 Transformador trifásico.....	78
4.1.2 Banco trifásico .....	78
<b>RESUMO DO TÓPICO 2 .....</b>	<b>82</b>
<b>AUTOATIVIDADE .....</b>	<b>83</b>
<b>TÓPICO 3 - O AUTOTRANSFORMADOR .....</b>	<b>85</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>85</b>
<b>2 INTRODUÇÃO AOS AUTOTRANSFORMADORES .....</b>	<b>85</b>
<b>3 VANTAGENS DO AUTOTRANSFORMADOR .....</b>	<b>91</b>
<b>4 DESVANTAGENS DO AUTOTRANSFORMADOR.....</b>	<b>92</b>
<b>5 APLICAÇÕES .....</b>	<b>93</b>
<b>6 CONVERSÃO DE UM TRANSFORMADOR DE DOIS ENROLAMENTOS</b>	
<b>EM AUTOTRANSFORMADOR.....</b>	<b>94</b>
<b>LEITURA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>96</b>
<b>RESUMO DO TÓPICO 3.....</b>	<b>100</b>
<b>AUTOATIVIDADE .....</b>	<b>101</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>103</b>

<b>UNIDADE 3 – MOTORES DE INDUÇÃO .....</b>	<b>105</b>
<b>TÓPICO 1 – PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO .....</b>	<b>107</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>107</b>
<b>2 O CAMPO GIRANTE .....</b>	<b>108</b>
<b>3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO .....</b>	<b>109</b>
<b>4 O ESCORREGAMENTO .....</b>	<b>110</b>
<b>5 O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE .....</b>	<b>111</b>
5.2 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO ROTOR POR FASE .....	112
5.3 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE COMPLETO REFERIDO AO ESTATOR POR FASE .....	113
5.4 FORMA ALTERNATIVA PARA O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE .....	114
<b>6 POTÊNCIA MECÂNICA ÚTIL.....</b>	<b>115</b>
<b>7 TORQUE .....</b>	<b>115</b>
<b>8 PERDAS NO COBRE DO ESTATOR.....</b>	<b>116</b>
<b>9 CONJUGADO E POTÊNCIA PELO USO DO TEOREMA DE THÉVENIN.....</b>	<b>116</b>
<b>10 CURVAS DE CONJUGADO, POTÊNCIA E CORRENTE .....</b>	<b>118</b>
<b>11 DIAGRAMA FASORIAL .....</b>	<b>120</b>
<b>RESUMO DO TÓPICO 1 .....</b>	<b>121</b>
<b>AUTOATIVIDADE.....</b>	<b>122</b>
<b>TÓPICO 2 - MÉTODOS DE PARTIDA .....</b>	<b>125</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>125</b>
<b>2 MÉTODOS DE PARTIDA .....</b>	<b>126</b>
2.1 PARTIDA DIRETA.....	126
2.2 PARTIDA COM TENSÃO REDUZIDA COM AUTOTRANSFORMADOR.....	127
2.3 PARTIDA COM TENSÃO REDUZIDA COM REATOR OU RESISTOR PRIMÁRIO .....	127
2.4 PARTIDA ESTRELA - TRIÂNGULO .....	128
2.5 PARTIDA POR FASE DIVIDIDA OU POR ENROLAMENTO PARCIAL .....	129
2.6 PARTIDA COM RESISTÊNCIA EXTERNA DE ROTOR.....	130
2.7 PARTIDA DIRETA COM ROTOR DE DUPLA GAIOLA .....	130
2.8 PARTIDA UTILIZANDO SOFT START.....	131
2.9 PARTIDA UTILIZANDO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	134
<b>3 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS .....</b>	<b>135</b>
3.1 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ROTOR.....	135
3.2 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE POLOS .....	136
3.3 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA LINHA .....	137
3.4 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA TENSÃO DA LINHA.....	137
3.5 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO ROTOR (VARIAÇÃO DO ESCORREGAMENTO) .....	138
3.6 CONTROLE UTILIZANDO INVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	138
<b>RESUMO DO TÓPICO 2.....</b>	<b>140</b>
<b>AUTOATIVIDADE.....</b>	<b>141</b>
<b>TÓPICO 3 - MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO .....</b>	<b>143</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>143</b>
<b>2 ANÁLISE DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO ATRAVÉS DO CAMPO GIRANTE ..</b>	<b>144</b>
<b>3 CARACTERÍSTICA TORQUE-VELOCIDADE .....</b>	<b>146</b>
<b>4 ANÁLISE DE DESEMPENHO .....</b>	<b>147</b>
<b>5 TIPOS E MÉTODOS DE PARTIDAS DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO .....</b>	<b>149</b>
5.1 MOTOR DE FASE DIVIDIDA OU FASE AUXILIAR.....	149
5.2 MOTOR DE FASE DIVIDIDA A CAPACITOR DE PARTIDA .....	150
5.3 MOTOR DE FASE DIVIDIDA COM CAPACITOR PERMANENTE .....	151

5.4 MOTOR DE FASE DIVIDIDA COM DOIS CAPACITORES.....	151
5.5 MOTOR COM BOBINA DE SOMBRA.....	152
<b>LEITURA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>154</b>
<b>RESUMO DO TÓPICO 3 .....</b>	<b>159</b>
<b>AUTOATIVIDADE .....</b>	<b>160</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>162</b>

# ASPECTOS CONSTRUTIVOS

## OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

**A partir do estudo desta unidade, você deverá ser capaz de:**

- conhecer os componentes básicos que formam um transformador;
- identificar os tipos construtivos de transformadores e entender a importância de cada um no seu funcionamento;
- compreender o princípio de funcionamento de um transformador ideal, bem como interpretar seu equacionamento;
- conhecer os modelos elétricos de um transformador real e compreender seu funcionamento com e sem carga aplicada.

## PLANO DE ESTUDOS

Esta unidade está dividida em três tópicos. No decorrer dela, você encontrará autoatividades com o objetivo de reforçar o conteúdo apresentado.

TÓPICO 1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRANSFORMADORES

TÓPICO 2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

TÓPICO 3 – ANÁLISE DO TRANSFORMADOR REAL



## CHAMADA

Preparado para ampliar seus conhecimentos? Respire e vamos em frente! Procure um ambiente que facilite a concentração, assim absorverá melhor as informações.



# **CONFIRA A TRILHA DA UNIDADE 1!**

Acesse o  
QR Code abaixo:



# CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRANSFORMADORES

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, neste tópico, abordaremos o que são os transformadores, qual a sua importância para o setor elétrico e qual a sua função. Em seguida, veremos sobre onde é possível encontrá-los. Será que eles estão apenas no alto dos postes da rua? As empresas de grande porte possuem algum? E um eletrodoméstico? Será que temos um desses dentro de casa?

Além disso, estudaremos a classificação dos transformadores, que podem ser classificados quanto ao material do núcleo, ao número de fases, à forma do núcleo, à disposição relativa dos enrolamentos e à proteção e maneira de dissipação de calor.

Um transformador, também é chamado de trafo, é um dispositivo que apresenta uma construção relativamente simples. Ele é estático, ou seja, não possui peças móveis ou desgastáveis. É utilizado para transferir energia de um circuito de corrente alternada (CA) para outro, o que pode envolver um aumento ou uma diminuição da tensão, sendo que a frequência não é alterada em ambos os circuitos.

Quando a transformação é realizada com um aumento da tensão, o transformador recebe o nome de **elevador**, mas, quando a tensão é reduzida, recebe o nome de **abaixador**.

Na teoria, pode-se dizer que o transformador tem um tempo de vida e apresenta perdas muito baixas de potência.

O transformador pode ser utilizado como um componente ou equipamento auxiliar em diversos tipos de circuitos, tanto elétricos quanto eletrônicos. Ele pode operar com pouca potência quando utilizado em aparelhos eletrônicos ou alta potência em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Além disso, é utilizado para aumentar ou abaixar tensão ou corrente, sendo que, devido a sua diversidade, pode atuar com diversas tensões, correntes e frequências.

## IMPORTANTE

O transformador não funciona em corrente contínua.



Um transformador pode ficar exposto ao mau tempo, quando está suspenso em uma estrutura de transmissão ou de distribuição de energia elétrica, e continuar funcionando perfeitamente sem precisar de atenção, além de exigir uma manutenção relativamente simples e restrita. Com relação à eficiência, pode-se dizer que é bem alta, comparando com o tempo de vida prolongado (SIMONE, 2010).

## 2 APLICAÇÕES PRINCIPAIS

Pode-se dizer que os transformadores têm uma grande família, isso devido a sua diversificação e utilização. Há uma gama de transformadores que se diferenciam por finalidade e funcionalidade, mas operam, praticamente, sob as mesmas leis fundamentais.

Um transformador pode operar em uma frequência fixa ou pouco variável, mas também pode operar dentro de uma extensa banda de frequências, que são os transformadores de audiofrequência.

Os transformadores podem ser utilizados nas mais diversas aplicações, sendo que a mais utilizada é em dispositivos e instalações elétricas, nos quais podem operar como transformadores elevador, abaixador ou isolador.



## INTERESSANTE

Com a invenção e, posteriormente, o desenvolvimento do transformador, a partir do século XIX, foi possível se estabelecer o predomínio dos sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada. Isso aconteceu porque, no transformador de modo simples, porém de forma robusta e eficiente, na transferência de energia de um circuito para outro, na maioria das vezes, ocorre uma transformação de tensão e, conseqüentemente, de corrente (BIM, 2018). Por esse motivo, é comum observarmos os transformadores sendo utilizados na transferência de grande quantidade de energia elétrica para longas distâncias.

Após ocorrer a geração de energia elétrica, os níveis de tensão precisam ser elevados para que, desse modo, a energia possa ser transportada a partir das linhas de transmissão. Após percorrer longas distâncias pelas linhas de transmissão, os valores de tensão precisam ser reduzidos para que, desse modo, seja possível a distribuição para os consumidores, sejam eles residenciais, sejam eles comerciais, sejam eles industriais.

Os transformadores também podem estar presentes em equipamentos eletrônicos e muitas vezes de modo tão discreto que passam despercebido, como os transformadores de frequência intermediária e os circuitos sintonizados das etapas detectores dos receptores de ondas de rádio.

Outra aplicação dos transformadores é nos circuitos conversores, pois eles controlam os níveis de tensão e também podem ser isoladores, por exemplo, eliminando ruídos.

Também há os transformadores de segurança que são utilizados em campainha e alguns brinquedos. Nos brinquedos, a tensão secundária não ultrapassa 24 volts. Nas campainhas, como precisam de pouca tensão para funcionar, essa limita-se a 12 volts.

Como pode-se ver, os transformadores possuem muitas finalidades, resumindo:

- redução da tensão de linhas domésticas para utilização nos aparelhos que necessitam de baixa tensão, como os brinquedos elétricos e os eletrodomésticos;
- elevação da tensão de geradores elétricos para que seja possível transmitir eletricidade a longas distâncias.

## **3 CLASSIFICAÇÃO**

Com base na estrutura e funcionamento dos transformadores, é possível classificá-los de diversos modos, por exemplo: quanto ao material empregado no núcleo, quanto ao número de fases, quanto à forma do núcleo e quanto à proteção e maneira de dissipação de calor.

Cada uma dessas classificações tem sua importância com relação à utilização do transformador, como exemplo podemos citar um transformador classificado com relação ao material com núcleo de ar que é utilizado em aplicações de rádio frequência.

### **3.1 QUANTO AO MATERIAL DO NÚCLEO**

Com relação ao material do núcleo, os transformadores podem ser classificados em núcleo de ar e núcleo de material ferromagnético.

Nos transformadores de núcleo de ar, os enrolamentos ficam em contato com a atmosfera; enquanto que nos de ferro magnético, o núcleo do transformador é constituído de chapas de aço laminadas, normalmente chapas de aço de silício, para diminuir as perdas por correntes de Foucault ou parasitas.

### 3.1.1 Núcleo de ar

Os transformadores de núcleo de ar também são conhecidos como bobinas de antena, pois são transformadores que são muito utilizados em circuitos de rádio frequência, na transmissão e também em outros sistemas de comunicação.

Os transformadores de núcleo de ar são diferentes dos outros tipos de transformadores: eles são considerados transformadores especiais. Um transformador de núcleo de ar funciona com os seus enrolamentos enrolados de um modo não magnético, normalmente um tubo oco de algum material. Geralmente, essas bobinas são enroladas em uma superfície não magnetizada, como tubos de plástico ou papelão. Ao contrário dos transformadores elétricos e de potência, nos quais os núcleos criam um fluxo. Os transformadores de núcleo de ar geram fluxo utilizando os enrolamentos da bobina e o ar que passa por seu orifício.

O grau de acoplamento ou de indutância mútua entre os enrolamentos nesse tipo de transformador é na maioria das vezes menor do que o de um transformador de núcleo de ferro equivalente. A vantagem do transformador de núcleo de ar é que as características indesejáveis de um transformador de núcleo ferromagnético, como as perdas por correntes parasitas, histerese, saturação etc., não existem nesse transformador, já que em aplicações que necessitem de alta frequência, esses efeitos dos transformadores de núcleos de ferro são mais problemáticos.

Algumas vantagens de usar transformadores de núcleo de ar, quando utilizados em dispositivos eletrônicos de pequeno porte, são: não há distorção e a operação é feita sem ruído. Como dito antes, não há perdas por histerese e correntes parasitas e o transformador é leve, pois não há um núcleo.

Há basicamente duas formas de transformadores de núcleo de ar: os transformadores de núcleo de ar cilíndrico e os de ar toroidais.

Nos transformadores de núcleo de ar cilíndrico, os fios de cobre isolados são enrolados em uma estrutura cilíndrica, oca e não metálica que fornece suporte mecânico aos enrolamentos.

Nos transformadores de núcleo de ar toroidais, os fios de cobre isolados são enrolados em torno de um anel não metálico, normalmente constituído de um tipo de plástico rígido, onde a bobina é enrolada em torno da periferia do anel. Nos transformadores de núcleo de ar toroidais, cada enrolamento da bobina é utilizado separadamente. A vantagem de se utilizar esse enrolamento separado é a garantia que o efeito de acoplamentos perdido seja o menor possível. Por esse motivo, os transformadores de núcleo de ar toroidais são normalmente instalados em aplicações que necessitam de alta frequência. A relação entre o enrolamento primário e o secundário depende do tipo de operação e da mudança de frequência.

Há algumas etapas específicas que tanto os engenheiros quanto os projetistas elétricos podem seguir para manter ou melhorar o desempenho do transformador de núcleo de ar. Algumas são: o enrolamento de proteção pode ser enrolado no enrolamento primário em transformadores cilíndricos para permitir o casamento de impedância e o enrolamento de proteção pode ser conectado a receptores de antena para melhorar a operação dos transformadores.

Existe uma outra maneira para melhorar o desempenho do transformador, como conectar um capacitor ao enrolamento. Essa melhora no desempenho acontece porque o capacitor permite que o enrolamento mantenha uma ressonância constante, ou seja, o capacitor em paralelo com o transformador de núcleo de ar é utilizado para sintonizá-lo em ressonância.

Assim, os transformadores de núcleo de ar são usados em frequências de rádio quando as perdas do núcleo de ferro são muito altas. Os pequenos transformadores de núcleo de ar de tamanho milimétrico são utilizados em receptores de rádio e os maiores transmissores de rádio podem usar bobinas do tamanho de um medidor.

### 3.1.2 Núcleo de material ferromagnético

O núcleo do transformador cria um caminho em direção ao fluxo magnético, quando se utiliza corretamente um tipo de material altamente permeável, ele ajuda a obter uma relutância muito baixa e permanece dentro do núcleo no caminho do fluxo magnético. Esse núcleo geralmente é feito de várias chapas finas de aço elétrico que são conhecidas como folhas de laminação.

Existe uma camada bem fina de revestimentos isolantes, para isolar um dos outros, o que é necessário para evitar que a corrente parasita passe pelo núcleo do transformador. O núcleo do transformador é uma das principais fontes de geração de calor, o que pode levar a um curto-circuito e superaquecimento. Por esse motivo, é necessário o uso de dutos de resfriamento para evitar falhas.

O princípio de funcionamento dos transformadores é baseado na indução mútua entre os dois enrolamentos de um par magnético. Eles são geralmente feitos de materiais altamente permeáveis, como o aço.

O núcleo do transformador deve ter alta resistência elétrica e baixa perda por histerese. Na fabricação, o aço é amplamente utilizado, pois possui melhores propriedades elétricas os que os tornam preferidos para a maioria das aplicações elétricas devido as suas propriedades materiais.

O material que é mais utilizado nos transformadores é, em primeiro, o aço amorfo, ou como também é conhecido vidro metálico. Esse nome é devido por serem fitas metálicas finas como um papel e muito quebradiças. Esse material é o mais utilizado devido ao alto desempenho.

Outro material muito utilizado é o aço silício, que possui uma maior resistividade elétrica, pois oferece maior saturação de fluxo magnético e menor relutância.

A cerâmica de ferrite é um composto cerâmico feitos de óxido metálico e é utilizada em transformadores de alta frequência. Os núcleos compostos de ferrite possuem baixa condutividade.

## 3.2 QUANTO AO NÚMERO DE FASES

Os transformadores também podem ser classificados com relação ao número de fases: monofásicos, trifásicos e polifásicos. O tipo de conexão utilizada dependerá de qual é a finalidade que esse transformador vai ser utilizado.

### 3.2.1 Transformador monofásico

Um transformador monofásico é um dispositivo estático, que funciona com base no princípio da lei de indução mútua de Faraday. Esse tipo de transformador possui um nível constante de frequência e variação do nível de tensão. O funcionamento do transformador monofásico se baseia na transferência de energia de um circuito para outro. Existem dois tipos de enrolamentos no transformador: o enrolamento no qual a alimentação em corrente alternada (CA) é fornecida que é denominado enrolamento primário; e outro em que a carga é conectada, denominado enrolamento secundário.

O transformador monofásico é aquele utilizado para alimentação de circuitos de comando, de uso industrial. Ele também é utilizado nas casas para transformar 127 V em 220 V e 220 V em 127 V. Já o transformador trifásico é aquele que é possível ver nas ruas. Esse tipo de transformador recebe a tensão da subestação de distribuição com uma tensão de 13800 V e transforma em 127 V ou 220 V.

### 3.2.2 Transformadores polifásicos

O primário e o secundário de um transformador podem ser conectados de várias formas, como o primário conectado em delta e o secundário conectado em estrela ou estrela-delta ou delta ou estrela-estrela. O tipo de conexão utilizada depende do uso do transformador. Quando os transformadores são usados para fornecer três ou mais de três fases, é chamado de transformador polifásico.

Os transformadores polifásicos são aqueles que fornecem a tensão para sistemas que precisam de mais fases através do sistema trifásico. São aqueles utilizados para retificação de medida de onda completa devido aos seus componentes, no qual o transformador varia de três a seis fases. Esses sistemas que necessitam de mais fases possuem eficiência relativamente alta.

### 3.2.3 Transformadores trifásicos

Os sistemas trifásicos possuem três fases, nas qual as tensões são senoidais e defasadas  $120^\circ$  entre si e são utilizados nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia. Esse sistema possui algumas vantagens, como a mudança de nível de tensão de aplicação pela mudança da ligação no gerador ou na carga, e a possibilidade de transmissão/distribuição de energia com apenas três cabos, sem a utilização de condutor neutro.

Um sistema trifásico só pode ser considerado equilibrado se, no sistema de geração, as três fases tiverem sido geradas com amplitude e frequência iguais, se os cabos que levam energia da fonte geradora às cargas tiverem a mesma impedância e as cargas conectadas ao sistema de alimentação tiverem o mesmo valor de impedância nas três fases (SOUZA *et al.*, 2017).

Um transformador trifásico é eletricamente e magneticamente conectado. Com relação aos enrolamentos primário (alta tensão) e secundário (baixa tensão), as três fases do lado do primário e as três fases do lado secundário podem estar eletricamente conectadas de diversos modos.

Existem duas configurações de conexão para energia trifásica: Delta e Wye. Delta e Wye são letras gregas que representam a forma como os condutores nos transformadores são configurados. Em uma conexão Delta, os três condutores são conectados de ponta a ponta em forma de triângulo ou delta. Para uma estrela, todos os condutores irradiam do centro, o que significa que estão conectados em um ponto comum.

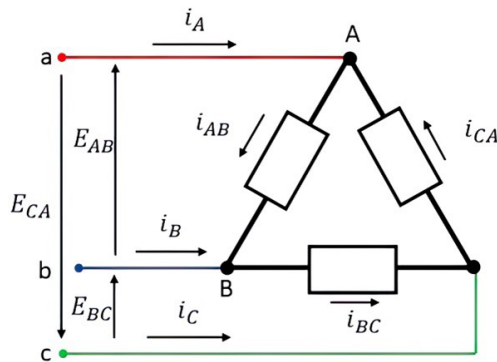
Desse modo, temos nos transformadores dois tipos de ligação entre essas três fases, que são Y (estrela) ou  $\Delta$  (triângulo), assim, o transformador pode ser ligado dos seguintes modos:

- Y-Y, em que temos relação de transformação =  $a$ , com  $\frac{I_{L,Y}}{I_{L,X}} = \frac{1}{a}$ . Algumas vantagens da conexão Y-Y são: como a tensão sobre o enrolamento é 57,7% da tensão de linha, o número de espiras necessário é menor, além disso fornece dois níveis de tensão, fase-neutro e fase-fase;
- Y- $\Delta$ , em que  $V_L = \sqrt{3}V_f$ , com relação de transformação =  $\sqrt{3}a$ . Em Y:  $I_L = I_f$ . Em  $\Delta$ :  $I_L = \sqrt{3}I_f$ . Assim, temos que  $\frac{I_{L,Y}}{I_{L,\Delta}} = \frac{1}{a\sqrt{3}}$ ;
- $\Delta$ -Y, com relação de transformação =  $\frac{a}{\sqrt{3}}$ . Esse tipo de conexão é mais empregado como transformador elevador em subestações de geração. Assim, temos  $\frac{I_{L,\Delta}}{I_{L,Y}} = \frac{\sqrt{3}}{a}$ ;
- $\Delta$ - $\Delta$ , com relação de transformação =  $a$ , com  $\frac{I_{L,\Delta}}{I_{L,\Delta}} = \frac{1}{a}$ . Esse tipo de conexão nos transformadores trifásicos em banco pode operar em conexão delta aberto, com um dos transformadores monofásicos em manutenção, podendo fornecer 58% da capacidade nominal do banco.

Cada conexão possui determinadas características que determinarão qual a utilização mais adequada para os tipos de aplicações.

Na ligação delta, representada na Figura 1, as três fases são interligadas de modo a formar um caminho para circulação das correntes. Nota-se pela figura que a tensão aplicada nos enrolamentos é igual à tensão de linha, ou seja,  $\sqrt{3}$  vezes maior que na ligação estrela.

FIGURA 1 - LIGAÇÃO EM TRIÂNGULO



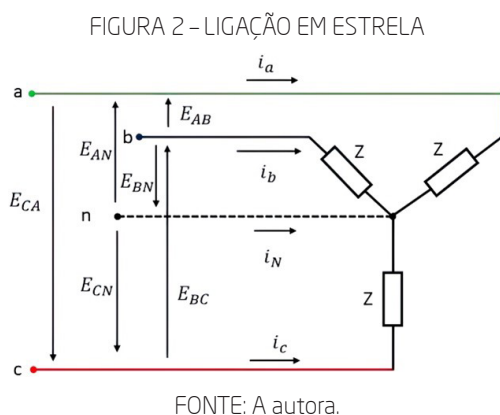
FONTE: A autora.

No caso, temos que  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são as correntes de linha;  $E_{CA}$ ,  $E_{AB}$  e  $E_{BC}$  são as tensões entre fases;  $i_{AB}$ ,  $i_{BC}$  e  $i_{CA}$  são as correntes entre fases.

Um dos modos de se fazer a ligação entre os três enrolamentos de um transformador trifásico é chamada de ligação estrela. Nessa configuração, apresentada na Figura 2, os três enrolamentos são interligados em um ponto comum.

Os enrolamentos primários e secundários são conectados em estrela e não existe diferença de fase entre as tensões primária e secundária. A corrente que flui através dos enrolamentos primário e secundário é igual às correntes das linhas às quais eles estão conectados (fonte de alimentação e carga). Tensões entre fases de linha em cada extremidade igual a  $\sqrt{3}$  vezes às respectivas tensões de enrolamento. As tensões e correntes são nulas no ponto comum de conexão dos enrolamentos, devido ao defasamento.

Este tipo de conexão funciona de modo satisfatório se a carga estiver balanceada. No entanto, se a carga estiver desequilibrada, o deslocamento do ponto neutro causa tensões de fase desiguais. Essa conexão gera consideravelmente interferência nas linhas de comunicação e, portanto, com esta configuração de conexão, as linhas telefônicas não podem ser executadas em paralelo. Devido a essas desvantagens, a conexão estrela-estrela é raramente usada e não empregada na prática.



No caso, temos que  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são as correntes de linha e  $i_N$  a corrente no neutro.  $E$ ,  $E_{CA}$ ,  $E_{AB}$  e  $E_{BC}$  são as tensões entre fases e  $E_{AN}$ ,  $E_{BN}$  e  $E_{CN}$  as tensões entre fase e neutro.

Para uma carga trifásica equilibrada temos:

- **tensão de fase:** tensão medida em cada um dos ramos monofásicos de um sistema trifásico;
- **tensão de linha:** tensão medida entre dois condutores terminais de fase;
- **corrente de fase:** corrente que percorre cada ramo monofásico de um sistema trifásico;
- **corrente de linha:** corrente que percorre por cada condutor de linha.

A relação de transformação nos transformadores trifásicos é definida pela relação entre a tensão de linha do primário e a tensão de linha do secundário. Assim, dependendo do tipo de ligação, a relação de transformação pode ser diferente da relação de espiras.

Há um outro tipo de ligação chamada de zig-zag. O transformador com ligação zig-zag é chamado de transformador com finalidade especial. Esse tipo de ligação é utilizado em sistema de energia, e pode ser encontrado como ligação de “enrolamento de partida interconectado”. Embora esse tipo de conexão de transformador não seja útil na transformação de potência, ele possui muitos recursos, pois combina as conexões de enrolamento do tipo Estrela e do tipo Delta.

Uma das características da ligação zig-zag é a possibilidade de construção de enrolamentos com quaisquer ângulos de defasagens, ou seja, é possível uma construção com mais de três fases de um modo bem mais simples.

O transformador zig-zag possui seis bobinas nas quais três são bobinas externas e três são bobinas internas. Os enrolamentos da bobina externa são chamados de enrolamento zig e os enrolamentos da bobina interna são chamados de enrolamento zag. O enrolamento zig de uma fase é conectado em série com o enrolamento zag de outra fase, por isso é chamado de enrolamento em estrela interconectado, onde duas bobinas de enrolamento em estrela estão interconectadas. Em cada fase, dois enrolamentos da bobina terão o mesmo número de voltas, mas são enrolados em direções opostas para cancelar as tensões de incompatibilidade.

Pode ser usado como transformador de aterramento em um sistema conectado em delta, ou seja, não possui terminal neutro, ou em uma partida não aterrada conectada (estrela de três terminais), em que o neutro não está disponível para aterramento. O transformador zig-zag é utilizado para aterramento do transformador conectado em delta.

No transformador conectado em delta, por exemplo, não há caminho para componentes de sequência zero e nenhuma proteção pode ser realizada para esses componentes, o que aumenta o aquecimento nos enrolamentos. Já o transformador com ligação zig-zag, fornece um neutro para o caminho de componentes de sequência zero e durante uma falta linha-terra permite que a proteção seja operada devido a essa falta. Na ausência de neutro aterrado, aumenta o nível de tensão linha a linha, sobrecarregando a isolação conectada ao equipamento. O transformador zig-zag ajuda na proteção, mas também reduz o aumento de tensões sob condições de falta simétricas.

O transformador zig-zag pode ser utilizado em conversores de eletrônica de potência. Nesse tipo de conversor eletrônico, o transformador zig-zag é usado para eliminar o componente de magnetização de corrente contínua (DC) apresentado devido a ângulos de disparo inadequados. Os ângulos de disparo dos componentes eletrônicos de potência, o SCR, podem adicionar componentes de magnetização em corrente contínua e isso é cancelado em cada ramo do transformador em zig-zag devido à direção oposta do componente de magnetização DC das correntes que fluem nos enrolamentos no mesmo membro.

Outra utilização do transformador com ligação zig-zag é como referência de aterramento ou transformador de aterramento. Esse tipo de ligação oferece um caminho de baixa impedância para componentes de sequência zero em condições de falha, para que possa ser perfeitamente usado como transformador de aterramento e referência de aterramento. Se a corrente de aterramento tiver que ser limitada em condições de falha, pode ser adicionado um resistor de modo adequado no terminal do neutro da ligação em zig-zag.

Por fim, as tensões harmônicas apresentadas no sistema podem ser reduzidas e até mesmo eliminadas nos enrolamentos em zigue-zague devido à conexão oposta das bobinas dos enrolamentos.

A utilização do transformador zig-zag com relação a outros tipos de transformadores de aterramento são seu menor custo em comparação com o transformador Scott, baixa impedância para correntes de sequência zero, supressão de tensões harmônicas e perfeito isolamento entre terra e componente. No entanto, existe uma desvantagem, que é a quantidade maior de cobre para construção dos enrolamentos, quando comparado com os demais tipos de ligação. Esse cobre a mais é em torno de 133%.

Existem transformadores que são fabricados com derivações, ou seja, taps no enrolamento. Esses taps servem para permitir que seja ajustada a tensão do transformador para uma tensão correta de entrada ou saída, ou até mesmo uma seleção de várias tensões para os mais variados tipos de aplicações.

Uma grande parte dos transformadores de pequeno e médio porte possuem comutadores de derivação que funcionam apenas na condição sem carga. Ou seja, a alimentação precisa ser desligada e as derivações alteradas no transformador quando ele estiver desenergizado.

Nos transformadores de grande porte, ou em unidades que foram projetadas, a mudança de derivação é realizada de modo automático. O problema desse método é o valor, já que possui um valor bem elevado, além de normalmente não ser empregado em transformadores de potência igual ou inferior 1000 kVA.

Quando o transformador possui dois enrolamentos, o enrolamento primário e o enrolamento secundário, ambos são isolados eletricamente um do outro. Assim, toda a transferência de energia é realizada por uma ação transformadora. Os transformadores de isolamento especiais de um modo geral são empregados para fornecer uma correção de tensão pelas derivações do primário, e assim estabelecer um terra isolado no lado secundário, e para isolar eletricamente as linhas de energia de entrada das cargas conectadas no secundário. A isolação do primário para o secundário em um transformador de isolação ajuda na redução dos transitórios e também dos ruídos de alta frequência, conforme eles tentam passar pelo transformador.

## 3.3 QUANTO À FORMA DO NÚCLEO

O transformador também pode ser classificado com relação à forma do núcleo. Nessa classificação, temos dois tipos: tipo envolvido (*core-type*) e o tipo envolvente (*shell-type*).

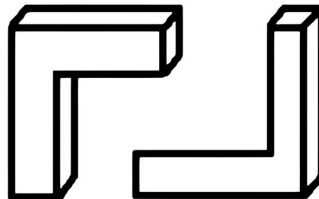
Uma das principais diferenças que há entre os transformadores do tipo núcleo envolvido e os do tipo núcleo envolvente é que, no transformador do tipo núcleo envolvido, o enrolamento envolve o núcleo; enquanto que, no transformador do tipo núcleo envolvente, o núcleo circunda o enrolamento do transformador.

### 3.3.1 Tipo envolvido (*core-type*)

O transformador do tipo núcleo envolvido, ou *core-type*, possui as colunas do núcleo envolvidas pelas bobinas dos enrolamentos. Os enrolamentos são construídos de modo cilíndrico e montados concentricamente em torno do núcleo. Geralmente, o enrolamento de baixa tensão é o cilindro interno, ou seja, aquele que é mais próximo do núcleo e o de alta tensão o cilindro externo.

O núcleo magnético do transformador é formado por laminações para formar uma moldura retangular. As laminações são cortadas na forma de tiras em forma de L, Figura 3.

FIGURA 3 - LAMINAÇÕES NO NÚCLEO TIPO ENVOLVIDO

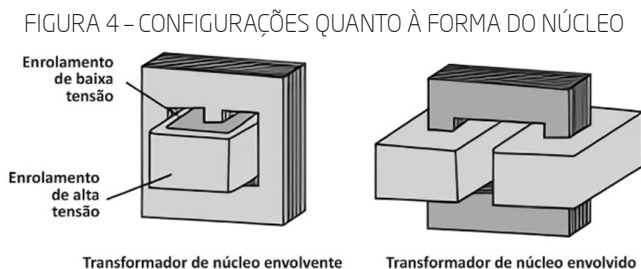


FONTE: A autora.

Os enrolamentos primário e secundário são intercalados para reduzir o fluxo de corrente de fuga. Metade de cada enrolamento é colocada lado a lado ou concentricamente. A camada de isolamento é fornecida entre o núcleo e o enrolamento interno e entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário. Para reduzir o isolamento, o enrolamento interno é sempre colocado próximo ao núcleo. O enrolamento é cilíndrico, e a laminação é inserida posteriormente nele.

### 3.3.2 Tipo encouraçado ou envolvente (*shell-type*)

Já o transformador tipo núcleo envolvente, ou *shell-type*, como podemos ver na Figura 4, possui as bobinas dos enrolamentos do primário e secundário envolvidos pelo núcleo, enroladas em torno de uma mesma coluna. Nesse tipo de construção, os enrolamentos são feitos em forma de disco em que os enrolamentos de alta e baixa se alternam em camadas. Essa montagem é muito utilizada em transformadores de pequena potência.



FONTE: Adaptado de Petruzella (2013).

O transformador do tipo núcleo envolvente, quando comparado com o de núcleo envolvido, possui a vantagem de utilizar quantidades menores de cobre; e a desvantagem por precisar de uma quantidade maior de material magnético para formar o núcleo, além de maior robustez mecânica.

## 3.4 QUANTO À DISPOSIÇÃO RELATIVA DOS ENROLAMENTOS

Os enrolamentos do transformador são uma peça importante da construção desse dispositivo. A importância se dá pelo fato de os principais condutores de corrente estarem enrolados em torno das seções laminadas do núcleo. Em um transformador monofásico de dois enrolamentos, por exemplo, dois enrolamentos estariam presentes: o primário e o secundário. O que está conectado à fonte de tensão, enrolamento primário, cria o fluxo magnético. No enrolamento secundário, é onde está presente a tensão induzida que é resultado de indução mútua. Se a tensão de saída secundária for menor que a tensão de entrada primária, o transformador é chamado de transformador abaixador, porém se a tensão de saída secundária for maior que a tensão de entrada primária, ele recebe o nome de transformador elevador.

A forma construtiva dos enrolamentos também é importante quando é necessário encontrar os valores da indutância de dispersão e das capacitâncias. Por exemplo, para se obter uma dispersão de fluxo pequeno deve-se colocar os enrolamentos de modo que seja possível que o fluxo produzido por um dos enrolamentos envolva de um modo efetivo as espiras do outro enrolamento. Por exemplo, se todo o secundário estiver sobre o primário, há um fluxo disperso maior.

Outra possibilidade é fazer um enrolamento bifilar, mas isto só é possível quando ambos os condutores estiverem diâmetros semelhantes, e quando não há necessidade de uma maior isolação entre os enrolamentos. O método de enrolamento bifilar é realizado no transformador com derivação central, pois esse transformador inclui indutância ressonante integrada em um conversor ressonante para melhorar a eficiência de conversão de energia e reduzir o desequilíbrio.

## NOTA



Uma bobina bifilar é um tipo de bobina eletromagnética que contém dois enrolamentos paralelos e próximos um do outro. A palavra bifilar na Engenharia, se refere a um fio que é feito de dois filamentos. Geralmente, bifilar é utilizada para denotar tipos especiais de fios de enrolamento para transformadores. O fio pode ser adquirido na forma bifilar, geralmente como fio esmaltado de cores diferentes. Quando se tem três fios, o nome passa a ser bobina trifilar.

### 3.5 QUANTO À PROTEÇÃO E MANEIRA DE DISSIPACÃO DE CALOR

Os transformadores também podem ser classificados com relação à proteção e à maneira de dissipação de calor em abertos ou seco e blindados.

Um transformador do tipo seco é um tipo de transformador que não possui líquido isolante, ou seja, os enrolamentos e o núcleo são mantidos dentro de um tanque selado que é pressurizado com ar.

Já os transformadores blindados, são um tipo particular usado como transformador de isolamento, e podem ser encontrados com dois tipos de blindagem: blindagem eletrostática e blindagem magnética. Os transformadores de isolamento possuem os enrolamentos primários e secundários fisicamente separados um do outro.

#### 3.5.1 Abertos ou a seco

Os transformadores do tipo seco utilizam o ar ambiente como meio de resfriamento e também de isolante, tanto dos seus enrolamentos quanto das demais peças que compõe os transformadores. Sua finalidade principal, e a mais utilizada, é a mesma dos transformadores imersos em líquido isolante, ou seja, ajustar a tensão primária aos níveis utilizados em indústrias, residências e empresas em geral.

Os transformadores do tipo seco são classificados em dois tipos: Transformador Tipo Seco de Resina Fundida (CRT) e Transformador Impregnado de Pressão de Vácuo (VPI).

O Transformador Tipo Seco de Resina Fundida (CRT) é utilizado em áreas que são propensas à alta umidade. Isso se deve ao fato dos enrolamentos primários e secundários desse tipo de transformador serem encapsulados com um material de resina epóxi. Este encapsulamento com resina epóxi ajuda a evitar que a umidade entre e afete o material do enrolamento. A proteção é importante e deve ser completada através do encapsulamento de resina fundida para que o transformador possa funcionar sem nenhum tipo de interrupção em áreas com grandes volumes de umidade. Pode-se dizer que o transformador CRT não é higroscópico. Este tipo de transformador está disponível em classificações de 25 KVA a 12.500 KVA., com classe de isolamento F, 90 °C.

O transformador CRT apresenta algumas vantagens que são melhor capacidade de carga, baixa perda e, portanto, uma boa eficiência. Além disso, não oferece nenhum risco de incêndio, pois o isolamento de enrolamento não é inflamável. Logo, esse tipo de transformador é adequado para instalação interna. O transformador CRT também pode ser instalado ao ar livre em um gabinete IP 45.

O Transformador Impregnado de Pressão de Vácuo (VPI) é um tipo de transformador feito com um material minimamente inflamável como isolamento dos enrolamentos. Os enrolamentos deste transformador são feitos em folha ou tira, porém, para tensões mais altas, o enrolamento já é feito de discos que são conectados em série ou paralelo conforme a potência nominal com relação ao nível de tensão.

O isolamento do enrolamento é de impregnação livre de vazios que é feito com resina de poliéster classe H. Os enrolamentos primários e secundários com núcleo são amarrados com segurança dentro de uma caixa de proteção a vácuo. O transformador VPI não é afetado pela umidade pois apresenta proteção de entrada de umidade. Este tipo de transformador está disponível de 5 KVA a 30 MVA com grau de isolamento F, 155 °C, e H, 180°C. É com proteção até IP56.

As vantagens do Transformador Impregnado de Pressão de Vácuo são: alta resistência mecânica, isolamento, não há flutuação de temperatura, simples manutenção e menos propenso ao risco de incêndio.

Já as principais vantagens do Transformador do Tipo Seco são: segurança tanto para as pessoas quanto para os bens, não há poluição e manutenção praticamente nula, instalação simples, suporta sobrecargas, custo reduzido em obras de instalação civil e sistemas de proteção contra incêndio, excelente resistência a correntes de curto-circuito, longa duração devido ao baixo aquecimento térmico e dielétrico e é adequado para áreas úmidas e contaminadas.

No entanto, há algumas desvantagens do transformador do tipo seco. Esse tipo de transformador possui longa duração e menor chance de falha no enrolamento, porém, caso ele falhe, toda a configuração deve ser alterada, ou seja, deve-se realizar uma mudança completa do enrolamento de alta e baixa tensão.

Outra desvantagem é com relação ao custo, pois, para o mesmo valor de potência e tensão, o transformador do tipo seco é mais caro do que o transformador refrigerado a óleo.

O transformador do tipo seco possui uma ampla variedade de aplicação e locais que são utilizados como nas indústrias química, de petróleo e gás; em áreas ambientalmente sensíveis, como as áreas de proteção de água; nas áreas que possuem risco de incêndio, como nas florestas; nas subestações no centro da cidade e subestações internas e subterrâneas; também na geração renovável, como nas turbinas eólicas *offshore*.

## 3.5.2 Blindados

O transformador blindado pode ser encontrado com dois tipos de blindagem: blindagem eletrostática e blindagem magnética.

O blindado com eletrostática, ou eletrostaticamente, é um tipo de transformador que fornece uma blindagem eletrostática de cobre entre os enrolamentos primário e secundário. A blindagem é aterrada e, assim, desvia os ruídos e transientes para o terra, em vez de passá-los para o secundário. O enrolamento desvia a maior parte dos ruídos presentes na corrente do primário para terra, porém pode-se passar uma pequena quantidade de ruído do primário para o secundário.

Os transformadores com classificação K devem ter uma blindagem eletrostática. Os transformadores blindados eletrostaticamente muitas vezes são os preferidos para serem utilizados em instalações elétricas, pois há circuitos eletrônicos que operam em baixa tensão DC e são muito sensíveis ao 'ruído'.

O transformador com blindagem magnética é feito por uma folha de material condutor, que envolve toda a bobina e o núcleo. Esse transformador proporciona o aterramento de parte dos ruídos do primário e uma redução do campo magnético da parte externa.

# RESUMO DO TÓPICO 1

## **Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- Os transformadores, mesmo sendo tão importantes e eficientes, possuem uma construção relativamente simples.
- Os transformadores possuem uma variedade de aplicações, sendo uma das mais importantes nas usinas geradoras e nas subestações.
- Os transformadores podem ser classificados de diversos modos, como quanto ao material empregado no núcleo, quanto ao número de fases, quanto à forma do núcleo e quanto à proteção e maneira de dissipação de calor.
- Os transformadores são responsáveis por garantir a energia em uma tensão correta em nossas casas, ou seja, são usados como abaixador.

# AUTOATIVIDADE



1 Um transformador, ou trafo, é um dispositivo que possui uma construção simples, não possui peças móveis ou desgastáveis. Ele é utilizado para transferir energia de um circuito de corrente alternada para outro, e pode ser elevador ou abaixador de tensão, sendo que a frequência não é alterada em ambos os circuitos. Sobre os transformadores, assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) Se um transformador é utilizado para baixar a diferença de potencial de 3 800 V para 127 V, significa que o número de espiras no primário é maior que no secundário.
- b) ( ) Um transformador trifásico apresenta uma bobina enrolada em três núcleos ferromagnéticos.
- c) ( ) Um transformador é um dispositivo que pode funcionar tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua.
- d) ( ) A forma construtiva dos enrolamentos é importante para se encontrar os valores da resistência de dispersão e das capacitâncias.

2 Os transformadores são equipamentos extremamente importantes para o setor elétrico e podem ser classificados de diversas formas: quanto ao material do núcleo, ao número de fases, à forma do núcleo, à disposição relativa dos enrolamentos e à proteção e maneira de dissipação de calor. Com base na classificação dos transformadores, analise as afirmativas a seguir:

- I- Com relação ao número de fases, os transformadores podem ser classificados em monofásicos, bifásicos e polifásicos.
- II- O transformador monofásico é aquele utilizado para alimentação de circuitos de comando, de uso industrial e também os utilizados nas casas para transformar 127 V em 220 V e 220 V em 127 V.
- III- Os transformadores polifásicos, que fornecem a tensão para sistemas, precisam de mais fases através do sistema trifásico.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas II e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 A Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO) é uma sociedade que representa os docentes, os discentes e os profissionais que desempenham as atividades nas diversas áreas da Engenharia de Produção. De acordo com os princípios e as normativas elencadas no estatuto da ABEPRO, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) Nos transformadores que possuem dois enrolamentos, chamamos um de primário e outro de secundário.
- ( ) Os transformadores possuem uma diversidade de usos, sendo que podem ser utilizados tanto para aumentar quanto diminuir o valor da tensão.
- ( ) O transformador do tipo núcleo envolvente possui as colunas do núcleo envolvidas pelas bobinas dos enrolamentos.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - V - V.
- b) ( ) V - V - F.
- c) ( ) F - V - V.
- d) ( ) V - F - V.

4 O transformador pode ser utilizado como um componente ou como um equipamento auxiliar em diversos tipos de circuitos elétricos e eletrônicos, podendo operar com pouca potência ou alta potência se estiver sendo utilizado em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O transformador também pode ser classificado de diversos modos. Disserte sobre a classificação dos transformadores.

5 Com relação as suas características, podemos dizer que um transformador ou trafo é um dispositivo que apresenta uma construção simples. Ele é estático, pois não possui peças móveis ou desgastáveis. Nesse contexto, disserte sobre as principais aplicações do transformador.



# PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, neste tópico, abordaremos o funcionamento de um transformador. Michael Faraday, em 1831, construiu o primeiro transformador primitivo que consistia em um núcleo de ferro fechado com duas bobinas sem conexão elétrica entre si.

Após entendermos o funcionamento do transformador, vamos compreender a polaridade. Determinar a polaridade de um transformador é identificar quais são os sentidos momentâneos da força eletromotriz, tanto dos enrolamentos primário quanto secundário do transformador.

Por fim, veremos o que é um transformador ideal e suas características. Um transformador ideal é aquele que possui um acoplamento perfeito entre as suas bobinas; e não possui nenhuma perda nem no enrolamento, nem no núcleo.

## 2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um transformador é um dispositivo estático, formado basicamente por duas bobinas isoladas eletricamente uma da outra, enroladas em torno de um mesmo núcleo e ligadas entre si através de um fluxo magnético. Através do acoplamento magnético, é realizada a transferência de energia elétrica de uma bobina para outra. A bobina que irá receber a energia de uma fonte de corrente alternada é chamada de primária e a que fornece energia chama-se secundária (PETRUZELLA, 2013). Os enrolamentos também podem ser chamados conforme a tensão que estão submetidos: enrolamento de alta tensão ou de baixa tensão.

Quando se aplica uma tensão de corrente alternada no enrolamento primário, o fluxo de corrente resultante estabelecerá um campo magnético que varia de modo constante. Esse campo aumenta ou diminui de acordo com a corrente alternada e vai induzindo uma tensão alternada no enrolamento do secundário, com a mesma frequência da tensão alternada que foi aplicada no primário.

O transformador funciona baseado no princípio da indução mútua. Quando o enrolamento primário estiver conectado a uma tensão alternada, passará nesse enrolamento uma corrente chamada de excitação. Essa corrente de excitação que flui pelo enrolamento primário gera um campo magnético de densidade  $B = B(t)$ , o qual

se interligará com o enrolamento secundário do transformador e induzirá uma força eletromotriz (fem) em ambos os enrolamentos, seguindo a lei de Faraday - Newman ou lei de Lenz (SIMONE, 2010):  $e = -N \cdot \frac{d\phi_{\text{mútuo}}}{dt}$ .

Como um campo magnético e as forças eletromotrizes são alternantes, tem-se que a frequência é a mesma da frequência da corrente de magnetização da unidade transformadora. As intensidades dessas forças eletromotrizes induzidas dependerão da frequência da corrente de magnetização,  $f$ , do número de espiras do enrolamento e do fluxo magnético  $\phi_{\text{mútuo}_M}$ , estabelecido no núcleo que é chamado de fluxo mútuo. Assim, a força eletromotriz induzida no primário,  $E_1$ , em um enrolamento que possui  $N_1$  espiras no primário é igual a:  $E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_{\text{mútuo}_M}$  (SIMONE, 2010).

Para determinada frequência e fluxo magnético de valor eficaz constante, a fem induzida em cada enrolamento dependerá apenas do número de espiras de cada enrolamento. Assim, tem-se:  $\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} = 4,44 \cdot f \cdot \phi_{\text{mútuo}_M}$ , em que  $N_2$  é o número de espiras do secundário e  $E_2$  é a força eletromotriz induzida no secundário. A relação entre o número de espiras e a fem induzida é chamada de primeira equação do transformador ideal.

Quando se utiliza uma tensão, corrente ou potência nominal de forma errada em uma instalação com transformadores, podem ocorrer sérios problemas desde ferimentos graves ou danos na instalação.

Para que se possa utilizar um transformador em um circuito, deve-se seguir com rigor as especificações de tensão, corrente e potência nos enrolamentos primário e secundário do transformador. Os valores nominais de tensão, corrente e potência são especificados e representam o ponto médio dos valores máximo e mínimo.

A tensão máxima que pode ser aplicada com a devida segurança é determinada pelo tipo e pela espessura do isolamento utilizado, se a isolação for de boa qualidade é utilizada uma tensão maior entre os enrolamentos. Já a corrente máxima é determinada pela seção do fio utilizada no enrolamento. Quando uma corrente acima do permitido passa pelo enrolamento de uma potência maior, ela será dissipada no enrolamento na forma de calor. Esse calor, se for muito elevado, provocará a ruptura do isolamento em torno do fio.

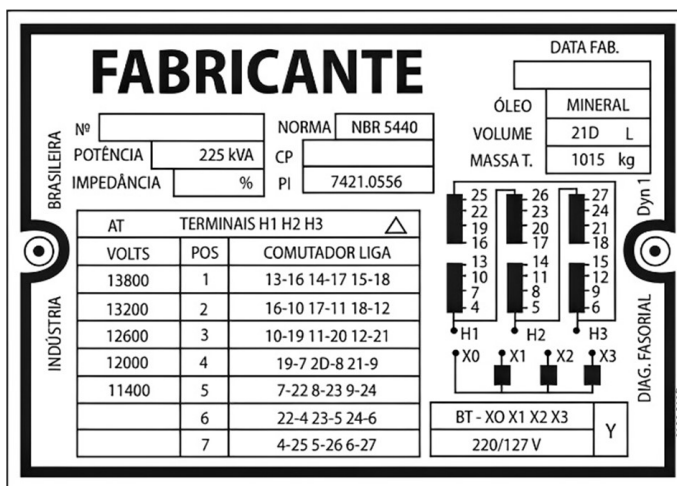
Os transformadores são classificados em *volt-ampères* (VA) ou *quilovolts-ampères* (kVA). O tamanho de um transformador é determinado pelo kVA da carga. Em muitos casos, a potência exigida pela carga é equivalente à classificação do transformador e assim é expressa em VA ou kVA. Por exemplo, uma carga de 1 KW (1000 Watts) exigiria um transformador de 1 kVA e fator de potência unitário.

Assim, temos que tanto o enrolamento primário quanto o secundário dos transformadores são projetados para suportar a potência aparente. Essa potência é indicada na placa de identificação do transformador. É importante salientar que na maioria das vezes as correntes de plena carga, tanto do primário quanto do secundário, não são dadas, porém, é possível calculá-las a partir da potência nominal.

Para os transformadores monofásicos, temos  $I_{plena\ carga} = \frac{VA}{Tensão}$  ou  $I_{plena\ carga} = \frac{KVA \cdot 1000}{Tensão}$ .  
 Já para os transformadores trifásicos, temos  $I_{plena\ carga} = \frac{KVA \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot Tensão}$ .

Suponha que um transformador monofásico possua uma tensão no primário de 127 V e uma potência nominal de 30 kVA. Para essas condições, a corrente de plena carga do primário será de 236,22 A. A Figura 5 apresenta uma típica placa de identificação de um transformador.

FIGURA 5 - PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR



FONTE: Adaptado de Petruzella (2013, p. 31).

Observando a Figura 5, nota-se que as informações seguem as normas da ABNT e representam algumas características do equipamento. Algumas das informações que necessitam estar presentes na placa são: nome do fabricante, potência nominal em kVA, frequência nominal, impedância de curto-circuito, tipo de óleo isolante e volume necessário, em litros e designação do método de resfriamento.

### 3 MARCAS DE POLARIDADE

A polaridade do transformador tornou-se importante quando os primeiros transformadores CA foram desenvolvidos no final do século XIX. Nessa época, os primeiros a utilizarem o transformador aprenderam o que significava polaridade quando tentaram colocar alguns transformadores em paralelo para tentar obter mais capacidade. No entanto, eles descobriram que os transformadores só funcionavam corretamente em paralelo quando eles tinham a mesma tensão e os terminais eram conectados de um determinado modo.

Naquela época, não existia marcações padrão para os terminais do transformador e as placas de identificação não incluíam qualquer indicação de polaridade. Como não existia nenhum tipo de teste, muitas vezes a conexão desses primeiros transformadores era realizada por tentativa e erro, e os trabalhadores eram expostos a riscos criados por curtos-circuitos e transformadores danificados. Com o passar do tempo, a indústria reconheceu a necessidade de esclarecimento e padronização de vários aspectos da fabricação de transformadores, como a determinação da polaridade (HENNESEY, 2016).

Entender e conhecer a polaridade de um transformador é fundamental para compreender como os transformadores funcionam e como eles são utilizados. Compreender a polaridade é essencial para colocar em paralelo os transformadores monofásicos e conectar os transformadores de instrumentos (corrente e potencial) a dispositivos de medição e relés de proteção. Algumas vezes é preciso operar dois ou mais transformadores em paralelo e, para isso, não apenas as tensões de saída devem ser iguais, mas as polaridades instantâneas devem ser as mesmas.

A polaridade de um transformador nada mais é que uma referência que pode ser determinada pelo projetista, pelo fabricante ou mesmo por quem utiliza o transformador. A polaridade do transformador dependerá de qual direção as bobinas são enroladas ao redor do núcleo, ou seja, no sentido horário ou no sentido anti-horário, e também como os fios são trazidos das extremidades do enrolamento para os terminais.

A polaridade é muito importante para a operação de transformadores e equipamentos de proteção, por isso deve-se compreender de modo efetivo esse assunto. A polaridade é útil para entender e analisar as conexões e operações de um transformador, bem como testar relés e sistemas de proteção.

As indicações de polaridade para transformadores são bem estabelecidas por normas que se aplicam a todos os tipos de transformadores. Existem duas variedades de polaridade: a aditiva e a subtrativa. Ambas seguem as mesmas regras.

Os transformadores de potência e instrumento são subtrativos, enquanto alguns transformadores de distribuição são aditivos. A marcação de polaridade pode ser representada através de um ponto, um quadrado ou um X, ou pode ser indicada pelas marcações padronizadas do terminal do transformador.

Quando se usa corrente alternada, a polaridade de um enrolamento de um transformador monofásico em relação ao outro enrolamento desse mesmo transformador é utilizada para se conhecer as tensões nele induzidas através do fluxo mútuo. O objetivo é verificar se as tensões estão em concordância ou não.

Determinar a polaridade de um transformador nada mais é que conseguir identificar quais são os sentidos da força eletromotriz tanto no enrolamento primário quanto no secundário.

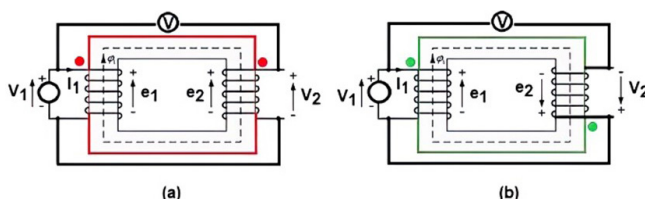
Quanto todos os transformadores tiverem a mesma polaridade, as forças eletromotrizes se anularão e a tensão resultante será nula. Já se a soma das forças eletromotrizes tiver um valor diferente de zero, surgirá uma corrente com valor alto.

Não é comum que seja necessário verificar a polaridade de um transformador, pois ela é confirmada nas placas de identificação. No entanto, pode haver alguma situação em que uma placa de identificação esteja faltando e a polaridade precise ser verificada. A verificação da polaridade de um transformador pode ser realizada através de um simples teste de tensão, chamado teste de polaridade.

### 3.1 REGRAS PARA COLOCAR A MARCA DA POLARIDADE

A polaridade dos transformadores depende do modo que as espiras dos enrolamentos primário e secundário são enroladas, ou seja, elas podem ter o mesmo sentido ou sentido oposto, como podemos ver na Figura 6 a seguir.

FIGURA 6 - POLARIDADE EM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO (A) SUBTRATIVA (B) E ADITIVA.

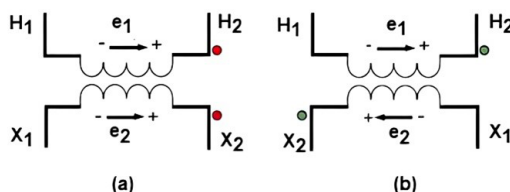


FONTE: A autora.

Na polaridade subtrativa, os enrolamentos estão no mesmo sentido, portanto, não haverá defasagem entre a entrada e a saída, pontos vermelhos, na figura 5(a). Na polaridade aditiva, os enrolamentos estão em sentidos opostos, portanto, haverá defasagem de  $180^\circ$  entre a entrada e a saída, pontos verdes, na figura 5(b).

A ABNT recomenda para os transformadores monofásicos que os terminais de tensão maior sejam identificados pelas letras  $H_1$  e  $H_2$  e os de tensão menor pelas letras  $X_1$  e  $X_2$  de modo que os sentidos das forças eletromotrizes estejam de acordo com os índices, como podemos ver na Figura 7: (a) polaridade subtrativa e (b) aditiva.

FIGURA 7 - RECOMENDAÇÃO DA ABNT COM RELAÇÃO AOS TERMINAIS DE TENSÃO



FONTE: A autora.

Para que os transformadores monofásicos possam operar em paralelo, suas tensões e suas polaridades instantâneas devem ser idênticas.

Se dois transformadores conectados em paralelo tiverem os terminais de polaridade trocados e conectados juntos, uma alta corrente aparecerá nos enrolamentos tanto do primário quanto do secundário. De modo efetivo, os dois enrolamentos secundários são conectados em série e, em seguida, **curto-circuitados**.

## 3.2 ENSAIO DE POLARIDADE

A ABNT NBR 5356-1 define quais são os métodos de ensaio recomendados para a determinação da polaridade de transformadores monofásicos, que são (ABNT, 1993):

- método do golpe indutivo com corrente contínua;
- método da corrente alternada;
- método do transformador padrão;
- método do transformador de referência variável.

Existem instrumentos de teste que são capazes de medir o defasamento angular entre as tensões primárias e secundária, assim, determinando a polaridade do transformador. Na impossibilidade desse instrumento, o método de maior aplicabilidade é o Método do Golpe Indutivo com corrente contínua.

Nesse método, liga-se uma fonte de tensão contínua entre os enrolamentos de alta tensão do transformador. Um voltímetro de zero central é conectado entre esses terminais. A polaridade positiva do voltímetro é ligada no positivo da fonte e esses em  $H_1$  para se obter uma deflexão positiva.

Após, insere-se o positivo do voltímetro em  $X_1$  e o negativo em  $X_2$  e observa-se a deflexão do ponteiro do voltímetro. Se as duas deflexões estiverem em sentidos opostos, a polaridade é aditiva, caso contrário subtrativa.

## 4 O TRANSFORMADOR IDEAL

Como já vimos, os transformadores podem elevar a tensão, abaixar a tensão ou apenas deixá-las iguais entre os enrolamentos primário e secundário, sem que se tenha uma perda significativa de potência.

A potência de saída de um transformador pode ser obtida pela potência de entrada do transformador menos as perdas internas, e é igual ao produto da tensão pela corrente. Os transformadores são especificados em kVA nominal, pois a potência nominal não depende do fator de potência.

## 4.1 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR IDEAL

Podemos definir um transformador ideal como aquele que não possui perdas no ferro e cobre, não tem dispersões de fluxo magnético, não possui relutância magnética e não tem saturação. Com a relutância do núcleo igual a zero, a permeabilidade do núcleo é infinita, sendo que a força magnetomotriz líquida que age no circuito magnético também será zero.

Nesse transformador, a potência de saída é equivalente à potência de entrada. A eficiência deste transformador é de 100%, o que significa que não há perda de energia dentro do transformador.

Um transformador é ideal em três condições: quando não possui fluxo de fuga, quando tem resistência de enrolamentos e quando há perda de ferro dentro do núcleo. As propriedades dos transformadores práticos e ideais não são semelhantes entre si.

### IMPORTANTE

Um transformador ideal é aquele em que não há perdas no ferro, não há indutância, o fio não apresenta resistência, ou seja, as perdas no cobre é nula, e o coeficiente de acoplamento entre as bobinas é unitário. No transformador ideal, a potência de entrada é igual à potência de saída.



## 4.2 FORÇAS CONTRAELETROMOTRIZES INDUZIDAS.

Conectando-se o enrolamento primário de um transformador a uma tensão alternada, existirá uma corrente no enrolamento primário. Essa corrente é denominada "corrente de excitação", a qual estabelece um fluxo magnético alternado e induz uma tensão nos enrolamentos primário e secundário. A tensão autoinduzida no enrolamento primário é uma força contra eletromotriz, ou seja, é uma força oposta em polaridade e praticamente igual em módulo à tensão aplicada, por esse motivo limita a corrente de excitação a um valor.

Com relação à tensão, a corrente de excitação primária está atrasada de aproximadamente 90°. Isso acontece devido ao fato de o enrolamento ser indutivo e possuir um valor baixo de resistência. A tensão induzida no enrolamento secundário resulta na indutância mútua. Em um transformador de potência típico, praticamente todo o fluxo é confinado ao núcleo magnético, apenas poucas linhas de fluxo são dispersas para o meio envolta do núcleo, desse modo, a mesma tensão é induzida em cada espira do enrolamento secundário. Assim, a tensão induzida total será diretamente proporcional ao número de espiras dos enrolamentos tanto do primário quanto do secundário.

## 4.3 RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

Conhecer e determinar a relação de espiras dos enrolamentos primário e secundário de um transformador é muito importante, pois é através dessa relação que será possível determinar por qual fator a tensão ou corrente será elevada ou abaixada. A relação de espiras também é chamada de relação de transformação de um transformador.

A tensão nas bobinas de um transformador é diretamente proporcional ao número de espiras das bobinas e a relação entre elas é dada por:  $\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$ , em que  $V_P$  é a tensão na bobina do primário,  $V_S$  é tensão na bobina do secundário,  $N_P$  é o número de espiras da bobina do primário e  $N_S$  é o número de espiras da bobina do secundário.

A razão  $V_P/V_S$  é denominada de relação de tensão (RT) e a razão  $N_P/N_S$  de relação de espiras (RE). Assim, temos que:  $RT = RE$ .

Por exemplo, se temos uma razão de tensão de 1:5 significa que, quando tem um volt no primário do transformador, há 5 V no secundário. Assim, a tensão do secundário é maior do que a tensão do primário, então chamamos esse transformador de elevador.

Se tivermos uma razão de tensão de 5:1, significa que quando o primário do transformador tiver 5 V, o secundário terá um 1V. Nesse caso, a tensão no secundário é menor do que a tensão no primário, assim, esse transformador recebe o nome de abaixador.

A corrente nos enrolamentos primário e secundário segue uma proporção inversa à relação de tensão e/ou relação de espiras, do seguinte modo:  $\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P}$ . Também é possível relacionar a corrente do primário e secundário com a relação de espiras através de:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \Rightarrow V_S = V_P \cdot \frac{N_S}{N_P}$$

$$\frac{V_P}{V_P \cdot \frac{N_S}{N_P}} = \frac{I_S}{I_P}$$

$$\frac{1}{1 \cdot \frac{N_S}{N_P}} = \frac{I_S}{I_P}$$

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

# RESUMO DO TÓPICO 2

**Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- A transferência de energia em um transformador ocorre através do campo magnético.
- Um transformador é um dispositivo estático, basicamente formado por duas bobinas isoladas eletricamente uma da outra e enroladas em torno de um mesmo núcleo e ligadas entre si através de um fluxo magnético.
- É possível descobrir a polaridade de um transformador através de um equipamento que mede o defasamento angular entre as tensões primárias e secundária.
- Um transformador ideal é um transformador que não possui nenhum tipo de perda, ou seja, é perfeito. No entanto, ele não existe na prática.

# AUTOATIVIDADE



1 Um transformador ideal é aquele que não possui nenhum tipo de perda, ou seja, a potência na entrada é a mesma da saída. Esse tipo de transformador não existe na prática, o que existe são características semelhantes. Com base no estudo do transformador ideal, sobre a relação de espiras e a tensão no secundário (dados:  $V_p=220\text{ V}$ ,  $N_1=100$  e  $N_2=10$ ), assinale a alternativa CORRETA:

- a)  10 e 22 V.
- b)  22 e 10 V.
- c)  0,1 e 220 V.
- d)  10 e 220 V.

2 A polaridade de um transformador é uma referência que serve para determinar a marcação da polaridade dos terminais dos enrolamentos, tanto primário quanto secundário, e a condição dos enrolamentos conforme sua disposição. Com base na determinação da polaridade de um transformador, analise as afirmativas a seguir:

- I- Determinar a polaridade de um transformador é identificar os terminais individuais das bobinas que possuem a mesma polaridade instantânea.
- II- Se todos os transformadores tiverem a mesma polaridade, as forças eletromotrizes se somarão e por consequência a tensão resultante será defasada de  $90^\circ$ .
- III- A polaridade de um transformador pode ser determinada pelo fabricante, pelo projetista e pelo próprio usuário.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a)  As afirmativas I e II estão corretas.
- b)  Somente a afirmativa II está correta.
- c)  As afirmativas I e III estão corretas.
- d)  Somente a afirmativa III está correta.

3 Michael Faraday, em 1831, construiu o primeiro transformador primitivo, que consistia em um núcleo de ferro fechado com duas bobinas sem conexão elétrica entre si. Atualmente, os transformadores funcionam baseados no princípio da indução. De acordo com o funcionamento dos transformadores, como corrente e tensão, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- A corrente de excitação estabelece um fluxo magnético contínuo e induz uma tensão nos enrolamentos primário e secundário
- A corrente de excitação primária está adiantada de aproximadamente  $90^\circ$ , devido ao fato do enrolamento ser indutivo e possuir um valor baixo de resistência.

- ( ) Em um transformador de potência típico, praticamente todo o fluxo é confinado ao núcleo magnético. Apenas poucas linhas de fluxo são dispersas para o meio envolto do núcleo. Desse modo, a mesma tensão é induzida em cada espira do enrolamento secundário.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - F - F.  
b) ( ) F - F - V.  
c) ( ) F - V - F.  
d) ( ) V - V - V.

- 4 Um ferro de solda do tipo pistola possui internamente um transformador abaixador, ou, como também é conhecido, transformador isolador AB, com uma relação de espiras de 300:1 e uma corrente de aquecimento no secundário de 500 A. Desse modo, calcule o valor da tensão no secundário desse transformador se o primário for conectado a uma fonte de 127 V.
- 5 Os transformadores, apesar de serem um dispositivo simples, possuem diversas aplicações importantes, desde levar energia às casas e fábricas até mesmo ser utilizados em máquinas de solda elétrica. Para conseguir fundir peças metálicas, a máquina de solda precisa atingir uma corrente elétrica de 500 A. Para isso, é utilizado um transformador que está ligado à rede elétrica com tensão de 127 V. Esse transformador fornece 50 A de corrente. Neste contexto, qual deverá ser a relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário do transformador e a tensão de saída?



# ANÁLISE DO TRANSFORMADOR REAL

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, neste tópico, abordaremos o transformador real em vazio, ou seja, o transformador sem carga. Abordaremos o transformador com núcleo linear e ferromagnético real. Em seguida, estudaremos o transformador real já com uma carga aplicada.

Por fim, veremos alguns tipos de circuitos equivalente, como o L, a impedância série equivalente e os circuitos com reatância série equivalente. Um circuito elétrico equivalente permite o estudo e a compreensão da forma de operar de um transformador. Para o desenvolvimento de um circuito elétrico equivalente que possa ajudar o pesquisador, é preciso conhecer o modo de operação.

O transformador ideal é aquele transformador que não possui perdas, ou seja, as bobinas primária e secundária possuem acoplamentos perfeitos e não existem linhas do campo magnético se dissipando. Também não existem perdas nos enrolamentos e no núcleo.

Já nos transformadores reais há perdas no núcleo ou no entreferro, que são as perdas por corrente de magnetização, há perdas por histerese e também por efeito joule.

## 2 O TRANSFORMADOR REAL EM VAZIO (SEM CARGA) - CORRENTE DE EXCITAÇÃO

Os transformadores ideais não existem na realidade. O que são construídos são os transformadores reais, ou seja, duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético. O que se pode afirmar é que um transformador real possui características que se aproximam de um transformador ideal.

A corrente de excitação do transformador é a corrente necessária para energizar o núcleo. Mesmo quando o transformador não está com carga, ele consumirá uma pequena quantidade de corrente devido às perdas internas. A corrente de excitação é composta por dois componentes: as perdas sem carga e a potência reativa.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Um transformador sem carga, quando é energizado em tensão constante, dissipa uma perda de energia. Essa perda de potência representa um custo para o usuário durante a vida útil do transformador.

Considerando um transformador sem nenhuma carga ligado no secundário, ou seja, ele está em aberto e conectando uma fonte de energia elétrica nesse ramo, uma corrente elétrica surgirá no circuito primário. Essa corrente que surge no primário é a corrente necessária para produzir fluxo em um núcleo ferromagnético e é formada por duas componentes: a corrente de magnetização  $i_M$ , ou como também é chamada de corrente de excitação; e a corrente de perdas no núcleo  $i_{p+H}$ , que é a soma da corrente por perdas de histerese e correntes parasita no núcleo.

A corrente de excitação é a corrente necessária para produzir o fluxo no núcleo do transformador. A perda no núcleo magnético do transformador ocorre devido às propriedades magnéticas. Assim, a perda de ferro em transformadores é a combinação de perda de histerese ( $P_H$ ) e perda de corrente parasita ( $P_e$ ).

## 2.2 EM UM NÚCLEO LINEAR IDEAL

Considere uma carga com impedância infinita conectada no transformador, ou deixe o secundário aberto. Em qualquer um desses casos teremos uma corrente no secundário igual a zero, porém existe uma pequena corrente, chamada de excitação que está no primário desse transformador que ocorre em regime permanente. Essa corrente, apesar de pequena, circulará e produzirá um fluxo alternado no circuito magnético que induzirá uma força eletromotriz no enrolamento primário.

Se considerarmos uma resistência nula nos enrolamentos do transformador, teremos uma tensão induzida no primário igual à tensão da fonte. Quando isso acontece, temos uma corrente com valor inferior, porém, atrasada de  $90^\circ$  em relação à tensão aplicada.

Esse fato se dá pelo fato de o circuito ser somente indutivo, pois só existe as bobinas dos enrolamentos e, se for aplicado na alimentação uma tensão senoidal, a forma de onda do fluxo também será senoidal.

## 2.3 EM UM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO REAL

O valor da corrente de excitação é determinada, principalmente, pela reatância indutiva do enrolamento primário e pode ser muito alta e mesmo assim não absorver muita potência ativa. Isso acontece porque a tensão e a corrente estão defasadas entre si de aproximadamente  $90^\circ$ .

Ao se energizar o transformador pela primeira vez, ou seja, aplicar uma tensão no seu enrolamento primário ou conectar à linha, uma corrente de energização ou de partida transitória fluirá (corrente de *inrush*). O valor da corrente de *inrush* pode ser até 15 vezes mais alta que a corrente nominal, dependendo do estado magnético do núcleo e do ponto da forma de onda de tensão no qual o transformador foi energizado. Essa corrente ao longo dos ciclos diminuirá de modo exponencial até se aproximar do fluxo normal da corrente de magnetização.

Como o ferro possui propriedades magnéticas não lineares, a forma de onda da corrente de excitação é diferente da forma de onda do fluxo, portanto a corrente de excitação de uma forma de onda de fluxo senoidal será diferente de uma senoidal.

## 3 O TRANSFORMADOR REAL COM CARGA - CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES

Um transformador real é estudado a partir de um circuito equivalente, em que os parâmetros como as perdas associadas ao núcleo e às perdas associadas aos enrolamentos que foram desprezados no transformador ideal devem ser considerados.

Para que um modelo seja útil, ou seja, possa ser utilizado, deve existir um modo de se determinar os valores dos parâmetros do modelo. Dois testes são utilizados para determinar os valores desses parâmetros do circuito equivalente: testes de **curto-circuito** e de circuito **aberto**.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Para se criar um modelo, o mais perfeito e exato possível do comportamento de um transformador real, é necessário levar em consideração as perdas que ocorrem nele. Essas perdas serão representadas por componentes eletrônicos, como resistores e indutores. As perdas representadas são:

- **perdas no cobre ( $I^2R$ ):** esse tipo de perda representa as perdas devido ao aquecimento resistivo nos enrolamentos primário e secundário do transformador;
- **perdas por corrente parasita ou corrente de Foucault:** essas perdas são aquelas devido ao aquecimento resistivo no núcleo do transformador que surge quando uma corrente alternada flui pelo enrolamento e surge um campo magnético variável no núcleo. Elas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao transformador;
- **perdas por histerese:** são as perdas associadas às propriedades ferromagnéticas, por apresentarem um atraso entre a indução e o campo magnético. Elas são não lineares;
- **fluxos de dispersão:** são aqueles que escapam do núcleo e passam através de apenas um dos enrolamentos do transformador. Eles se dispersam e produzem uma indutância de dispersão nas bobinas primária e secundária.

O transformador não possui nenhuma peça rotativa, então pode-se dizer que ele não possui nenhuma perda ocasionada por partes mecânicas, como as perdas por vento ou fricção. Esse é um dos motivos por ele possuir uma alta eficiência operacional, sendo que na maioria das vezes chega a ser superior a 90%. No entanto, todo dispositivo elétrico possui perdas e, como foi visto, o transformador também possui. Essas perdas aparecem na forma de calor e fazem com que aumente a temperatura do equipamento, diminuindo, assim, a sua eficiência, e causando um aumento de temperatura e uma queda na eficiência.

Desse modo, tem-se que a eficiência de um transformador é igual à razão entre a potência de saída do enrolamento secundário e a potência de entrada no enrolamento do primário. Caso o transformador seja ideal, como ele não possui nenhum tipo de perda, ele possui 100% de eficiência. Assim, a perda de um transformador real é dada por (PETRUZELLA, 2013):  $\%Eficiência = \frac{Potência\ de\ Saída\ (W)}{Potência\ de\ Entrada\ (W)} \cdot 100$ .

É importante destacar que a eficiência de um transformador é uma função somente das perdas no cobre e no núcleo do transformador e não possui nenhum tipo de relação com o fator de potência.

A regulação de tensão é outro fator importante em um transformador. Ele é definido como sendo a medida de quanto um transformador de potência pode manter constante a tensão no secundário, a partir de uma tensão constante no primário e para uma grande variação da corrente de carga.

A regulação de tensão em um transformador irá depender da impedância da carga e das perdas do cobre do transformador. Os transformadores de potência e também os utilizados na iluminação, dependendo do tamanho e da aplicação, possuem normalmente uma regulação de 2% a 4%.

A medida da regulação de tensão nos transformadores é a diferença entre a tensão a vazio (sem carga) e a plena carga (carga nominal), dada por:

$$\% \text{Regulação de tensão} = \frac{V_S(\text{vazio}) - V_S(\text{plena carga})}{V_S(\text{plena carga})} \cdot 100.$$

Um exemplo de como é utilizado a equação: suponha um transformador que fornece 120 V sem carga e 110 V a plena carga (carga nominal), a regulação teria um valor de seria de 9,09%.

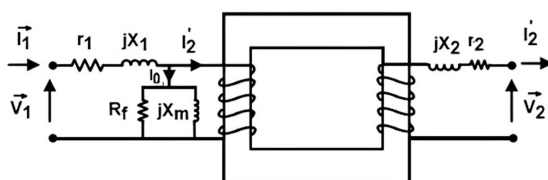
## 3.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES EM "L"

Um transformador real pode ser modelado através de um circuito equivalente. Nesse circuito, o transformador real é modelado através de resistências e indutâncias, em que cada um desses componentes é responsável por representar uma perda que faz parte do transformador ideal. As perdas que estão representadas no circuito equivalente são: as perdas por Joule nos enrolamentos que são realizadas pelas resistências  $r_1$  e  $r_2$ , respectivamente, a resistência dos enrolamentos primário e secundário, as perdas no ferro, que são representadas através de uma resistência, chamada resistência de perdas no ferro,  $R_f$ , que ficará em paralelo com a força eletromotriz induzida pelo fluxo mútuo.

Além dessas perdas, também são representados os efeitos dos fluxos de dispersão no primário e no secundário do transformador através das reatâncias indutivas, chamadas de reatâncias de dispersão,  $X_1$  e  $X_2$ .

É colocado uma reatância indutiva,  $X_m$ , em paralelo com a força eletromotriz, induzida do primário, por onde fluirá a corrente  $I_0$ , resultando no circuito apresentado na Figura 8. Esta reatância recebe o nome de reatância de magnetização do transformador.

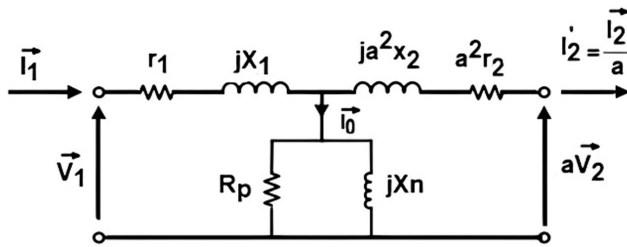
FIGURA 8 – CIRCUITO APRESENTANDO A PERMEABILIDADE FINITA



FONTE: A autora.

O transformador da Figura 8 possui enrolamentos com resistências nulas, não há dispersão, nem perdas no ferro e permeabilidade infinita. Essas são as características que representam um transformador ideal. Desse modo, pode-se refletir o circuito do secundário para o primário e, assim, é obtido o circuito equivalente do transformador real, como podemos ver na Figura 9.

FIGURA 9 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR REAL



FONTE: A autora.

Nota-se na Figura 9 que o circuito equivalente apresentado possui os elementos correspondentes às principais características que um transformador real possui.

### 3.3 CIRCUITO IMPEDÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE

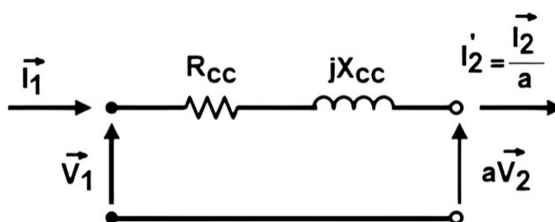
O circuito elétrico equivalente apresentado na Figura 9 representa um circuito completo, em que se observam os principais fenômenos que estão presentes em um transformador real. No entanto, foram realizados estudos que comprovam que não é preciso tanta precisão.

Sendo assim, é possível fazer algumas simplificações, como:

- o cobre, por exemplo, é um excelente condutor, assim, são reduzidas as resistências dos enrolamentos;
- outra simplificação que se pode fazer é com relação à impedância resultante quando se faz o paralelo da resistência de perdas no ferro com a reatância de magnetização. Essa impedância resultante é muito maior que as demais impedâncias que existem no circuito equivalente do transformador.

Assim, na Figura 10, o circuito equivalente apresentado é uma simplificação, considerando a impedância de magnetização muito maior que as demais impedâncias do transformador.

FIGURA 10 – CIRCUITO SIMPLIFICADO



FONTE: A autora.

No caso:  $R_{CC} = r_1 + a^2 r_2$  e  $X_{CC} = x_1 + a^2 x_2$ , sendo que  $a$  é dado por  $a = \frac{V_P}{V_S}$ .

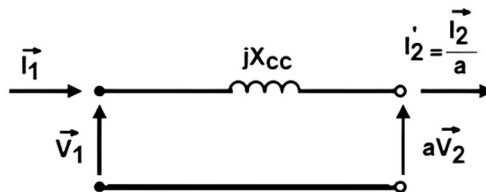
O transformador possui uma propriedade que é alterar os níveis de tensão e corrente. O interessante é que o transformador também consegue alterar a razão entre essas duas grandezas e, por consequência, alterar a impedância. Dessa maneira, a impedância aparente do primário é dada por:  $\vec{Z} = a^2 Z$ .

Nota-se que a impedância aparente do transformador depende da relação de transformação.

### 3.4 CIRCUITO REATÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE

As resistências dos enrolamentos também podem ser desprezadas. Assim, temos o circuito mais simples dos circuitos equivalentes do transformador, como podemos ver na Figura 11.

FIGURA 11 – CIRCUITO MAIS SIMPLES DA REPRESENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR



FONTE: A autora.

Por exemplo: suponha que um transformador de 150 kVA – 5.500/340 (V) – 60 Hz apresenta as reatâncias de dispersão:  $x_1 = 16\Omega$  e  $x_2 = 0,06\Omega$ , despreze as resistências e a impedância de magnetização. Determine o circuito equivalente desse transformador.

O primeiro passo é determinar a relação de transformação, ou seja, o valor de  $a$ , através da equação:  $a = \frac{V_P}{V_S} = \frac{3400}{340} = 10$ . Agora é calcular  $X_{CC}$ :

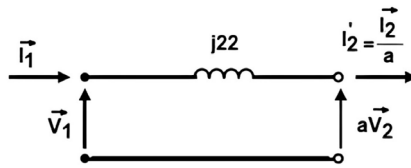
$$X_{CC} = x_1 + a^2 x_2$$

$$X_{CC} = 16 + 10^2 \cdot 0,06$$

$$X_{CC} = 22$$

Assim, o circuito equivalente é dado conforme a Figura 12.

FIGURA 12 – CIRCUITO EQUIVALENTE



FONTE: A autora.

A escolha de qual circuito equivalente utilizar vai depender de quanta precisão será necessária, por exemplo, o circuito apresentado na Figura 9 é um circuito equivalente completo, ou seja, a precisão é muito grande. Diferentemente do circuito da Figura 11, que requer muito menos precisão.



## ATENÇÃO

É possível determinar experimentalmente os valores das indutâncias e resistências do modelo do circuito equivalente do transformador. Uma aproximação adequada desses valores pode ser obtida através dos ensaios a vazio e de curto-circuito.

# LEITURA COMPLEMENTAR



## TRANSFORMADORES, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

Henrique Mattede

Você sabe o que são transformadores, para que servem e quais são as suas características? Os transformadores elétricos são máquinas extremamente importantes e fundamentais para os **circuitos elétricos**, com diversas aplicações. Sabendo da importância dos transformadores elétricos, o Mundo da Elétrica explica neste artigo o que é transformador, suas aplicações e características. Vamos lá pessoal!

### Transformadores: O que são?

Assim como os motores e geradores, os transformadores também são considerados máquinas elétricas, porém são máquinas elétricas em repouso e que trabalham apenas em circuitos de corrente alternada. Os transformadores têm a capacidade de transmitir a energia elétrica de um circuito para o outro através de campos magnéticos, transformando os valores de tensão e de corrente ao mesmo tempo.

Por causa da ação deste campo magnético, os transformadores possuem a capacidade de converter a energia elétrica CA, com uma determinada frequência e tensão, em outra energia elétrica CA de mesma frequência, porém com nível de tensão diferente, ou seja, ele é capaz de elevar ou diminuir a tensão de saída com relação a sua entrada, além disso os transformadores servem como dispositivo isolador no circuito.



### Características e aplicações de um transformador

Existem diversos tipos de transformadores, em que cada um deles têm uma construção, tamanho e finalidade específica. Um detalhe importante sobre os transformadores é que, teoricamente, eles têm de transferir toda a potência aplicada no primário para o secundário, por isso corre mudança, tanto na tensão quanto na corrente de saída com relação a sua entrada.

## Transformadores: aplicações

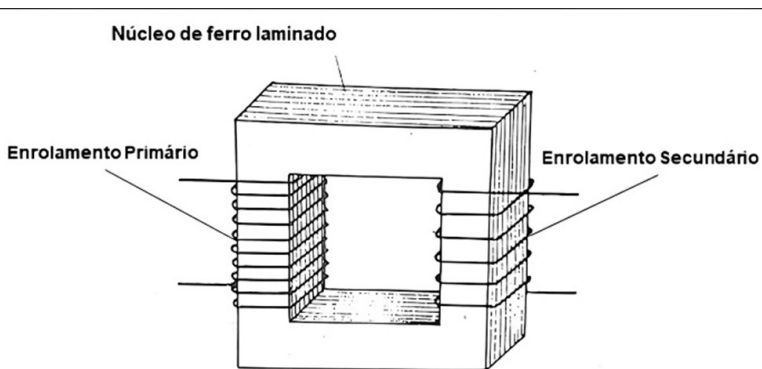
Os transformadores são muito usados em dispositivos e instalações elétricas, operando como transformador elevador, abaixador ou isolador. Aplicação muito comum para os transformadores é no transporte de grande quantidade de energia elétrica para longas distâncias, assim reduzindo as quedas de tensões ao longo dos percursos.

Neste transporte da energia elétrica, após a geração, os níveis de tensão são elevados para a energia ser transportada pelas linhas de transmissão, para diminuir as quedas de tensão. Depois de percorrer grandes distâncias, estes valores de tensão são reduzidos para então serem distribuídos para os consumidores.

Outra aplicação interessante que podemos citar para os transformadores é nos circuitos conversores, pois além de serem úteis para controlar os níveis de tensão eles também são úteis como isoladores, por exemplo, eliminando ruídos [...].

## Transformadores: constituição

O modelo básico de um transformador, que está representado na imagem a seguir, consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético. Sendo que normalmente essas bobinas não estão interligadas diretamente entre si, de forma com que a única conexão entre essas bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo. Devido a essa característica que o transformador também é usado como isolador nos circuitos elétricos.



## Estrutura básica de um transformador elétrico

Os transformadores possuem uma entrada e uma saída, sendo o enrolamento primário e o secundário, respectivamente. Dessa forma, ligamos uma fonte de energia elétrica CA no enrolamento primário do transformador, enquanto no enrolamento do secundário do transformador conectamos as cargas, pois é onde será fornecida energia para elas. É importante destacar que além dos enrolamentos primários e secundários, se houver um terceiro enrolamento, ele será denominado como enrolamento terciário.

## Transformadores: relações

Ao realizar cálculos e dimensionamentos dos transformadores usamos um modelo ideal, isto é, não consideramos perdas magnéticas. Isso significa que a permeabilidade magnética do núcleo é considerada infinita e a relutância é nula, que facilita a condução do fluxo magnético. A seguir temos a imagem que representa as relações entre tensão, corrente e número de espiras do primário e do secundário de um transformador.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

(a)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

(b)

$U_1$  = Tensão no primário  
 $U_2$  = Tensão no secundário  
 $N_1$  = Número de espiras no primário  
 $N_2$  = Número de espiras no secundário  
 $I_1$  = Corrente no primário  
 $I_2$  = Corrente no secundário

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

(c)

## Relações de tensão, corrente e número de espiras de um transformador

### Transformadores: rendimento

Os **transformadores são máquinas elétricas** de alto rendimento e isso é devido à falta de qualquer peça móvel no seu interior, não havendo fricções como nos motores e geradores de energia, além disso não existe perdas mecânicas no transformador. Um detalhe importante com relação aos transformadores é que, quanto maior a potência maior será o rendimento do transformador.

Podemos dizer que as perdas de um transformador são perdas elétricas e perdas magnéticas, em que:

- as perdas elétricas, também chamadas de perdas no cobre, ocorrem devido à resistência ôhmica dos enrolamentos do transformador;
- as perdas magnéticas, também chamadas de perdas no núcleo, ocorrem por causa do campo magnético alternado e as correntes induzidas no núcleo de ferro do transformador.

[...]

FONTE: MATTEDE, H. **Transformadores, características e aplicações**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/transformadores-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 1º fev. 2022.

# RESUMO DO TÓPICO 3

**Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- Um transformador consiste apenas em perdas elétricas, que são as perdas de ferro e perdas de cobre, e que as perdas do transformador podem ser semelhantes às perdas de uma máquina CC, exceto pelo fato de os transformadores não possuírem perdas mecânicas.
- O transformador real, ou seja, aquele em que a potência de entrada é igual à potência de saída, diferentemente do ideal, possui diversos tipos de perdas.
- É importante se obter o circuito equivalente de um transformador para se determinar os parâmetros do transformador.
- Um transformador real é estudado a partir de um circuito equivalente, por isso a importância de se determinar os parâmetros e escolher a aproximação correta.

# AUTOATIVIDADE



- 1 O valor da corrente de *inrush* pode ser até 15 vezes mais alta que a corrente nominal, dependendo do estado magnético do núcleo e do ponto da forma de onda de tensão no qual o transformador foi energizado. Sobre a corrente de *inrush*, assinale a alternativa CORRETA:
- a) ( ) A corrente de *inrush* é uma corrente de energização ou de partida transitória.
  - b) ( ) A corrente *inrush* é determinada, principalmente, pela reatância indutiva do enrolamento primário e pode ser muito alta.
  - c) ( ) A corrente *inrush* é uma corrente parasita, que ocorre devido ao aquecimento resistivo no núcleo do transformador.
  - d) ( ) A corrente *inrush* é uma corrente que surge devido aos efeitos dos fluxos de dispersão no primário e no secundário.
- 2 O transformador ideal é um transformador que não possui perdas, ou seja, as bobinas primária e secundária possuem acoplamentos perfeitos. Além disso, não existem linhas do campo magnético se dissipando, nem perdas nos enrolamentos e no núcleo. Com base na teoria dos transformadores, analise as afirmativas a seguir:
- I- Nos transformadores reais, ocorrem perdas no núcleo ou no entreferro, que são as perdas pela tensão de magnetização.
  - II- Algumas perdas que existem no transformador são as perdas por histerese e por efeito joule.
  - III- Os transformadores ideais não existem na realidade, porém, é possível afirmar que um transformador real possui características que se aproximam de um transformador ideal.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas II e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 Um transformador ideal é um transformador sem perda de energia, ou seja, eles têm acoplamento perfeito, possuem enrolamento sem perdas, e as bobinas primária e secundária possuem autoindutâncias infinitas. Além disso, os enrolamentos de um transformador ideal não têm resistência ôhmica e perda de núcleo. No entanto, esse transformador não existe na realidade. De acordo com os princípios e funcionamento dos transformadores reais, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) As perdas no cobre são aquelas perdas que ocorrem devido ao aquecimento resistivo nos enrolamentos do transformador: primário e secundário.
- ( ) As perdas por corrente parasita são as perdas que ocorrem devido ao aquecimento resistivo no núcleo do transformador e são proporcionais ao quadrado da corrente aplicada ao transformador.
- ( ) As perdas por histerese são aquelas perdas que estão ligadas à variação da magnetização do núcleo do transformador. Elas são lineares.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - F - F.
- b) ( ) V - F - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 Os transformadores reais apresentam, diferentemente dos transformadores ideais, diversas perdas, como no cobre e no núcleo. A perda no cobre é devido à resistência ôhmica dos enrolamentos. Após um ensaio, um transformador apresentou os seguintes valores: resistência do primário de  $10 \Omega$ , resistência do secundário:  $0,5 \Omega$ , corrente no primário:  $1,5 \text{ A}$  e corrente no secundário:  $0,4 \text{ A}$ . Determine as perdas no cobre desse transformador.

5 Os transformadores são equipamentos que fornecem energia através de um enrolamento secundário, quando se liga uma fonte no primário. O circuito equivalente do transformador facilita os cálculos e serve para explicar as características detalhadas do transformador do mundo real. Um transformador monofásico possui tensão nominal 10 vezes maior no primário que no secundário. Uma carga está ligada nesse transformador e possui impedância que está relacionada à tensão e à corrente no secundário de  $Z = 1,5 + j4,5 \Omega$ . Nesse contexto, calcule o valor da impedância equivalente  $Z$  relacionada ao primário.

# REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: transformador de potência. Rio de Janeiro: ABNT, 1993. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5356.PDF>. Acesso em: 14 fev. 2022.

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento**. Barueri: Grupo GEN, 2018.

HENNESSEY, M. Transformer polarity. 2016. Disponível em: <https://energycentral.com/c/iu/transformer-polarity>. Acesso em: 9 fev. 2022.

MATTEDE, H. **Transformadores, características e aplicações**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/transformadores-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 1º fev. 2022.

PETRUZELLA, F. D. **Eletrotécnica II**. São Paulo: Grupo A, 2013.

SIMONE, G. A. **Transformadores**: teoria e exercícios. São Paulo: Saraiva, 2010.

SOUZA, D. *et al.* **Eletrotécnica**. São Paulo: Grupo A, 2017.



# ESTUDO DAS PERDAS, ENSAIOS E AUTOTRANSFORMADOR

## OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

**A partir do estudo desta unidade, você deverá ser capaz de:**

- compreender o que é o rendimento e a regulação de um transformador e a sua importância na escolha do equipamento;
- conhecer e saber realizar os diferentes ensaios de transformadores para obtenção dos parâmetros elétricos;
- conhecer o princípio básico do autotransformador, suas vantagens e desvantagens em relação a um transformador isolador;
- saber como utilizar um transformador isolador na configuração de autotransformador para aumento da potência nominal.

## PLANO DE ESTUDOS

Esta unidade está dividida em três tópicos. No decorrer dela, você encontrará autoatividades com o objetivo de reforçar o conteúdo apresentado.

TÓPICO 1 – RENDIMENTO E REGULAÇÃO

TÓPICO 2 – ENSAIOS E CONEXÕES

TÓPICO 3 – O AUTOTRANSFORMADOR



## CHAMADA

Preparado para ampliar seus conhecimentos? Respire e vamos em frente! Procure um ambiente que facilite a concentração, assim absorverá melhor as informações.



# **CONFIRA A TRILHA DA UNIDADE 2!**

Acesse o  
QR Code abaixo:



# RENDIMENTO E REGULAÇÃO

## 1 INTRODUÇÃO

Esta unidade foi pensada para você compreender a importância do estudo das perdas e dos ensaios em um transformador e autotransformador, que é utilizado para reduzir custos ou em situações específicas, em que se pode optar por sua utilização ou construção.

Um transformador possui muitas aplicações, sendo que uma delas é elevar ou baixar os valores da tensão e corrente elétrica. Sua construção é composta por dois enrolamentos que compartilham o mesmo núcleo magnético. A alimentação do transformador provoca a variação do campo magnético, uma vez que a tensão a ser transformada é alternada.

No Tópico 1, abordaremos o que é o rendimento e a regulação de um transformador. Seguiremos, então, com os tipos de ensaios existentes, em curto-circuito e circuito aberto, e os tipos de conexões trifásicas. Por meio dos ensaios, podemos calcular as perdas. O custo das perdas sem carga ou com ferro pode ser determinado a partir do preço médio anual que uma concessionária paga pela energia. Isso só é possível porque essas perdas permanecem constantes durante o ano. Já as perdas de carga ou com cobre variam de acordo com a carga do transformador. Desse modo, o custo dessas perdas, em um mercado liberalizado, deve levar em consideração a carga do transformador e o preço da energia a cada hora do ano. A mudança nas perdas de carga é proporcional ao quadrado da curva de carga do transformador.

Abordaremos, ainda, sobre o autotransformador, sendo necessário enfatizar que ele não compete com o transformador convencional, pois tem suas próprias aplicações. Veremos, então, como ele é formado, assim como suas vantagens, desvantagens e aplicações.

## 2 RENDIMENTO

Nesta etapa, discutiremos sobre a regulação e eficiência da tensão de um transformador. O transformador é um equipamento elétrico estático que tem a função de transferir a energia de um sistema de tensão para outro por meio da indução eletromagnética.

O transformador tem muitas aplicações, e uma delas é que pode ser utilizado para variar o nível de potência. Desse modo, é muito importante ter um conhecimento da teoria, dos fundamentos do projeto e do desempenho dos transformadores, pois é essencial para a compreensão da operação dos sistemas de potência, de controle e de muitos sistemas eletrônicos. Vale mencionar, nesse contexto, que todos os transformadores envolvidos nesses sistemas operam, fundamentalmente, do mesmo modo e servem como base para a compreensão dos princípios eletromagnéticos.

Como já foi mencionado, o transformador possui diversos usos, assim, de acordo com Simone (2010), pode ser útil para:

- mudança de níveis de tensão e corrente em um sistema elétrico, porém sem nenhuma alteração na frequência da onda fundamental;
- casamento de impedâncias em estágio de sistema de sonorização, tanto de áudiofrequência quanto de radiofrequência;
- isolamento elétrico de dois ou mais estágios em planta elétrica de centro de avaliação médica, equipamentos de laboratório de pesquisa, transmissão e geração de sinais, centro de processamento de dados, computação, eletrônica etc.

A primeira das três funções apresentadas, possivelmente, é a que mais veremos, pois ela é constantemente aplicada nas redes de distribuição de energia, nos ramais de fornecimento, nas redes de transmissão e nas usinas geradoras de energia elétrica.

Os transformadores de distribuição são bastante utilizados na etapa final da utilização da energia elétrica. No Brasil, é muito comum utilizar a Classe de Tensão de Isolamento de 15 kV para a distribuição primária e a classe de 0.6 kV para a distribuição secundária, ou seja, para a distribuição ao consumidor residencial, comercial e pequenas fábricas.

Um transformador real possui impedância em série em seu interior, e a tensão de saída varia com a carga, mesmo que a tensão de entrada permaneça constante. Para comparar os transformadores nesse aspecto, costuma-se definir uma grandeza, que é denominada de **Regulação de Tensão** (RT). A RT do transformador pode ser definida como uma variação do valor da tensão existente na entrada e saída do transformador. Geralmente, ela é utilizada no sistema de energia para demonstrar a diferença percentual de tensão entre a tensão sem carga e a tensão em plena carga.

Quando se projeta um transformador, é necessário ter certeza de que ele é eficiente. Para tanto, há princípios fundamentais que precisamos conhecer, como a quantidade de enrolamentos e as perdas do núcleo e do fluxo magnético. Assim, temos que a **força magnetomotriz** (fmm) é definida como:  $fmm = N \cdot i$ , em que N é o número de espiras do fio na bobina e i é a corrente. A medida para fmm é dada por amperes-espiras.

A relação entre a fmm e o fluxo no núcleo é definida como:  $\phi = \frac{fmm}{R}$ , na qual temos que R é a **relutância** total no núcleo. A relutância é a contrapartida da resistência elétrica e obedece às mesmas regras que as resistências em um circuito elétrico.

Como todo dispositivo elétrico, nos transformadores também ocorrem perdas. As principais perdas no transformador são divididas em **perdas nos enrolamentos**, denominadas perdas de cobre; e perdas no circuito magnético, denominadas **perdas de ferro**.

Os transformadores que são colocados em estruturas presentes nas vias públicas têm medição na alta tensão. Os consumidores residenciais, comerciais e fabris de pequena demanda possuem seus equipamentos de medição colocados na baixa tensão após o transformador e, nesse caso, é a concessionária que arca com o custo das perdas totais nas unidades transformadoras do sistema de distribuição urbano.

Os transformadores que são considerados energeticamente eficientes atingem um objetivo importante. Como o preço da energia varia a cada hora, o mesmo ocorre com o custo das perdas. Desse modo, as variações sazonais de carga também aumentam os benefícios associados aos transformadores eficientes, principalmente se a época de carga máxima coincidir com os preços máximos de energia.

## 2.1 PERDAS MAGNÉTICAS NO NÚCLEO

As **perdas por histerese** ocorrem cada vez que o campo magnético é invertido. Uma pequena quantidade de perda de energia se dá devido à histerese dentro do núcleo. Para um determinado material de núcleo, esta perda é proporcional à frequência e é uma função da densidade de fluxo de pico que ele está sujeito. Elas também produzem calor dentro do núcleo do transformador.

A **magnetostricção** é a propriedade que os materiais ferromagnéticos possuem de se deformarem pela presença de um campo magnético externo. Trata-se de uma propriedade inerente ao material, ou seja, que não muda com o tempo. Nos transformadores, a magnetostricção ou magnetostricção diz respeito a um efeito no fluxo magnético em um material ferromagnético, como o núcleo. Esse efeito faz com que o material se expanda e se contraia fisicamente a cada ciclo do campo magnético, o que produz o zumbido comumente associado aos transformadores e causa perdas devido ao aquecimento por fricção em núcleos suscetíveis.

## 2.2 PERDAS JOULE NAS RESISTÊNCIAS ÔHMICAS DOS ENROLAMENTOS

Em um mundo ideal, um transformador poderia ser utilizado para alterar as tensões perfeitamente sem diminuir a potência geral. Nesse caso, a energia da bobina primária seria totalmente transferida para a secundária. A perda mais simples que temos em um transformador é a **perda por Joule ou calor**. Ela ocorre devido à resistência nos fios a que todos os aparelhos elétricos são suscetíveis. Com maior corrente e maior resistência nos fios, a perda aumenta, como em qualquer circuito elétrico. O cálculo dessa perda é proporcional ao quadrado da corrente vezes a resistência.

As perdas no transformador também surgem da resistência do enrolamento e são resultantes da corrente que flui através dos enrolamentos, causando aquecimento resistivo dos condutores. Na presença de frequências mais altas, os dois efeitos peliculares e de proximidade criam resistência e perdas de enrolamento adicionais.

## 2.3 PERDAS SUPLEMENTARES OU ADICIONAIS

Há outros tipos de perdas como aquelas causadas por correntes parasitas que ocorrem quando os materiais ferromagnéticos são utilizados. Os materiais ferromagnéticos são bons condutores. Um núcleo sólido feito deste material também constitui uma única espira em curto-circuito em todo o seu comprimento.

As **correntes parasitas**, portanto, circulam dentro do núcleo em um plano normal ao fluxo e são responsáveis pelo aquecimento resistivo do seu material. A perda de corrente parasita é uma função complexa do quadrado da frequência de alimentação e do quadrado inverso da espessura do material do núcleo.

As **perdas mecânicas**, além da magnetostricção, são aquelas provocadas pelo campo magnético alternado que causa a fem entre os enrolamentos primário e secundário. Essas perdas incitam vibrações, aumentando o zumbido e consumindo uma pequena quantidade de energia.

As **perdas por dispersão** já são um tipo de perda provocadas pelas indutâncias de fuga. Qualquer fluxo de fuga que intercepte materiais condutores próximos, como a estrutura de suporte do transformador, dará origem às correntes parasitas e, assim, será convertida em calor. Há, também, as perdas chamadas radiativas que ocorrem devido a oscilações no campo magnético oscilante, mas que, geralmente, são pequenas.

Uma das perdas que ocorre em um transformador são as perdas por ocasião da resistividade do cobre utilizado para a fabricação do fio magnético esmaltado (CARVALHO, 2011). Essa perda, nas quais a resistência em série é responsável, é dada por:  $P_{cu} = I^2 \cdot R$

As perdas por histerese e correntes parasitas são perdas contabilizadas pelo resistor  $R_c$ . Ambas causam aquecimento no material do núcleo. Geralmente, são combinadas e chamadas de perda do núcleo. Além disso, elas devem ser consideradas no projeto de qualquer máquina ou transformador.

Vamos analisar um exemplo a seguir para reforçar o aprendizado.

Considere um transformador abaixador de 10:1 de 6 kVA que tenha uma especificação para a corrente do secundário com carga máxima de 60 A. Este transformador foi submetido a um teste de curto-circuito. Para determinar a perda no cobre com carga máxima, ele apresenta uma leitura no wattímetro de 120 W. Se a resistência do enrolamento do primário for de  $0,5 \Omega$ , calcula-se a resistência do enrolamento do secundário e a perda de potência no secundário do seguinte modo:

- para calcular  $I_p$ , a corrente no primário, com carga máxima, utiliza-se a equação:

$\frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P}$ . Assim, temos que:

$$I_P = I_S \cdot \frac{N_S}{N_P}$$

$$I_P = 60 \cdot \frac{1}{10}$$

$$I_P = 6A$$

- o próximo passo é determinar o valor da  $R_S$ , a resistência no secundário, a partir da equação da perda no cobre:

$$I_S^2 \cdot R_S = I_P^2 \cdot R_P$$

$$I_S^2 \cdot R_S = 100 - I_P^2 \cdot R_P$$

$$R_S = \frac{100 - I_P^2 \cdot R_P}{I_S^2}$$

$$R_S = \frac{100 - 6^2 \cdot 0,5}{60^2}$$

$$R_S = 0,023 \Omega$$

- logo, temos os seguintes valores: perda de potência no secundário =  $I_S^2 \cdot R_S = 60^2 \cdot 0,023 = 82,8W$  ou perda de potência no secundário =  $100 - I_P^2 \cdot R_P = 100 - 6^2 \cdot 0,5 = 82W$ .

### 3 REGULAÇÃO

O termo **regulação de tensão** identifica a característica da mudança de tensão no transformador com carga, que é definida como a diferença entre a tensão do terminal do secundário em vazio, ou seja,  $I_2 = 0$ , e a plena carga nominal,  $I_2 = I_{2n}$ , em um determinado fator de potência com o mesmo valor da tensão primária para carga nominal e sem carga.

Ao se retirar a carga de um transformador, a tensão nos terminais do secundário sofre uma variação. Quando a tensão do primário se mantém, a variação chamada de regulação de tensão é expressa em porcentagem da tensão de carga (BIM, 2018).

**Por exemplo, a regulação** de tensão dos transformadores monofásicos é a porcentagem da alteração em sua tensão terminal secundária, em comparação com sua tensão original sem carga, sob condições variáveis de carga secundária. De outro modo, a regulação de tensão determina a variação na tensão terminal secundária que acontece no interior do transformador como resultado de variações na carga conectada do transformador, afetando seu desempenho e eficiência, caso estas perdas sejam altas e a tensão secundária for muito baixa.

Quando não há carga conectada ao enrolamento secundário do transformador, ou seja, os seus terminais de saída estão em circuito aberto, não existe condição de malha fechada. Dessa maneira, não existe corrente de carga de saída ( $IL = 0$ ) e o transformador atua como um enrolamento único de alta autoindutância.

## ATENÇÃO

A tensão secundária sem carga é resultado da tensão primária fixa e da relação de espiras do transformador.



Quando se carrega o enrolamento secundário do transformador com uma impedância de carga, uma corrente secundária começa a fluir através do enrolamento interno do transformador. Desse modo, a tensão cai devido à resistência interna dos enrolamentos. Além disso, sua reatância de fuga faz com que a tensão do terminal de saída se altere.

A mudança de regulação de tensão (VR) de um transformador, entre sua tensão terminal secundária de uma condição sem carga quando  $IL = 0$ , ou seja, no circuito aberto, para uma condição totalmente carregada quando  $IL = I_{MAX}$ , ou seja, na corrente máxima para uma tensão primária constante, é dada por:

$$VR = \frac{\text{Tensão de saída com carga}}{\text{Tensão de saída sem carga}}$$
$$VR = \frac{V_{sem\ carga} - V_{plena\ carga}}{V_{sem\ carga}}$$

Essa regulação de tensão, quando é expressa através de uma fração ou mudança de unidade da tensão do terminal sem carga, pode ser definida de dois modos: **regulação de tensão down** (*Reg down*) e **regulação de tensão up** (*Reg up*). Ou seja, quando a

carga é conectada ao terminal de saída do secundário, a tensão do terminal diminui, ou quando a carga é removida, a tensão do terminal do secundário aumenta. Assim, a regulação do transformador dependerá de qual valor de tensão é usado como tensão de referência: valor com carga ou valor sem carga.

A regulação de tensão do transformador também pode ser expressa através de uma variação percentual entre a condição sem carga e a condição de plena carga do seguinte modo:

$$\%VR(down) = \frac{V_{sem\ carga} - V_{plena\ carga}}{V_{sem\ carga}} \cdot 100\%$$
$$\%VR(up) = \frac{V_{sem\ carga} - V_{plena\ carga}}{V_{plena\ carga}} \cdot 100\%$$

Quando se realiza uma mudança em uma carga conectada, cria-se uma mudança na tensão terminal do transformador entre as tensões “sem carga” e tensão com “carga total”. Assim, a regulação da tensão do transformador exerce uma função externa a ele. Desse modo, concluímos que quanto menor for a regulação percentual da tensão, mais estável será a tensão do terminal secundário do transformador, independentemente do valor da corrente de carga. No entanto, se a carga conectada for puramente resistiva, teremos uma queda de tensão menor. Além disso, teremos em um transformador ideal regulação de tensão zero, ou seja, carga total igual à carga sem carga, pois não existiria perdas.

Geralmente, espera-se que se tenha uma regulação de tensão tão baixa quanto possível. Para um transformador ideal, VR = 0%, porém, não é sempre uma boa ideia ter uma baixa regulação de tensão, pois algumas vezes os transformadores com regulação de tensão elevada e alta impedância são utilizados para reduzir as correntes de falta em um circuito.

Assim, para se determinar a regulação de tensão de um transformador, é necessário entender as quedas de tensão em seu interior.

Vejamos um exemplo: suponha que um transformador monofásico tenha uma tensão terminal sem carga de circuito aberto de 100 volts e a mesma tensão terminal cai para 90 volts na aplicação de uma carga conectada. A regulação de tensão do transformador seria, então, 0,1 ou 10%, ou seja:

$$\%VR(down) = \frac{V_{sem\ carga} - V_{plena\ carga}}{V_{sem\ carga}} \cdot 100\%$$
$$\%VR(up) = \frac{100 - 90}{100} \cdot 100\% = 10\%$$

Dessa forma, a regulação de tensão de um transformador pode ser expressa como um valor de mudança de unidade ou como um valor de mudança percentual da tensão sem carga.

Além da regulação de tensão, um transformador também pode ser comparado e avaliado com relação a sua **eficiência**. A eficiência do transformador ( $\eta$ ) pode ser explicada através da equação:  $\eta = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}}$ . Essa equação é utilizada tanto para os motores e geradores quanto para os transformadores. Os circuitos equivalentes facilitam os cálculos de eficiência e os tipos de perdas presentes nos transformadores que são considerados para os cálculos:

- perdas no cobre,  $I^2R$ , que são representadas pela resistência em série no circuito equivalente;
- perdas por histerese que estão incluídas no resistor  $RC$ ;
- perdas por corrente parasita que estão incluídas no resistor  $RC$ .

Para calcular a eficiência de um transformador que está operando com uma determinada carga, devemos somar as perdas de cada resistor. A potência de saída é dada por:  $P_{saída} = V_{saída} \cdot I_{saída} \cdot \cos(\theta_s)$ . E a eficiência do transformador pode ser expressa por  $\eta = \frac{V_{saída} \cdot I_{saída} \cdot \cos(\theta_s)}{V_{saída} \cdot I_{saída} \cdot \cos(\theta_s) + P_{cu} + P_{núcleo}} \times 100\%$ .

Em um transformador não há parte rotacional, portanto, não há perdas rotacionais, como nos enrolamentos e perdas por atrito em uma máquina rotativa. Desse modo, podemos obter uma eficiência máxima de até 99% em um transformador bem projetado.

Podemos também obter a eficiência de um transformador durante todo o dia. Nesse caso, a razão entre a saída de energia de 24 horas e a entrada de energia de um período de 24 horas é chamada de eficiência de um transformador para todo o dia e é dada por:

$$\eta(\text{dia}) = \frac{\text{potência de saída (24 horas)}}{\text{potência de entrada (24 horas)}}$$

$$\eta(\text{dia}) = \frac{\text{potência de saída (24 horas)}}{\text{potência de saída (24 horas)} + \text{perdas de energia em 24 horas}}$$

Quando se conhece o ciclo de carga do transformador, a eficiência durante todo o dia pode ser facilmente determinada.

## 4 OS DADOS DE PLACA E A ESCOLHA DE UM TRANSFORMADOR

A instalação de um transformador com uma tensão, corrente ou potência nominal incorreta pode causar danos sérios ou ferimentos graves. Para se usar um transformador em determinado circuito, é necessário levar em consideração as especificações desse transformador: tensão, corrente e potência nos enrolamentos primário e secundário do transformador. Estas especificações representam o ponto médio dos respectivos valores máximo e mínimo.

Os transformadores podem falhar, e a principal causa dessas falhas é a elevação excessiva da temperatura. O calor que é gerado na operação do transformador aumenta a temperatura no interior do transformador. Os transformadores, que são mais eficientes, costumam possuir um aumento menor da temperatura. A elevação da temperatura do transformador é definida como o aumento médio da temperatura dos enrolamentos acima da temperatura ambiente, quando esse transformador está carregado com a sua potência nominal que está especificada na placa de identificação. Esse valor, normalmente, tem como base uma temperatura ambiente de 40 °C (COSTA; RODRIGUES, 2017).

Para evitar essa alta da temperatura, deve-se garantir uma refrigeração adequada para evitar a deterioração dos materiais de isolamento que estão no interior de um transformador e permitir uma maior expectativa de vida.

Um transformador é projetado para funcionar com valores específicos de potência, de tensão, de frequência, de corrente e de temperatura. Quando o transformador funciona com esses valores especificados, como sendo os dados ou valores nominais, dizemos que ele funciona em **condições nominais**. O fabricante do transformador registra esses dados em uma placa que é fixada na caixa do transformador e, por esse motivo, muitas vezes, usamos a expressão **dados de placa** em vez de valores nominais (BIM, 2018).

As grandezas nominais são definidas por:

- **tensão elétrica nominal de um transformador:** é o valor eficaz da tensão que serve de base para o seu funcionamento. Geralmente, essa tensão é entendida como sendo a tensão escolhida para alimentar a carga que está conectada ao enrolamento de baixa ou de alta do transformador. A especificação das tensões dos transformadores são as tensões nos lados de baixa e de alta;
- **corrente nominal:** é o valor eficaz da corrente que é especificado pelo projeto para que o limite de temperatura permitido não seja ultrapassado;
- **frequência nominal:** é aquela frequência de operação para a qual o transformador foi projetado;
- **potência aparente nominal de um transformador:** é a potência que é medida nos terminais do secundário, isto é, a potência que pode ser entregue à carga com tensão e frequência nominais, sem que se ultrapasse a sua temperatura limite. Geralmente, é expressa em kVA.

Assim, os transformadores apresentam quatro especificações nominais que podemos considerar como principais:

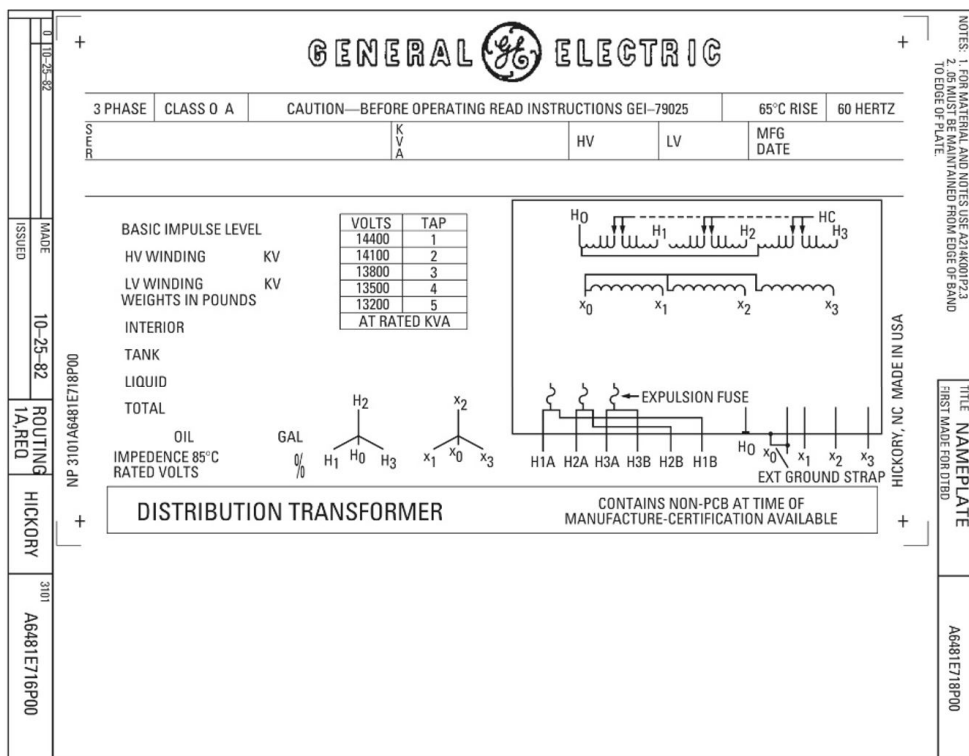
- potência aparente (kVA ou MVA);
- tensões primária e secundária (V);
- frequência (Hz);
- resistência e reatância em série (por unidade).

Essas especificações nominais podem ser encontradas na **placa de identificação** da maioria dos transformadores. Os padrões exigem algumas informações e dados para transformadores com capacidade nominal acima de 500 kVA (1000 kVA = 1 MVA).

As informações e dados mínimos que são impressos em uma placa de identificação do transformador do projetista e dos fabricantes contêm:

- nome do fabricante;
- número de série;
- ano de produção;
- número de fases;
- classificação kVA ou MVA;
- frequência;
- classificações de tensão;
- voltagens de toque;
- diagrama de conexão;
- resfriamento;
- temperatura nominal em °C;
- polaridade (para transformadores monofásicos);
- diagrama fatorial ou vetorial (para transformadores polifásicos ou trifásicos);
- porcentagem de impedância;
- massa ou peso aproximado do transformador;
- tipo de líquido isolante;
- material condutor de cada enrolamento;
- volume de óleo (de cada recipiente/compartimento do transformador);
- instruções para instalação e operação.

FIGURA 1 - EXEMPLO DE PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

Uma placa de identificação típica de um transformador de distribuição está apresentada na Figura 1. A informação disponibilizada nessa placa inclui a tensão nominal, os quilovolts-ampères nominais, a frequência nominal e a impedância por unidade em série do transformador, além de mostrar a tensão nominal de cada derivação do transformador e o desenho esquemático de fiação do transformador. Geralmente, placas como a da Figura 1 apresentam também a designação do tipo do transformador e referências às instruções de operação.

Com relação à grande diversificação dos transformadores e das normas que os fabricantes aplicam na padronização dos produtos, escolher um transformador de corrente ou de potencial pode exigir determinado cuidado. A ABNT tem publicações que orientam o usuário na escolha do melhor transformador. A Norma NBR 6856 estabelece para os transformadores de corrente as seguintes classes de exatidão: 0,3%; 0,6%; 1,2%; 3,0%.

Para orientação de quem vai utilizar o transformador, de acordo com Simone (2010), é necessário levar em conta as seguintes normas:

- para produção de TCs: ABNT - NBR 6856;
- para ensaio de TCs: ABNT - NBR 6821;
- para produção de TPs: ABNT - NBR 6855;
- para ensaio de TPs: ABNT - NBR 6820.

Em seguida, realiza-se uma análise dos aspectos ligados à especificação de transformadores de instrumentos, visando às aplicações previstas pelas Normas NBR 6855 e 6856 (SIMONE, 2010).

A **potência secundária** na especificação de um transformador é considerada o elemento fundamental. A carga deve ser ligada a esse secundário e deve manter-se dentro de rígidos intervalos. Com relação à padronização, devemos chamar de C para Transformadores de Corrente e de P para Transformadores de Potencial. Desse modo, uma unidade designada por 0,6 C 12,5 indica que temos um transformador de corrente da classe de exatidão de 0,6% com secundário para uma carga de até 12,5 VA. Já uma unidade designada por 0,3 P 25 indica que se trata de um transformador de potencial, da Classe de Exatidão de 0,3% com secundário para uma carga de até 25,0 VA.

O quadro a seguir apresenta os transformadores de corrente e as potências admissíveis no secundário:

QUADRO 1 - TRANSFORMADORES DE CORRENTE: POTÊNCIAS ADMISSÍVEIS NO SECUNDÁRIO DA UNIDADE

Designação ABNT	Designação ANSI	Impedância da carga (ohms)	Potência de secundário (VA)	Fator de Potência
C 2,5	B 0,1	0,1	2,5	0,9
C 5,0	B 0,2	0,2	5,0	0,9
C 12,5	B 0,5	0,5	12,5	0,9
C 25,0	B 1,0	1,0	25,0	0,5
C 50,0	B 2,0	2,0	50,0	0,5
C 100,0	B 4,0	4,0	100,0	0,5
C 200,0	B 8,0	8,0	200,0	0,5
C 400,0		16,0	400,0	0,5

FONTE: Adaptado de Simone (2010).

O Quadro 2 apresenta dados similares aos do Quadro 1, mas com os transformadores de potencial e as potências admissíveis no secundário.

QUADRO 2 - TRANSFORMADORES DE POTENCIAL: POTÊNCIAS ADMISSÍVEIS NO SECUNDÁRIO DA UNIDADE

Designação ANSI	Designação ABNT	Potência de secundário (VA)	Fator de potência de carga
W	P 12,5	12,5	0,10
X	P 25	25,0	0,70
Y	P 75	75,0	0,85
Z	P 200	200,0	0,85
ZZ	P 400	400,0	0,85

FONTE: Adaptada de Simone (2010).

Os quadros apresentam também a padronização dos transformadores.

Assim, o transformador de potência é, basicamente, operado com o seu secundário aplicado sobre as cargas de impedância bem reduzida, como bobinas amperométricas de aparelhos dinamométricos, bobinas de corrente de relés, bobinas de corrente de amperímetro etc.

O enrolamento primário de um transformador de corrente, na maioria das vezes, consiste em um número menor de espiras executadas em condutor de seção adequada à corrente operacional do circuito de força, conectado em série com esse enrolamento. Isso faz com que toda a corrente que flui para determinada carga ou determinado consumidor de energia circule pelo enrolamento primário do transformador (SIMONE, 2010).

# RESUMO DO TÓPICO 1

**Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- O rendimento das unidades transformadoras tem uma boa variação e, atualmente, dada à escassez de energia de todas as formas, o rendimento, que já era importante, passou a ser fundamental.
- Na placa de identificação da maioria dos transformadores, há pelo menos quatro especificações nominais: potência aparente, tensões primária e secundária, frequência e resistência e reatância em série por unidade.
- A regulação de tensão a plena carga compara a tensão de saída do transformador a vazio com a tensão de saída a plena carga.
- Os circuitos equivalentes servem para facilitar os cálculos de eficiência e dos tipos de perdas presentes nos transformadores, que são as perdas no cobre, perdas por histerese e perdas por corrente parasita.

# AUTOATIVIDADE



1 Os transformadores, do mesmo modo que outros dispositivos, não são perfeitos, apresentando perdas de potência. A potência de saída de um transformador é sempre menor que a sua potência de entrada. Essas perdas de energia transformam-se em calor que deve ser removido do transformador. Sobre os transformadores, assinale a alternativa CORRETA:

- a)  Os quatro principais tipos de perda são conhecidas como: perda resistiva, correntes parasitas, histerese e perda de fluxo.
- b)  As perdas resistivas, ou perda  $I^2R$ , ou perda de cobre, é a perda de potência em um transformador, causada pela resistência do fio de cobre usado para fazer os enrolamentos.
- c)  A perda de corrente parasita é a perda de potência em um transformador ou motor devido a correntes induzidas nas partes metálicas do sistema a partir do campo magnético estático.
- d)  A relação entre a potência de saída de um transformador e a potência de entrada é chamada de eficiência do transformador. O efeito das perdas do transformador é medido pela regulação de tensão, juntamente à eficiência do transformador.

2 Um transformador pode ser definido como um equipamento elétrico estático que possui a função de transferir a energia de um sistema de tensão para outro através do método da indução eletromagnética. Com base na teoria que envolve os transformadores, analise as afirmativas a seguir:

- I- É possível obter a eficiência de um transformador durante todo o dia, através da razão entre a saída de energia de 24 horas e a entrada de energia de um período de 24 horas.
- II- No transformador não há parte rotacional, desse modo, podemos dizer que não existem perdas rotacionais como nos enrolamentos, além das perdas por atrito na máquina rotativa.
- III- Um transformador pode ser comparado em relação à regulação de tensão e a sua eficiência. Para o cálculo da eficiência, não são consideradas as perdas no transformador.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a)  As afirmativas I e II estão corretas.
- b)  Somente a afirmativa II está correta.
- c)  As afirmativas I e III estão corretas.
- d)  Somente a afirmativa III está correta.

3 Os detalhes da placa de identificação são usados para ler sobre o projeto do transformador. Todo engenheiro electricista deve saber ler os detalhes da placa de identificação do transformador de energia ou de distribuição. De acordo com os princípios da teoria dos transformadores, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas.

- ( ) Com relação à padronização de um transformador, chama-se C os transformadores de potencial e P os transformadores de corrente.
- ( ) A Norma NBR 6856 diz que para os transformadores de corrente há classes de exatidão de 0,3%; 0,6%; 1,2%; 3,0% .
- ( ) Na placa de identificação do transformador, costuma-se encontrar algumas informações, como: tensão nominal, frequência nominal, impedância por unidade em série do transformador, tensão nominal de cada derivação do transformador e o desenho esquemático de fiação do transformador.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - F - F.
- b) ( ) V - F - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 Para aplicações de transformadores de potência em que o transformador é visto pela carga como uma fonte constante de tensão, espera-se que a tensão secundária varie o mínimo possível para grandes alterações na corrente de carga. Conforme um transformador de potência mantém a tensão secundária constante em uma faixa de correntes de carga, temos o que chamamos de regulação de tensão do transformador. Assim, considere o enrolamento primário de um transformador abaixador monofásico 10:1 de 500 VA alimentado por uma fonte constante de  $240V_{rms}$ . Calcule a regulação percentual do transformador quando conectado a uma impedância de  $1,1 \Omega$ .

5 A regulação de tensão é a medida de quanto um transformador de potência consegue manter a tensão secundária constante, dada uma tensão primária constante e ampla variação na corrente de carga. Quanto menor a porcentagem, ou seja, mais próxima de zero, mais estável será a tensão secundária e melhor será a regulação que ela proporcionará. Considere um transformador monofásico com regulação de tensão de 4% e tensão de terminal secundário de 115 volts em corrente de carga total. Calcule sua tensão terminal sem carga quando a carga é removida.

# ENSAIOS E CONEXÕES

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, o assunto do Tópico 2 é ensaios e conexões. Primeiramente, abordaremos o assunto ensaio em curto-circuito de um transformador. Nesse ensaio, é utilizado um voltímetro, um wattímetro e um amperímetro, que são conectados no lado de alta tensão do transformador.

Em seguida, é abordado o ensaio ou teste em aberto. Nesse teste, também são utilizados os equipamentos voltímetro, wattímetro e amperímetro, mas são conectados no lado de baixa tensão do transformador. A tensão na frequência nominal é aplicada ao lado de baixa tensão com a ajuda de um VARIAC. Os testes de circuito aberto e curto são realizados em um transformador para determinar o circuito equivalente do transformador, sua regulação de tensão e eficiência.

Por fim, são abordadas as conexões em transformadores trifásicos, com uma breve introdução sobre o transformador trifásico e os tipos de ligações, como delta e estrela.

## 2 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Os principais ensaios que podem ser realizados nos transformadores, de acordo com Jordão (2002), são:

- medida de resistência, teste de resistência de enrolamento de um transformador realizado como teste de tipo, teste de rotina e teste de campo. Em uma fábrica, ajuda a determinar o cálculo das perdas  $I^2R$ , o cálculo da temperatura do enrolamento no final do teste de elevação de temperatura do transformador, e como referência para avaliar possíveis danos em campo. Esse teste é realizado no local para verificar se há anormalidades devido a conexões soltas, fios quebrados do condutor, alta resistência de contato em comutadores, cabos de alta tensão e buchas;
- determinação da relação de transformação;
- identificação dos enrolamentos com as respectivas fases de transformadores polifásicos, incluindo os trifásicos, além de polaridade e deslocamentos angulares de fase;

- determinação das perdas em vazio (perdas constantes) e em carga (perdas variáveis): as perdas são encontradas através dos ensaios em vazio e de curto-circuito (ensaio de impedância). Também são encontradas através dos testes os parâmetros do circuito equivalente;
- determinação da elevação de temperatura;
- temperatura de regime;
- determinação do rendimento;
- verificação da isolação.

É possível determinar de modo experimental tanto os valores das indutâncias quanto das resistências do circuito equivalente de um transformador. Para isso, é realizada uma aproximação adequada e, então, os valores podem ser obtidos através de dois testes ou ensaios, chamados de **ensaio a vazio** e o **ensaio de curto-circuito**.

As unidades transformadoras, do mesmo modo que muitos equipamentos elétricos, possuem sua construção, seus ensaios e suas especificações baseados em normas nacionais e internacionais. Caso a empresa produtora do equipamento deseje ingressar no mercado externo, os dispositivos e equipamentos elétricos que são fabricados no Brasil passam por testes e ensaios rigorosos prescritos em normas.

Assim, as normas brasileiras, de modo gradual, vão se adaptando e aproximando das normas internacionais e as empresas brasileiras vão ganhando espaço para que os seus produtos possam alcançar o comércio exterior.

Há muitas normas brasileiras que estão atreladas aos transformadores de potências, por exemplo, a norma NBR 5356, que trata da especificação de transformadores de potência; e a NBR 5380, que trata do método de ensaio dos referidos transformadores (ABNT, 1993b).

## IMPORTANTE



Os ensaios devem ser realizados sob a orientação e supervisão de um profissional habilitado e sempre seguindo as normas de segurança com relação a equipamentos de proteção individual, por exemplo, calçados adequados e óculos de proteção. Também devem-se respeitar as normas técnicas e os limites dos equipamentos.

Os instrumentos e equipamentos utilizados nos ensaios são: megôhmetro, multímetro, voltímetro, amperímetro e wattímetro (CARVALHO, 2011).

O ensaio em curto-circuito não é considerado destrutivo, pois podemos manter o transformador energizado por horas ou até mesmo dias. Uma observação importante é, caso a tensão presente no enrolamento do transformador sob o ensaio ultrapassar o valor de 600 V, deve-se utilizar um transformador de potencial junto aos instrumentos de medição.

## 2.1 OBJETIVOS

O teste ou ensaio de curto-circuito em um transformador é utilizado para encontrar o **parâmetro de curto-circuito**, como perdas de cobre, resistência equivalente e regulação de tensão em condição de carga total. Esse teste deve ser realizado na condição de corrente nominal.

Alguns motivos para se realizar o ensaio de curto-circuito são: encontrar a resistência equivalente e a reatância equivalente do transformador, para conhecer as perdas variáveis, ou seja, a perda de cobre no transformador e regulação de tensão do transformador que poderá ser determinada a partir dos dados obtidos no ensaio.

Assim, concluímos que no ensaio em curto-circuito, diferentemente do ensaio a vazio, são medidas as perdas nos enrolamentos. Desse modo, os objetivos do ensaio em curto-circuito são medir as perdas nos enrolamentos, a queda de tensão interna, além de definir alguns os parâmetros percentuais de dispersão como: Z%, R% e X%.

## 2.2 PROCEDIMENTOS

Para realizar o ensaio, o transformador é colocado em curto-circuito. No entanto, o primeiro passo é verificar e levantar as temperaturas da sala de ensaio e a do óleo isolante e refrigerante do transformador.

Para realizar esse procedimento, o pesquisador deve seguir alguns passos. Assim, liga-se o transformador e passa-se uma corrente contínua por seus enrolamentos, determinando as resistências ôhmicas dos enrolamentos referentes às temperaturas anteriormente medidas. Após ter realizado esse levantamento, um dos enrolamentos do transformador é colocado em curto-circuito.

As normas NBR 5356 e NBR 5380 recomendam que o curto-circuito seja praticado no ramo da baixa tensão e os instrumentos de medida sejam colocados no ramo da alta tensão (ABNT, 1993a; 1993b).

# IMPORTANTE

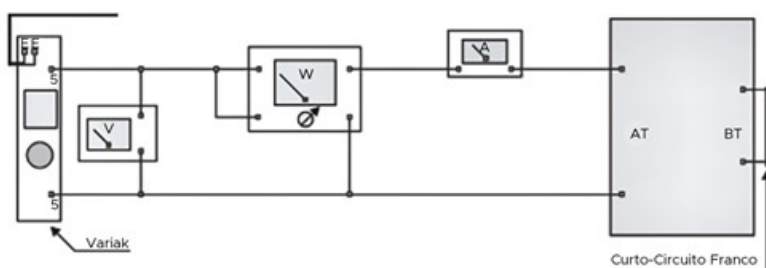
Após montar o circuito, deve-se verificar as ligações, e então lentamente a tensão é elevada até que circule pelo enrolamento de alta tensão uma corrente elétrica de valor numérico igual à corrente nominal desse enrolamento.



O ensaio de curto-circuito é considerado seguro, pois a tensão aplicada não ultrapassa 7% da tensão nominal do enrolamento de alta tensão nos transformadores de potência. Assim, por exemplo, se o transformador tem sua alta tensão 13200 V, a tensão aplicada, nesse caso, não deve ultrapassar 660 V, que é o limite superior da Classe de Tensão de Isolamento de 0,6 kV, tensão normalmente aceitável pelos instrumentos de laboratório específicos.

A Figura 2 apresenta um banco de medição para ensaio em curto-circuito.

FIGURA 2 - BANCO DE MEDIÇÃO PARA ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO.



FONTE: Adaptado de Simone (2010).

O valor de  $V_{CCAT}$  (tensão de curto-circuito em alta tensão) é proporcionalmente pequeno quando comparado com  $V_{NAT}$  (valor nominal em alta tensão), e está contido no intervalo:  $3\% \cdot V_{NAT} \leq V_{CCAT} \leq 7\% \cdot V_{NAT}$ .

O transformador que estamos vendo é um transformador monofásico. Assim, temos a corrente nominal do enrolamento de maior tensão determinada por:  $I_{CCAT} = I_{NAT} = \left[ \frac{S_N}{V_{NAT}} \right]$ .

O fator de potência em curto-circuito é determinado por:  $\cos(\varphi_{CCAT}) = \left[ \frac{P_{CCAT}}{V_{CCAT} \cdot I_{CCAT}} \right]$ .

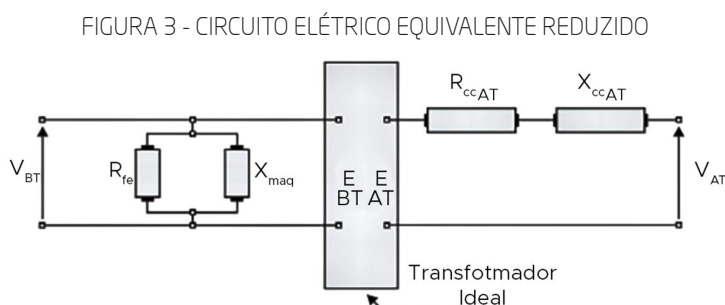
Desse modo, a impedância de curto-circuito será calculada a partir de:  $Z_{CCAT} = \left[ \frac{V_{CCAT}}{I_{CCAT}} \right]$ .

A resistência de curto-circuito é a combinação das resistências dos enrolamentos de alta tensão e de baixa tensão e pode ser determinada a partir do triângulo de impedâncias que é formado por:  $Z_{CCAT}, R_{CCAT}$  e  $X_{CCAT}$ :  $R_{CCAT} = Z_{CCAT} \cdot \cos(\varphi_{CCAT})$ .

Como a impedância de curto-circuito é formada por uma parte ativa e uma reativa indutiva, podemos escrever a impedância como:  $Z_{CCAT} = \sqrt{(R_{CCAT})^2 + (X_{CCAT})^2}$ .

Um ponto importante que devemos considerar é o fato de a **reatância de curto-circuito** não sofrer nenhuma alteração com a variação de temperatura do transformador e, por este motivo, ela não sofre correções. Já a **resistência de curto-circuito** é uma função da temperatura da unidade transformadora e por esse motivo o seu valor deve ser corrigido para uma temperatura referência. A temperatura referência é uma função do composto utilizado na isolação dos condutores elétricos usados na confecção dos enrolamentos e do material isolante empregado na confecção da unidade transformadora.

A Figura 3 apresenta o circuito elétrico equivalente reduzido com os parâmetros do transformador.



FONTE: Adaptado de Simone (2010).

Podemos fazer algumas simplificações e adotar algumas igualdades em um transformador convencional, como as representadas a seguir:

$$R_{AT} = R'_{BT}$$

$$X_{AT} = X'_{BT}$$

$$R_{CCAT} = R_{AT} + R'_{BT}$$

$$X_{CCAT} = X_{AT} + X'_{BT}$$

Assim:

$$R_{BT} = R'_{BT} \cdot \left(\frac{N_{BT}}{N_{AT}}\right)^2$$

$$X_{BT} = X'_{BT} \cdot \left(\frac{N_{BT}}{N_{AT}}\right)^2$$

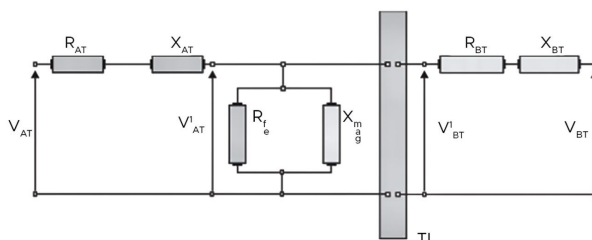
Se o transformador utilizado for para distribuição de energia elétrica, ele recebe em AT (alta tensão) e fornece em BT (baixa tensão). Assim, para montar o circuito elétrico equivalente, deve-se refletir o ramo de excitação para a alta tensão:

$$R_{FE_{AT}} = F_{FE_{BT}} \cdot \left(\frac{N_{AT}}{N_{BT}}\right)^2$$

$$X_{MAG_{AT}} = X_{MAG_{BT}} \cdot \left(\frac{N_{AT}}{N_{BT}}\right)^2$$

A Figura 4 apresenta o **circuito elétrico equivalente**.

FIGURA 4 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR



FONTE: Adaptado de Simone (2010).

Como já vimos, as grandezas que formam o ramo de excitação do transformador praticamente não variam com a variação da temperatura. No entanto, isso não é válido com relação às resistências ôhmicas dos enrolamentos tanto do primário quanto do secundário, ou da alta e da baixa tensão do transformador. Desse modo, duas temperaturas de referências são normalizadas e devem ser utilizadas como referências.

O valor que deve ser adotado dependerá do tipo de verniz utilizado para a isolamento dos condutores elétricos e dos materiais elétricos isolantes que são empregados na unidade transformadora, que acabam definindo a **classe de temperatura do transformador**. Se os materiais empregados possuem classe de temperatura igual a 105° e 130°, a temperatura referência do transformador é de 75°. Quando os materiais empregados têm classe de temperatura de 155° e de 180°, a temperatura referência da unidade transformadora é 115°.

### 3 ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

O ensaio em aberto ou a vazio pode ser aplicado em qualquer transformador que tenha como finalidade a transferência de energia. De acordo com as normas NBR 5356 e NBR 5380, quando se realiza o ensaio em vazio, os instrumentos de medida, preferencialmente, devem estar colocados no ramo de baixa tensão ou no ramo que possua a menor tensão e, assim, os terminais de alta tensão devem ficar em aberto (ABNT, 1993b).

O teste ou **ensaio de circuito aberto** é feito para determinar as perdas sem carga ou perdas de núcleo, bem como a relação de espiras, correntes sem carga, componentes de magnetização e componentes de perda de núcleo do transformador.

Geralmente, a alimentação é conectada ao lado de baixa tensão do transformador e o lado de alta tensão do transformador é deixado aberto. Os equipamentos de medidas utilizados são: voltímetros, amperímetros e wattímetros.

### 3.1 OBJETIVOS

Os objetivos do ensaio a vazio são: medir as perdas a vazio no núcleo, a relação de transformação e a determinação dos parâmetros do ramo magnetizante, que são:  $R_m$ ,  $X_m$  e  $Z_m$ .

Para atingir esses objetivos, deve-se aplicar a tensão nominal ao lado de baixa tensão do transformador. Em seguida, deve-se medir a corrente sem carga,  $I_0$ ; a potência,  $P$ ; e a tensão de entrada,  $V_0$ . Finaliza-se medindo a tensão do lado de alta tensão em circuito aberto para conhecer a relação do transformador.

### 3.2 PROCEDIMENTOS

Do mesmo modo que o ensaio em curto-circuito, devemos montar e verificar as conexões antes de iniciar o ensaio. Assim, após o circuito ter sido vistoriado, deve-se elevar a tensão aplicada no transformador lentamente até atingir o valor da tensão nominal do enrolamento na frequência do projeto.

A temperatura ambiente da carcaça do transformador e, se for refrigerado a líquido, a temperatura do óleo refrigerante e isolante devem ser anotadas. Mede-se a corrente de excitação  $I_0$  no enrolamento de baixa tensão. De acordo com a teoria de circuitos elétricos, temos que  $S$  é potência aparente, dada em VA;  $Q$  é potência reativa, dada em Var; e  $W$  é a potência ativa, dada em W.

Com os valores que foram obtidos no ensaio em vazio aplicado do transformador, determinam-se:  $\cos(\varphi_0) = \frac{P_0}{S_0}$  e  $S_0 = V_0 \cdot I_0$ .

Após determinar o ângulo de defasamento entre a corrente e a tensão aplicadas no ensaio em vazio, que é o ângulo característico do fator de potência a vazio do transformador, determina-se o valor da corrente de perdas no ferro desse transformador através da equação:  $I_{P_{BT}} = I_{0_{BT}} \cdot \cos(\varphi_0)$ . Para o cálculo do valor da corrente de magnetização do transformador, utiliza-se a equação:  $I_{MAG_{BT}} = I_{0_{BT}} \cdot \sin(\varphi_0)$ .

Podemos comparar numericamente as duas correntes:  $I_p$  e  $Imag$ . Se a corrente  $I_p$  for igual ou maior do que  $Imag$ , deduzimos que alguma coisa não está correta no ensaio do transformador ou com o núcleo magnético. Assim, a resistência elétrica fictícia que simula as perdas no ferro é dada por:  $R_{FE_{BT}} = \frac{V_{N_{BT}}}{I_{P_{BT}}}$ .

A reatância de magnetização, que simula o armazenador de energia na forma de um campo magnético, faz com que a energia disposta no núcleo do transformador possa ser determinada de acordo com a equação:  $X_{MAG_{BT}} = \frac{V_{N_{BT}}}{I_{MAG_{BT}}}$ .

A potência reativa indutiva está presente na forma de um campo magnético que enlaça os enrolamentos do transformador e é dada por:  $Q_{L_{MAG}} = \frac{V_{N_{BT}}^2}{X_{FE_{BT}}}$ .

A energia armazenada na forma de um campo magnético e as perdas no ferro do transformador não variam com a variação da temperatura dele. Desse modo, não precisará de nenhuma correção nos seus valores devido à variação da temperatura.

Assim, o ramo excitador do transformador possui características que não variam com a temperatura do transformador, dentro das faixas de valores de temperatura em que eles trabalham.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES

Os ensaios e testes que são realizados nos transformadores estão previstos em normas, como a norma brasileira NBR 5380: Transformador de Potência - Método de Ensaio (ABNT, 1993a).

Através de ensaios e testes é possível verificar se os parâmetros reais do transformador estão de acordo com o previsto no projeto ou se algum parâmetro vai comprometer a sua vida útil quando em funcionamento. Além disso, os ensaios também permitem dar dimensões às variáveis definidas no modelo do transformador real, possibilitando, desse modo, a utilização do modelo em simulações.

Geralmente, o primeiro teste realizado é a medição da resistência de isolamento através de um megôhmetro. A medição deve ser feita entre as bobinas do primário e do secundário, e entre as bobinas e o núcleo de ferro. Em seguida, mede-se a resistência ôhmica dos enrolamentos, marcando o lado de maior resistência como primário.

As perdas, os rendimentos e os parâmetros para o modelo do transformador são obtidos por meio de ensaios específicos.

## 4 CONEXÕES EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Os enrolamentos primário, ou de alta tensão, e secundário, ou de baixa tensão, podem estar eletricamente conectados em:

Y - Y.

Y -  $\Delta$ .

$\Delta$  -  $\Delta$ .

$\Delta$  - Y.

Y - zigue-zague.

Em ligações trifásicas, no que diz a respeito às instalações elétricas e aos motores elétricos convencionais, é possível que sejam feitas conexões em estrela e triângulo. Nos transformadores, por serem muitos os enrolamentos secundários possíveis, podem ser muitas as combinações possíveis de serem efetivadas, cada qual com seu número de vantagens e de desvantagens.

Os transformadores trifásicos são formados por três unidades monofásicas eletricamente conectadas em um banco trifásico. A potência aparente trifásica é dada por:  $S_{3F} = 3 \cdot S_{1F}$ , em que  $S_{1F}$  é a potência aparente de uma unidade trifásica e  $S_{3F}$  é a potência aparente trifásica. Cabe ressaltar que um transformador trifásico é elétrica e magneticamente conectado.

### 4.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO E BANCO TRIFÁSICO

Veremos como podem ser classificadas conexões elétricas que são mais utilizadas na atualidade.

Chamamos de **conexão usual** aquele tipo de conexão que tem como objetivo resolver os problemas tradicionais de um sistema de utilização, distribuição e transmissão de energia elétrica. Algumas das características das conexões usuais são:

- não linearidades magnéticas do material de que é feito o núcleo;
- desequilíbrios de corrente nas cargas consumidoras ligadas à jusante da unidade transformadora;
- redução de problemas físicos na unidade por atuação de curto-circuito;
- recomposição simples dos enrolamentos em caso de reforma e modernização;
- oferecimento de condutor neutro no enrolamento secundário;
- aterramento do enrolamento conectado em Y.

## 4.1.1 Transformador trifásico

A geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica são mais econômicas em sistemas trifásicos do que em sistemas monofásicos. Quando se fala em um sistema trifásico são precisos três transformadores monofásicos. A **transformação trifásica** pode ser feita de dois modos, a saber: utilizando um único transformador trifásico ou utilizando um banco de três transformadores monofásicos. Em cada uma das opções, há vantagens e desvantagens.

Um único transformador trifásico custa por volta de 15% a menos do que um banco de três transformadores monofásicos. Um transformador trifásico ocupa menos espaço do que um banco de três transformadores monofásicos. Por exemplo, se o transformador trifásico for muito grande, é impossível transportá-lo para o local. Uma alternativa para isso é transportar três transformadores monofásicos, que são montados separadamente para formar uma unidade trifásica.

Outra vantagem de usar um banco de três transformadores monofásicos é que, se uma unidade do banco ficar fora de serviço, o banco pode funcionar como um transformador delta aberto.

## 4.1.2 Banco trifásico

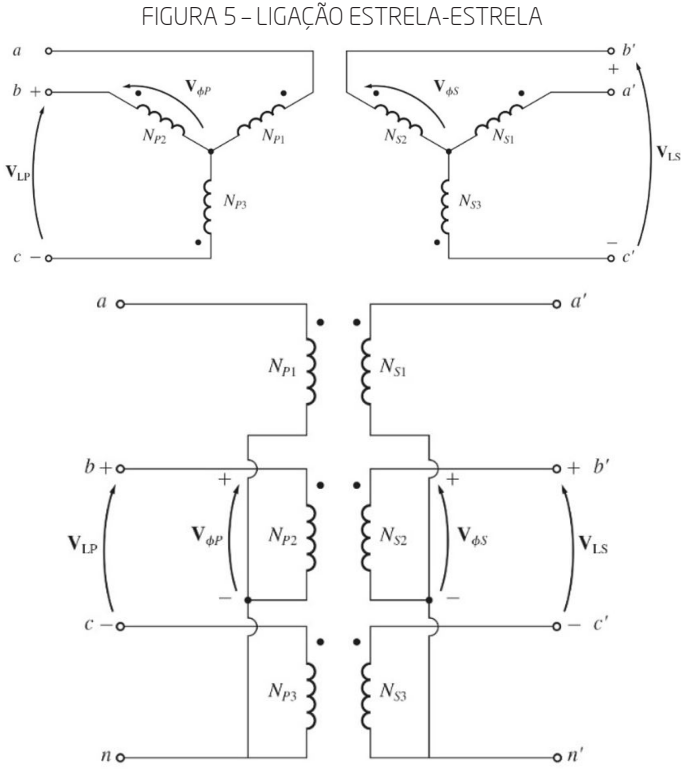
Bancos de transformadores trifásicos servem o mesmo propósito em circuitos trifásicos, como transformadores de potência monofásicos em circuitos monofásicos. Ou seja, os bancos de transformadores trifásicos são utilizados principalmente para aumentar a tensão dos enrolamentos primários para os enrolamentos secundários, ou para abaixar a tensão dos enrolamentos primários para os enrolamentos secundários.

A energia em corrente alternada trifásica é muito utilizada em todo o mundo para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Dessa forma, os bancos de transformadores trifásicos são um dos componentes elétricos mais comuns e acabam sendo essenciais para qualquer rede trifásica de energia em corrente alternada.

Há diversas configurações possíveis de transformadores trifásicos ao conectar os enrolamentos primários e secundários de um banco de transformadores trifásicos, em que cada configuração apresenta características diferentes. Ao conectar um banco trifásico de transformadores em um circuito, é importante determinar quais características são vantajosas para o circuito.

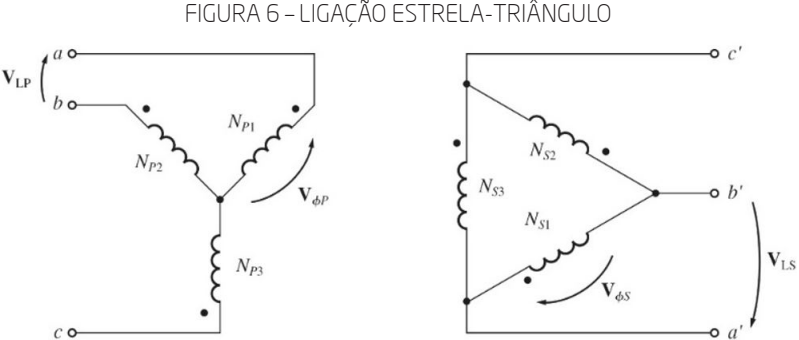
Um transformador trifásico consiste em três transformadores, separados ou combinados em um núcleo. Os primários e os secundários de qualquer transformador trifásico podem ser ligados de modo independente nas chamadas **configurações estrela (Y)** ou **triângulo ( $\Delta$ )**. Isso significa que um banco de transformadores trifásicos pode ser montado conforme um total de quatro configurações possíveis de ligação:

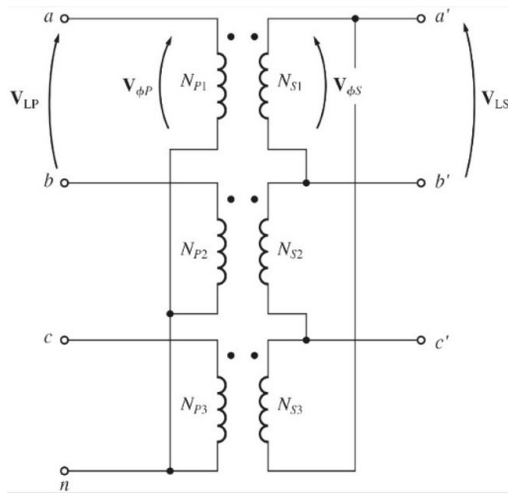
- Estrela-estrela (Y-Y): o **transformador estrela-estrela (Figura 5)** é formado em um transformador trifásico conectando um terminal de cada fase do lado individual, juntos.



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

- Estrela-triângulo (Y-Δ): no **transformador estrela-triângulo, Figura 6**, a conexão em estrela no lado de alta tensão é formada conectando todos os terminais com sufixo juntos como ponto comum, e os cabos primários do transformador são retirados de terminais com sufixo dos enrolamentos primários.

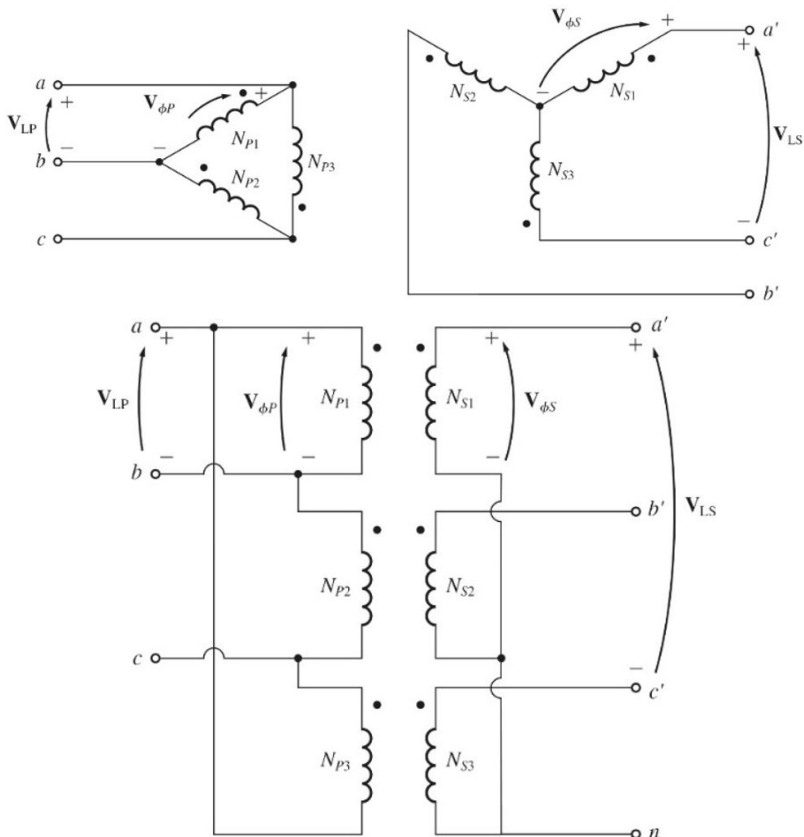




FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

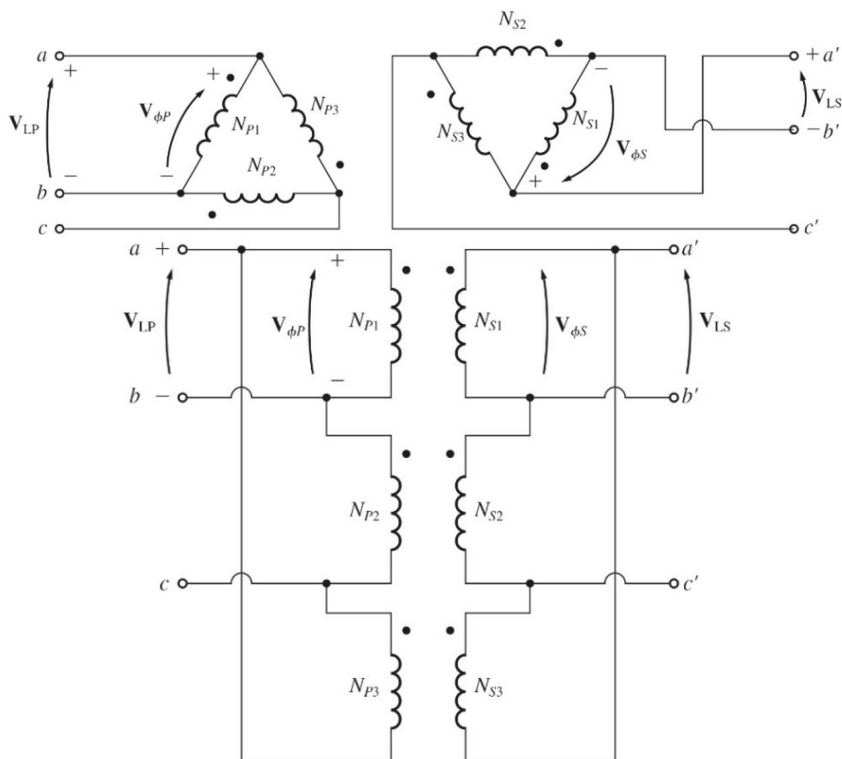
- Triângulo-estrela ( $\Delta$ -Y): a **conexão do transformador delta-estrela, Figura 7**, do transformador trifásico é semelhante à conexão estrela-triângulo. Se for trocado o lado AT e o lado BT do transformador estrela-triângulo no diagrama, ele simplesmente se torna um transformador trifásico conectado em delta-estrela.

FIGURA 7 - LIGAÇÃO TRIÂNGULO-ESTRELA



- triângulo-triângulo ( $\Delta$ - $\Delta$ ): no **transformador delta-delta**, Figura 8, um terminal com sufixo de cada enrolamento primário de fase será conectado com dois terminais com sufixo do enrolamento primário da próxima fase.

FIGURA 8 - LIGAÇÃO TRIÂNGULO-TRIÂNGULO



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

Para analisar qualquer banco de transformadores trifásicos é preciso examinar um único transformador do banco, pois qualquer um deles comporta-se como os transformadores monofásicos. Para os transformadores trifásicos, os cálculos de impedância, regulação de tensão e eficiência são realizados tomando uma fase de cada vez. Para isso, são usadas as mesmas técnicas dos transformadores monofásicos.

# RESUMO DO TÓPICO 2

**Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- Os transformadores trifásicos funcionam como três transformadores monofásicos. No entanto, um único transformador trifásico ocupa menos volume e pesa menos que três transformadores monofásicos projetados para a mesma finalidade.
- Três transformadores monofásicos semelhantes podem ser conectados para formar um transformador trifásico. Os enrolamentos primário e secundário podem ser conectados em arranjo em estrela (y) ou delta (d).
- No ensaio de curto-circuito, os terminais de baixa tensão do transformador são colocados em curto-circuito e os terminais de alta tensão são ligados a uma fonte de tensão variável.
- No ensaio a vazio ou de circuito aberto, um enrolamento do transformador é deixado em circuito aberto e o outro enrolamento é conectado à tensão nominal plena de linha.

# AUTOATIVIDADE



1 Os testes de circuito aberto e curto-circuito são realizados para determinar os parâmetros do transformador, como sua eficiência, regulação de tensão, constante do circuito etc. Esses testes são realizados sem a carga real e, por esse motivo, é necessário muito menos energia para sua realização. Com base no texto de curto-circuito, assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) A corrente no lado secundário é desprezível.
- b) ( ) A tensão no lado secundário não varia.
- c) ( ) A tensão aplicada no lado primário é baixa.
- d) ( ) A corrente de plena carga não é fornecida ao transformador.

2 O teste de circuito aberto e o teste de curto-circuito fornecem todos os parâmetros do circuito equivalente precisamente. No entanto, os ensaios devem ser feitos sob a orientação e supervisão de um profissional habilitado e seguindo as normas de segurança. Com base nos testes e ensaios, analise as afirmativas a seguir:

- I- O teste de curto-circuito é usado para determinar as perdas de cobre que ocorrem no transformador em operação.
- II- O teste de circuito aberto nos dá o valor das perdas do núcleo que ocorrem no transformador.
- III- É uma prática comum realizar o teste de curto-circuito do lado de alta tensão, mantendo o lado de alta tensão em curto-circuito. Assim, a corrente de curto-circuito flui dos terminais de baixa tensão em curto, ou seja, do lado de alta tensão.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas I e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 É possível prever o desempenho de um transformador em vários níveis de carga conhecendo todos os parâmetros do circuito equivalente. Esses parâmetros de circuito são fornecidos realizando os testes de circuito aberto e curto-circuito de um transformador. Ambos fornecem os resultados que são usados para determinar os parâmetros do circuito equivalente, sem sobrecarregar o transformador. De acordo com os princípios e as normas dos ensaios ou testes de transformadores, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) O wattímetro com fator de baixa potência é usado no teste de circuito aberto do transformador.
- ( ) Durante o teste de curto-circuito, as perdas de ferro são desprezíveis porque a tensão aplicada no lado primário é alta.
- ( ) O teste de curto-circuito fornece as perdas de cobre; essas perdas são levadas em consideração pelos parâmetros em série do circuito equivalente.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - V - F.
- b) ( ) V - F - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 O ensaio de curto-circuito e o ensaio em aberto de transformador são realizados para encontrar os parâmetros de circuito equivalente do transformador e suas perdas. O teste de circuito aberto e o teste de curto-circuito no transformador são muito econômicos e convenientes porque são realizados sem realmente carregar o transformador. Disserte sobre esses dois testes ou ensaios.

5 Um transformador trifásico em uma subestação elétrica pode ser construído de duas maneiras: conectando adequadamente um banco de três transformadores monofásicos e construindo um transformador trifásico em uma estrutura magnética comum. Em ambos os casos, os enrolamentos podem ser conectados em quatro métodos de conexão diferentes. Nesse contexto, cite os quatro métodos de conexões possíveis.

# O AUTOTRANSFORMADOR

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, no Tópico 3, abordaremos os **autotransformadores**. Ao contrário do transformador de tensão que possui dois enrolamentos isolados eletricamente, o primário e o secundário, um autotransformador possui apenas um único enrolamento de tensão que é comum aos dois lados.

Iniciaremos com uma introdução a respeito do autotransformador. Veremos suas vantagens, como custo reduzido em relação ao transformador convencional, pois os enrolamentos primários e secundários de um autotransformador são ligados eletricamente e magneticamente. Como todo equipamento elétrico, os autotransformadores também possuem desvantagens, como o fato de não possuírem isolamento de enrolamento primário/secundário.

Finalizaremos com as aplicações mais comuns do autotransformador e uma discussão sobre como é realizada a conversão de um transformador de dois enrolamentos em um autotransformador.

## 2 INTRODUÇÃO AOS AUTOTRANSFORMADORES

Os autotransformadores podem funcionar em uma ampla faixa de potências e de tensões, que vai desde alguns VAs até potências bem superiores na ordem dos MVAs.

Os transformadores possuem uma variedade muito grande de opções. Dentre elas, há um ramo chamado de **autotransformadores de potência** (SIMONE, 2010). Os autotransformadores trabalham em alguns ramos, por exemplo, em baixa tensão nos domicílios para alimentar eletrodomésticos e cargas de pequena potência em geral. Eles também são utilizados em telecomunicações, em receptores e transmissores de ondas de rádio. No entanto, também são usados com média e alta tensão, com níveis elevados de potências, e podem operar como unidades monofásicas, trifásicas ou especiais.

Podemos afirmar que os transformadores, sejam eles convencionais ou autotransformadores, possuem **campos de aplicações** diferentes, não sendo concorrentes.

Do mesmo modo das unidades transformadoras convencionais, os autotransformadores também podem operar como unidades elevadoras, unidades abaixadoras ou como indutores colocados em paralelo com a carga.

A principal característica do autotransformador é a utilização do mesmo enrolamento tanto para funções de primário quanto do secundário.

Os autotransformadores possuem algumas limitações na fabricação e na utilização, mas devemos tomar cuidado em não classificar isso como uma desvantagem. Outro ponto importante que vale ressaltar é que os autotransformadores não pretendem ocupar o espaço dos transformadores tradicionais. Eles apenas possuem suas aplicações específicas e, para algumas delas, não encontra como concorrente o transformador convencional.

Por esses motivos, há algumas regras de operação e construção que devem ser estabelecidas e obedecidas, como a que veremos a seguir, segundo Simone (2010):

- não se pode ter um autotransformador se a tensão menor for menor do que a tensão maior dividida por quatro, ou seja:  $V_{menor} > \frac{V_{maior}}{4}$ ;
- os dispositivos e os equipamentos elétricos são divididos através de classes chamadas de **classe de tensão de isolamento**. Assim, um ATRAF0 não pode pular, com suas tensões de terminais, de uma classe de tensão para outra.

Desse modo, temos que a primeira classe de tensão de isolamento é a de 0,6 kV. Portanto, um ATRAF0 que recebe em 760 V e fornece em 220 V não contrariará a regra a, mas contraria a regra b, pois a tensão de 760 V é da Classe de Tensão de Isolamento de 1,2 kV.

De acordo com a Norma NBR 5440 (ABNT, 2014), as Classes de Tensão de Isolamento são representadas por:

QUADRO 3 - CLASSES DE TENSÃO DE ISOLAMENTO

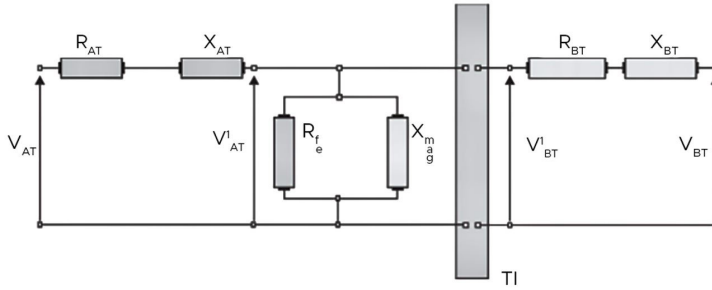
CLASSES DE TENSÃO DE ISOLAMENTO (kV)	0,6	1,2	5	8,7	15,0	25,0	34,5	46,0	69,0
--------------------------------------	-----	-----	---	-----	------	------	------	------	------

FONTE: Adaptado de Simone (2012).

Os autotransformadores podem ser classificados como abaixadores ou elevadores. A diferença entre os autotransformadores abaixadores e elevadores é somente para fins didáticos, já que pode ser facilmente reversível. Assim, para estudo, vamos levar em consideração para o autotransformador abaixador ou elevador a corrente de excitação da unidade. Conseqüentemente, definimos um autotransformador abaixador quando a tensão de entrada tomada nos terminais da rede de alimentação é maior do que a tensão de saída tomada nos terminais da carga, ou seja:  $V_E > V_S$ .

A Figura 9 apresenta o circuito equivalente de autotransformador abaixador.

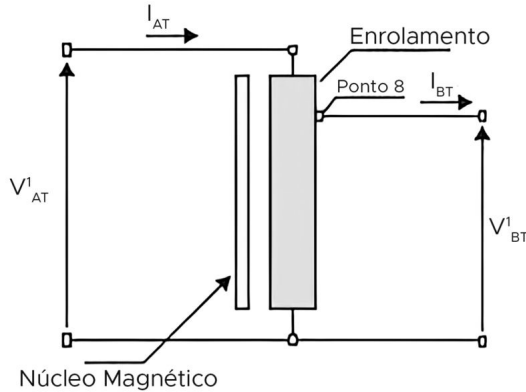
FIGURA 9 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM AUTOTRANSFORMADOR ABAIXADOR



FONTE: Adaptado de Simone (2010).

Com relação às equações aplicadas nos autotransformadores ideais, elas são as mesmas que nós já vimos nos transformadores ideais. A Figura 10 apresenta um ATRAFO ideal.

FIGURA 10 - UNIDADE AUTOTRANSFORMADORA IDEAL



FONTE: Adaptado de Simone (2010).

Assim, temos:  $\frac{E_{AT}}{N_{AT}} = \frac{E_{BT}}{N_{BT}}$  e  $N_{AT} \cdot I_{AT} = N_{BT} \cdot I_{BT}$ . Além disso,  $S_E = S_S$  e  $E_{AT} \cdot I_{AT} = E_{BT} \cdot I_{BT}$ .

Na operação ATRAFO ABAIXADORA, temos:  $N_{AT} > N_{BT}$  e  $I_{AT} < I_{BT}$ .

Fisicamente, tem-se duas parcelas de potências no autotransformador que se comportam de formas muito diferentes. A primeira chamamos de **potência magneticamente transferida** e é dada por  $S'_s$ . Essa potência não se transfere, a não ser que seja através dos meios magnéticos, e pode ser chamada também de **potência física da unidade autotransformadora**. Seu valor numérico é utilizado para calcular a seção reta do núcleo da unidade autotransformadora.

Já a segunda potência representa a parcela que pode ser levada à carga de modo teórico, sem a concorrência do núcleo. Nesse caso, o núcleo e o enrolamento atuam como partes de um indutor, produzindo uma especificada queda de tensão e ajustando a tensão final da carga. Ela é chamada de **potência eletricamente transferida**. De modo geral, essa potência não deve aparentemente se envolver com o projeto do núcleo do transformador. Assim, temos que:  $S_S = S'_S + S''_S$ .

Desse modo, quando se desenvolve o projeto de autotransformador, escrevemos que  $S'_S$  é a potência magneticamente transferida:  $S_{FE} = S_{FE}(B_{MÁX}, S'_S, f, etc)$ . Sendo que  $S_{FE}$  é a seção reta do núcleo da unidade autotransformadora.

Se considerarmos dois transformadores convencionais que possuem a mesma potência aparente, mas possuem uma relação de espiras desiguais, ou seja,  $a_1 > a_2$ , caso estejam conectados como autotransformador, aquele que possuir uma maior relação de espiras terá a maior capacidade nominal de potência aparente, ou seja,  $|ST1| > |ST2|$ . Vejamos um exemplo para reforçar e ilustrar o aprendizado:

Considere um transformador monofásico convencional que possui potência nominal de 25 kVA e enrolamentos para 5000 V e 500 V. A carga que deve ser conectada ao secundário do autotransformador possui uma potência nominal de 25 kVA e opera na tensão de 500 V. A rede de alimentação em média tensão da concessionária local está na tensão de 5500 V. Desenvolva um autotransformador que permita a conexão do transformador convencional de 25 kVA, monofásico, à rede de 5500 V, da concessionária, ou seja, encontre as correntes de baixa e média tensão.

Para resolver esse exercício temos:

Corrente Nominal da carga ligada ao secundário da unidade transformadora convencional:  $S_{CARGA} = 25kVA$ .

$$\begin{aligned} S_{CARGA} &= V_{CARGA} \cdot I_{CARGA} \\ 25000 &= 500 \cdot I_{CARGA} \\ I_{CARGA} &= 50 \text{ A} \end{aligned}$$

Como a carga está ligada ao secundário do transformador,  $I_{BT} = I_{CARGA}$ , portanto:  $I_{BT} = 50 \text{ A}$ .

O autotransformador está ligado à rede de 5500 V, que será o de alta tensão. O ATRAF0 liga-se ao Trafo e este é ligado à carga.

A tensão de saída do ATRAF0 é de 5000 V, que será a média tensão. Desse modo:  $I_{MT} \cdot N_{MT} = I_{BT} \cdot N_{BT}$ . No entanto:

$$\frac{E_{MT}}{N_{MT}} = \frac{E_{BT}}{N_{BT}}$$

$$\frac{5000}{N_{MT}} = \frac{500}{N_{BT}}$$

$$\frac{N_{MT}}{N_{BT}} = \frac{5000}{500} = 10$$

Portanto:

$$I_{MT} = \frac{N_{BT}}{N_{MT}} \cdot I_{BT}$$

$$I_{MT} = \frac{1}{10} \cdot 50 = 5 \text{ A}$$

Esse valor é referente à corrente de transferência na média tensão.

Como não conhecemos o ângulo de  $I_{BT}$ , também não conhecemos o ângulo de  $I_{MT}$ . Desse modo, a situação de corrente máxima no primário do transformador convencional é igual  $I_{TMT} = I_{0MT} + I_{MT}$ .

A corrente de excitação ( $I_0$ ) é aquela que circula em um enrolamento do transformador quando ele é alimentado com sua tensão nominal, enquanto o outro enrolamento está em aberto. Essa corrente é dada em % da corrente nominal e é responsável pela produção do fluxo magnético, além de suprir perdas no núcleo.

Uma unidade monofásica de 25 kVA tem uma corrente de excitação em torno de 5% de IMT. Assim:

$$I_{TMT} = 0,05 \cdot I_{MT} + I_{MT}$$

$$I_{TMT} = 1,05 \cdot I_{MT}$$

$$I_{TMT} = 1,05 \cdot 5$$

$$I_{TMT} = 5,25 \text{ A}$$

Esse valor é referente à corrente fornecida ou que deve ser fornecida pelo secundário do ATRAFO para excitar o transformador convencional e alimentar a carga secundária.

Vamos agora ver a corrente no alimentador de alta tensão. Como o ATRAFO recebe em 5500 V e fornece em 5000 V, escreve-se:

$$\frac{E_{AT}}{N_{AT}} = \frac{E_{MT}}{N_{MT}}$$

$$\frac{5500}{N_{AT}} = \frac{5000}{N_{MT}}$$

$$\frac{N_{MT}}{N_{AT}} = \frac{5000}{5500}$$

$$\frac{N_{MT}}{N_{AT}} = \frac{10}{11}$$

O ATRAFO transfere para o transformador convencional toda a corrente que este solicita. Desse modo:

$$I_{AT} \cdot N_{AT} = I_{T_{MT}} \cdot N_{MT}$$

$$I_{AT} = I_{T_{MT}} \cdot \frac{N_{MT}}{N_{AT}}$$

$$I_{AT} = 5,25 \cdot \frac{10}{11}$$

$$I_{AT} = 4,77 \text{ A}$$

Do mesmo modo que o transformador convencional, o ATRAFO também possui corrente de excitação. Estimando em 3% da corrente de transferência, porque o núcleo magnético é pequeno, resulta:

$$I_{T_{AT}} = I_{0_{AT}} + I_{AT}$$

$$I_{T_{AT}} = 0,03 \cdot I_{AT} + I_{AT}$$

$$I_{T_{AT}} = 0,03 \cdot 4,77 + 4,77$$

$$I_{T_{AT}} = 4,91 \text{ A}$$

A corrente ***I<sub>TAT</sub>*** é a intensidade de corrente solicitada à rede de alimentação do sistema.

Para Potência Magneticamente Transferida, o autotransformador fornece ao transformador convencional:

$$I_{T_{MT}} = 5,25 \text{ A}$$

$$E_{MT} = V_{MT} = 5000 \text{ V}$$

Desse modo, temos que:

$$S_{ATRAFO} = V_{MT} \cdot I_{T_{MT}}$$

$$S_{ATRAFO} = 5000 \cdot 5,25$$

$$S_{ATRAFO} = 26250 \text{ VA}$$

Quando um ATRAFO está operando, temos duas parcelas de potência: uma parcela é transferida eletricamente e a outra é transferida magneticamente.

Vamos chamar de ***S'ATRAFO*** a parcela que é transferida magneticamente. Assim, temos:

$$S'_{ATRAFO} = S_{ATRAFO} \cdot \left(1 - \frac{N_{MT}}{N_{AT}}\right)$$

$$S'_{ATRAFO} = 26250 \cdot \left(1 - \frac{10}{11}\right)$$

$$S'_{ATRAFO} = 2386,36 \text{ VA}$$

Vamos chamar de ***S''ATRAFO*** a parcela que é transferida eletricamente. Assim, temos:

$$S''_{ATRAFO} = S_{ATRAFO} \cdot \left(\frac{N_{MT}}{N_{AT}}\right)$$

$$S''_{ATRAFO} = 26250 \cdot \left(\frac{10}{11}\right)$$

$$S''_{ATRAFO} = 23863,63 \text{ VA}$$

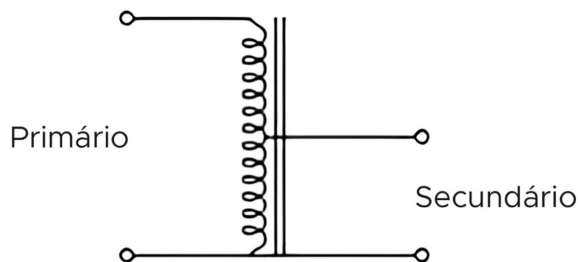
Observe que a potência magneticamente transferida ***S'ATRAFO*** é pequena - 2,38 kVA, o que se evidencia pela pequena diferença de tensões entre ***VAT*** e ***VMT***.

### 3 VANTAGENS DO AUTOTRANSFORMADOR

O autotransformador é utilizado para reduzir custos ou em situações específicas. Esse tipo de transformador não é muito diferente de um transformador monofásico no que diz respeito a seu ferromagnético. A grande diferença está no sistema de bobinas.

No autotransformador, não existem primário e secundário como dois enrolamentos distintos. Na realidade, temos apenas um enrolamento que serve como primário e como secundário ao mesmo tempo, como podemos ver na Figura 11. Assim, se esperam perdas menores no cobre e, conseqüentemente, um aumento no rendimento.

FIGURA 11 - LIGAÇÃO DE UM AUTOTRANSFORMADOR



FONTE: Adaptado de Carvalho (2011).

Como não há mais dois enrolamentos, existe uma economia, mas perdemos a isolamento elétrica entre entrada e saída, pois o mesmo caminho elétrico que constitui a entrada constitui a saída. Outro fator importante que deve ser levado em consideração antes da opção por um autotransformador é a **potência do equipamento**.

Se a relação de espiras do transformador for grande, a potência nominal de um autotransformador será muito maior do que a potência nominal de um transformador convencional. Em um transformador convencional, toda a potência é transformada; enquanto em um autotransformador, a maior parte da potência é conduzida em um potencial elevado. Como resultado, um autotransformador é muito menor do que um transformador convencional da mesma classificação.

Outras vantagens de um autotransformador sobre um transformador de dois enrolamentos são:

- mais barato;
- mais eficiente, porque as perdas permanecem as mesmas enquanto a classificação aumenta em comparação com um transformador convencional;
- corrente de excitação mais baixa;
- melhor regulação de tensão, pois a queda de tensão na resistência e a reatância do enrolamento único são menores;
- para relação de transformação =2, o tamanho do transformador automático seria aproximadamente 50% do tamanho correspondente de dois transformadores de enrolamento;
- a economia de custo é importante quando a relação do transformador é baixa, ou seja, inferior a dois. Assim, o autotransformador é menor em tamanho e mais barato;
- um transformador automático tem maior eficiência do que dois transformadores de enrolamento. Isso ocorre devido a menores perdas ôhmicas e de núcleo por causa da redução do material do transformador.

## 4 DESVANTAGENS DO AUTOTRANSFORMADOR

Como todo equipamento elétrico, o autotransformador também possui algumas desvantagens.

Devido à condutividade elétrica dos enrolamentos primário e secundário, o circuito de baixa tensão é suscetível de ser pressionado por uma tensão mais alta. Para evitar possíveis avarias no circuito de baixa tensão é preciso projetá-lo para suportar tensões mais altas.

O fluxo de fuga entre os enrolamentos primário e secundário do autotransformador é pequeno e, portanto, a impedância é baixa. O problema é que isso resulta em correntes de curto-circuito mais severas sob condições de falha.

Se o circuito secundário entrar em curto-circuito, a corrente do primário será muito maior, danificando-o com facilidade.

As conexões nos lados primário e secundário de um autotransformador devem ser idênticas. Isso causa problemas, pois os ângulos de fase do primário e do secundário mudam, especialmente no caso em que a conexão é do tipo delta/delta. Esse problema só não ocorre caso as conexões sejam em estrela, interligadas.

Devido ao neutro comum em um autotransformador conectado em estrela-estrela, não é possível aterrar o neutro de apenas um dos lados, assim, o aterramento do enrolamento secundário é o terra do primário. Além disso, é mais difícil manter o equilíbrio eletromagnético do enrolamento quando são necessários ajustes de tensão.



## IMPORTANTE

O fornecimento de um terminal de derivação em um autotransformador aumenta consideravelmente o tamanho do quadro do transformador.

Assim, resumindo, as principais desvantagens são:

- maior corrente de curto-circuito;
- não existe isolamento entre os enrolamentos primário e secundário;
- útil apenas para mudanças de tensão moderadas ou menores.

## 5 APLICAÇÕES

O autotransformador possui algumas aplicações interessantes:

- compensação de quedas de tensão aumentando a tensão de alimentação nos sistemas de distribuição, ou seja, eles geralmente são usados para conectar linhas de transmissão de tensões ligeiramente diferentes, por exemplo, 115 kV e 138 kV ou 138 kV e 161 kV;
- os autotransformadores com várias derivações são utilizados para a partida de motores de indução e síncronos;
- o autotransformador é muito utilizado como VARIAC em laboratório ou onde são necessárias variáveis contínuas em amplas faixas;
- os autotransformadores, normalmente, são empregados para compensar quedas de tensão em circuitos de alimentação longas, nos quais é importante que cada dispositivo de carga receba a mesma tensão. Um exemplo são os circuitos de iluminação de aeródromos para que se possa garantir a intensidade uniforme da lâmpada;

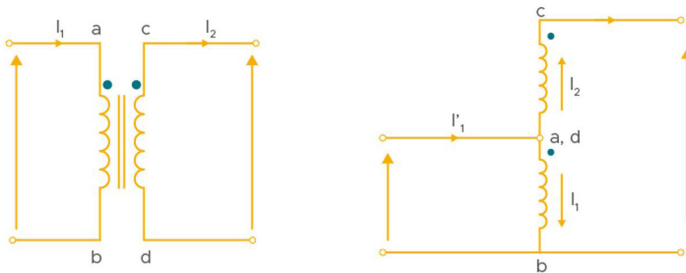
- eles oferecem controle de tensão variável na configuração do laboratório, pois conforme movemos o contato deslizante, praticamente toda a bobina pode se tornar uma bobina em série. Assim, toda a bobina deve ser dimensionada para a corrente máxima;
- por fim, os autotransformadores são utilizados para ajustar a tensão de saída do transformador para manter a tensão do sistema constante com carga variável.

Os autotransformadores também são utilizados na partida de motores de indução, na regulação da magnitude e do ângulo de fase da tensão em linhas de transmissão. No entanto, quando possuem a função de apenas variar a magnitude de tensões, recebem o nome de reguladores de tensão. Já quando controlam os ângulos de fase das tensões são chamados de regulador de ângulo de fase ou transformador defasador (BIM, 2018).

## 6 CONVERSÃO DE UM TRANSFORMADOR DE DOIS ENROLAMENTOS EM AUTOTRANSFORMADOR

Um transformador convencional de dois enrolamentos pode ser facilmente convertido em um autotransformador, como podemos ver na Figura 12.

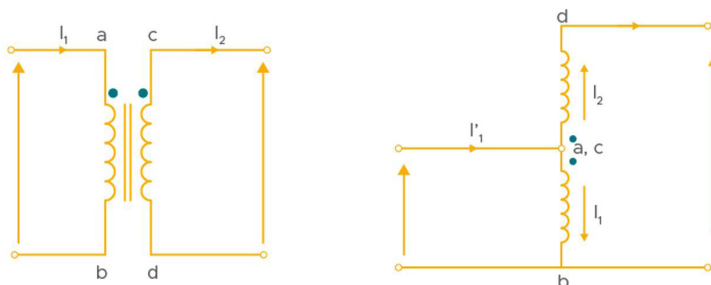
FIGURA 12 - CONEXÕES EM SÉRIE DO ENROLAMENTO COM POLARIDADE ADITIVA



FONTE: A autora.

Ele pode ser convertido em um **autotransformador step-up** conectando os dois enrolamentos eletricamente em série com polaridades aditivas. Se os enrolamentos forem conectados eletricamente em série com polaridades subtrativas são chamados de **autotransformador abaixador**.

FIGURA 13 - CONEXÕES EM SÉRIE DO ENROLAMENTO COM POLARIDADE SUBTRATIVA



FONTE: A autora.

A potência nominal de um autotransformador é maior do que a de um transformador equivalente de dois enrolamentos.

Existem equipamentos industriais que possuem uma fonte de corrente alternada ajustável. Nesses equipamentos, é comum encontrar um autotransformador ajustável na fonte. Bons motivos para isso são a economia e a simplicidade de um autotransformador ajustável. Geralmente, por questão física do equipamento, o enrolamento é bobinado sobre um núcleo em forma de tiroide.

No autotransformador ajustável, aproveita-se o mesmo enrolamento primário como secundário. No entanto, nesses casos, a saída funciona selecionando o número de espiras necessárias para produzir determinada tensão na saída do transformador. Em laboratório, é possível encontrar autotransformadores ajustáveis que operam em equipamentos como o VARIAC.

# LEITURA COMPLEMENTAR



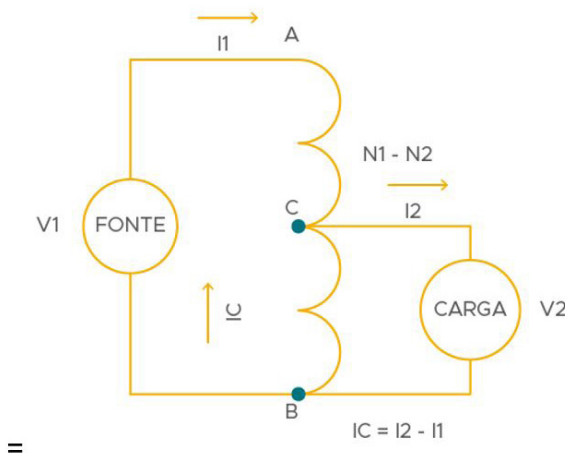
## O QUE É UM AUTOTRANSFORMADOR E COMO FUNCIONA?

Os transformadores normalmente contêm dois enrolamentos independentes. Isso inclui um enrolamento primário, que recebe a energia da fonte, e um enrolamento secundário, que fornece a energia para a carga.

Um autotransformador é um transformador no qual os circuitos primário e secundário têm uma parte de seus dois enrolamentos em comum. A potência de um autotransformador é maior que a de um transformador equivalente de dois enrolamentos.

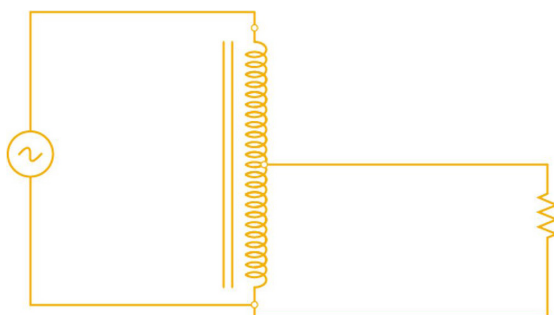
Desde já, repare que, em um transformador comum, os enrolamentos primário e secundário são eletricamente isolados um do outro, mas conectados magneticamente. Na figura a seguir temos a representação de um transformador abaixador. Uma maior tensão é conectada entre os pontos A e B, e uma menor tensão é fornecida entre os pontos C e D.

AUTOTRANSFORMADOR ABAIXADOR



Enquanto no autotransformador, um único enrolamento faz a função de primário e secundário, já que existe a conexão magnética e elétrica entre os enrolamentos.

Existe uma derivação que é feita diretamente de um ponto da bobina, o qual determinará o valor de tensão de saída. Repare que uma parte do simples enrolamento contínuo é comum tanto para o primário quanto para o secundário.

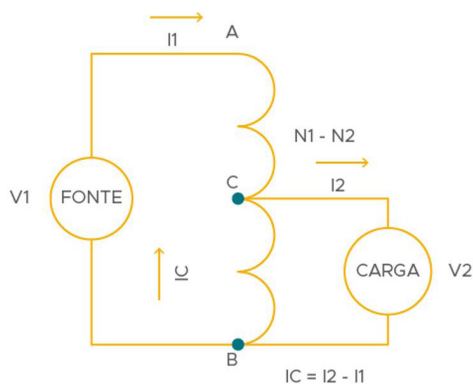


Não se esqueça de que a relação de proporção entre tensão e corrente deve ser respeitada, igual um transformador comum.

$$K = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

### Autotransformador abaixador

Veja que o autotransformador abaixo é abaixador. Suponha que ele possua uma bobina com 1000 espiras ( $N_1$ ), em que o valor de entrada seja 220 V ( $V_1$ ). Veja que exatamente no centro da bobina, ou 50%, é derivado um ponto C, o qual podemos concluir que equivale a exatamente 500 espiras. Dessa forma, a tensão entre os pontos B e C será 110 V.



$$\text{Relação de transformação} = \frac{110}{220} = \frac{500}{1000}$$

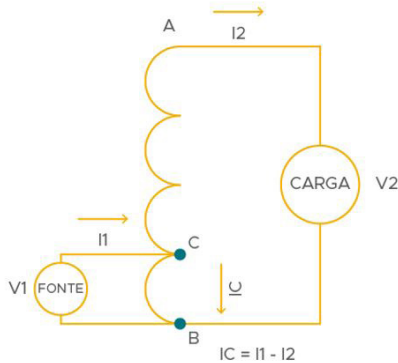
$$\text{Relação de transformação} = 0,5 \text{ ou } 2:1$$

A relação de transformação para configuração abaixador é  $< 1$ .

## Autotransformador elevador

Veja que o autotransformador a seguir é elevador. Suponha que ele possua uma bobina com 1000 espiras ( $N_2$ ). Veja que é derivado um ponto C num local que consideraremos sendo 25% da bobina, no qual o valor de entrada ( $V_1$ ) seja 50 V. Dessa forma, podemos concluir que  $N_1$  equivale a exatamente 250 espiras e a tensão entre os pontos A e B ( $V_2$ ) é de 200 V.

AUTOTRANSFORMADOR ELEVADOR



$$\text{Relação de transformação} = \frac{200}{50} = \frac{1000}{250}$$

$$\text{Relação de transformação} = 4 \text{ ou } 1:4$$

A relação de transformação para configuração elevador é  $> 1$ .

## Vantagens

- Para a relação de transformação igual a dois, o tamanho do autotransformador seria aproximadamente 50% do tamanho correspondente de um transformador de dois enrolamentos. Para a relação de transformação de 20, por exemplo, o tamanho seria de 95%. A economia no custo de material, naturalmente, não está na mesma proporção. A economia de custo é apreciável quando a relação de transformação do autotransformador é baixa, menor que 2.
- Um autotransformador tem maior eficiência do que um transformador de dois enrolamentos. Isso se deve a menor perda ôhmica e a perda do núcleo devido à redução do material utilizado.
- Um autotransformador, além de ser mais barato, tem melhor ajuste de tensão por possuir um único enrolamento.

## Desvantagens

- O fluxo magnético entre os enrolamentos primário e secundário é pequeno e, portanto, a impedância é baixa. Isso resulta em correntes de curto-circuito mais graves em condições de falha.
- As conexões em lados primários e secundários precisam necessariamente ser as mesmas, exceto quando se usa conexões estreladas interconectadas. Isso introduz complicações devido à mudança do ângulo de fase primária e secundária, particularmente no caso da conexão delta/delta.
- Devido ao neutro comum em um autotransformador conectado estrela/estrela, não é possível a terra neutra de um só lado. Ambos os lados devem ter sua neutralidade, seja na terra ou isolados.
- O enrolamento secundário não está isolado do enrolamento primário.
- Se um autotransformador é usado para fornecer baixa tensão e há uma quebra na enrolação secundária, a tensão primária completa vem através do terminal secundário que é perigoso para o operador e o equipamento. Assim, o autotransformador não deve ser usado para interligar sistemas de alta tensão e baixa tensão.
- Utilizado apenas nos locais limitados onde é necessária uma pequena variação da tensão de saída da tensão de entrada.
- Os autotransformadores são limitados por sua baixa impedância e falta de isolamento elétrico entre os circuitos primário e secundário.

## Aplicações

- Compensando quedas de tensão aumentando a tensão de alimentação nos sistemas de distribuição.
- Autotransformadores com uma série de tapes são usados para iniciar a indução e motores síncronos.
- O autotransformador é usado como variador em laboratório ou onde a variável contínua sobre amplas faixas é necessária.
- É usado como partida para dar até 50 a 60% de tensão total ao estator de um motor de indução de gaiola de esquilo durante a partida.
- É usado para dar um pequeno impulso a um cabo de distribuição para corrigir a queda de tensão.
- Também é usado como regulador de tensão.
- Usado no sistema de transmissão e distribuição de energia e também no sistema de áudio e ferrovias.

FONTE: <<https://aprendendoeletrica.com/o-que-e-um-autotransformador-e-como-funciona/>>. Acesso em: 13 mar. 2022.

# RESUMO DO TÓPICO 3

**Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- Os autotransformadores possuem várias limitações que impedem seu uso generalizado em circuitos de potência. Uma limitação significativa de um autotransformador comparado a um transformador convencional é sua baixa impedância e falta de isolamento entre o primário e o secundário.
- Um autotransformador também pode ser feito a partir de um transformador de dois enrolamentos conectando os dois enrolamentos para formar um enrolamento contínuo.
- Um autotransformador, normalmente, é construído a partir de um único enrolamento com várias derivações. Para uma aplicação de redução, a fonte é aplicada em toda a bobina que atua como primária. A carga é conectada através de uma parte de todo o enrolamento e atua como secundária.
- Para uma aplicação *step-up*, a fonte é aplicada em apenas parte da bobina e a carga é conectada em toda a bobina.

# AUTOATIVIDADE



1 Um autotransformador é um transformador no qual os circuitos primário e secundário têm uma parte de seus dois enrolamentos em comum. A potência nominal de um autotransformador é maior do que a de um transformador equivalente de dois enrolamentos. Sobre o autotransformador, assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) Um autotransformador pode ser construído a partir de um transformador de dois enrolamentos conectando os dois enrolamentos para formar um enrolamento contínuo.
- b) ( ) Um autotransformador tem menor eficiência do que um transformador de dois enrolamentos.
- c) ( ) Um autotransformador possui um custo menor e tem melhor ajuste de tensão por possuir dois enrolamentos.
- d) ( ) O autotransformador possui alta impedância em comparação com os transformadores convencionais.

2 O autotransformador, diferentemente do transformador convencional, possui apenas um único enrolamento de tensão que é comum aos dois lados, ou seja, ao primário e ao secundário. A partir de um transformador de dois enrolamentos é possível construir um autotransformador. Com base nas definições do autotransformador, analise as afirmativas a seguir:

- I- No autotransformador, os enrolamentos primário e secundário estão ligados somente eletricamente.
- II- A principal vantagem do autotransformador é que ele pode ter um custo inferior para a mesma classificação VA.
- III- A maior desvantagem de um autotransformador é que ele não possui o isolamento de enrolamento primário/secundário de um transformador convencional de enrolamento duplo.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas II e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 Para reduzir custos, ou quando é necessário para algumas situações específicas, pode-se optar pela utilização de um autotransformador. O autotransformador não é muito diferente de um transformador monofásico, quando se compara ao ferromagnético do equipamento. A grande diferença está no sistema de bobinas. De acordo com a teoria envolvendo o autotransformador, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) No autotransformador, se espera menos perdas no cobre e, conseqüentemente, um aumento no rendimento.
- ( ) O autotransformador é parecido com um transformador normal, mas é conectado de uma maneira especial, exceto que os enrolamentos do autotransformador devem ser isolados de modo adequado para que possam suportar a tensão de funcionamento.
- ( ) Uma diferença muito importante quando se pensa em transformador e um autotransformador é que, entre o transformador de dois enrolamentos e o autotransformador, os enrolamentos do transformador de dois enrolamentos estão eletricamente isolados, enquanto que os do autotransformador estão conectados diretamente entre si.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - F - F.
- b) ( ) V - V - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 Em algumas ocasiões é preciso realizar pequenas alterações nos níveis de tensão, por exemplo, elevar a tensão de 110 para 120 V. Essas pequenas elevações podem ser necessárias devido a quedas de tensão que ocorrem em sistemas de potência que estão muito distantes dos geradores. Nessas circunstâncias, enrolar um transformador com dois enrolamentos completos, com cada um especificado para aproximadamente a mesma tensão, teria um custo elevado e desnecessário. Desse modo, ao invés de se utilizar um transformador convencional, utiliza-se um autotransformador. Disserte sobre as vantagens e desvantagens de um autotransformador.

5 Em um autotransformador, os enrolamentos primário e secundário estão ligados elétrica e magneticamente. A seção do enrolamento designada como a parte primária do enrolamento é conectada à fonte de alimentação CA com o secundário, sendo parte do enrolamento primário. Um autotransformador também pode ser utilizado para aumentar ou diminuir a tensão de alimentação, invertendo as conexões. Assim, considere um transformador de 2500:250 V e 50 kVA que é conectado em forma de autotransformador, em que ab é o enrolamento de 250 V e bc é o de 2500 V. Nesse caso, o enrolamento de 250 V tem isolamento suficiente para suportar uma tensão de 2750 V com relação à terra. Calcule as tensões nominais VA e VB nos lados de alta e baixa tensão do autotransformador. Em seguida, calcule a especificação nominal em kVA do autotransformador.

# REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5380 - Transformador de potência**. Rio de Janeiro: ABNT, 1993a. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5380.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356 - Transformador de potência**. Rio de Janeiro: ABNT, 1993b. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5380.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440 - Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5380.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2022.

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento**. São Paulo: Grupo GEN, 2018.

CARVALHO, G. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios**. São Paulo: Saraiva, 2011.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. São Paulo: Grupo A, 2013.

COSTA, D. B.; RODRIGUES, R. **Eletrotécnica**. São Paulo: Grupo A, 2017.

JORDÃO, R. G. **Transformadores**. São Paulo: Blücher, 2002.

SIMONE, G. A. **Transformadores: teoria e exercícios**. São Paulo: Saraiva, 2010.



# MOTORES DE INDUÇÃO

## OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

**A partir do estudo desta unidade, você deverá ser capaz de:**

- conhecer os principais tipos de motores de indução;
- entender o princípio do campo girante no funcionamento do motor de indução;
- conhecer e avaliar os principais tipos de partidas de motores trifásicos;
- compreender o princípio de funcionamento dos motores de indução monofásico e conhecer seus tipos construtivos.

## PLANO DE ESTUDOS

Esta unidade está dividida em três tópicos. No decorrer dela, você encontrará autoatividades com o objetivo de reforçar o conteúdo apresentado.

TÓPICO 1 – PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

TÓPICO 2 – MÉTODOS DE PARTIDA

TÓPICO 3 – MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO



## CHAMADA

Preparado para ampliar seus conhecimentos? Respire e vamos em frente! Procure um ambiente que facilite a concentração, assim absorverá melhor as informações.



# **CONFIRA A TRILHA DA UNIDADE 3!**

Acesse o  
QR Code abaixo:



# PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, seja bem-vindo à Unidade 3 do Livro Didático Máquinas Elétricas e Transformadores I. Esta unidade foi pensada para que você tenha compreensão a respeito da importância dos motores de indução e aprenda o seu funcionamento, já que os motores de indução trifásicos são os mais utilizados na indústria.

No Tópico 1, será abordado o que é o motor de indução, onde é utilizado e o seu princípio de funcionamento. Em seguida, abordaremos os tipos de modelos de circuito elétrico equivalente, a potência mecânica útil, torque e perdas no cobre do estator.

Os próximos assuntos que aprenderemos são sobre o conjugado e potência pelo uso do Teorema de Thévenin, as curvas de conjugado, potência e corrente. Por fim, abordemos o tópico diagrama fasorial.

Máquinas elétricas são máquinas movidas por energia elétrica, que podem ser classificadas por várias categorias, como:

- quanto ao movimento: máquinas rotativas (motores e geradores) e máquinas estáticas ou estacionárias (transformadores);
- quanto à velocidade: máquinas síncronas e máquinas assíncronas;
- quanto à natureza da corrente: máquinas de corrente contínua e máquinas de indução ou de corrente alternada;
- quanto ao número de fases: máquinas monofásicas e máquinas trifásicas.

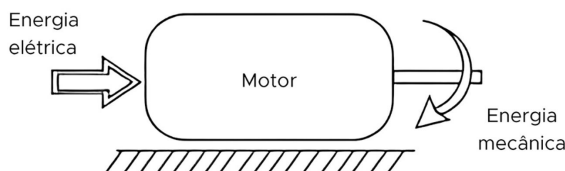
A Figura 1 apresenta a classificação das máquinas elétricas quanto ao movimento.



FONTE: A autora.

Os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica, como vemos na Figura 2. O motor elétrico é a máquina mais utilizada na indústria, no comércio e nas residências. O motivo é a energia elétrica, que é uma energia limpa, relativamente de baixo custo e de fornecimento instantâneo. Além disso, os motores possuem uma larga faixa de valores de potência que vai desde poucos watts até milhares de quilowatts (FILIPPO FILHO, 2013).

FIGURA 2 - TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM MECÂNICA EM UM MOTOR



FONTE: Adaptada de Filippo Filho (2013).

Há muitos tipos de motores elétricos e, por esse motivo, eles foram divididos em duas grandes áreas: motor de corrente contínua (CC) e motor de corrente alternada (CA). Os motores de corrente alternada podem ser divididos em especial, síncrono e assíncrono ou indução.

As máquinas de indução, do mesmo modo que as máquinas síncronas, são conversores eletromecânicos rotativos de energia que tem o seu funcionamento baseado na produção de campos girantes no entreferro e, por esse motivo, também são chamados de máquinas de campo girante. A máquina de indução pode ser utilizada tanto como motor quanto como gerador, porém, como gerador, apresenta desvantagens, por isso sua utilização ocorre apenas em aplicações especiais. Assim, as máquinas de indução muitas vezes são referidas como motores de indução.

## 2 O CAMPO GIRANTE

A máquina de indução é uma das máquinas mais utilizadas e dentre os vários motivos podemos citar a sua simplicidade, robustez e seu custo relativamente baixo, comparando-se com o custo de uma máquina de corrente contínua ou de uma máquina síncrona de mesma potência. Além disso, a máquina de indução tem a conveniência de ser muito parecida com um transformador monofásico ou trifásico no qual temos o secundário girante.

Algumas características das máquinas de indução são correntes e tensões elétricas alternadas nos enrolamentos do estator e do rotor.

Como essas máquinas são parecidas com o transformador, é possível afirmar que o estator e o rotor de um motor de indução podem ser comparados aos enrolamentos primário e secundário do transformador, no qual o estator é a parte estacionária do motor de indução e o rotor é a parte rotativa.

O motor de indução funcionará devido ao **campo magnético rotativo no motor de indução**, o qual é produzido pelo enrolamento do estator no entreferro entre o estator e o rotor. O estator possui um enrolamento estacionário trifásico que pode ser conectado em estrela ou em delta.

Sempre que a alimentação CA é conectada aos enrolamentos do estator, as correntes de linha defasadas de  $120^\circ$  entre si começam a fluir. Em razão de cada corrente de linha, um fluxo senoidal é produzido no entreferro. Esses fluxos têm a mesma frequência das correntes de linha e a mesma diferença de fase de  $120^\circ$  entre si.

### 3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

No século XIX, o físico francês François Arago notou que as correntes parasitas, que são produzidas em um condutor devido à indução eletromagnética, conseguem girar um disco circular condutor. Quando um campo magnético rotativo atravessa um disco circular condutor, correntes parasitas são induzidas no disco. Uma força de Lorentz é produzida pela corrente de Foucault e pelo campo magnético rotativo.

Os motores de indução são os motores mais utilizados nas mais diversas aplicações, principalmente devido a sua construção ser de baixo custo que está relacionada à falta de exigência de ímãs permanentes caros. Esse tipo de motor também é chamado de motor assíncrono, pois o motor de indução sempre funciona a uma velocidade menor que a velocidade síncrona, ou seja, inferior à velocidade do campo magnético rotativo no estator. Dependendo do tipo da alimentação de entrada utilizada, os motores de indução podem ser formados basicamente de dois tipos: motor de indução monofásico e motor de indução trifásico .

Eles também podem ser classificados de acordo com o tipo de rotor utilizado em: gaiola de esquilo ou anel deslizante ou tipo bobinado.

Em um motor de indução, a corrente elétrica no rotor necessária para produzir torque é obtida por indução eletromagnética a partir do campo magnético rotativo do enrolamento do estator.

## ATENÇÃO

Em um motor de indução, apenas o enrolamento do estator é alimentado com uma alimentação CA.



No motor de indução, o fluxo alternado é produzido ao redor do enrolamento do estator devido à alimentação CA. Este fluxo, chamado de campo magnético rotativo, gira com uma velocidade síncrona. A velocidade relativa entre o estator de campo magnético rotativo e os condutores do rotor causa uma força eletromotriz induzida nos condutores do rotor que estão em curto-circuito, assim a corrente do rotor é produzida devido à força eletromotriz induzida.

Devido à força eletromotriz induzida, esse motor é chamado de indução. Outro ponto importante é que esse mesmo princípio ocorre nos transformadores e, por isso, os motores de indução também são conhecidos como transformadores rotativos.

A corrente induzida no rotor também produz fluxo alternado ao seu redor, em que esse fluxo produzido no rotor fica atrás do fluxo do estator. A direção da corrente induzida do rotor se opõe a sua produção. Quem produz a corrente do rotor é a velocidade relativa entre o fluxo giratório do estator e do rotor, em que o rotor tende a alcançar o campo magnético rotativo do estator. Assim, o rotor gira na mesma direção do fluxo do estator para minimizar a velocidade relativa. No entanto, o rotor nunca vai atingir a velocidade síncrona.

Então, a velocidade síncrona,  $\omega_s$ , dada em rpm, é a velocidade de rotação do campo magnético em uma máquina rotativa e depende da frequência e do número de polos da máquina e é dada por:  $\omega_s = \frac{120 \cdot f}{P}$ , em que  $f$  é a frequência e  $P$  é o número de polos.

## DICA



A invenção dos motores de indução mudou completamente a trajetória da civilização. Esse motor foi inventado pelo cientista Nikola Tesla e é o tipo de motor mais comum. O canal Lesics Português mostra a animação do funcionamento do motor de indução, ou como eles mesmos definem mais especificamente, no pensamento genial de Nikola Tesla: [youtube.com/watch?v=AaotM\\_xbemU](https://www.youtube.com/watch?v=AaotM_xbemU)

## 4 O ESCORREGAMENTO

O rotor da máquina de indução tem operação semelhante ao secundário de um transformador. O enrolamento do rotor comporta-se como uma carga variável colocada no secundário da unidade transformadora. Essa carga é função de uma variável presente nas máquinas de indução, chamada de escorregamento do rotor com relação ao campo magnético, estabelecido no entreferro pelas correntes que circulam no enrolamento de armadura.

O escorregamento do rotor, representado por  $s$ , com relação ao campo magnético que atravessa o entreferro, é dado por Simone (2007):  $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \cdot 100\%$ , em que  $\omega_r$  é a velocidade angular do rotor e  $\omega_s$  a velocidade do sinal.

O escorregamento nominal de um motor de indução dificilmente ultrapassa os 5%. Com a introdução dos resistores externos ligados ao circuito do rotor, termicamente projetados para dissiparem o calor gerado, o escorregamento pode ser mantido em níveis bem maiores.

O escorregamento também pode ser escrito em função da velocidade síncrona e da velocidade real do motor através de:  $s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \cdot 100\%$ , em que  $\omega_s$  é a velocidade síncrona e  $\omega$  é a velocidade real.

Em 1908, já existiam motores de indução trifásicos de 50 HP, quatro polos, 440 V 60 Hz com rendimento superior a 88% e escorregamento de 4%, em plena carga.

## 5 O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Quando utilizamos um circuito elétrico para modelar uma determinada máquina, temos uma sensação de segurança pelo menos aparentemente, pois as suas propriedades são conhecidas, já que muitas equações fundamentais da eletricidade podem ser diretamente aplicadas. Por esse motivo, a maioria das máquinas possui um circuito elétrico equivalente ou real.

No circuito elétrico equivalente de uma máquina de indução trifásica, substituímos a força usada nas unidades transformadoras por um conversor de energia elétrica em energia mecânica. Esse conversor leva à potência de saída da máquina operando como motor e ao conjugado mecânico médio desenvolvido por ele.

Através do circuito equivalente, é possível avaliar as perdas no ferro e no cobre, a potência mecânica, o rendimento, a corrente do estator, o conjugado desenvolvido e outros parâmetros. Com o circuito equivalente, podemos avaliar o comportamento desses parâmetros em caso de variação da carga mecânica, da frequência e da tensão (FILIPPO FILHO, 2013).

Dessa forma, o circuito equivalente é útil para analisar as características e o desempenho do motor, como para auxiliar a compreensão de seu funcionamento.

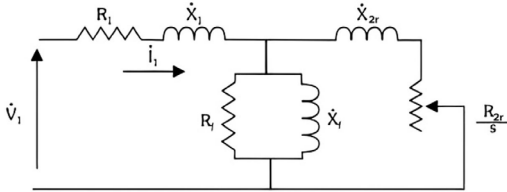
### 5.1 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO ESTATOR POR FASE

Para analisar as características operacionais do motor de indução, é comum realizar a sua representação através de um circuito elétrico equivalente. Vale ressaltar que o circuito elétrico equivalente não representa com exatidão todos os parâmetros elétricos do motor, porém oferece uma boa aproximação da realidade.

Para uma rede elétrica, considera-se o motor de indução como uma carga elétrica trifásica equilibrada. Como a carga está equilibrada, podemos então representar apenas uma fase. Assim, tem-se o circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico (FILIPPO FILHO, 2013).

A Figura 3 apresenta o circuito equivalente por fase refletido no estator:

FIGURA 3 - CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE REFLETIDO NO ESTATOR



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

A potência na resistência variável com o escorregamento,  $R_{2r}/s$ , representa toda a potência transferida ao rotor. Uma parte dessa potência é dissipada por efeito Joule nas barras do rotor e a outra parte é dissipada por histerese e por correntes parasitas no núcleo magnético do rotor.

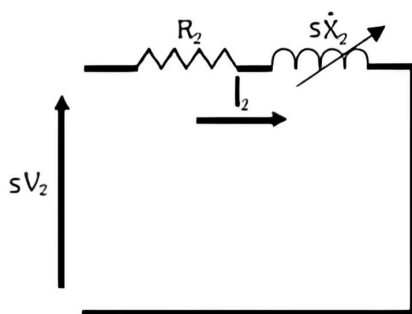
## 5.2 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO ROTOR POR FASE

Quando se aplica uma alimentação trifásica nos enrolamentos do estator, uma tensão é induzida nos enrolamentos do rotor. Quanto maior for o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos do estator, maior será a tensão do rotor resultante. Esse maior movimento relativo acontece na condição de parada, que é chamada de rotor bloqueado. Se a tensão induzida do rotor nesta condição for  $V_{2s}$ , então a tensão induzida em qualquer escorregamento é dada por:  $V_{2s} = sV_2$ .

A resistência do rotor,  $R_{2r}$ , é constante e independente do escorregamento. A reatância do motor de indução depende da indutância do rotor,  $X_{2r}$ , e da frequência da tensão e corrente no rotor, e por consequência do escorregamento.

A Figura 4 apresenta o circuito equivalente do rotor por fase:

FIGURA 4 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO ROTOR



FONTE: A autora.

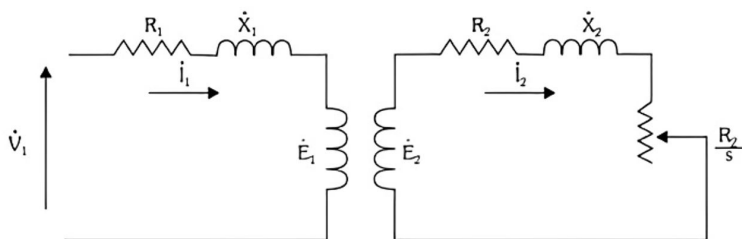
Nesse caso,  $V_2$  é a tensão induzida no enrolamento do rotor bloqueado, ou seja, nas condições  $s=1$  e  $n=0$ ,  $R_2$  é a resistência do enrolamento do rotor por fase, que representa a perda por cobre,  $X_2$  é a reatância de dispersão do rotor parado por fase; nas condições  $s=1$  e  $n=0$ ,  $I_2$  é a corrente por fase no rotor.

### 5.3 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE COMPLETO REFERIDO AO ESTATOR POR FASE

Se o rotor girasse na velocidade síncrona, o escorregamento seria igual a zero. Já com o rotor bloqueado, o escorregamento é igual a 1. No entanto, o escorregamento igual a zero não é possível, pois se o motor girar na velocidade de sincronismo, não há indução e não existe ação motriz.

Sendo assim, temos a resistência e a indutância do estator, o efeito transformador do motor e a impedância do rotor, e podemos estabelecer o circuito equivalente por fase, conforme a Figura 5, em que  $R_1$  e  $X_1$  são respectivamente a resistência e a reatância devido à dispersão do estator.

FIGURA 5 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE COMPLETO REFERIDO AO ESTATOR

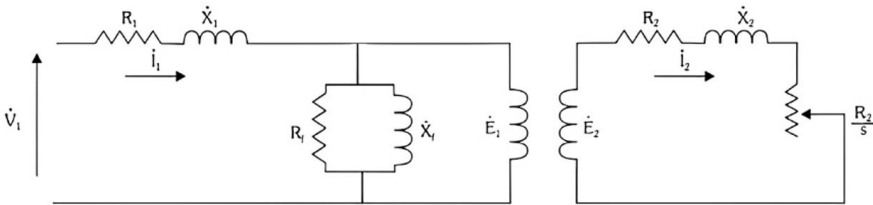


FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

Nesse caso,  $E_2$  é a tensão induzida por fase quando o rotor está bloqueado,  $X_2$  é a reatância de dispersão por fase e  $R_2$  a resistência do rotor por fase e a resistência variável  $R_2/s$  é a potência do rotor, que inclui potência mecânica de saída e perda de cobre do rotor.

A Figura 6 apresenta outro modo de representar o circuito elétrico equivalente por fase:

FIGURA 6 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE POR FASE



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

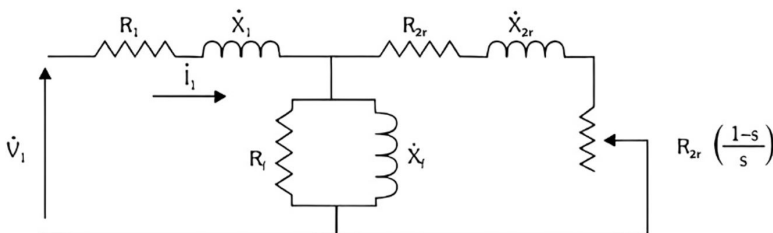
Nesse caso,  $R_1$  e  $X_1$  são a resistência do enrolamento do estator e reatância de fuga,  $R_2$  e  $X_2$  são a resistência do enrolamento do rotor e reatância de fuga na parada, ou seja, com  $s = 1$ . O  $X_2$  é a reatância de fuga do rotor no escorregamento,  $R_f$  e  $X_f$  são a resistência que representa as perdas no ferro e a indutância representativa da magnetização, e  $E_1$  e  $E_2$  são as fem induzidas pelo estator e pelo rotor no escorregamento  $s$ .

## 5.4 FORMA ALTERNATIVA PARA O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Também é possível representar o circuito equivalente de um motor de indução de um modo alternativo, conforme a Figura 7. Para separar as perdas de natureza elétrica da potência total transferida ao rotor, utiliza-se a igualdade representada por:

$$\frac{R_{2r}}{s} = R_{2r} + R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right).$$

FIGURA 7 - FORMA ALTERNATIVA PARA O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE



FONTE: Adaptada de Filippo Filho (2013).

A resistência  $R_{2r}$  representa as perdas de natureza elétrica do rotor, assim, a parcela restante, representa a potência mecânica total. Para obtenção da potência mecânica útil, subtraímos as perdas por atrito e ventilação.

## 6 POTÊNCIA MECÂNICA ÚTIL

A potência mecânica útil dos motores pode ser expressa em cv (cavalos-vapor) ou kW (quilowatt) e a relação entre essas unidades é dada por:  $1CV = 0,736KW$ .

O motor trifásico, para fornecer a potência mecânica, precisa que a rede forneça uma potência elétrica,  $P_{ei}$ , de:  $P_{ei} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\phi$ , em que  $V_L$  é a tensão de linha,  $I_L$  é a corrente de linha,  $\phi$  é a defasagem entre a tensão e a corrente e  $\cos\phi$  é o fator de potência do motor.

A maior parcela da potência elétrica é transformada em potência mecânica, uma outra parte menor são as perdas por efeito Joule no estator e rotor, perdas por correntes parasitas e por histerese no núcleo magnético, perdas rotacionais devido ao atrito e ventilação e outras perdas.

A potência mecânica é dada pela equação  $P_{mec} = C \cdot \omega = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$ , em que  $C$  é o conjugado (torque - N.m) e  $\omega$  é a velocidade angular (rad/s).

Do circuito equivalente, vimos que a potência mecânica é representada por uma resistência variável, assim temos:  $P_{mec} = 3 \cdot R_{2r} \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \cdot I_{2r}^2$

Nessa equação, o fator 3 deve-se ao fato de o circuito ser por fase. A velocidade angular do rotor em relação à velocidade síncrona é dada por:  $\omega = \omega_s \cdot (1 - s)$ .

A eficiência do motor de indução é calculada pela equação:  $eficiência = \frac{P_{mec}}{P_{ei}}$

Como o circuito equivalente é dado por fase, a potência total é:  $P_{ei} = 3 \cdot P_{fase}$ . A  $P_{fase}$  é obtida através da equação:  $P_{fase} = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi$ .

## 7 TORQUE

Um motor de indução desenvolve o torque quando induz corrente ao rotor, que é proporcional à velocidade diferencial do rotor e ao campo magnético rotativo no estator.

Do ponto de vista mecânico, o que vai nos interessar é o conjugado médio (torque) desenvolvido pelo conjunto completo das barras. Assim, pode-se assumir que o conjugado médio é proporcional ao fluxo magnético por polo e à corrente *rms* nas barras do rotor, desde que esteja em fase com a tensão induzida. O conjugado ou torque é calculado através de  $C = k \cdot \phi \cdot I_2$ .

O torque em condição de operação é máximo no valor de escorregamento, o que torna a reatância do rotor por fase igual à resistência do rotor por fase.

## 8 PERDAS NO COBRE DO ESTATOR

Do mesmo modo que o transformador, um motor de indução trifásico também possui vários tipos de perdas, como as perdas  $R I^2$  nos enrolamentos do estator, as perdas  $R I^2$  no rotor e as perdas por histerese e correntes parasitas de Foucault no núcleo. Também há outros tipos de perdas, como: as perdas por atrito e ventilação ou perdas rotacionais, além das perdas adicionais que são, por exemplo, as de dispersão do fluxo magnético.

O estator do motor de indução trifásico possui algumas perdas, que são: as perdas de cobre do estator e as perdas de ferro do estator. As perdas de ferro do estator estão relacionadas às perdas de corrente de Foucault e por histerese e dependem de dois fatores: a densidade de fluxo e a frequência de alimentação.

A perda de ferro do rotor depende da frequência da corrente do rotor e a frequência da corrente do rotor depende do escorregamento ou velocidade do rotor. As perdas de ferro do rotor são desprezíveis, pois a frequência da corrente do rotor é muito pequena.

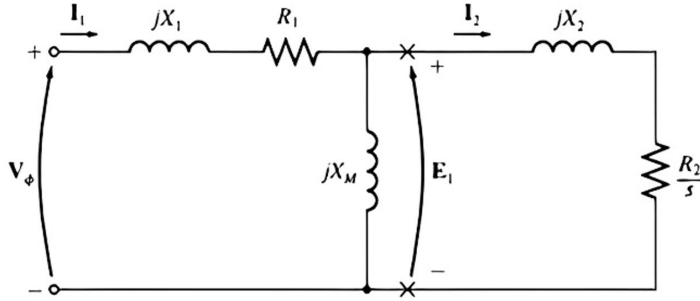
As perdas no cobre do estator são calculadas através de:  $P_{\text{cobre}} = R_1 \cdot I_1^2$

## 9 CONJUGADO E POTÊNCIA PELO USO DO TEOREMA DE THÉVENIN

O teorema de Thévenin pode ser aplicado à análise do circuito equivalente de um motor de indução. Esse teorema afirma que qualquer circuito linear que possa ser separado por dois terminais do resto de um sistema pode ser substituído apenas por uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente.

Considerando o circuito equivalente do motor de indução, o circuito resultante é uma combinação simples de elementos em série, como vemos na Figura 8 (CHAPMAN, 2013).

FIGURA 8 - CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO MOTOR DE INDUÇÃO



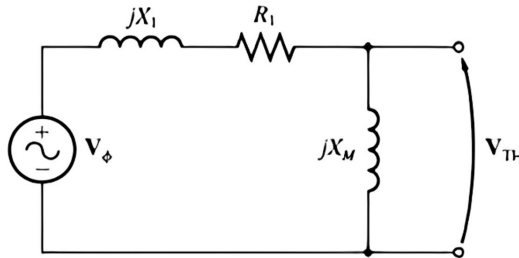
FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

A tensão de Thévenin para o circuito equivalente de um motor de indução é calculada aplicando a regra do divisor de tensão através de:  $V_{th} = \frac{jX_M}{jX_1 + R_1 + jX_M} \cdot V_\phi$ .

Reordenando a equação temos:  $V_{th} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \cdot V_\phi$ .

A Figura 9 representa a tensão de Thévenin no circuito do motor de indução:

FIGURA 9 - TENSÃO EQUIVALENTE DE THÉVENIN DO CIRCUITO DE ENTRADA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO

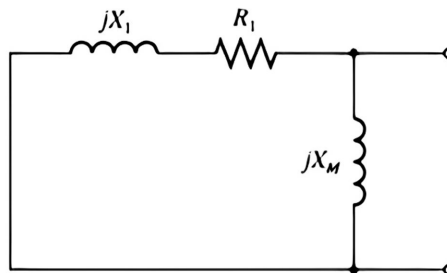


FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

Após o cálculo da tensão de Thévenin, vamos calcular a impedância de Thévenin através da equação:  $Z_{th} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)}$ .

A Figura 10 apresenta no circuito a impedância equivalente de Thévenin:

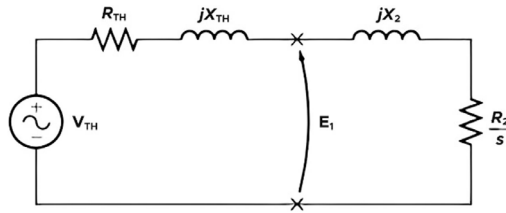
FIGURA 10 - IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE THÉVENIN DO CIRCUITO DE ENTRADA



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

A Figura 11 apresenta o circuito simplificado do motor de indução após os cálculos da tensão e impedância de Thévenin:

FIGURA 11 - CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO RESULTANTE DO MOTOR DE INDUÇÃO



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

A partir da Figura 11, podemos determinar a corrente  $I_2$  através da equação  $I_2 = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_2}$ . Substituindo  $Z_{th}$  e  $Z_2$ , a corrente  $I_2$  é igual a:  $I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_2 + X_{th})^2}}$ .

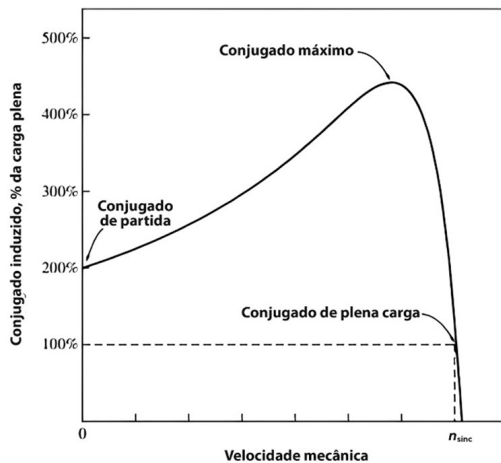
Após o cálculo da corrente  $I_2$ , podemos calcular o valor da potência de entreferro através de  $P_{EF} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}$  ou  $P_{EF} = \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2}$ .

A partir da potência de entreferro, podemos calcular o conjugado induzido do rotor  $\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}}$ . Substituindo a  $P_{EF}$  temos que:  $\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega_{sinc} [(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2]}$ .

## 10 CURVAS DE CONJUGADO, POTÊNCIA E CORRENTE

A curva característica de conjugado versus velocidade de um motor de indução, como vemos na Figura 12, fornece muitas informações sobre como funciona os motores de indução (CHAPMAN, 2013).

FIGURA 12 - CONJUGADO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE E DO ESCORREGAMENTO



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

A primeira informação é que o conjugado induzido do motor é nulo na velocidade síncrona.

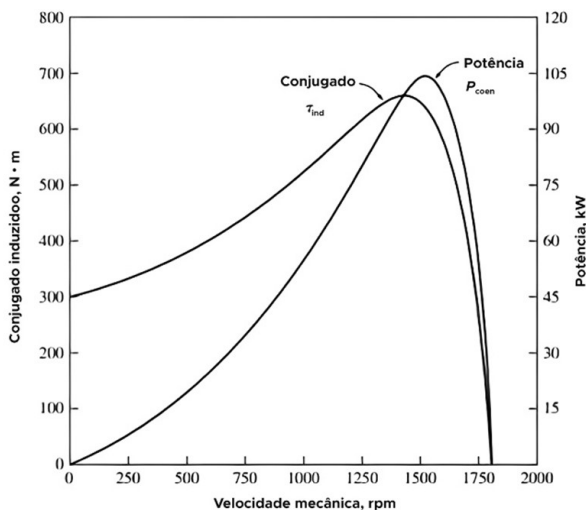
A segunda informação diz que essa curva é aproximadamente linear entre a carga a vazio e plena carga. Assim, temos que a resistência do rotor é bem maior que a reatância e a corrente; e o campo magnético do rotor e o conjugado induzido aumentam linearmente conforme o escorregamento vai crescendo.

A terceira informação do gráfico mostra que existe um conjugado chamado de conjugado máximo que é de 2 a 3 vezes maior que o conjugado nominal de plena carga do motor.

A quarta informação importante diz que o motor de indução colocará em movimento qualquer carga no qual ele pode acionar através da potência máxima. Isso se deve ao motivo que o conjugado de partida do motor é um pouco superior a seu conjugado de plena carga. O escorregamento do motor de indução variará com o quadrado da tensão aplicada sobre ele.

A potência de pico que o motor de indução fornece acontece em uma velocidade diferente da de conjugado máximo, como vemos na Figura 13.

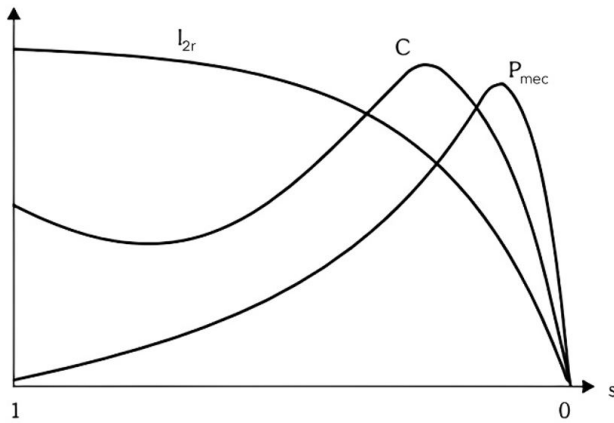
FIGURA 13 - CONJUGADO INDUZIDO E POTÊNCIA CONVERTIDA VERSUS VELOCIDADE



FONTE: Adaptado de Chapman (2013).

A Figura 14 apresenta as curvas do conjugado da corrente e da potência mecânica, pelo escorregamento.

FIGURA 14 - CURVAS DO CONJUGADO, CORRENTE E POTÊNCIA MECÂNICA VERSUS ESCORREGAMENTO



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

Nota-se na Figura 14 que no limite, quando  $s \rightarrow 0$ , o conjugado também  $C \rightarrow 0$ .

## 11 DIAGRAMA FASORIAL

Como já vimos, o princípio de funcionamento do motor de indução é muito parecido ao de um transformador. Um motor de indução parado é semelhante a um transformador sem carga. Assim, o método de desenho do diagrama fasorial do motor de indução, como vemos na Figura 15, é o mesmo do diagrama fasorial do transformador.

FIGURA 15 - DIAGRAMA FASORIAL DO MOTOR DE INDUÇÃO POR FASE

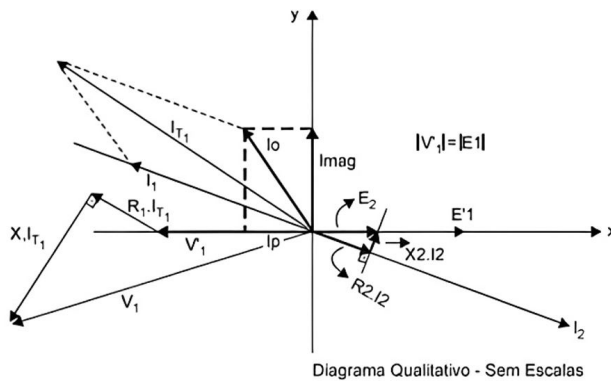


Diagrama Qualitativo - Sem Escalas

FONTE: Adaptado de Simone (2007).

O rotor da máquina de indução opera de modo semelhante ao secundário do transformador. O enrolamento do rotor comporta-se como uma carga variável colocada no secundário do transformador.

# RESUMO DO TÓPICO 1

## **Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- Os motores elétricos de indução são as máquinas mais utilizadas na indústria, no comércio e nas residências, transformando energia elétrica em energia mecânica. Esses motores são eficientes e de baixo custo.
- Nas máquinas de indução, tanto a corrente quanto a tensão elétrica são alternadas nos enrolamentos do estator, parte estacionária e do rotor, parte rotativa. Por esse motivo, o estator e o rotor do motor de indução são comparados aos enrolamentos primário e secundário de um transformador.
- Do mesmo modo que um transformador, o motor de indução trifásico também possui vários tipos de perdas, como as perdas nos enrolamentos do estator, as perdas no rotor e as perdas por histerese e correntes parasitas de Foucault no núcleo. Além das perdas por atrito e ventilação e perdas rotacionais.
- O teorema de Thévenin pode ser utilizado para realizar análises em um circuito equivalente de um motor de indução, ou seja, substituindo todo o sistema por uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente.

# AUTOATIVIDADE



1 O rotor dos motores de indução podem ser dois tipos: bobinado ou de gaiola de esquilo. Uma das diferenças entre eles é com relação ao custo, em que o bobinado possui um custo maior. Isso se deve ao fato do rotor bobinado possuir mais manutenção devido ao desgaste nas escovas e anéis deslizantes. A consequência desse custo maior faz com que esse tipo de rotor bobinado dificilmente seja utilizado. Sobre os motores de indução, assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) O rotor da máquina de indução opera de um modo semelhante ao secundário de um transformador, em que o enrolamento do rotor comporta-se como uma carga variável que é colocada no secundário do transformador.
- b) ( ) A potência de pico que um motor de indução pode fornecer ocorre com velocidade igual ao do conjugado máximo.
- c) ( ) Um motor de indução trabalha induzindo tensões e correntes no estator da máquina e, por esse motivo, ele também é chamado algumas vezes de transformador rotativo.
- d) ( ) Os motores de indução são o tipo de motor menos utilizado na indústria, pois possuem manutenção complexa e alto custo para construção, não compensando para uma fábrica mantê-los em funcionamento.

2 Casas, escritórios, fábricas e indústrias não são alimentados por pequenas baterias, ou seja, não são alimentados com corrente contínua, mas com corrente alternada. A corrente alternada inverte sua direção cerca de 60 vezes por segundo, assim possui uma frequência de 60 Hz. Com base nas definições sobre os motores de indução, analise as afirmativas a seguir:

- I- O motor de indução é o tipo de motor de corrente alternada mais utilizado. Ele também é chamado de motor assíncrono, pois funciona com velocidade menor quando comparado com a velocidade síncrona.
- II- Em um motor de indução, a corrente elétrica no rotor necessária para produzir um torque é obtida através da indução eletromagnética a partir do campo magnético rotativo do enrolamento do estator.
- III- A velocidade síncrona é definida como a velocidade de rotação do campo elétrico em uma máquina do tipo rotativa e dependerá apenas da frequência e da tensão aplicada nessa máquina.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas I e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 Um motor de indução, ou motor assíncrono, é um tipo de motor elétrico que opera em corrente alternada e que é muito utilizado. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao de um transformador, exceto pela parte rotativa que o transformador não possui. De acordo com os princípios de funcionamento de um motor de indução, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) O motor de indução possui um conjugado máximo que é cerca de 2 a 3 vezes maior que o conjugado nominal de plena carga desse motor.
- ( ) No motor de indução, o fluxo alternado é produzido ao redor do enrolamento do rotor devido à alimentação CA.
- ( ) Através do circuito equivalente, é possível avaliar as perdas no ferro e no cobre, a potência mecânica, o rendimento, a corrente do estator, o conjugado desenvolvido e outros parâmetros.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - F - F.
- b) ( ) V - F - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 Há basicamente dois tipos de motores de indução que dependem da alimentação de entrada, sendo motores de indução monofásicos e motores de indução trifásicos. A velocidade angular do rotor se relaciona com a velocidade angular do campo magnético girante através do escorregamento. Considere um motor de indução de 220 V, seis polos, 60 Hz e ligado em Y. Esse motor possui um escorregamento de plena carga de 3%. Nesse contexto, calcule qual é a velocidade síncrona desse motor de indução.

5 O escorregamento nominal de um motor de indução normalmente não ultrapassa o valor de 5%. Quando introduzidos, os resistores externos são termicamente projetados para dissiparem o calor gerado e ligados ao circuito do rotor, o escorregamento pode ser mantido em níveis bem maiores. O escorregamento pode ser escrito em função da velocidade síncrona e da velocidade real. Considere um motor de indução que possui quatro polos e frequência de 50 Hz ligado em Y. Esse motor possui um escorregamento de plena carga de 4%. Qual é a velocidade do rotor desse motor com carga nominal?



# MÉTODOS DE PARTIDA

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, neste tópico, abordaremos primeiramente o assunto métodos de partida de um motor de indução. No tipo de motor de indução monofásicos, a partida não é automática, mas nos motores de indução trifásicos a partida já é automática. Quando o motor começa a funcionar de modo automático, ou seja, sem nenhuma força externa aplicada a essa máquina, dizemos que o motor é de autopartida.

Nessa primeira parte, vamos ver os diversos tipos de partida: direta, com tensão reduzida com autotransformador, com tensão reduzida com reator ou resistor primário, partida estrela – triângulo, por fase dividida ou por enrolamento parcial, com resistência externa de rotor, direta com rotor de dupla gaiola, utilizando “soft start” e partida utilizando conversor de frequência.

A segunda parte se refere ao controle de velocidade de motores de indução trifásicos. O motor de indução é um motor que possui velocidade constante, ou seja, independente da variação de carga, a variação de velocidade é pequena. Um problema nesse tipo de motor acontece quando existe uma redução da velocidade, pois ela é acompanhada por uma perda de eficiência e por um baixo fator de potência.

Os motores de indução são muito utilizados e devido à alta utilização uma grande parte das vezes é necessário possuir algum tipo de controle de velocidade. Há muitos métodos de se realizar o controle de velocidade do motor de indução. Nesse sentido, nós veremos o controle pela variação da resistência do rotor, pela variação do número de polos, pela variação da frequência da linha, pela variação da tensão da linha, pela variação da frequência do rotor, ou seja, variação do escorregamento e o controle utilizando conversores de frequência.

O principal fator que limita as correntes de partida no motor de indução são as indutâncias de dispersão, tanto do estator quanto do rotor, que podem variar de 6 a 8 vezes na corrente nominal desse motor. Quando se aciona um motor, em caso de altas correntes serem absorvidas, a corrente nominal necessária na unidade de processamento de potência será muito alta e, portanto, impossível de se trabalhar.

Na partida, a velocidade  $\omega_m$  do rotor é zero, portanto a velocidade de escorregamento  $\omega_{\text{esco}}$  é a mesma da velocidade síncrona  $\omega_{\text{sin}}$ . Devido a esse fato, devemos aplicar tensões com baixa frequência nos motores de indução para que se possa manter a velocidade de escorregamento em um valor baixo e assim evitar essas altas correntes de partida.

## 2 MÉTODOS DE PARTIDA

A maioria dos motores grandes de indução são acionados diretamente na linha, mas quando motores muito grandes são iniciados desse modo, eles causam uma perturbação de tensão nas linhas de alimentação devido a grandes surtos de corrente de partida. Para limitar o pico de corrente de partida, grandes motores de indução são iniciados com tensão reduzida e, em seguida, têm a tensão de alimentação completa reconectada quando atingem a velocidade de rotação próxima.

Controlar a velocidade do motor de indução CA, ou – como também é conhecido – motor assíncrono, sempre foi desafiador. Enquanto uma máquina CC geralmente tem duas partes enroladas, os enrolamentos de campo e de armadura, bem como escovas e um comutador, a máquina CA tem um enrolamento simples e fixo que é o estator e rotor. O rotor geralmente consiste em condutores formados pela fundição de alumínio ou cobre no núcleo de ferro. Não há escovas ou comutadores. A máquina é, portanto, mais barata, mais simples e mais confiável. Por esse motivo, essas máquinas continuam sendo a maioria nas indústrias do mundo. Então, como controlamos a velocidade e damos partida nesses motores de indução? Para responder essa questão, há algumas técnicas que veremos a seguir.

### 2.1 PARTIDA DIRETA

Este método de partida é normalmente limitado a motores de indução pequenos de gaiola de esquilo, pois a corrente de partida pode ser muito alta podendo chegar a até oito vezes a corrente de carga total do motor.

O uso de um rotor de gaiola dupla requer uma corrente de partida baixa de aproximadamente quatro vezes na corrente de carga total do motor. O uso de AVR de ação rápida permite que motores de 75 KW e acima sejam iniciados diretamente na linha.

A partida direta é um tipo de partida simples e de baixo custo para um motor de indução trifásico. Nesse tipo de partida, os contatos se fecham contra a ação da mola e um isolador é necessário para isolar o motor de partida da alimentação. Há necessidade de proteção para o motor e algumas delas são: proteção contra sobrecorrente, proteção contra subtensão, proteção contra curto-circuito, etc. A tensão do circuito de controle às vezes é reduzida através de um autotransformador.

## 2.2 PARTIDA COM TENSÃO REDUZIDA COM AUTOTRANSFORMADOR

A partida do motor através do autotransformador opera através de um interruptor de duas posições, ou seja, manualmente/automaticamente, utilizando um temporizador para mudar da posição inicial para a posição de operação.

Na partida, a alimentação é conectada aos enrolamentos do estator através de um autotransformador que reduz a tensão aplicada para 50, 60 e 70% do valor normal, dependendo da derivação utilizada.

A tensão reduzida diminui a corrente nos enrolamentos do motor em cerca de 50% da derivação da corrente do motor, e a corrente de alimentação será metade da corrente do motor. Assim, a corrente de partida tomada da fonte será apenas 25% da corrente do motor de partida DOL (*Direct Online Starter*).

Para um motor de indução, o torque  $T$  é desenvolvido em 50% de derivação, então, no torque da partida, 25% de torque é produzido.

## 2.3 PARTIDA COM TENSÃO REDUZIDA COM REATOR OU RESISTOR PRIMÁRIO

Esse método usa resistores para criar uma queda de tensão e, desse modo, reduzir a corrente de partida do motor. Cada condutor do estator consiste em um resistor variável em série com ele. Desse modo, durante a partida, a resistência completa está presente no circuito. Isso causa uma queda de tensão e, assim, uma tensão reduzida aparece nos terminais do motor. O resistor desliga gradualmente à medida que o motor vai aumentando a velocidade.

Quando o motor atinge a velocidade máxima, todas as resistências são desconectadas e uma tensão nominal aparece nos terminais do motor. Assim, com a partida com resistor primário, a corrente de partida e o torque de partida são reduzidos em uma proporção quadrada.

Algumas vantagens desse tipo de partida são: proporcionar uma aceleração suave do motor, e fornecer um fator de potência mais alto na partida.

No entanto, há algumas desvantagens, como: os resistores dissipam o calor e para as cargas variáveis ajustarem a tensão neste método não é muito simples.

## 2.4 PARTIDA ESTRELA - TRIÂNGULO

Um motor trifásico fornecerá três vezes a potência de saída quando os enrolamentos do estator estiverem conectados em delta do que em estrela. No entanto, consumirá 1/3 da corrente da alimentação quando conectado em estrela do que quando conectado em delta. O torque de partida desenvolvido em estrela é metade do torque de partida em delta.

A chave de partida estrela-triângulo deve garantir que a partida do motor seja realizada na ligação estrela, na qual o motor, durante alguns segundos, deve ficar nessa ligação. Durante esse tempo, o motor vai ganhar velocidade, por esse motivo ele é ajustável. Após o motor ganhar velocidade, a ligação estrela é desfeita e é realizada a ligação triângulo. Entre o desligamento da ligação em estrela e a ligação em triângulo temos um intervalo de tempo de aproximadamente 100 ms.

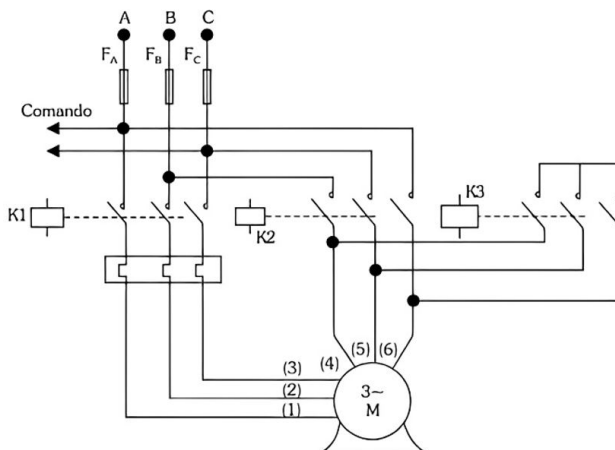
# ATENÇÃO



Não pode ser realizada a ligação triângulo antes da ligação estrela ser desfeita. Caso isso aconteça, haverá um curto-circuito entre as fases.

A Figura 16 apresenta o diagrama de força da chave estrela-triângulo. A partida estrela-triângulo é mais complicada do que a partida direta. Um motor com partida estrela-triângulo pode não produzir torque suficiente para iniciar a partida em plena carga, de modo que a saída é reduzida na posição de partida. Os motores normalmente são iniciados sob uma condição de carga leve. Ao utilizar a partida em estrela, há uma redução na corrente de partida.

FIGURA 16 - DIAGRAMA DE FORÇA-CHAVE Y/Δ



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

Quando os contatores principais  $K_1$  e  $K_3$  estiverem energizados, se formará a ligação estrela, e obrigatoriamente  $K_2$  deve estar desenergizado. Após o tempo ajustável,  $K_3$  é desarmado e, aproximadamente 100 ms depois,  $K_2$  é energizado para se estabelecer a ligação triângulo.

## 2.5 PARTIDA POR FASE DIVIDIDA OU POR ENROLAMENTO PARCIAL

O estator do motor de indução monofásico, além do enrolamento principal, ou também chamado de enrolamento de funcionamento, possui um outro enrolamento que é conhecido como enrolamento auxiliar ou enrolamento de partida. Uma chave chamada de interruptor centrífugo é conectado em série com esse enrolamento de partida. Essa chave tem a função de desconectar o enrolamento auxiliar do circuito principal quando o motor monofásico atingir uma velocidade de aproximadamente 75 a 80% da velocidade síncrona.

Como o enrolamento de funcionamento é indutivo, para se criar uma diferença de fase entre os dois enrolamentos é preciso que o enrolamento de partida tenha uma alta resistência. Para que um enrolamento seja altamente resistivo, a corrente deve ficar praticamente em fase com a tensão e, para um enrolamento altamente indutivo, a corrente fica atrás da tensão com um ângulo bem defasado.

Já o enrolamento de partida é altamente resistivo. Portanto, a corrente que flui nesse enrolamento fica atrás da tensão aplicada com um ângulo bem pequeno. Como já vimos, o enrolamento em execução é altamente indutivo. Assim, a corrente que flui no enrolamento em execução fica atrás da tensão aplicada em um grande ângulo.

A resultante dessas duas correntes produz um campo magnético rotativo que gira em uma direção.

Em um motor de indução de fase dividida, a corrente de partida e principal são separadas uma da outra por algum ângulo, então, esse motor recebeu o nome de motor de indução de fase dividida.

Os motores de indução de fase dividida possuem como característica baixa corrente de partida e torque de partida moderado. Esses motores são muito utilizados em ventiladores, sopradores, bombas centrífugas, máquinas de lavar, esmerilhadeiras, tornos, ventiladores de ar-condicionado etc.

## 2.6 PARTIDA COM RESISTÊNCIA EXTERNA DE ROTOR

Esse tipo de partida é utilizado com um motor de indução de rotor bobinado. O método consiste em utilizar uma resistência/fase externa no circuito do rotor para que o mesmo desenvolva um alto valor de torque. Esse alto torque é produzido em baixas velocidades, ou seja, quando a resistência externa está em seu valor mais alto.

Na partida, ao mesmo tempo que alimentação de energia é conectada ao estator através de um contator de três polos, também é adicionada uma resistência externa do rotor. A alta resistência limitará a corrente inicial e, desse modo, permitirá que o motor dê partida com toda segurança contra altas cargas.

Os resistores na grande maioria das vezes são do tipo bobinado e conectados por meio de escovas e anéis coletores a cada fase do rotor. Eles são rosqueados com pontos trazidos para contadores fixos.

À medida que o motor arranca, a resistência externa do rotor é gradualmente cortada do circuito. Após a partida, é girada e move os três contatos de modo simultâneo de um contato fixo para o próximo. Os três contatos móveis são interconectados para formar um ponto de partida para os resistores.

No entanto, é necessário garantir que o motor não comece a funcionar até que todas as resistências do rotor estejam em circuito. Para isso, é instalado um intertravamento que impede que os contadores sejam fechados até que a condição seja estabelecida.

## 2.7 PARTIDA DIRETA COM ROTOR DE DUPLA GAIOLA

O torque de partida em um motor de gaiola de esquilo é relativamente pequeno, e isso se deve à baixa resistência do rotor. No entanto, não tem como ser colocado uma resistência externa, pois o enrolamento nesse motor está permanentemente em curto-circuito.

Assim, para melhorar os torques de partida dos motores de gaiola de esquilo são utilizados um rotor chamado de gaiola dupla. Esse tipo de rotor gaiola dupla é um método utilizado para obter uma resistência comparativamente alta do rotor na partida. Essa resistência alta serve para dar um bom torque de partida. Já a baixa resistência do rotor durante a operação serve para dar uma boa eficiência na gaiola dos motores.

Desse modo, temos que o rotor de gaiola dupla consiste em duas gaiolas separadas no rotor. A gaiola interna é composta de baixa resistência, aumentando sua área de seção transversal e alta reatância indutiva, e está profundamente embutida no rotor. Já a outra gaiola possui seção transversal pequena, ou seja, tem alta resistência e baixos valores de reatância.

Quando o motor está conectado através da alimentação, ou seja, na partida, a frequência da fem ou corrente induzida do rotor é alta, o que é igual à frequência de alimentação do estator. Isso causa mais fluxo de fuga nos condutores da gaiola interna do que na gaiola superior. Por isso, temos que a reatância indutiva da gaiola inferior será maior e, assim, a impedância oferecida pela gaiola inferior também aumentará, resultando em pouca corrente fluindo.

Esse fato faz com que a maior parte da corrente induzida flua através da gaiola superior, pois ela possui alta resistência e baixa impedância de fuga. Assim, o motor de indução desenvolverá um alto torque de partida devido a um aumento na resistência efetiva do rotor.

Conforme a velocidade vai aumentando e se aproximando da velocidade nominal, a frequência diminui para menos de 2 Hz. Trabalhando em condições normais, a reatância indutiva e seu efeito na corrente na gaiola interna serão muito pequenos. Nessa condição, a maior parte da corrente do rotor fluirá através da gaiola interna, pois a corrente sempre procurará fluir para um caminho de baixa resistência. Desse modo, a perda de  $I^2R$  no circuito do rotor não será alta e, portanto, terá uma alta eficiência em condições de operação.

Na partida, temos que  $s = 1$ , nessa condição, uma porção maior do torque é contribuída pela gaiola externa. Durante o funcionamento, a gaiola externa contribui apenas com uma pequena parte do torque total. A construção do rotor de gaiola dupla do motor de indução possui ótimas características de funcionamento.

O alto torque de partida produzido é limitado à gaiola superior devido a sua alta resistência. Portanto, deve-se tomar cuidado com a partida frequente do motor com cargas pesadas, pois isso superaquecerá a gaiola superior e seus condutores, podendo até ocasionar uma queima.

Algumas vantagens do motor de indução de gaiola dupla são permitir um alto torque de partida e boa eficiência durante as condições de funcionamento; e não possuir uma necessidade de manutenção de anéis coletores e escovas quando comparado ao rotor bobinado. Como a corrente de partida necessária para produzir o torque de partida é pequena, o motor pode ser iniciado através de uma partida direta e é extremamente útil para partida sob condições de carga pesada.

## 2.8 PARTIDA UTILIZANDO SOFT START

As indústrias utilizam vários tipos de máquinas para produzir os mais diversos produtos. Como já vimos, a máquina de indução é uma das máquinas trifásicas mais utilizadas e que representa quase 70% dos motores utilizados nas indústrias. Isso se deve ao fato que sua construção é robusta e o motor possui alta eficiência, o tornando a melhor escolha para todos os setores industriais.

No entanto, esse motor precisa de dispositivos e equipamentos de proteção usados para que a sua operação seja segura, para que possam operar com segurança e evitar qualquer dano potencial ao motor, além de aumentar sua vida útil. O equipamento mais essencial usado para o motor de indução trifásico é a partida de motor.

O *soft starter* é um tipo de partida de motor que utiliza a técnica de redução de tensão, justamente para reduzir a tensão durante a partida do motor. O *soft starter*, durante a partida do motor, vai oferecendo um aumento gradual da tensão, o que permitirá que o motor acelere lentamente e ganhe velocidade de um modo mais suave. Essa técnica evita qualquer rasgo mecânico e solavancos devido ao fornecimento rápido de tensão total.

Como sabemos, o torque de um motor de indução é diretamente proporcional ao quadrado da corrente e a corrente depende da tensão de alimentação. Desse modo, a tensão de alimentação pode ser utilizada para controlar o torque de partida.

Se fizéssemos uma partida de motor normal, ou seja, aplicarmos a tensão total no motor na partida, gerariamos um torque máximo de partida, o que apresentaria um alto risco mecânico ao motor.

Portanto, podemos concluir que um *soft starter* é um dispositivo que reduzirá o torque de partida e o aumentará de forma gradativa e segura até atingir a sua velocidade nominal. Quando o motor atingir a sua velocidade nominal, o *soft starter* retoma a alimentação de tensão total através dele.

Durante a parada do motor, a tensão de alimentação é gradualmente reduzida para desacelerar suavemente o motor. Quando a velocidade atingir o valor zero, ele interrompe a alimentação de tensão de entrada para o motor.

Para regular a tensão em um *soft starter*, o principal componente utilizado é uma chave semicondutora, como um *tiristor* (SCR).

Algumas vantagens de se utilizar um *soft starter* são: ao contrário da partida de motor convencional, a do *soft starter* proporciona um aumento gradual da tensão, portanto, velocidade que resulta em uma partida muito suave. Além disso, não possui nenhum esforço mecânico ou solavancos que possam danificar o motor. Outra vantagem é oferecer tanto uma aceleração quanto uma desaceleração totalmente ajustável do motor. Variar o ângulo de disparo lentamente ou rapidamente pode controlar a aceleração durante a partida e a desaceleração durante a parada do motor. Isso é usado em aplicativos em que a aceleração de inicialização precisa ser ajustada. Além disso, não há picos de energia, pois o acionador de motor convencional permite tensão total no motor, uma grande corrente de pico começa a fluir para o motor, causando um pico de energia no circuito. Quando se utiliza o *soft starter*, essa corrente é limitada evitando assim os picos de energia. Através da *soft starter*, é possível ter múltiplas partidas, pois algumas aplicações exigem que o motor dê partida e pare várias vezes em um pequeno período.

O motor de indução, se utilizado com uma partida convencional, sofrerá superaquecimento devido à alta corrente de partida. No entanto, se utilizar o *soft starter*, aumentará muito o número de partidas de um motor em uma duração específica. O superaquecimento do motor de indução é um problema sério e preocupante. Isso ocorre devido à alta corrente do enrolamento durante sua partida. O *soft starter* permite uma quantidade muito pequena de corrente de partida evitando, desse modo, o superaquecimento do motor. O *soft starter*, em comparação com um starter convencional, melhora a vida útil do motor, isso ocorre devido ao bom funcionamento e ausência de tensão elétrica e mecânica no motor.

Outra grande vantagem do *soft starter* é possuir menos manutenção. Como o seu funcionamento é suave, o motor de indução tem menos probabilidade de apresentar falhas mecânicas, razão pela qual requer menos manutenção em comparação com a partida de motor convencional.

Uma partida de motor convencional fornece tensão total, e por consequência corrente de partida muito alta ao motor, que acaba consumindo muita energia. Um *soft starter* reduz significativamente esse consumo, permitindo um aumento gradual no consumo de energia. Além disso, os interruptores de energia são controlados usando um nível de tensão baixo e melhorando a eficiência do motor. O *soft starter* também possui um design compacto, ocupando assim um espaço muito pequeno, ao contrário de outras partidas de motor. E por fim, quando comparamos a outros tipos de partida, o custo do *soft starter* é menor.

No entanto, o *soft starter* possui algumas desvantagens, como: ele só permite o controle da alimentação da tensão de entrada, ou seja, de 0 volts até a tensão de linha com uma frequência fixa. Como a frequência é constante, a velocidade do motor também é constante e só é regulada através da carga que está conectada a ele. A velocidade do motor de indução é regulada variando a frequência de alimentação abaixo ou acima da frequência da linha de acordo com a necessidade. Outro problema é com relação à dissipação de calor. Os interruptores semicondutores dentro do *soft starter* dissipam alguma energia na forma de calor, sendo assim, é preciso dissipadores de calor para resfriar os interruptores. O torque de partida também é reduzido, pois como a tensão de entrada, que corresponde à corrente de entrada que é diretamente proporcional ao torque de partida do motor de indução, é reduzida, o torque de partida também é. É por isso que o *soft starter* é usado para aplicações de torque de partida baixa ou média.

Com relação às aplicações, o *soft starter* é utilizado em indústrias e é mais usado em motores que funcionam em velocidade constante. Alguns exemplos são os ventiladores que são utilizados nas indústrias que funcionam em velocidade constante, no entanto, eles exigem a proteção de inicialização. Um *soft starter* é a melhor opção para esses ventiladores.

As correias transportadoras nas indústrias são utilizadas para mover objetos de um local para outro e por isso precisam de cuidados. Os solavancos durante a partida ou parada usando o motor de partida convencional devem ser evitados, pois podem desalinhar as correias e danificar devido ao estresse mecânico, além de danificar os objetos que estão sobre ela. Para se evitar esses transtornos, deve-se apresentar uma partida e uma parada de maneira suave e isso é conseguido através de um *soft starter*.

O motor que aciona a carga através de correias e polias também não pode tolerar e sofrer os solavancos repentinos. Para evitar esse problema, também é utilizado um *soft starter* que oferece uma partida suave para esses tipos de aplicações de motores.

Qualquer tipo de bomba conectada a um motor requer uma partida suave e uma parada suave, devido ao aumento repentino de pressão dentro dos tubos. Se for utilizado uma partida convencional durante a partida, pode-se gerar uma alta pressão suficiente para romper a linha. Agora, utilizando um *soft starter*, o aumento será gradual na pressão para essas bombas de líquido. O problema ocorre apenas com relação ao controle de velocidade da bomba durante a operação normal que não existe.

## 2.9 PARTIDA UTILIZANDO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

As máquinas de indução são muito utilizadas em várias aplicações industriais. Por isso, os inversores de frequência variável oferecem flexibilidade no controle de velocidade além de melhorar o desempenho de partida e operação de motores de indução. Um inversor de frequência variável é um tipo de inversor de velocidade ajustável utilizado para controlar motores elétricos que são acionados através de corrente alternada. Na indústria, os dois tipos básicos de motores de corrente alternada são os síncronos e os de indução.

Colocar um inversor de frequência variável em um motor de indução trifásico permite que a velocidade do motor seja alterada em conformidade com a carga do motor, economizando, desse modo, energia. A tensão e a frequência são fornecidas de forma precisa na partida do motor, eliminando também o desperdício de energia. Além dessas, há outras vantagens, como o aumento da vida útil do motor AC, o controle de velocidade e a redução da manutenção.

A maioria dos inversores de frequência variável funcionam com base na alimentação CA e depois realizam a conversão para CC, utilizando um retificador e convertendo novamente em uma fonte de frequência variável usando um inversor. O inversor é a parte principal desse processo, portanto, um inversor de frequência muitas vezes é chamado apenas de inversor.

Os inversores e alguns retificadores possuem semicondutores de potência que podem comutar e conduzir altas tensões e correntes, além de precisar de microprocessadores para controlá-los.

## 3 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Controlar a velocidade dos motores elétricos na indústria sempre foi importante, pois praticamente todos os processos que se utilizam de um motor se beneficiam do controle de velocidade. Com o controle de velocidade, não é apenas o processo que é melhorado, mas, em muitos casos, principalmente nas bombas e ventiladores, esse controle representa uma economia de energia considerável.

Os acionamentos do motor de indução podem ser utilizados nos controles de processos industriais, como para realizar ajustes na velocidade de ventiladores, bombas e outros. O fato de variar de modo eficiente a velocidade do motor pode gerar grandes economias de energia. Além do controle de processos industriais, os acionamentos do motor de indução de velocidade ajustável são também usados em tração elétrica e no controle de movimento em fábricas automatizadas.

### 3.1 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ROTOR

O controle de velocidade do motor de indução do rotor bobinado, utilizando a variação da resistência do rotor, é um método utilizado no qual é inserido um reostato variável em série com o enrolamento trifásico do motor. Esse método é aplicado apenas em motores de indução com rotor bobinado e quando é necessário o controle de velocidade intermitente.

Esse método de controle de velocidade apresentou alguns problemas e, assim, não era economicamente viável. A variação da resistência do rotor é realizada através de dispositivos eletrônicos de potência, tornando o método mais eficiente. Para um torque constante, o escorregamento é diretamente proporcional à resistência do rotor, ou seja, se a resistência no circuito do rotor aumentar, o escorregamento também aumentará. No entanto, a velocidade do rotor diminuirá.

Entre as desvantagens desse método podemos destacar o desequilíbrio no rotor, devido ao reostato que é utilizado para variar a resistência por fase, as resistências geram perdas de calor no sistema. No caso de uma máquina de grande porte, o tamanho do reostato também será grande, não sendo facilmente portátil e requer mais manutenção, portanto, o custo associado a ele é maior.

Esse método não pode ser utilizado para fins de automação industrial, pois temos que alterar manualmente o valor da resistência.

Essas desvantagens podem ser facilmente resolvidas utilizando *Pulse Width Modulation* (PWM) ou *Pulse Duration Modulation* (PDM) juntamente a um retificador de ponte e um transistor de comutação.

## 3.2 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE POLOS

A velocidade do rotor,  $\omega_r$ , de um motor de indução é dada pela equação:  $\omega_r = (1 - s) \cdot \omega_s$  e a velocidade síncrona por  $\omega_s = \frac{120 \cdot f}{P}$ . Assim, substituindo uma equação na outra, temos:  $\omega_r = (1 - s) \cdot \frac{120 \cdot f}{P}$ .

Observando a equação, podemos perceber que a velocidade do motor de indução pode ser alterada através da variação da frequência (f), do número de polos (P) ou do escorregamento (s). Desse modo, uma outra maneira de realizar o controle de velocidade de um motor de indução é através do método de mudança de polo do estator. Quando se muda os polos do estator, a velocidade do motor de indução também se alterará, conforme a equação. Desse modo, temos que o número de polos do estator pode ser alterado pelos enrolamentos de vários estatores, pelo método de polos consequentes e pela modulação do polo PAM (*Pulso Amplitude Modulation*).

O método de controle de velocidade de mudança de polo é adequado para motores de indução de gaiola de esquilo, pois esses motores de indução desenvolvem automaticamente polos do rotor iguais aos polos do enrolamento do estator.

No método de enrolamento múltiplo do estator, o estator é fornecido com dois enrolamentos separados que são enrolados para dois números diferentes de polos. Um enrolamento do estator é excitado por vez. Esse método de controle de velocidade do motor de indução é menos eficiente e caro, portanto, é usado apenas quando absolutamente necessário.

Devido às complicações no projeto e comutação das interconexões dos enrolamentos do estator, esse método pode fornecer um máximo de quatro velocidades síncronas diferentes para qualquer motor.

No método de polos consequentes, um único enrolamento do estator é dividido em dois grupos de bobinas. Os terminais de ambos os grupos são retirados. O número de polos da máquina pode ser alterado apenas com alterações nas conexões das bobinas. O número de polos pode ser alterado na proporção de 2:1.

A modulação de amplitude de polo já é um método flexível de mudança de polo. Esse método é utilizado em aplicações que são necessárias relações de velocidade diferentes de 2:1. Os motores projetados para mudança de velocidade com base no esquema de modulação de amplitude de polos são conhecidos como motores PAM.

### 3.3 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA LINHA

O controle do motor pela variação da frequência é um dos métodos utilizados para controlar a velocidade de um motor de indução. Como sabemos, a velocidade síncrona e, por consequência, a velocidade do motor podem ser controladas variando a frequência de alimentação. Desse modo, a velocidade síncrona se alterará com a mudança na frequência de alimentação.

Esse método de controle de velocidade não é muito utilizado, porém, pode ser aplicado nos motores de indução que são alimentados por um gerador dedicado, pois com essa alimentação a frequência pode ser facilmente variada alterando a velocidade do motor principal. Além disso, em frequências baixas, a corrente do motor pode se tornar muito alta devido à diminuição da reatância. E se a frequência for aumentada além do valor nominal, o torque máximo desenvolvido cai enquanto a velocidade aumenta.

Em um motor de indução, a fem é dada por  $E = 4,44 \cdot \Phi \cdot k \cdot T \cdot f$ , em que K é o coeficiente de enrolamento, f é a frequência e T é o número de rotações por fase.

Se modificarmos a frequência, a velocidade síncrona também variará, porém com uma redução no fluxo de frequência, e essa variação de fluxo causa a condição de saturação nos núcleos do rotor e do estator. Portanto, é preciso manter o fluxo constante e isso só é viável se modificarmos a tensão. Assim, a razão de V/f deve ser mantida constante. Esse é o método V/f. Devemos fornecer tensão e frequência variáveis para controlar a velocidade do motor de indução pelo método V/f, empregando o inversor e o conjunto de conversores.

### 3.4 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA TENSÃO DA LINHA

Quando alterarmos a frequência fornecida ao estator, também mudamos o campo magnético rotacional que é diretamente proporcional à mudança na frequência e na curva de torque-velocidade, em que a localização do ponto sem carga também variará.

A velocidade síncrona do motor nas condições nominais é chamada de velocidade base. Quando se altera a frequência, há a possibilidade de se definir a velocidade do motor sendo menor ou maior que a velocidade base.

Um acionamento de motor de indução de frequência variável projetado com precisão pode ser muito flexível. Para garantir a operação contínua e segura do motor, durante a variação de frequência, o torque e a tensão deve estar em determinado nível. Quando o motor estiver trabalhando em velocidade menor que a velocidade base, é necessário diminuir a tensão aplicada no estator para o bom funcionamento do motor.

A diminuição da tensão aplicada no estator deve ser linear com a diminuição da frequência do estator. Caso esse procedimento não seja realizado, o nível de saturação do material do núcleo aumentará, que é o aço, e uma grande quantidade de corrente de magnetização passará pelo motor.

## 3.5 CONTROLE PELA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO ROTOR (VARIAÇÃO DO ESCORREGAMENTO)

A velocidade do campo girante no motor deve ser mantida constante durante o controle da variação da frequência do rotor. Nessa operação, apenas a velocidade do rotor é alterada. Essa alteração é possível de ser realizada através de dois modos, sendo que o primeiro é através da variação da resistência do rotor, que pode ser utilizada em motores de rotor bobinado.

Nesse caso, é preciso inserir resistências e elas alterarão a característica torque X velocidade do motor, alterando desse modo a velocidade de operação. A desvantagem desse método é possuir baixa regulação e baixo rendimento.

O outro modo é através da variação da tensão do estator, em que o torque que foi desenvolvido por um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão que foi aplicada nos terminais desse motor. Sendo assim, é possível alterar a velocidade de operação do motor. Esse método de controle é normalmente utilizado em motores pequenos que acionam ventiladores e apresenta baixo rendimento e baixa regulação de velocidade.

## 3.6 CONTROLE UTILIZANDO INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que permitem a variação da velocidade de motores de indução trifásicos. Esses dispositivos são instalados entre o motor e a rede elétrica e atuam mudando essa frequência na entrada do motor. Se a frequência for maior, a velocidade do motor será maior; e se a frequência for menor a velocidade também será menor.

Um inversor de frequência variável (VFD) é um tipo de inversor de velocidade que é ajustável e utilizado para controlar motores elétricos acionados por corrente alternada (CA).

Quando inserimos um inversor de frequência em um motor de indução trifásico, a velocidade do motor pode ser alterada em conformidade com a carga do motor, e dessa maneira economizar energia. Algumas vantagens da utilização do VFD são: aumento da vida útil do motor de corrente alternada, controle de velocidade e menor manutenção quando comparado com um motor controlado por corrente contínua.

Os motores de indução trifásicos que são controlados com o VFD são mais eficientes, possuem o funcionamento mais suave e tem maior economia de energia disponíveis.

# RESUMO DO TÓPICO 2

## **Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- A partida estrela-triângulo não é simples, sendo mais complicada do que a partida direta. Um motor com partida estrela-triângulo pode não produzir torque suficiente para iniciar uma partida do motor de indução já em plena carga, de modo que a saída é reduzida na posição de partida. Assim, normalmente, os motores são iniciados com uma carga leve.
- Quando acionamos um motor, altas correntes são absorvidas e a corrente nominal requerida na unidade de processamento de potência será muito alta e, portanto, impraticável.
- Controlar a velocidade dos motores elétricos na indústria é muito importante, pois praticamente todos os processos que se utilizam de um motor se beneficiam do controle de velocidade, por exemplo, a melhoria no processo e, em alguns casos, a economia de energia.
- Os motores de indução trifásicos, que são controlados por um inversor de frequência variável, são bem eficientes, possuem o funcionamento mais suave e têm maior economia de energia disponíveis.

# AUTOATIVIDADE



1 Os acionamentos do motor de indução são utilizados nos controles de processos industriais para ajustar a velocidade de ventiladores, bombas e equipamentos similares. Em muitas aplicações, a capacidade para variar eficientemente a velocidade pode conduzir a grandes economias de energia. Sobre os acionamentos do motor de indução, assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) É possível ajustar a velocidade do motor de indução controlando apenas a magnitude das tensões na frequência de linha aplicadas ao motor.
- b) ( ) Os motores de indução com rotor de gaiola não mantêm a velocidade constante dentro da região de funcionamento.
- c) ( ) Nos motores de indução, a redução da velocidade é acompanhada por uma correspondente perda de eficiência e aumento no fator de potência.
- d) ( ) Para o controle de velocidade nos motores de indução, só há um método possível, que é através da alteração da frequência aplicada.

2 Um motor de indução é praticamente um motor de velocidade constante, ou seja, para toda a faixa de carga, a variação de velocidade do motor é pequena. Como os motores de indução são amplamente utilizados, seu controle de velocidade pode ser necessário em muitas aplicações. Com base na teoria dos motores de indução, analise as afirmativas a seguir:

- I- Em um motor de indução, a velocidade síncrona e, em consequência, a velocidade de operação podem ser modificadas alterando o número de polos do estator. Esse método é geralmente usado em motores de indução de gaiola de esquilo.
- II- Em um motor de indução, se a frequência for aumentada além do valor nominal, o torque máximo desenvolvido cai juntamente à velocidade.
- III- Quando alterarmos a frequência fornecida ao estator, também mudamos o campo magnético rotacional que é diretamente proporcional à mudança na frequência.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas I e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 Uma partida de motor é um tipo de dispositivo elétrico utilizado para iniciar e parar um motor com segurança. É semelhante a um relé, porém, ao contrário dele, além de ligar e desligar também fornece uma proteção de baixa tensão e sobrecorrente. De acordo com os métodos de partida de um motor de indução, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) A partida com resistência externa de rotor é utilizada com um motor de indução de rotor bobinado.
- ( ) O torque de partida em um motor de gaiola de esquilo é relativamente pequeno e isso se deve à alta resistência do roto.
- ( ) A partida do motor através do autotransformador é operada através de um interruptor de duas posições (manualmente/automaticamente), utilizando um temporizador para mudar da posição inicial para a posição de operação.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - F - F.
- b) ( ) V - F - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 a velocidade do motor de indução pode ser alterada variando a frequência, o número de polos ou o escorregamento. A partir dessas observações, o controle de velocidade de um motor de indução pode ser realizado pelo método de mudança de polo. Considere um motor de indução com os seguintes valores de operação: frequência 60 Hz, número de polos 4 e escorregamento 0,03. Calcule a velocidade do rotor.

5 Uma partida de motor é um dispositivo de controle que é utilizado para comutar o motor de dois modos manualmente ou automaticamente. Ele é utilizado ainda para o controle seguro liga/desliga de motores elétricos. Nas indústrias, várias técnicas de partida são usadas para dar partida em um motor de indução. Por que é necessário ter uma partida nos motores de indução?

# MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

## 1 INTRODUÇÃO

Acadêmico, neste tópico, abordaremos os motores de indução monofásicos que possuem construção simples, que são relativamente de baixo custo, confiáveis e com manutenção simples. Esses motores são encontrados, por exemplo, em nossas casas, nos aspiradores, ventiladores e nas máquinas de lavar.

Iniciaremos realizando uma análise do motor de indução monofásico através do campo girante, abordaremos a característica torque-velocidade e vamos fazer uma análise de desempenho.

Finalizaremos vendo quais são os tipos e métodos utilizados para dar a partida no motor de indução monofásico, como: motor de fase dividida ou fase auxiliar, motor de fase dividida a capacitor de partida, motor de fase dividida com capacitor permanente, motor de fase dividida com dois capacitores e motor com bobina de sombra.

Um sistema monofásico é mais econômico do que um sistema trifásico. Desse modo, os motores monofásicos de indução são uma alternativa para locais onde não se dispõe de alimentação trifásica. O sistema monofásico é aquele sistema de energia que atende à maioria das casas, lojas, escritórios etc. Sua utilização é justificada apenas para baixas potências.

Os motores monofásicos apresentam algumas características, como: são simples na construção, apresentam baixo valor, são confiáveis e fáceis de realizar algum tipo de manutenção, tanto preventiva quanto corretiva. Devido a todas essas vantagens, o motor monofásico é encontrado nas mais diversas aplicações, como em nossas casas, nos ventiladores e até em máquinas de lavar.

Como os demais motores elétricos, o motor assíncrono também possui duas partes principais: o rotor e o estator.

A alimentação CA monofásica é fornecida no estator, que possui dois enrolamentos, e é a parte estacionária do motor de indução; já o rotor é igual aos outros motores e se trata da parte rotativa. O rotor desse tipo de motor é do tipo gaiola de esquilo e tem a função de conectar a carga mecânica através de um eixo.

O estator do motor de indução monofásico possui uma estampagem laminada. Essa estampagem é útil para reduzir um tipo de perda, as perdas por correntes parasitas. O material da estampagem é aço silício para reduzir outro tipo de perda, as perdas por

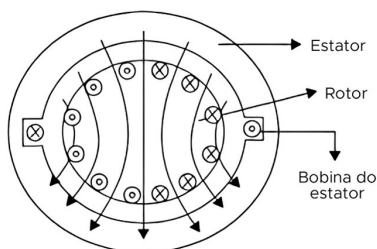
histerese. Quando se aplica uma alimentação CA ao enrolamento do estator, o campo magnético é produzido e o motor girará com uma velocidade inferior à velocidade síncrona. A velocidade síncrona é dada pela equação:  $\omega_s = \frac{120 \cdot f}{P}$ , em que f é a frequência da tensão de alimentação e P é o número de polos do motor.

A construção do estator do motor de indução monofásico é parecida com a do motor de indução trifásico, mas há duas diferenças importantes na parte do enrolamento do motor. A primeira diferença é que a maioria dos motores de indução monofásicos possuem bobinas concêntricas. Essa característica permite ajustar o número de voltas por bobina.

Com exceção apenas do motor de polo sombreado, o motor assíncrono possui dois enrolamentos do estator, o que chamamos de enrolamento principal e enrolamento auxiliar. Ambos são colocados em quadratura espacial entre si.

A construção do rotor do motor de indução monofásico é parecida com motor de indução trifásico gaiola de esquilo. O rotor é cilíndrico e possui ranhuras que não são paralelas entre si, porém possuem um pouco de inclinação, pois a inclinação é necessária para evitar o travamento magnético dos dentes do estator e do rotor, tornando o funcionamento do motor de indução mais suave e silencioso.

FIGURA 17 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM MOTOR MONOFÁSICO



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

O rotor gaiola de esquilo é formado por barras de alumínio, latão ou cobre. Essas barras de alumínio ou cobre são chamadas de condutores do rotor e colocadas nas ranhuras na periferia do rotor.

## 2 ANÁLISE DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO ATRAVÉS DO CAMPO GIRANTE

Para o funcionamento de qualquer motor elétrico, seja um motor CA ou CC, é necessário ter dois fluxos, pois a interação desses dois fluxos produz o torque necessário. Quando aplicamos uma alimentação CA ao enrolamento do estator do motor de indução monofásico, a corrente alternada começa a fluir pelo estator ou pelo enrolamento principal. Essa corrente alternada produz um fluxo alternado chamado fluxo principal que se liga aos condutores do rotor e, portanto, corta os condutores do rotor.

De acordo com a lei de indução eletromagnética de Faraday, a força eletromotriz é induzida no rotor. Conforme se fecha o circuito do rotor, a corrente começa a fluir produzindo o fluxo de rotor devido ao princípio de indução. Os motores que trabalham com esse princípio são conhecidos como motor de indução. Há dois fluxos: o fluxo principal e o fluxo do rotor. Ambos produzem o torque desejado que é requerido pelo motor para girar.

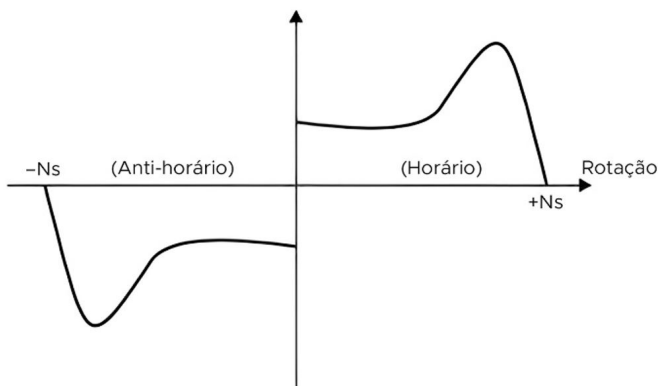
Conforme a teoria da rotação de campo duplo, podemos decompor qualquer quantidade alternada em dois componentes, em que cada componente possui uma magnitude igual à metade da magnitude máxima da quantidade alternada, no qual ambos giram na direção oposta um do outro. Por exemplo, o fluxo  $\varphi$  pode ser decomposto em dois componentes:  $\frac{\varphi_m}{2}$  e  $-\frac{\varphi_m}{2}$ . Quando o  $\varphi_m / 2$  gira no sentido horário, o outro,  $\varphi_m / 2$ , gira no sentido anti-horário.

A partir da teoria apresentada, quando aplicamos uma alimentação CA monofásica no enrolamento do estator de um motor de indução monofásico, ele produzirá um fluxo de magnitude  $\varphi_m$ . De acordo com a teoria do campo duplo rotativo, esse fluxo alternado,  $\varphi_m$ , é dividido em duas componentes de magnitude,  $\varphi_m / 2$ . Cada um desses componentes girará na direção oposta, com a velocidade síncrona  $\omega_s$ .

Esses dois componentes de fluxo são chamados de encaminhamento do fluxo  $\varphi_f$  e o componente de retorno do fluxo  $\varphi_b$ . A resultante desses dois componentes do fluxo em qualquer instante de tempo dá o valor do fluxo instantâneo do estator naquele instante particular.

Para analisar o desenvolvimento do conjugado, cada um dos campos pode ser tratado de modo isolado. A Figura 18 representa a curva do conjugado do motor desenvolvida por cada um dos campos girantes. O primeiro quadrante representa o sentido horário e o terceiro quadrante o sentido anti-horário.

FIGURA 18 - CONJUGADO DO MOTOR DE CADA CAMPO GIRANTE



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

Os conjugados motores são opostos, mas possuem a mesma intensidade. Nota-se na figura que não tem como dar a partida ( $N_s=0$ ). Isso ocorre devido à contraposição dos conjugados desenvolvidos pelos campos girantes. Cada um dos lados do eixo de rotação é como se fosse um motor de indução trifásico, mas com 50% da intensidade do campo magnético. Se o motor acelerar através de meios auxiliares de partida para qualquer uma das direções, o campo girante nessa direção desenvolve a ação motora, parecida com a de um motor de indução trifásico.

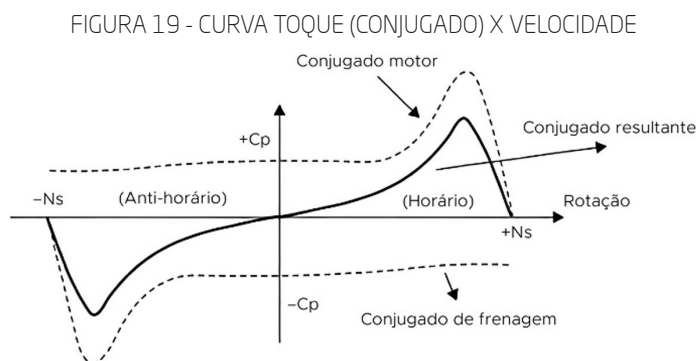
### 3 CARACTERÍSTICA TORQUE-VELOCIDADE

O torque total ou conjugado da máquina é a soma das contribuições dos torques direto e reverso e é definido como o esforço realizado para girar um eixo. Podemos dizer que o torque direto impulsiona o eixo, e o torque reverso o freia.

O torque direto é alto para um escorregamento próximo de zero; já o torque reverso só será elevado se o escorregamento for alto. Entende-se como alto um valor aproximadamente igual a dois.

Sem velocidade, o torque reverso é igual ao torque direto, ou seja, nessa condição, a máquina não tem torque de partida. Quando a velocidade é diferente de zero e diferente da velocidade síncrona, o torque líquido é diferente de zero, mantendo a máquina em movimento.

O campo girante que possui um sentido oposto ao da rotação do motor permanece, desenvolvendo um conjugado de frenagem, opondo-se ao conjugado motor. Nesse caso, o conjugado de frenagem possui menos intensidade que o conjugado do motor. A diferença entre esses dois conjugados resulta no conjugado motor líquido, como apresentado na Figura 19.



FONTE: Adaptado de Filippo Filho (2013).

Nota-se na Figura 19 que o conjugado resultante na partida é nulo.

O torque máximo do motor é independente da resistência do rotor. Quanto maior for o valor da resistência, maior será o valor do escorregamento no qual ocorre o torque máximo. Conforme a resistência do rotor aumenta, a velocidade de arrancamento do motor diminui. Nessa condição, o torque máximo permanece constante.

## 4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Os motores monofásicos podem ter o seu valor aumentado conforme o aumento da potência e também de acordo com as características de desempenho, como a razão entre conjugado de partida e corrente. Normalmente, para se reduzir esse custo, um engenheiro, por exemplo, que trabalhe em uma fábrica escolherá o motor que possui as menores especificações de potência e desempenho, mas que sejam capazes de atender às exigências para cada tipo de aplicação (UMANS, 2014).

O rendimento em qualquer sistema pode ser determinado através de:  $\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$   
OU  $\eta = \frac{P_{entrada} - Perdas}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + Perdas}$ .

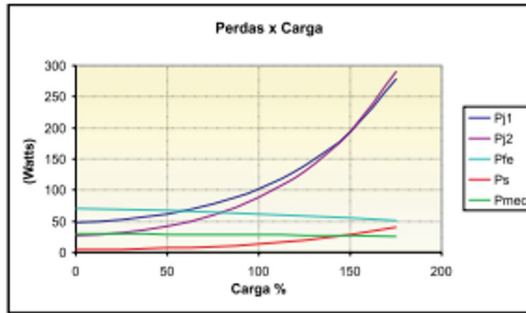
A primeira equação é uma relação direta entre entrada e saída, já para a segunda equação é preciso conhecer as perdas do sistema.

De acordo com Oliveira e Dias (2021), perdas nos motores de indução monofásicos são classificadas em:

- perdas mecânicas: esse tipo de perda é gerado pelo sistema de ventilação e pelo atrito dos rolamentos do motor. Para reduzi-las, basta otimizar os valores dos ventiladores e adequando os mancais;
- perdas por Joule no estator e no rotor: esse tipo de perda aumentará conforme a carga que é aplicada ao motor. Ela também pode ser minimizada aumentando a seção de cobre dos condutores do estator e aumentando as gaiolas condutoras do rotor;
- perdas magnéticas no ferro: esse tipo de perda é gerada pelo efeito de histerese e também pelas correntes induzidas que são chamadas de correntes de Foucault. Essas perdas possuem a característica de variar de acordo com a frequência e a densidade do fluxo magnético, mas é possível reduzi-las através da utilização de chapas de aço de baixas perdas magnéticas e do uso de um maior volume de material para redução da densidade de fluxo magnético;
- perdas suplementares: essas perdas são aquelas geradas pela força magneto motriz da corrente de carga, no qual desviará uma parte do fluxo magnético em vazio para o fluxo de dispersão.

A Figura 20 representa a distribuição das perdas de um motor monofásico tipo capacitor de partida.

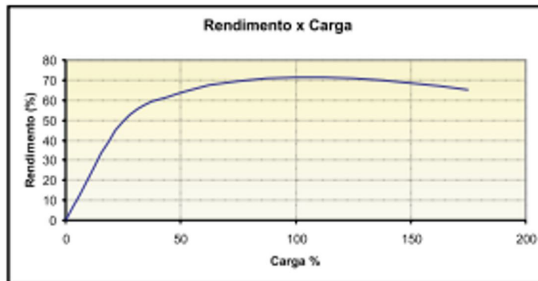
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DE PERDAS DE UM MOTOR MONOFÁSICO CAPACITOR DE PARTIDA DE 1CV



FORNTE: Adaptado de Oliveira e Dias (2021).

A Figura 21 representa a variação do rendimento em função da carga aplicada de um motor monofásico tipo capacitor de partida.

FIGURA 21 - VARIAÇÃO DO RENDIMENTO COM A CARGA APLICADA DE UM MOTOR MONOFÁSICO CAPACITOR DE PARTIDA DE 1CV.



FORNTE: Adaptado de Oliveira e Dias (2021).

O rendimento também está relacionado com a potência elétrica e mecânica através de  $P_{el} = \frac{P_{mec}}{\eta}$ , em que a potência elétrica ( $P_{el}$ ) é dada por:  $P_{el} = V_L \cdot I_L \cdot \cos\theta$ .

A potência ativa é consumida durante a execução, a potência reativa não produz trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação. O fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Ele indica a eficiência do uso da energia.

A potência aparente (S) é calculada através da equação:  $S = V_L \cdot I_L$ .

Podemos relacionar o fator de potência (FP) com as potências ativa (P) e reativa através de:  $FP = \cos\theta = \frac{P}{S}$ .

Quando o fator de potência possui um valor alto, ele indica uma alta eficiência energética. Desse modo, um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética.

# 5 TIPOS E MÉTODOS DE PARTIDAS DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

Os motores monofásicos não possuem partida automática e, por esse motivo, é necessário obter meios ou equipamentos auxiliares para que se possa realizar a partida nesse tipo de motor. Os métodos mecânicos são impraticáveis.

Os motores de indução monofásicos são normalmente classificados de acordo com os meios auxiliares utilizados para dar partida nesses motores, ou seja, eles são classificados de acordo com os métodos de partida. Esses métodos de partida vão depender de dois campos alternados deslocados no espaço e na fase.

O campo rotativo é a resultante dos dois campos individuais e reage com o rotor da gaiola para fornecer o torque de partida. Um campo é produzido pelo enrolamento de campo e o outro pelo enrolamento auxiliar ou pelo enrolamento de partida.

## 5.1 MOTOR DE FASE DIVIDIDA OU FASE AUXILIAR

O motor de fase dividida, ou também chamado de motor de partida por resistência, é composto por um rotor de gaiola única, um estator que possui dois enrolamentos: o principal e o enrolamento de partida. Os enrolamentos estão deslocados 90 graus no espaço. O enrolamento principal tem resistência muito baixa e reatância indutiva alta, enquanto o enrolamento de partida tem alta resistência e baixa reatância indutiva.

Nesse tipo de motor, um resistor é conectado em série com o enrolamento auxiliar. A corrente nos dois enrolamentos é diferente, portanto, o campo rotativo não é uniforme. Assim, temos um torque de partida pequeno, da ordem de 1,5 a 2 vezes o torque de operação. Na partida do motor, ambos os enrolamentos são conectados em paralelo.

Quando o motor atingir a velocidade de aproximadamente 70 a 80% da velocidade síncrona, o enrolamento de partida é desconectado de modo automático da rede de alimentação. Caso os motores possuam 100 Watts ou mais, é preciso utilizar um interruptor centrífugo para desconectar o enrolamento de partida. Já para os motores de classificação menor, um relé pode ser utilizado para desconectar o enrolamento.

O relé é conectado em série com o enrolamento principal, na partida, a corrente fluirá no circuito e o contato do relé será fechado. Desse modo, o enrolamento de partida fica no circuito e, à medida que o motor atinge a velocidade predeterminada, a corrente no relé começa a diminuir. Dessa forma, o relé abre e desconecta o enrolamento auxiliar da alimentação, fazendo com que o motor funcione apenas no enrolamento principal.

O torque de partida do motor de partida por fase dividida ou auxiliar é por volta de 1,5 vezes o torque de carga total. Para esse motor, o torque máximo é de aproximadamente 2,5 vezes o torque de carga total em cerca de 75% da velocidade síncrona. Nesse tipo de motor, a corrente de partida é alta, de aproximadamente 7 a 8 vezes o valor de plena carga.

A direção do motor de partida por resistência pode ser revertida invertendo a conexão de linha do enrolamento principal ou do enrolamento de partida, mas é importante ficar atento que a reversão do motor só será possível com o motor parado.

O motor de fase dividida tem um custo baixo e é adequado para partidas fáceis de cargas em que a frequência de partida é limitada. Esse tipo de motor não é utilizado para acionamentos que requerem mais de 1 KW devido ao baixo torque de partida. Eles podem ser utilizados: na máquina de lavar e ventiladores de ar-condicionado, em trituradores de mistura, polidores de piso, sopradores, bombas centrífugas e máquina de furação e torno.

## 5.2 MOTOR DE FASE DIVIDIDA A CAPACITOR DE PARTIDA

Os motores de fase dividida a capacitor de partida são tipos de motores de indução monofásicos que utilizam dispositivo capacitor no circuito do enrolamento auxiliar. O capacitor é utilizado para produzir uma maior diferença de fase entre a corrente no enrolamento principal e no enrolamento auxiliar.

O próprio nome do motor já indica que para a partida é utilizado um capacitor. O motor de partida do capacitor apresenta um rotor de gaiola e dois enrolamentos no estator: o enrolamento principal e enrolamento auxiliar ou de partida. Os dois enrolamentos são colocados a 90 graus de distância. Um capacitor C S é conectado em série com o enrolamento de partida e um interruptor centrífugo S C está conectado no eixo do motor.

O motor atua como um motor bifásico balanceado e, conforme o motor se aproxima da velocidade nominal, o enrolamento auxiliar e o capacitor de partida são desconectados automaticamente pela chave centrífuga.

O capacitor de partida do motor possui um torque de partida alto de aproximadamente 3 a 4,5 vezes o torque de carga total. Para se obter esse torque alto de partida, é preciso duas condições: o valor do capacitor inicial deve ser grande e a válvula da resistência do enrolamento de partida deve ser baixa.

O motor de partida do capacitor pode ser revertido. Para isso, é necessário deixar o motor na condição de repouso e apenas depois inverter as conexões de um dos enrolamentos. Esse tipo de motor é utilizado para cargas de maior inércia, em que é necessária partida frequente. Dessa forma, pode ser utilizado em bombas e compressores, nos compressores de geladeira e ar-condicionado para transportadores e em máquinas-ferramentas.

## 5.3 MOTOR DE FASE DIVIDIDA COM CAPACITOR PERMANENTE

O motor de capacitor dividido permanente, também conhecido como motor de capacitor de valor único, é formado por um rotor de gaiola e possui dois enrolamentos que são chamados de enrolamentos principais e auxiliares.

Esse tipo de motor possui um capacitor conectado em série com o enrolamento de partida e está conectado de moto permanente ao circuito tanto na partida quanto nas condições de operação. Pelo fato de o capacitor estar sempre conectado no circuito, o motor não possui uma chave de partida.

Assim, o enrolamento auxiliar está sempre presente no circuito e, portanto, o motor opera como um motor bifásico balanceado. O motor produz um torque uniforme e opera sem ruídos.

O motor de capacitor de valor único possui algumas vantagens, que são: não há a necessidade de um interruptor centrífugo, alta eficiência, fator de potência alto e possui um torque maior. No entanto, existem também algumas limitações, uma delas é possuir baixo torque de partida, menor que o torque de carga total.

## 5.4 MOTOR DE FASE DIVIDIDA COM DOIS CAPACITORES

Esse tipo de motor possui um rotor de gaiola de esquilo e seu estator possui dois enrolamentos que são chamados de enrolamentos principais e enrolamentos auxiliares, defasados 90° no espaço.

Nesse método, é necessário possuir dois capacitores, no qual um é utilizado no momento da partida e o outro para o funcionamento contínuo do motor. O primeiro capacitor é chamado de capacitor de partida,  $C_s$ , e o segundo de capacitor RUN,  $C_R$ . Assim, esse motor é conhecido como motor de capacitor de dois valores.

Há dois capacitores neste motor. Na partida, os dois capacitores são ligados em paralelo. O capacitor  $C_s$  é classificado de tempo curto e é quase eletrolítico. Na partida, é preciso uma grande quantidade de corrente para se obter o torque. Desse modo, o valor da reatância capacitiva  $X$  deve ser baixo no enrolamento de partida. Como  $X_A = \frac{1}{2} \pi f C_A$ , o valor do capacitor de partida deve possuir um alto valor.

A corrente de linha nominal é menor que a corrente de partida na condição normal de operação do motor. Portanto, o valor da reatância capacitiva também deve ser alto. Como  $X_R = \frac{1}{2} \pi f C_R$ , o valor do capacitor de operação deve ser pequeno.

Conforme o motor vai atingindo a velocidade síncrona, o capacitor de partida é desconectado do circuito através da chave centrífuga. O capacitor  $C_R$  sempre ficará conectado no circuito e, por isso, é conhecido como Capacitor RUN. O capacitor de operação é feito de papel cheio de óleo. Esse tipo de motor é considerado silencioso e suave e possui uma eficiência maior quando comparados com os motores que funcionam apenas nos enrolamentos principais. Eles são utilizados para cargas de maior inércia e que exigem partidas frequentes, em que o torque máximo de tração e a eficiência necessários são maiores. Eles são utilizados, por exemplo, em equipamentos de bombeamento, refrigeração, compressores de ar etc.

## 5.5 MOTOR COM BOBINA DE SOMBRA

O motor de indução de polos sombreados, também chamado de motor *shaded-pole*, é um tipo de motor de indução monofásico que possui partida automática, em que um dos polos é sombreado pelo anel de cobre. O anel de cobre também recebe o nome de anel sombreado. Este anel de cobre atuará como um enrolamento secundário para o motor.



### ATENÇÃO

O motor de polo sombreado gira apenas em determinada direção, e o movimento reverso do motor não é possível de se realizar.

As perdas de potência no motor de indução de polo sombreado são altas e o fator de potência e o torque de partida são baixos. Devido a essas características, esse tipo de motor possui baixa eficiência.

O motor de polo sombreado pode possuir dois ou quatro polos, sendo o motor de dois polos considerado o mais simples. A velocidade do motor é inversamente proporcional ao número de polos utilizados no motor.

O estator do motor de polo sombreado possui um polo saliente, ou seja, os polos do ímã são projetados em direção à armadura do motor. Cada polo do motor é excitado através da bobina de excitação. Os anéis de cobre sombreiam os laços, ou como são conhecidos bobina de sombreamento.

Os polos desse tipo de motor são laminados, ou seja, possuem várias camadas de material. Desse modo, a força do polo aumenta.

A bobina de cobre em curto-circuito é colocada neste *slot*. A parte coberta com o anel de cobre é chamada de parte sombreada; e a que não é coberta pelos anéis é chamada de parte não sombreada.

O motor de polo sombreado utiliza um rotor do tipo gaiola de esquilo, em que as barras desse rotor são inclinadas em um ângulo de  $60^\circ$ . Essa inclinação ocorre para que se possa melhorar o torque de partida.

Com relação à construção desse tipo de motor, podemos dizer que é simples, pois não contém comutador, escovas, anéis coletores etc. A possibilidade desse tipo de motor falhar é muito pequena. A chave centrífuga é o tipo de chave elétrica que começa a operar utilizando a força centrífuga, gerada pelo eixo rotativo e é utilizada para controlar a velocidade do eixo.

O motor de indução de polo sombreado é adequado para pequenos equipamentos devido ao seu baixo custo e partida simples, como os relés e ventiladores. Além disso, ele é aplicado para potências inferiores a 0,1 cv, sendo tipicamente utilizado em pequenos aparelhos domésticos. Seu rendimento também é muito baixo, mas isso não é problema para que ele tenha suas devidas aplicações. Isso se deve às baixíssimas potências envolvidas.

## ATENÇÃO

Esse tipo de motor é utilizado para acionar dispositivos que requerem baixo torque de partida.



Ele também é utilizado em exaustores, secadores de cabelo, ventiladores de mesa, em equipamentos de ar-condicionado e refrigeração e ventiladores de refrigeração.

Alguns outros equipamentos em que encontramos esse tipo de motor são gravadores, projetores, fotocopiadoras, também são utilizados para iniciar relógios eletrônicos e motores de temporização síncronos monofásicos. Portanto, há uma possibilidade grande de existir em nossa casa esse tipo de motor.

# LEITURA COMPLEMENTAR



## LIGAÇÃO DE MOTOR MONOFÁSICO. COMO FAZER?

Henrique Mattede

Neste artigo estudaremos mais os motores monofásicos, com ênfase em motores com ligações de três fios. Vamos estudar o que são os motores monofásicos, como funcionam, quais os tipos, as suas aplicações, as vantagens e desvantagens, quais as diferenças de motor monofásico e trifásico e concluir com a exemplificação de como instalar um motor monofásico com três fios.

### **Dicas de como ligar um motor monofásico a três fios**

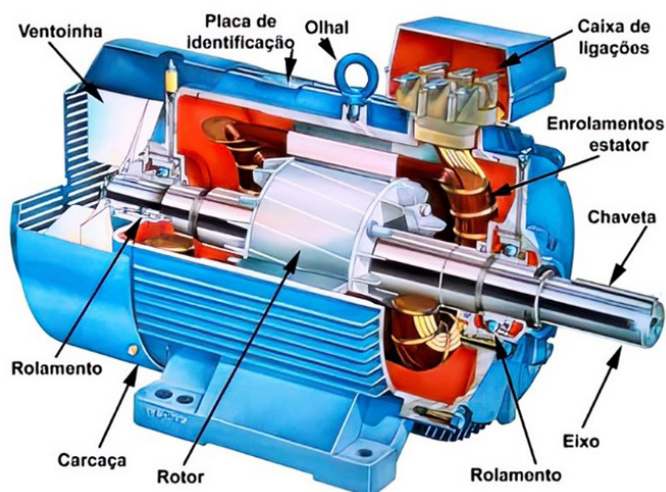
Os motores elétricos são responsáveis pelo maior consumo de energia elétrica em um cenário energético, com isso, nota-se a grande importância de estudos voltados a essa área, em específico, visando otimizar a utilização dessa máquina e ser mais eficiente. Para isso, devemos analisar desde os seus princípios de funcionamento até sua instalação do motor.

Os motores trifásicos são os mais utilizados no setor industrial, porém, em residências, é comum nos depararmos com motores monofásicos, aplicados em diversos equipamentos eletroeletrônicos/eletrodomésticos, como geladeiras, freezer, máquinas de lavar roupa, sensoramento de portão eletrônico, dentre outras aplicações. Portanto, verifica-se a grande importância do estudo de tais máquinas. A instalação de motores monofásicos depende de diversas variáveis [...].

### **O que é um motor monofásico?**

Os motores monofásicos de indução operam com tensão entre 220 V e 127 V, alimentados por uma rede monofásica de energia elétrica. Seus enrolamentos de campo estão diretamente conectados à rede monofásica, esse tipo de motor transforma a energia elétrica consumida em energia mecânica.

Os motores monofásicos possuem apenas um conjunto de bobinas e são alimentados por uma corrente alternada monofásica. Os motores elétricos são geralmente empregados em locais onde não tem a disponibilidade de uma rede trifásica, ou em cargas que não necessitam de muita potência, como ventiladores, furadeiras, impressoras, motores de geladeiras, entre outras aplicações.



Motor de indução monofásico e seus componentes

## Como funcionam os motores elétricos monofásicos?

Os motores monofásicos apresentam maior dificuldade para serem acionados que os motores trifásicos, pois os motores monofásicos necessitam apenas de uma fase, apesar de haver uma variação do fluxo magnético entre os enrolamentos de campo e armadura do estator e do rotor da máquina, o fluxo não possui defasagem, já que está alinhado com o campo magnético do estator e não gera o campo magnético girante, conseqüentemente não tem conjugado de partida. Para o motor monofásico gerar energia mecânica, deve haver uma defasagem angular, pois faz surgir o campo magnético girante e esse processo é realizado por alguns métodos, como enrolamentos de fase dividida, motores com capacitor de partida e permanente.

## Tipos de motores monofásicos

### Motor de Fase Dividida

Esse tipo de motor possui um enrolamento principal e um auxiliar, ambos com defasagem de 90 graus, o principal serve para partida e regime permanente de trabalho, o enrolamento auxiliar tem utilidade somente na hora de dar a partida, com isso, quando o motor atinge uma determinada rotação, o enrolamento auxiliar é desconectado da rede. Como o auxiliar é utilizado somente para dar partida à máquina, caso ocorra o seu não desligamento, poderá provocar a queima do motor.

O enrolamento auxiliar cria uma defasagem produzindo o torque essencial para iniciar a rotação, rompendo o conjugado de partida e a sua aceleração até se aproximar da velocidade síncrona. Esse tipo de motor apresenta um conjugado de partida igual ou um pouco superior que o nominal, o que limita a sua aplicação em potências fracionárias e em cargas que exigem baixo conjugado de partida. É um motor indicado para aplicações específicas, como em ventiladores, exaustores, máquinas de escritórios, entre outras.

## **Motor de Capacitor de Partida**

Esse tipo de motor é o mais utilizado e conhecido, ele se parece com o de fase dividida, porém o que diferencia esse modelo é a introdução de um capacitor eletrolítico, ligado em série, como um enrolamento auxiliar para a partida dos motores monofásico. Com a inclusão do capacitor, o ângulo de defasagem entre as correntes dos enrolamentos aumenta, com isso, proporciona elevados conjugados de partida.

Quando o motor atinge cerca de 75% a 80% da velocidade síncrona, o circuito auxiliar é desconectado, nesse momento o seu funcionamento é igual a um motor de fase dividida.

Esse motor monofásico possui um elevado conjugado de partida (entre 200% e 350% do conjugado nominal), o motor de capacitor de partida pode ser utilizado em uma diversidade de aplicações que precisam de um elevado conjugado de partida. Esse tipo motor é fabricado em potências que vão de  $\frac{1}{4}$  cv a 15 cv.

## **Motor com Capacitor Permanente**

Nesse tipo de motor, o enrolamento auxiliar e o capacitor ficam energizados durante todo o tempo de funcionamento e não exclusivamente na partida, o capacitor é do tipo eletrostático. O efeito do capacitor é o de proporcionar condições em que o fluxo fique semelhante ao fluxo dos motores trifásicos, aumentando o conjugado máximo, o fator de potência e o rendimento do motor.

Esse motor possui um conjugado de partida muito pequeno, cerca de 50% do conjugado de um motor de fase dividida, assim, é crucial que haja conhecimento de onde ele será aplicado, é recomendado que esse tipo de motor seja utilizado em aplicações com a partida leve. Motores monofásicos com capacitor permanente são normalmente fabricados para potências de  $\frac{1}{50}$  a 1,5 cv.

## **Motor com dois capacitores (Partida + Permanente)**

O motor com dois capacitores é o modelo mais vantajoso e completo dentre os que foram abordados anteriormente, ele possui uma partida como a do motor de capacitor de partida, com elevados conjugados de partida e funcionamento em regime, igual ao do motor de capacitor permanente, exibindo, com isso, um melhor desempenho e rendimento do que os demais motores monofásicos.

No entanto, devido ao seu elevado custo de produção, os motores com dois capacitores são encontrados em potências acima de 1 cv. É muito comum a aplicação desse tipo de motor no meio rural, onde são necessárias potências maiores em instalações monofásicas.

## **Diferença entre motor monofásico e trifásico**

A principal diferença que se pode observar entre um motor monofásico e um motor trifásico é que o motor trifásico pode induzir um campo magnético girante no rotor sem o auxílio de bobinas auxiliares, pelo fato de ser alimentado por uma rede em três fases defasadas em 120°.

Os motores monofásicos são fisicamente maiores quando comparados aos motores trifásicos de mesma potência, isso ocorre devido aos motores trifásicos serem alimentados por três fases, com isso, a potência é três vezes maior do que em um circuito monofásico.

## **Aplicações para um motor monofásico**

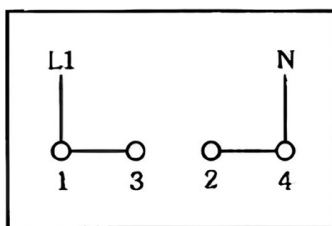
Os motores monofásicos são geralmente utilizados em locais onde não há disposição de rede de alimentação trifásica, como em residências, zonas rurais, comércios e pequenas indústrias. Por ser um motor que opera em baixas potências, ele é recomendado para equipamentos de pequeno porte, como ventiladores, furadeiras elétricas, impressoras, entre outras.

## **Ligação de motores monofásicos de indução com 3 fios**

Quando o motor possui quatro terminais que saem dos enrolamentos da máquina ou três terminais, um dos enrolamentos é comum, sendo possível identificá-lo com o auxílio de um multímetro, medindo a resistência de dois pontos de enrolamento do motor monofásico. Esses motores possuem um terminal com a resistência ôhmica aproximadamente o dobro dos demais, que é chamado de enrolamento auxiliar, utilizado para a partida do motor. Quando o motor atinge a sua velocidade nominal de rotação, a chave centrífuga é desligada, utilizando, assim, apenas os terminais de trabalho.

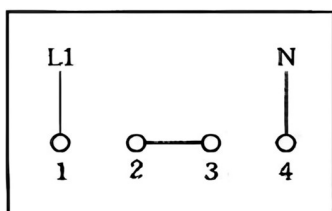
Os dois enrolamentos com praticamente a mesma resistência mostram que o motor atua com o capacitor permanente, com o mesmo circuito, porém sem chave centrífuga. [...]

Podemos realizar o fechamento do motor de quatro terminais de dois modos diferentes. Primeiro podemos fazer o fechamento deste tipo de motor em paralelo. Para isso, fechamos os terminais 1 e 3 e alimentamos com uma fase; e fechamos os terminais 2 e 4 alimentado com o neutro. Nesse fechamento, o motor poderá ser alimentado por uma tensão menor, neste caso 127 V.



Ligação de motor monofásico com quatro terminais em paralelo

No segundo modo, para realizar o fechamento do motor, fechamos os terminais 3 e 2, isolando-os (neste modo, fechamos as duas bobinas em série) e alimentamos o terminal 1 com uma fase e o terminal 4 com outra fase. Dessa forma, temos o fechamento do motor na tensão maior, que é 220 V.



Ligação de motor monofásico com quatro terminais em série 220 V

Esses tipos de motores são mais utilizados em setores rurais e residenciais, onde possuem diversas aplicações com aparelhos elétricos, portanto, é essencial ter conhecimento dessa ferramenta para lidar com situações causadas por ela [...].

FONTE: MATTEDE, H. **Ligação de motor monofásico**. Como fazer? <https://www.mundodaeletrica.com.br/ligacao-de-motor-monofasico-como-fazer/>. Acesso em: 18 fev. 2022.

# RESUMO DO TÓPICO 3

**Neste tópico, você adquiriu certos aprendizados, como:**

- Os motores de indução monofásicos operam pelo mesmo princípio de que um motor trifásico continue girando sem uma das fases, mas os motores monofásicos necessitam de dispositivos auxiliares de partida que permitem essa aceleração. Após atingir a velocidade determinada, os dispositivos auxiliares podem ser desconectados.
- A partida de motores de indução monofásicos pode ser realizada através de um enrolamento auxiliar de partida, porém, esse enrolamento auxiliar deve estar defasado de  $90^\circ$  no espaço do enrolamento principal.
- Ao garantir a partida do motor de indução monofásico através de meios auxiliares, ele passa a funcionar de modo parecido com o de um motor de indução trifásico, a menos caso haja a presença do conjugado de frenagem em oposição ao conjugado motor.
- O motor de polos sombreados possui um custo baixo e é aplicado para potências baixas, inferiores a 0,1 cv, tipicamente em pequenos aparelhos domésticos. Apesar de possuir rendimento muito baixo, isso não o inviabiliza de ser utilizado, dadas às baixas potências envolvidas.

# AUTOATIVIDADE



1 O rotor do motor de polos sombreados é do tipo gaiola, e o estator é constituído de uma simples bobina enrolada sobre um polo saliente. As espiras de sombra são anéis de cobre que estão inseridos nas sapatas polares. O campo magnético no entreferro possui uma defasagem em relação ao restante da região da sapata polar. Sobre os motores de polo sombreado, assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) O motor de polos sombreados é um tipo de motor que possui um custo bem baixo e é aplicado para potências inferiores a 0,1 cv.
- b) ( ) O motor de polos sombreados, apesar da baixa potência, possui um rendimento alto e é utilizado em muitas aplicações, como máquina de lavar e secador de cabelo.
- c) ( ) O motor de polo sombreado pode possuir quatro ou oito polos, sendo que o motor de quatro polos é considerado mais simples.
- d) ( ) A velocidade do motor de polos sombreados é diretamente proporcional ao número de polos utilizados no motor.

2 Um motor de indução faltando uma fase é impossível de partir, ou seja, o motor não ganha rotação. Apesar do motor de indução monofásico operar pelo mesmo princípio que faz um motor trifásico continuar girando sem uma das fases, os motores monofásicos necessitam de dispositivos auxiliares de partida que permitem a aceleração. Com base nos motores de indução monofásicos, analise as afirmativas a seguir:

- I- O rotor de qualquer motor de indução monofásico é igual ao rotor de gaiola do motor trifásico.
- II- A partida do motor de indução monofásico é obtida por meio de um enrolamento auxiliar de partida, em que esse enrolamento deve estar adiantado de  $90^\circ$  no espaço do enrolamento principal.
- III- Ambos os enrolamentos em um motor de indução monofásicos são alimentados pela mesma fonte. Desse modo, a melhor maneira de se obter defasagem entre as correntes é inserir um capacitor em série com o enrolamento auxiliar.

Assinale a alternativa CORRETA:

- a) ( ) As afirmativas I e II estão corretas.
- b) ( ) Somente a afirmativa II está correta.
- c) ( ) As afirmativas I e III estão corretas.
- d) ( ) Somente a afirmativa III está correta.

3 Os motores de indução monofásicos operam com tensão entre 127 e 220 V. Esse tipo de motor possui somente um conjunto de bobinas, é alimentado por uma corrente alternada monofásica e normalmente é empregado em locais onde não há uma rede trifásica. De acordo com os princípios e funcionamento de um motor de indução monofásico, classifique V para as sentenças verdadeiras e F para as falsas:

- ( ) Os motores de partida com capacitor são motores de indução monofásicos que utilizam um capacitor no circuito do enrolamento auxiliar para produzir uma maior diferença de fase entre a corrente no enrolamento principal e no enrolamento auxiliar.
- ( ) O torque máximo do motor de indução monofásico depende da resistência do rotor. Quanto maior for o valor da resistência, maior será o valor do escorregamento no qual ocorre o torque máximo.
- ( ) Para o funcionamento de qualquer motor elétrico, seja um motor CA ou CC, é preciso possuir dois fluxos, pois a interação desses dois fluxos produz o torque necessário. Quando aplicamos uma alimentação CA ao enrolamento do estator do motor de indução monofásico, a corrente alternada começa a fluir pelo estator ou pelo enrolamento principal.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência CORRETA:

- a) ( ) V - V - F.
- b) ( ) V - F - V.
- c) ( ) F - V - F.
- d) ( ) F - F - V.

4 O motor de indução também é chamado de motor assíncrono, pois operam a uma velocidade menor que sua velocidade síncrona. Há dois tipos de motores de indução: o monofásico e o trifásico. Os monofásicos não possuem partida automática, enquanto os trifásicos são motores de partida automática. Considere um motor de indução monofásico de 1,5 cv, 3500 rpm, que possui uma corrente nominal de 7,5 A em 220 volts. O rendimento desse motor é de 75%. Calcule o valor do fator de potência.

5 O estator de um motor de indução monofásico possui estampagem laminada que serve para reduzir as perdas por correntes parasitas. Essas estampagens são constituídas de aço para que se possa reduzir as perdas por histerese. Quando se aplica uma alimentação CA ao enrolamento do estator, o campo magnético é produzido e o motor gira a uma velocidade inferior à velocidade síncrona. Considere um motor de indução monofásico de 220 V, 4 polos e velocidade síncrona de 1500 rpm. Nesse contexto, calcule o valor da frequência desse motor de indução monofásico.

# REFERÊNCIAS

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. São Paulo: Grupo A, 2013.

FILIPPO FILHO, G. **Motor de indução**. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.

MATTEDE, H. **Ligação de motor monofásico**. Como fazer? <https://www.mundodaeletrica.com.br/ligacao-de-motor-monofasico-como-fazer/>. Acesso em: 18 fev. 2022.

OLIVEIRA, E. C. P. de; DIAS, J. C. Rendimento nos motores monofásicos. **Weg em Revista**, n. 79, p. 13-17, jul./set. 2015. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h95/hea/WEG-rendimento-nos-motores-monofasicos-001-article-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2022.

SIMONE, G. A. **Máquinas de indução trifásicas**: teoria e exercícios. São Paulo: Saraiva, 2007.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. São Paulo: Grupo A, 2014.