

UNIP

UNIVERSIDADE PAULISTA

Ciência da Computação Integrada

Autor: Prof. Álvaro A. Colombero Prado

Colaboradoras: Profa. Vanessa Lessa

Profa. Christiane Mazur Doi

Professor conteudista: Álvaro A. Colombero Prado

Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Paulista (UNIP, 2013), bacharel em Sistemas de Informação pela UNIP (2010) e pós-graduado *lato sensu* em Engenharia de Software (UNIP, 2011). Atua como professor dos cursos de bacharelado em Ciência da Computação e Sistemas de Informação na UNIP, no *campus* Tatuapé, já com dez anos de experiência como docente de Ensino Superior.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P896c Prado, Álvaro A. Colombero.

Ciência da Computação Integrada / Álvaro A. Colombero Prado. –
São Paulo: Editora Sol, 2024.

168 p., il.

Nota: este volume está publicado nos Cadernos de Estudos e
Pesquisas da UNIP, Série Didática, ISSN 1517-9230.

1. Indutores. 2. Circuitos ativos. 3. Diodos. I. Título

CDU 681.3

U519.86 – 24

Profa. Sandra Miessa
Reitora

Profa. Dra. Marília Ancona Lopez
Vice-Reitora de Graduação

Profa. Dra. Marina Ancona Lopez Soligo
Vice-Reitora de Pós-Graduação e Pesquisa

Profa. Dra. Claudia Meucci Andreatini
Vice-Reitora de Administração e Finanças

Prof. Dr. Paschoal Laercio Armonia
Vice-Reitor de Extensão

Prof. Fábio Romeu de Carvalho
Vice-Reitor de Planejamento

Profa. Melânia Dalla Torre
Vice-Reitora das Unidades Universitárias

Profa. Silvia Gomes Miessa
Vice-Reitora de Recursos Humanos e de Pessoal

Profa. Laura Ancona Lee
Vice-Reitora de Relações Internacionais

Prof. Marcus Vinícius Mathias
Vice-Reitor de Assuntos da Comunidade Universitária

UNIP EaD

Profa. Elisabete Brihy
Profa. M. Isabel Cristina Satie Yoshida Tonetto
Prof. M. Ivan Daliberto Frugoli
Prof. Dr. Luiz Felipe Scabar

Material Didático

Comissão editorial:

Profa. Dra. Christiane Mazur Doi
Profa. Dra. Ronilda Ribeiro

Apoio:

Profa. Cláudia Regina Baptista
Profa. M. Deise Alcantara Carreiro
Profa. Ana Paula Tôrres de Novaes Menezes

Projeto gráfico:

Prof. Alexandre Ponzetto

Revisão:

Luiza Gomyde
Kleber Souza

Sumário

Ciência da Computação Integrada

APRESENTAÇÃO	9
INTRODUÇÃO	10

Unidade I

1 SOBRE OS INDUTORES	11
1.1 Breve histórico	11
1.2 Eletricidade, magnetismo e os indutores	14
2 A INDUTÂNCIA	17
2.1 Reatância indutiva	18
2.2 Materiais empregados na construção de indutores	19
2.2.1 Indutores com núcleo de ar	19
2.2.2 Indutores com núcleo de ferro	22
2.2.3 Indutores com núcleo de pó de ferro (ferrite)	24
2.3 Tipos de indutores mais encontrados	25
2.3.1 Indutores moldados	25
2.3.2 Indutores com encapsulamento plástico/epóxi	26
2.3.3 Indutores de enrolamento entrelaçado "honeycomb"	27
2.3.4 Indutores de valor ajustável	27
2.3.5 Indutores de fabricação artesanal	29
2.4 Os indutores em série e em paralelo	31
2.4.1 Cálculo de indutores em série	31
2.4.2 Cálculo de indutores em paralelo	33
3 INDUÇÃO MÚTUA – TRANSFORMADORES	34
3.1 Relação de espiras entre enrolamentos	36
3.1.1 Relação de espiras e taps nos transformadores	37
3.2 Tipos de transformadores	39
3.2.1 Transformadores isoladores	39
3.2.2 Autotransformadores	40
3.2.3 Autotransformadores variáveis (Variac)	42
3.3 Identificação de transformadores desconhecidos	44
3.3.1 Reconhecimento das características externas do transformador	44
3.3.2 Identificação dos enrolamentos do transformador	47
3.3.3 Identificação da relação entre espiras do transformador	50
3.4 Circuitos com indutores: os filtros	55
3.4.1 Filtros com indutores e capacitores	55
3.4.2 O filtro como controle de tonalidade	63

3.5 Indutores em altas frequências.....	68
3.5.1 Circuitos sintonizadores.....	68
4 TESTE DE INDUTORES	69
4.1 O indutímetro	70
4.2 <i>Ring testers</i>	71
4.3 Relês.....	72
4.3.1 Funções lógicas com relês.....	73

Unidade II

5 COMPONENTES ATIVOS	83
5.1 As válvulas termiônicas	83
5.1.1 Breve histórico	85
5.1.2 Diodo de Fleming	85
5.1.3 O tríodo de Lee De Forest	89
5.1.4 Amplificação de sinais na válvula tríodo	90
5.1.5 Evolução das válvulas	92
5.1.6 Aquecimento direto ou indireto?	93
5.1.7 Válvulas tetrodo	95
5.1.8 Válvulas pêntodo	95
5.1.9 Válvulas com seis ou mais elementos	97
5.2 Funções lógicas com válvulas	99
5.3 Aplicações atuais das válvulas.....	103
5.3.1 Áudio de alta fidelidade.....	103
5.3.2 Amplificadores para guitarras e afins.....	105
5.3.3 Sinalização.....	107
5.3.4 Fornos de micro-ondas.....	108
6 DISPOSITIVOS DE ESTADO SÓLIDO: OS DIODOS	109
6.1 Breve histórico.....	109
6.2 O uso de minerais como diodos.....	111
6.2.1 Galena (sulfeto de chumbo – PbS).....	112
6.2.2 Piritas de ferro	113
6.2.3 Outros materiais.....	113
6.3 Materiais mais utilizados nos diodos modernos	114
6.3.1 Germânio.....	115
6.3.2 Silício.....	116
6.4 Polarização do diodo.....	117
6.4.1 Queda de tensão no diodo.....	119
6.5 Principais circuitos com diodos.....	121
6.5.1 Retificadores.....	121
6.5.2 Portas lógicas.....	127
6.6 Tipos especiais de diodos	134
6.6.1 Diodos zener	134
6.6.2 Diodo zener ajustável.....	136
6.6.3 Diodos varicap.....	139
6.6.4 Diodos schottky	140

7 DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs)	141
7.1 Histórico.....	141
7.2 Polarização dos LEDs.....	143
7.3 Tipos especiais de LEDs	147
7.3.1 LEDs do tipo pisca.....	147
7.3.2 LED bicolor.....	148
7.3.3 LEDs RGB.....	149
7.3.4 LEDs infravermelhos e ultravioletas.....	150
8 CIRCUITOS SIMPLES UTILIZANDO DIODOS E LEDs	150
8.1 Indicador de bateria fraca, com LED e TL431.....	150
8.2 Fonte de baixíssima tensão	153
8.3 Adaptador de pilhas de lítio 18650.....	155

APRESENTAÇÃO

Nos tempos atuais, cada vez mais nos vemos rodeados de novas tecnologias e de mudanças (muitas vezes profundas) de diversos paradigmas que influem em nosso trabalho, estudos e cotidiano. Novas facilidades são adicionadas cada vez mais ao já extenso rol de benesses que a tecnologia nos oferece, alterando nossa forma de resolver problemas e nos auxiliando em novos desafios.

Pensando nisso, este livro-texto segue a mesma linha de pensamento abordado no semestre anterior, na disciplina *Ciência da Computação Interdisciplinar*: apresentamos os conceitos fundamentais da eletrônica, fornecendo ao estudante as ferramentas necessárias para compreender como funcionam os dispositivos tecnológicos básicos utilizados no nosso dia a dia e que podem servir como base para entender o funcionamento de computadores, *tablets* e celulares, objetos que utilizamos o tempo todo.

Além disso, trabalhamos mais alguns componentes eletrônicos, como os indutores, transformadores e relês, e introduzimos dispositivos ativos e diodos, essenciais para operar os mais diversos circuitos eletrônicos, cada um com seus respectivos detalhes técnicos, cálculos e aplicações práticas envolvidas. Ao final, falamos de algumas técnicas construtivas simples para circuitos eletrônicos, complementando o assunto abordado.

Vale acrescentar que este material está em linguagem simples e direta, facilitando o entendimento do leitor. Como recurso didático, são inseridas muitas imagens, além dos itens Observação e Lembrete, que direcionam e dão suporte ao estudante caso haja eventuais dúvidas. Os itens Saiba mais possibilitam-no ampliar seus conhecimentos, com sugestões de conteúdo para ser lido ou assistido. Há, ainda, muitos exemplos de aplicação, resolvidos em detalhes, que ajudam o estudante a fixar os assuntos estudados.

Bons estudos.

INTRODUÇÃO

Não é possível dissociar a eletrônica da computação, uma vez que esta última teve sua origem na primeira. Assim, para o aluno da área de computação, o conhecimento sobre tecnologias básicas empregadas dentro das máquinas – muitas vezes poderosas – que operamos é de grande importância.

Este livro dá continuidade à série iniciada no semestre passado com a disciplina *Ciência da Computação Interdisciplinar*, que aborda os conceitos básicos utilizados para construir circuitos eletrônicos, que subsidiam as soluções de hardware esperadas dos alunos para protótipos que podem acompanhar um TCC, por exemplo, ou mesmo para projetos pessoais e profissionais que trarão êxito e realização.

Na unidade I aborda-se as características dos indutores, transformadores e relês, componentes eletrônicos importantes que podem ser aplicados em grande parte dos dispositivos domésticos elétricos e eletrônicos que utilizamos no dia a dia. Falaremos de suas grandezas e sobre a unidade de medida Henry (H). Serão dados exemplos da aplicação destes componentes em circuitos de acoplamento, filtros e em alta frequência.

A unidade II introduz os **circuitos ativos**, característicos por modificar e também produzir sinais. É feita toda uma digressão histórica sobre as válvulas eletrônicas – que serviram de base para os circuitos eletrônicos modernos com componentes mais atuais – em que são apresentadas suas características de amplificação e de retificação de sinais, bem como sua aplicação nos primeiros receptores de rádio. Em seguida, aborda-se os **diodos**, componentes sólidos de grande aplicação e utilidade nos dias de hoje. Por fim, serão apresentados exemplos de diodos dos mais diversos materiais, incluindo os minérios de galena e pirita, bem como os tipos comerciais mais utilizados, como os diodos zener, varicap, schottky, além de pontes retificadoras e LEDs.

Espera-se que os estudantes tenham uma boa leitura e se sintam impelidos a seguir pesquisando sobre a eletrônica e sua relação com os computadores modernos a partir desta disciplina.

Unidade I

1 SOBRE OS INDUTORES

Em meio a todos os componentes eletrônicos empregados nos diversos circuitos que nos rodeiam, dos mais simples aos mais complexos, sempre haverá aquele com algum papel de destaque – seja por seu papel central no comportamento do circuito, seja por seu uso em grandes quantidades. Essa posição ressalta sua importância como peça-chave na construção dos aparelhos de que fazem parte.

Dentre os componentes de maior destaque, estão os **resistores** e os **capacitores** – peças praticamente onipresentes em qualquer circuito eletrônico.

Os **indutores**, componentes que abordaremos no decorrer deste tópico, compartilham praticamente do mesmo grau de importância dos outros componentes passivos, estando presentes em um grande número de equipamentos eletrônicos apesar de passarem despercebidos ou serem confundidos com outros componentes cujas funções são bem diferentes (como os resistores).

Um indutor é essencialmente composto de um fio enrolado várias vezes ao redor de uma forma que pode ser feita de diversos materiais: cartão, plástico ou até de metal. O fio enrolado forma um enrolamento ou simplesmente uma bobina, com características elétricas particulares.

Neste tópico, trataremos destes componentes interessantes e seu emprego em circuitos de filtros, além de seu uso como eletroímãs, transformadores e aplicações em altas frequências, chegando finalmente aos relês, muito usado nos primórdios da computação.

1.1 Breve histórico

Em lugares como Grécia Antiga e a atual Índia, os povos antigos já haviam observado os fenômenos elétricos e magnéticos sem, embora, conseguir explicar sua origem ou comportamento exatos, não conseguindo, portanto, fazer uso prático deles.

São observáveis, por exemplo, as manifestações das descargas atmosféricas durante as tempestades, que chamamos de relâmpagos (corrente elétrica), a atração magnética de metais ferrosos que ocorrem naturalmente (como a magnetita), bem como a presença da eletricidade estática em objetos que sofriam algum tipo de atrito.

Esta última forma de eletricidade foi observada por **Tales de Mileto** no século VI a.C., quando um pedaço de âmbar esfregado em um lenço passava a atrair corpos leves, como partículas de pimenta moída ou cinzas de madeira, assim como o exemplo demonstrado na figura 1.

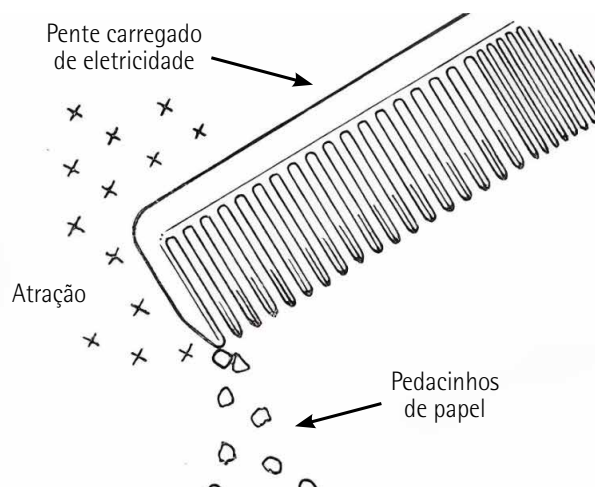


Figura 1 – Reprodução do experimento feito por Tales de Mileto com materiais modernos: um pente, previamente esfregado em um pano de nylon ou similar, e pedacinhos de papel

Fonte: Braga (2018c).

Contudo, foi apenas no século XVI que **William Gilbert** cunhou o termo **eletricidade** a partir do termo grego *elektron*, que era o nome dado ao mineral âmbar pelos antigos gregos. O âmbar é uma gema de coloração amarelada e origem fóssil que ocorre naturalmente, conforme a figura 2.



Figura 2 – Pedras de âmbar

Disponível em: <http://tinyurl.com/yw6ke2fy>. Acesso em: 3 jan. 2024.

No ano de 1727, o cientista inglês **Stephen Gray**, observando as propriedades dos isolantes e condutores, determinou que os condutores elétricos poderiam ser energizados (desde que estivessem isolados).

Em 1819, o físico dinamarquês **Hans Christian Ørsted** observou que, ao posicionar uma bússola nas proximidades de um fio elétrico pelo qual circulava uma corrente elétrica, notava-se um desvio de sua agulha, que em vez de apontar no sentido norte-sul, como normalmente faria, passava a se posicionar perpendicularmente ao fio, voltando à posição inicial uma vez que a corrente elétrica era interrompida (figura 3).

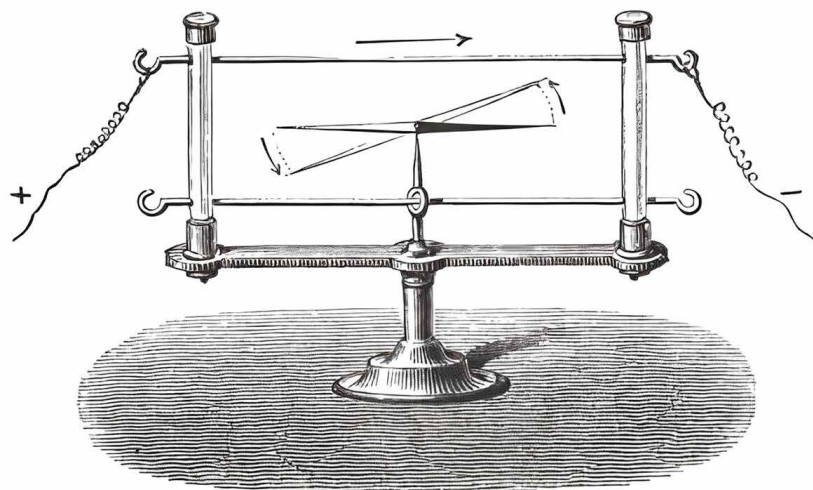


Figura 3 – Experimento de Ørsted

Disponível em: <http://tinyurl.com/28a5fws7>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Este experimento demonstrou que a **eletricidade** e o **magnetismo** eram fenômenos relacionados, e que ao permitir a passagem de uma corrente elétrica por um condutor, ela produzia um campo magnético a seu redor.

Em 1831 o cientista inglês **Michael Faraday** enrolou dois fios elétricos em lados opostos de um anel de ferro. Nas pontas de um dos fios, ele conectou um galvanômetro (dispositivo com uma agulha, capaz de indicar a presença de correntes elétricas), enquanto, nas pontas do outro fio, conectou uma bateria.

Ele esperava que, ao fechar o circuito da bateria, algum tipo de corrente elétrica se manifestaria no galvanômetro ligado do outro lado, o que de fato ocorreu: ao ligar a bateria, ele observou um movimento na agulha do galvanômetro indicando um pulso de corrente elétrica, e, ao desligá-la, verificou outro movimento, o que evidenciava um transiente ocasionado pela mudança no fluxo magnético quando a bateria era ligada ou desligada (figura 4).

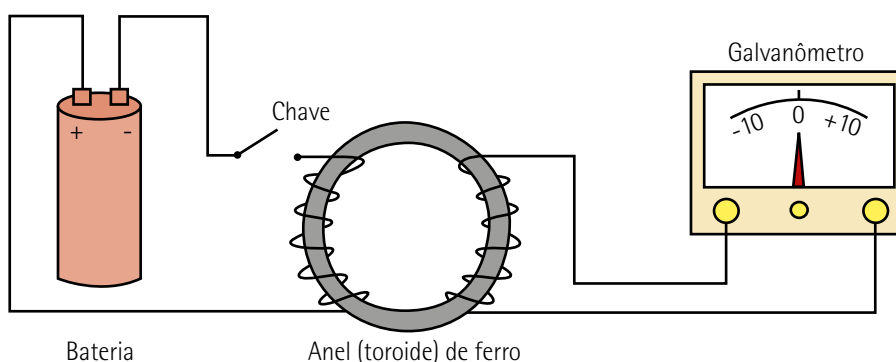


Figura 4 – Arranjo utilizado por Faraday para comprovar sua teoria de indução magnética

Adaptada de: <http://tinyurl.com/2u2vd78x>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Faraday demonstrou no experimento que o campo magnético gerado por uma bobina poderia ser transferido para outra que estivesse próxima, estabelecendo assim as bases do fenômeno que conhecemos como **indução magnética**.

Independentemente disso, no ano seguinte o mesmo experimento também seria demonstrado pelo cientista estadunidense **Joseph Henry**, que teorizou a respeito de fenômenos como a autoindutância e a indutância mútua – apesar de a primazia das descobertas serem então atribuídas a Faraday.



Figura 5 – Joseph Henry

Disponível em: <http://tinyurl.com/47yknkpa>. Acesso em: 3 jan. 2024.



Lembrete

Joseph Henry posteriormente produziria grandes contribuições, como a invenção do motor elétrico, e suas pesquisas acerca dos relês eletromagnéticos serviriam de base para Samuel Morse e Charles Wheatstone inventarem o telégrafo. A unidade de medida do Sistema Internacional para a indutância é nomeada em homenagem a Henry.

1.2 Eletricidade, magnetismo e os indutores

Um **indutor** (que podemos também chamar de **bobina** ou **solenóide**) é todo componente elétrico constituído por um condutor elétrico, enrolado de forma helicoidal (ou seja, dando voltas no entorno de um núcleo), que pode ser feito de algum material com características **ferromagnéticas** ou não.

Dessa forma, ele se configura como um componente **passivo** – que não produz energia nem necessita dela para funcionar –, que não amplifica sinais ou controla circuitos, mas que armazena energia em forma de campo magnético.

Isso ocorre porque, conforme demonstrado na experiência de Ørsted, qualquer condutor percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético a seu redor. Se o condutor for **retilíneo**, ou seja, estiver disposto de forma esticada, o campo se manifestará em forma de **linhas de força concêntricas** ao fio condutor.

O sentido dessas linhas de força pode ser determinado pelo uso da chamada **regra da mão direita**: coloque o dedo polegar apontado no **sentido da corrente elétrica**, com os demais dedos **envolvendo** o condutor e apontando o sentido das **linhas de indução** do campo magnético, conforme a figura 6.

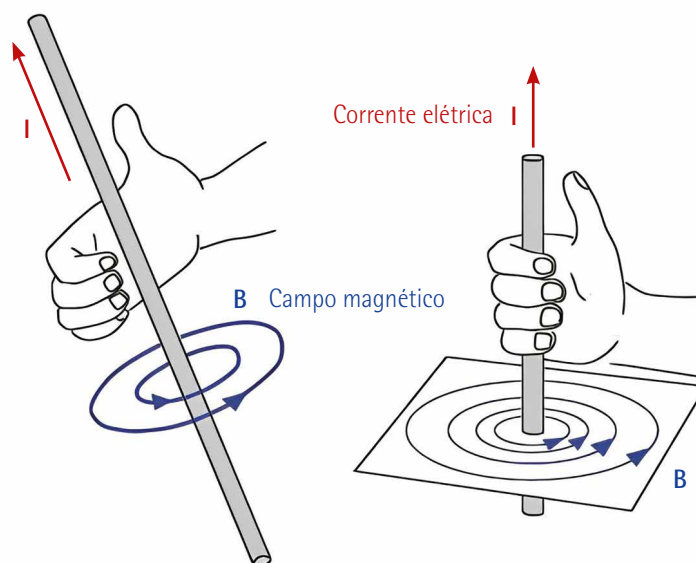


Figura 6 – Representação da regra da mão direita

Adaptada de: <http://tinyurl.com/2fa3853r>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Contudo, se o fio condutor estiver enrolado por diversas voltas do fio, de forma a criar uma espiral, as linhas de indução irão se concentrar em seu interior, criando um campo magnético de maior intensidade. Quanto mais voltas de fio houver, e quanto maior for o diâmetro de sua circunferência, maior será o campo magnético gerado.

Esse efeito pode ser **potencializado** em muitas vezes se o fio for enrolado em torno de um núcleo de **material magnetizável**, como o ferrosilício (também conhecido popularmente como ferro doce), ou similar.

Nesse caso, com a passagem de uma corrente elétrica pelo fio, teremos em mãos um **eletroímã**, cujo campo magnético estará presente apenas enquanto passar uma corrente elétrica por ele. A intensidade

da corrente também determinará a intensidade do campo, que se orientará pelos polos norte e sul, tal como um ímã convencional permanente (figura 7).

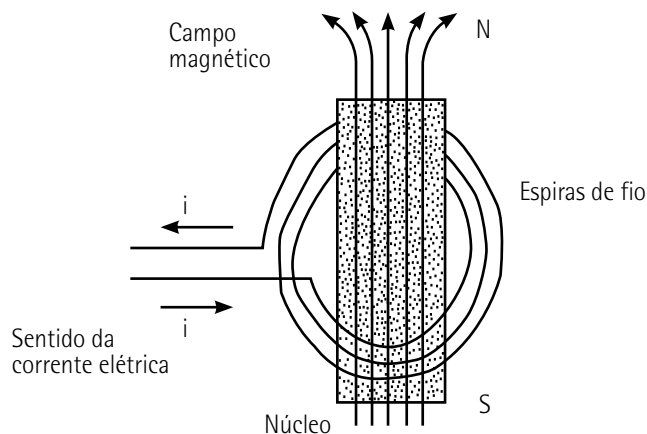


Figura 7 – Campo magnético em uma bobina

Portanto, a finalidade de um indutor é produzir um campo magnético a partir de uma corrente elétrica. Em outras palavras, podemos dizer que esse componente **armazena energia** em forma de campo magnético.



Observação

A apresentação do símbolo do indutor nos diagramas esquemáticos é feita por uma **espiral** que começa e termina em dois extremos bem definidos, representando os dois terminais do componente. A presença ou ausência de um núcleo com características magnéticas é indicada por linhas que acompanham longitudinalmente o desenho da espiral: se elas forem tracejadas, o indutor é indicado para altas frequências; se forem contínuas, para baixas frequências (figura 8).

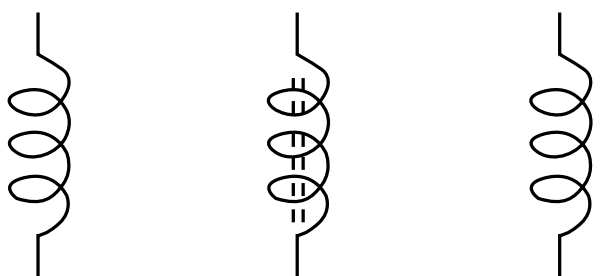


Figura 8 – Simbologia dos indutores: indutor sem núcleo (esquerda), indutor com núcleo de ferrite (centro) e com núcleo de ferro (direita)

2 A INDUTÂNCIA

Chamamos de **indutância** a capacidade de um indutor produzir, a partir de uma corrente circulante por ele, um campo magnético. A unidade de medida correspondente, determinada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), é o **Henry**, cujo símbolo é dado pela letra **H**.

Para compreendermos sua relação com as demais grandezas que o determinam, podemos partir do seguinte pressuposto: quando a taxa de variação da corrente elétrica em um circuito corresponde ao valor equivalente a 1 Ampère por segundo (1 A/s), e a tensão (força eletromotriz) resultante for de 1 Volt (1 V), pode-se dizer que a indutância do circuito será de 1 Henry (1 H).

Desta forma, quando a corrente circulante por uma bobina apresentar um valor constante de 1 Ampère durante um período de 1 segundo, apresentando esta última uma tensão de 1 Volt sobre seus terminais, a sua indutância será equivalente a 1 Henry.



Lembrete

A **tensão**, ou diferença de potencial, refere-se ao **potencial elétrico** que existe entre os dois terminais de um gerador de eletricidade qualquer, que pode ser uma pilha ou bateria. Medida em Volts (V), ela é a **força eletromotriz** que movimenta os elétrons através dos fios que ligam o gerador ao circuito alimentado, fazendo-o funcionar.

Já a **corrente elétrica**, medida em Ampères (A), é o fluxo dos elétrons que saem de um gerador (como uma bateria), fluem pelo circuito que estão alimentando (no caso, o indutor) e retornam à referida bateria, constituindo o que chamamos de um **circuito fechado**.

Um detalhe importante é que valor de 1 H equivale a uma indutância bastante grande, e muitas vezes os valores de indutores utilizados são frações de 1. Por essa razão, é mais comum adotar seus submúltiplos, como o milihenry (mH), o microhenry (μH) e o nanohenry (nH), cujos valores são comparados na tabela 1.

Tabela 1 – Submúltiplos de Henry mais utilizados

Valor em Henrys	Submúltiplo	Nome	Símbolo
0,001	10^{-3}	milihenry	mH
0,00001	10^{-6}	microhenry	μH
0,00000001	10^{-9}	nanohenry	nH

Normalmente, os valores dos indutores seguem os mesmos padrões de numeração já utilizados para os demais componentes eletrônicos, conforme a norma IEC 60063 (2015), que estabelece os intervalos para os seus valores em séries, conhecidas popularmente como Série E. Notadamente, são utilizadas nos indutores as séries E6 (tabela 2), E12 ou E24 – apesar de isso não ser uma regra, e alguns fabricantes utilizarem numerações que seguem padrões próprios ou específicos, muitas vezes causando alguma confusão nos estudantes.

Tabela 2 – Valores da série E6 para tolerâncias de 20%

Valor x1	1	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8
x10	10	15	22	33	47	68
x100	100	150	220	330	470	680
x1000	1K	1K5	2K2	3K3	4K7	6K8
x10000	10K	15K	22K	33K	47K	68K
x100000	100K	150K	220K	330K	470K	680K
x1000000	1M	1M5	2M2	3M3	4M7	6M8



Observação

Na tabela, o prefixo **K** (de quilo) denota o valor multiplicado por 1 mil, e o prefixo **M** (de mega) representa o valor multiplicado por 1 milhão.

As tolerâncias mais adotadas para os valores desses componentes ficam geralmente entre 5 e 20%. O mais comum é adotar o valor de 10%, adequado para a série E6 que significa que um indutor pode apresentar uma variação de 10% em seu valor, para mais ou para menos, e considerando que tolerâncias mais baixas usualmente não são empregadas.

2.1 Reatância indutiva

Os indutores também têm a propriedade de comportar-se como resistores quando submetidos a uma corrente alternada. Contudo, ao se opor à passagem da corrente elétrica, os indutores permitem a passagem livre da corrente contínua ao mesmo tempo que apresentam oposição à passagem de correntes alternadas.

Quando uma corrente alternada flui por um indutor, ela gera um campo magnético ao seu redor. Esse campo magnético induz uma tensão oposta à variação da corrente que o gerou. Dessa forma, a reatância indutiva se manifesta como uma resistência aparente ao fluxo de corrente alternada, que é diretamente proporcional à taxa de variação dessa corrente.

A reatância indutiva é medida em Ohms (Ω), e pode ser calculada mediante o uso da fórmula básica:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

Em que:

- X_L é o valor da reatância, dado em Ohms (Ω);
- π é uma constante da fórmula, de valor aproximado 3,1416;
- f é a frequência da corrente alternada aplicada à bobina, em Hertz (Hz) e;
- L é a indutância da bobina, em Henrys (H).



Observação

É importante notar que a reatância indutiva oferecida por um indutor será diretamente proporcional aos valores tanto do indutor como da frequência da corrente alternada ao qual este será submetido.



Saiba mais

As calculadoras disponíveis no site Coil32 são excelentes ferramentas para o cálculo de indutores de diversos tipos, bem como para circuitos que utilizem a propriedade da reatância indutiva. Acesse-as em:

COIL32. 2008. Disponível em: <http://tinyurl.com/jkcf53dy>. Acesso em: 3 jan. 2024.

2.2 Materiais empregados na construção de indutores

Todos os indutores são constituídos de dois materiais básicos: um **fio**, que pode ser de cobre (normalmente escolhido por suas boas características condutoras), alumínio ou qualquer outro material, e uma **fôrma**, sobre a qual será enrolado este fio.

O material escolhido para estas fôrmas pode variar em suas características, podendo apresentar propriedades magnéticas ou não. Normalmente são utilizados o cartão (ou papelão), o ferro e o ferrite, cujos formatos, propriedades e influência destas no resultado final do indutor serão abordadas a seguir.

2.2.1 Indutores com núcleo de ar

Nos primórdios da eletrônica, os indutores eram normalmente enrolados em fios de cobre rígidos e grossos, que, quando colocados em uma dada posição, assim permaneciam até que fossem manipulados novamente. Isso dava-lhes uma boa estabilidade mecânica e permitia que fossem enrolados de forma autossuportada, sem o uso de nenhuma fôrma para servir de suporte (figura 9).



Figura 9 – Bobina com núcleo de ar

Por não conterem mais nada em sua estrutura, esse tipo de bobina passou a ser denominada núcleo de ar, uma vez que apenas o ar se encontrava entre as espiras de fio, agindo como isolante (dielétrico) entre elas, permitindo que o campo magnético se formasse de forma natural.

Com o tempo, surgiu a necessidade de bobinas cada vez menores em razão do emprego de fios mais finos, de forma que foram adotadas fôrmas de material isolante para seu suporte que, embora oferecessem uma base para enrolar as voltas de fio, não apresentavam características magnéticas notáveis, o que lhes tornava similaridades em funcionamento às bobinas de núcleo de ar. Desta forma, mesmo nos dias atuais, as bobinas enroladas sobre uma base feita de material não magnético – como papelão, madeira ou plástico – ainda são denominadas núcleo de ar.

Bobinas com núcleo de ar têm a particularidade de apresentarem valores de indutância relativamente baixos, necessitando de muitas voltas de fio – ou de um diâmetro muito avantajado – para que ofereçam um valor de indutância expressivo.

O motivo para isso é o que chamamos de **fator de mérito**, ou simplesmente **Q** , que determina o valor da indutância que será obtido para **cada volta** de fio na bobina. Nas bobinas com núcleo de ar,

como não há a presença de nenhum material magnético potencializando o campo produzido quando a bobina é energizada, a indutância será invariavelmente **baixa**, sendo que para que se obtenham valores maiores, deve ser utilizado um núcleo de material magnético.

Observe que muito embora as bobinas com núcleo de ar sejam bastante descritas na literatura e largamente construídas em formato cilíndrico, isso não é uma regra. Elas podem ser construídas em diversas fôrmas: quadradas (também denominadas bobinas de quadro) ou mesmo planas – chamadas sugestivamente de fundo de cesto, pelo seu enrolamento dar-se pelo entrelaçamento do fio de cobre em uma chapa de material isolante, como o fenolite ou o cartão (conforme visto na figura 10).



Figura 10 – Bobina de quadro de construção caseira, destinada a aplicações com radiofrequência



Saiba mais

As bobinas de quadro apresentam características especialmente desejadas em aparelhos de alta frequência, receptores de rádio, osciladores e até mesmo em detectores de metais. Um exemplo interessante de bobina de quadro é apresentado em:

RADIOESCUTA DX. *Antena loop de quadro eficiente para ondas médias.* 22 ago. 2003. Disponível em: <http://tinyurl.com/22jed7fp>. Acesso em: 3 jan. 2024.

2.2.2 Indutores com núcleo de ferro

Tal como no experimento levado a cabo por Faraday no século XIX, os indutores podem ser construídos usando um núcleo de ferro (seja ele comum ou de um tipo especial) que contém uma certa proporção de silício em sua composição. Ele é popularmente denominado ferro doce e tem propriedades específicas para aplicações elétricas. O material é usado por permitir que maior relação de indutância seja obtida por espira de fio, viabilizando bobinas mais compactas e com maiores valores.

Contudo, o ferro por si só, mesmo que seja de boa procedência e alta qualidade, não permite aplicações em frequências muito altas. Nesse caso, outros tipos de núcleos se comportam melhor, fazendo com que o ferro seja empregado apenas em circuitos de baixa frequência (para uso direto na rede elétrica), em frequências de 50 ou 60 Hz, ou em áudio – situação em que as frequências máximas não passam de alguns quilohertz (figura 11).



Figura 11 – Indutor com núcleo de ferro, fabricado pela Hammond

Disponível em: <http://tinyurl.com/yu48h573>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Exemplos comuns de núcleos de ferro são os normalmente encontrados em transformadores de força para aplicações domésticas ou industriais (figura 14), trabalhando ligados diretamente aos 110 ou 220 V da rede elétrica, em indutores de filtro (também popularmente chamados como choques) e utilizados com capacitores em circuitos de fontes de alimentação lineares, auxiliando na eliminação de ruídos da rede elétrica (figura 12).

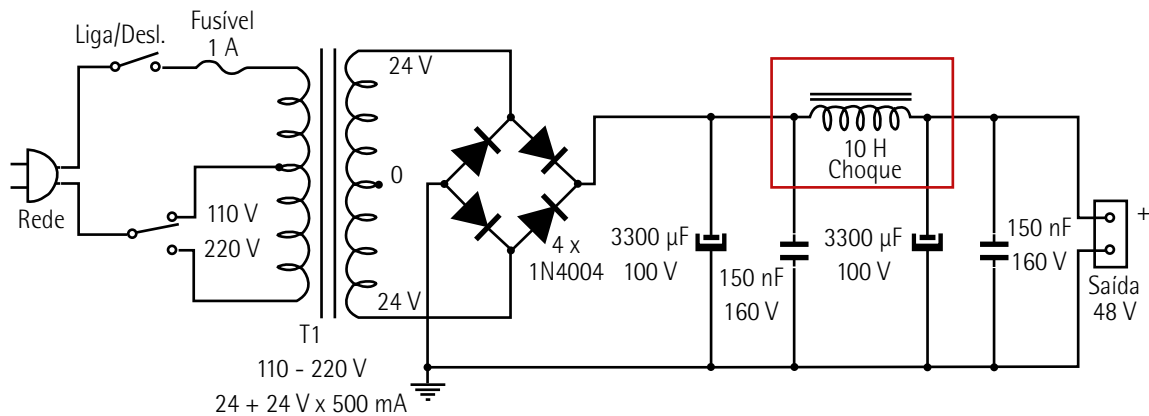


Figura 12 – Utilização de indutor do tipo choque, em circuito de fonte de alimentação

Outras aplicações dos núcleos de ferro são em transformadores para áudio e em solenoides utilizados em eletroímãs e relês, situações em que normalmente são submetidos a frequências baixas ou correntes contínuas. Tais núcleos são normalmente fabricados em chapas em forma de E e I, embora outros formatos também sejam encontrados (figura 13).

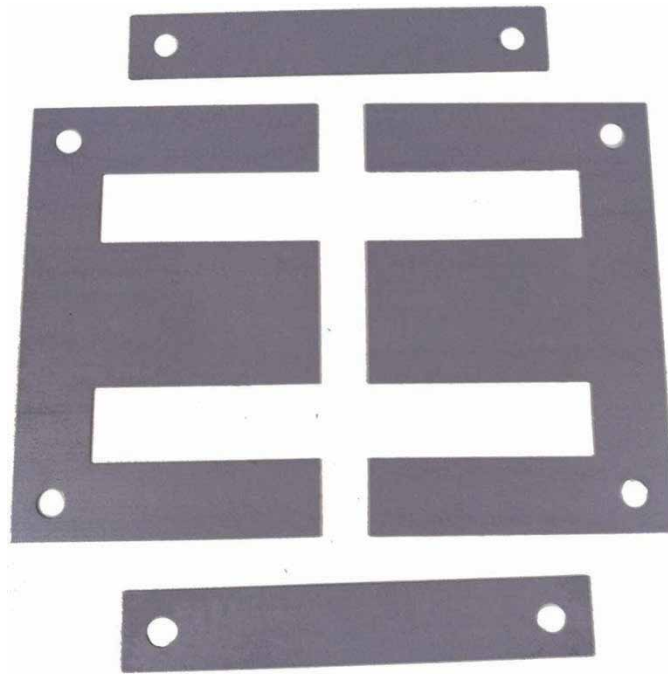


Figura 13 – Chapas tipo E e I para núcleo de transformadores

Disponível em: <http://tinyurl.com/r4hbarue>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Depois, essas chapas são empilhadas umas sobre as outras, preenchendo o espaço do centro da bobina, já enrolada em um carretel de papelão ou plástico, formando seu núcleo. Então, todo o conjunto é banhado em verniz, promovendo ao conjunto boa fixação mecânica, rigidez e isolamento elétrico.

2.2.3 Indutores com núcleo de pó de ferro (ferrite)

Como acabamos de comentar, o ferro e o ferro silício utilizados sozinhos não são adequados para trabalhar em frequências altas (acima de 10 ou 20 quilohertz).

A solução encontrada para os núcleos dos indutores destinados a frequências acima desse patamar foi elaborar um material específico à base de **pó de ferro** (também conhecido popularmente como **limalha**) misturado com um agente aglutinante – normalmente **resina epóxi** ou **cerâmica** – e outros aditivos, como pó de **manganês**, **cobre**, **zinco**, **cobalto** ou **níquel**, além do óxido do próprio ferro. A esse produto final deu-se o nome de **ferrite** ou **ferrita**.

Dependendo das proporções dos materiais empregados junto ao ferro nessa mistura, é possível obter ferrites com diferentes propriedades magnéticas, mais magnetizáveis ou não, o que permite constituir uma enorme variedade de indutores com as mais variadas características a nível de **indutância por volta de fio**.

Por apresentarem características adequadas para o trabalho em **altas frequências**, funcionando muito bem até **centenas de megahertz**, os ferrites são largamente empregados em circuitos de **radiofrequência**, **osciladores** e **fontes de alimentação** chaveadas, dentre outros. Por atingirem valores de indutância relativamente altos com poucas voltas de fio, eles permitem soluções bastante compactas e também de custo bastante baixo, com economia de material.

Eles estão disponíveis em diversos formatos (figura 14), e os formatos mais comuns são o cilíndrico, o de barra e o toroide. Os dois últimos permitem a construção de excelentes indutores pequenos, preferidos atualmente para constituir diversos circuitos eletrônicos.



Figura 14 – Núcleos de ferrite de diversos formatos

2.3 Tipos de indutores mais encontrados

2.3.1 Indutores moldados

Dos modelos mais encontrados hoje em dia, os mais comuns são os do tipo **moldado**, fabricados utilizando um fio finíssimo enrolado sobre um substrato de cerâmica ou ferrite e codificados por um código de faixas coloridas. A semelhança com os resistores causa bastante confusão, e a única forma de diferenciar um indutor de um resistor é pela da cor de seu substrato: enquanto os resistores no geral são azuis ou marrons, os indutores são recobertos por uma tinta de cor esverdeada (figura 15).



Figura 15 – Indutor moldado em forma de resistor

Disponível em: <http://tinyurl.com/38sskpmr>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Sua leitura, por utilizar-se do mesmo código de cores dos resistores de quatro faixas coloridas, pode ser feita da mesma forma (de acordo com o padrão da tabela 3 a seguir). Os valores normalmente vão de 1 microhenry até alguns milihenrys, com precisão de 10%.

Tabela 3 – Códigos de cores para os indutores

Cor	Algarismo	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	×1	–
Marrom	1	×10	1%
Vermelho	2	×100	2%
Laranja	3	×1000	
Amarelo	4	×10000	

Cor	Algarismo	Multiplicador	Tolerância
Verde	5	$\times 100000$	
Azul	6	–	
Violeta	7	–	
Cinza	8	–	
Branco	9	–	
Ouro	–	$\times 0,1$	5%
Prata	–	$\times 0,01$	10%

2.3.2 Indutores com encapsulamento plástico/epóxi

Outro tipo de indutor bastante utilizado é o de encapsulamento plástico/epóxi, também chamado Sontag, nome dado em alusão à empresa que os fabricou por muitos anos no Brasil. Eles são enrolados de forma muito semelhante, sobre uma fôrma de cerâmica ou de outros materiais, e encapsulados dentro de uma pequena caixa plástica, selada na parte inferior com resina epóxi. Trata-se de um componente muito robusto e resistente (figura 16), de qualidade superior.

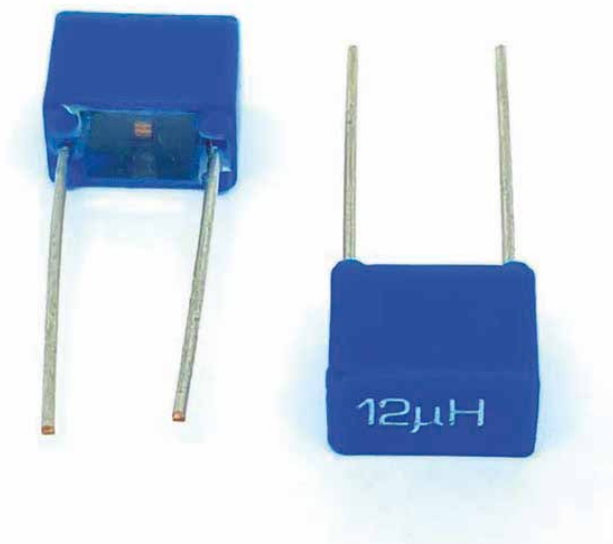


Figura 16 – Indutor tipo Sontag

Disponível em: <http://tinyurl.com/5h328v49>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Outros indutores semelhantes a esses têm o corpo em material plástico de cor verde, mas seu interior não é selado em epóxi – o que pode favorecer problemas de corrosão do fio condutor na parte interna, especialmente se armazenados em local úmido.

2.3.3 Indutores de enrolamento entrelaçado "honeycomb"

Ainda são bastante comuns os indutores mais antigos, feitos sobre uma base de cerâmica e enrolados em um formato chamado *honeycomb* (colmeia, em inglês), com enrolamento entrelaçado (figura 17). O formato lhes confere qualidades especiais, que comentaremos adiante.



Figura 17 – Indutores tipo *honeycomb*, com enrolamento de fio entrelaçado e exposto

Construídos de forma totalmente aberta, são recobertos com verniz ou cola que promovem fixação mecânica, mas não oferecem alta resistência a atrito ou batidas, o que os torna especialmente frágeis. Pela exposição, seu fio pode facilmente romper-se ou começar a desenrolar.

Esses indutores eram muito comuns em montagens no passado. Hoje em dia são utilizados apenas em aplicações bem específicas, e geralmente feitos de forma artesanal – o que não é simples, dado o tipo de enrolamento entrelaçado que os caracteriza – ou sob encomenda por alguns poucos fabricantes especializados. Via de regra não apresentam seu valor gravado em seu corpo, como em outros modelos, o que muitas vezes dificulta sua identificação.

2.3.4 Indutores de valor ajustável

Por vezes, dependendo da aplicação de um indutor, seu valor tem um papel crítico no comportamento do circuito em operação, e pode fazer com que o circuito não opere conforme o esperado ou especificado.

Muitas vezes é desejável que um indutor seja de valor ajustável dentro de certo intervalo, adequando-se às necessidades definidas pelo circuito e sendo capaz de compensar suas próprias tolerâncias e as dos demais componentes.

Assim, os indutores podem ser passíveis de ajuste, que normalmente é implementado de duas formas:

- **Nos indutores autossuportados de valor baixo:** na casa dos nanohenrys e com núcleo de ar (conforme a figura 9), esse ajuste pode ser feito aproximando ou afastando as espiras entre si.
- **Nos indutores de formato cilíndrico com núcleo de ferrite ou ferro:** o núcleo pode ser movimentado para posicionar-se totalmente para dentro ou para fora da bobina, o que varia sua influência sobre ela e, conseqüentemente, sua indutância final.

Os indutores do primeiro tipo descrito, por sua simplicidade, baixíssimo custo e razoável estabilidade, são largamente empregados em circuitos de rádios FM e VHF, uma vez que se comportam muito bem em frequências altas e dificilmente requerem ajustes. Neste caso, após ajustados na fábrica, os indutores são recobertos com cera ou parafina derretida para ter alguma fixação mecânica adicional, o que evita que mudem de posição.

Já os indutores com núcleo de ferrite ajustável permitem valores maiores de indutância (até a casa dos vários milihenries), e são muito utilizados em circuitos de sintonia, em uma grande faixa de frequências (normalmente desde alguns quilohertz até muitos megahertz). Nesses componentes, o núcleo de ferrite é geralmente moldado em forma de parafuso e então atarraxado dentro de uma fôrma plástica, sobre a qual será enrolada a bobina, conforme a figura 18.

Outros indutores mais antigos dispunham de seu núcleo moldado em forma de bastão cilíndrico, atarraxado à fôrma por um parafuso de latão pela sua parte superior. Neste caso, utiliza-se o latão em razão do material não ter propriedades magnéticas, não afetando o valor ou a operação do indutor pronto. Um exemplo desse tipo de componente pode ser visto na figura 21.



Figura 18 – Exemplos de indutores com núcleo de ferrite ajustável

2.3.5 Indutores de fabricação artesanal

Não raramente são encontrados indutores de fabricação quase artesanal, especialmente em equipamentos mais antigos ou de fabricação caseira, situação em que valores específicos (normalmente de valores baixos, na casa de alguns microhenries) eram requeridos e muitas vezes não estavam disponíveis prontamente no mercado.

Tais indutores eram enrolados sobre materiais de baixo custo, como tubinhos plásticos, pedaços de canos de PVC, ou mesmo sobre resistores de valor alto. Como o valor ôhmico do indutor geralmente não passa de alguns Ohms, por ser basicamente um fio enrolado, a influência do resistor torna-se desprezível no que se refere a circuito, já que ele atua apenas como suporte para enrolar a bobina (figura 19).

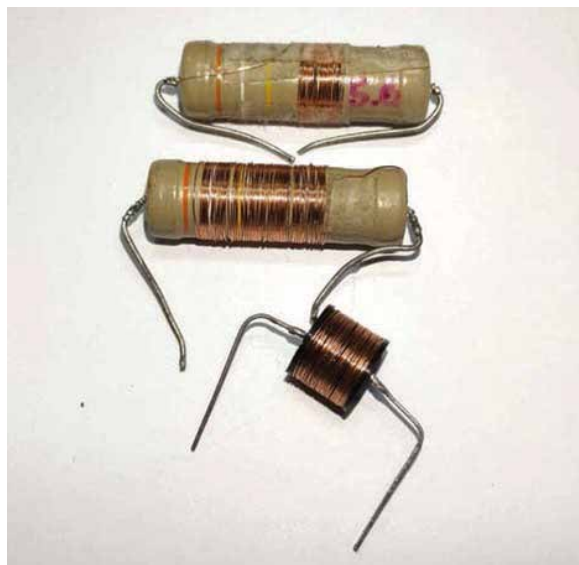


Figura 19 – Indutores enrolados sobre resistores e sobre forma plástica, impressa em 3D

Esses indutores são enrolados com fio esmaltado fino, que pode ser retirado de algum transformador velho ou de alguma sucata de televisão, e podem ser facilmente calculados por uma fórmula bem simples – uma vez que são compostas apenas de uma camada de fio enrolado, formato cilíndrico e núcleo de ar, e o resistor (que serve de base para o enrolamento) não apresenta características magnéticas notáveis – proposta por Wheeler (1942):

$$L = \frac{N^2 \times D^2}{(45.72 \times D) + (101.6 \times l)}$$

Na fórmula apresentada, L é a indutância (em microhenries), N é o número de voltas de fio, D é o diâmetro da forma (em centímetros) e l é o comprimento do enrolamento (também em centímetros), conforme ilustrado na figura 20.

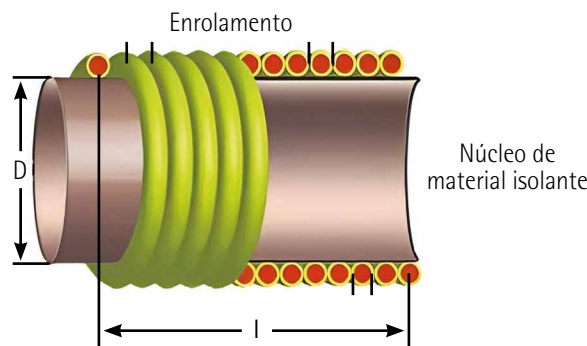


Figura 20 – Dimensões de uma bobina com núcleo de ar

Adaptada de: <http://tinyurl.com/bdeezz39>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Observe que, nesse caso, o diâmetro do fio não é levado em conta, dado que é irrelevante para o valor final da indutância.

Exemplo de aplicação

Testando a continuidade de indutores

Embora a medição dos valores dos indutores não seja, a princípio, uma tarefa simples, é possível verificar o estado de um indutor de forma rápida e fácil para garantir que seu fio não esteja interrompido, o que o tornaria inútil.

Para isso, pode-se utilizar um multímetro qualquer – analógico ou digital – na escala de Ohms $\times 1$, provando em seus terminais as lides do componente. Se o fio estiver íntegro, ele permitirá a passagem da corrente elétrica e o multímetro a acusará, indicando uma resistência em Ohms relativamente baixa.

Se o valor medido der infinito (ou seja, o multímetro não acusar leitura) ou a leitura for uma resistência elétrica muito alta (na casa de $1\text{ M}\Omega$ ou mais), é certo que o fio do indutor está interrompido e não poderá mais ser aproveitado.

Isso pode ocorrer por diversos fatores:

- fio rompido por choque mecânico ou por atrito, no caso dos indutores abertos mais antigos;
- corrosão da ligação do finíssimo fio interno com as lides, geralmente causada por umidade, e;
- excesso de corrente circulante pelo componente ao operar – por ser muito fino, o fio não tolera correntes muito superiores a 100 miliampères, rompendo-se quando operado nessas condições por algum tempo.

Via de regra, este método de identificação de indutores "bons" é de grande valor quando estamos às voltas com a caixa de sucata, mas não permite, por exemplo, determinar se um indutor está com espiras em curto (um problema que volta e meia pode se manifestar) ou seu valor em Henrys – algo que demanda equipamentos mais complexos e dedicados, que podem ser construídos por entusiastas ou adquiridos em comércios especializados sem grande dispêndio de dinheiro, e sobre os quais falaremos adiante neste tópico.

2.4 Os indutores em série e em paralelo

Do mesmo jeito que quaisquer componentes eletrônicos – como resistores ou capacitores – podem ser associados em série ou em paralelo, os indutores permitem associações em diversas configurações, obtendo valores que não existem dentro das séries disponíveis (E6, E12 etc.), ou que não temos à mão no momento.

Desta forma, neste tópico estudaremos as configurações possíveis para as associações de indutores, para entender como esses componentes se comportam quando ligados em série, paralelo, ou em associações mistas de ambos.

2.4.1 Cálculo de indutores em série

Quando associamos dois indutores em série, a corrente que circula pelo circuito e atravessa os componentes é a mesma. Pode-se dizer que um indutor se comporta como o prolongamento do outro, permitindo que seus valores se acumulem.

Desta forma, o resultado da indutância equivalente dessa malha (ou associação) de indutores será igual à soma de seus valores, conforme a figura 21.

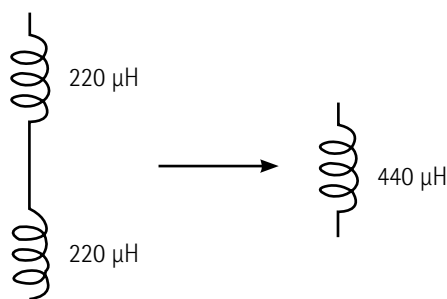


Figura 21 – Associação de dois indutores de 220 µH em série, perfazendo um valor total de 440 µH

No caso apresentado, há dois indutores de 220 µH (microhenries), que, ligados em série, apresentam um valor final de 440 µH. Observe que, se forem associados mais indutores em série, a regra se mantém, conforme a figura 22.

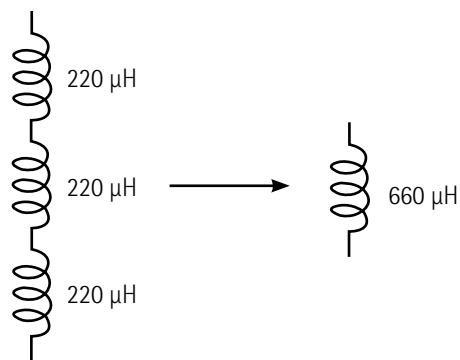


Figura 22 – Associação de três indutores de $220\ \mu\text{H}$ em série, perfazendo um valor total de $660\ \mu\text{H}$

Neste último exemplo, foram associados em série três indutores de $220\ \mu\text{H}$, somando uma indutância equivalente (L_{eq}) de $660\ \mu\text{H}$.

Essa regra de associação vale para quaisquer tipos de indutores, com quaisquer valores (inclusive diferentes entre si), bastando somar todos valores para obter a indutância equivalente.

A associação em série dos indutores é dada pela fórmula:

$$L_{\text{eq}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

Em que L_{eq} será o valor da indutância equivalente da associação, e $L_1 \dots L_n$ são os valores dos n indutores associados em série no circuito, conforme podemos conferir na figura 23.

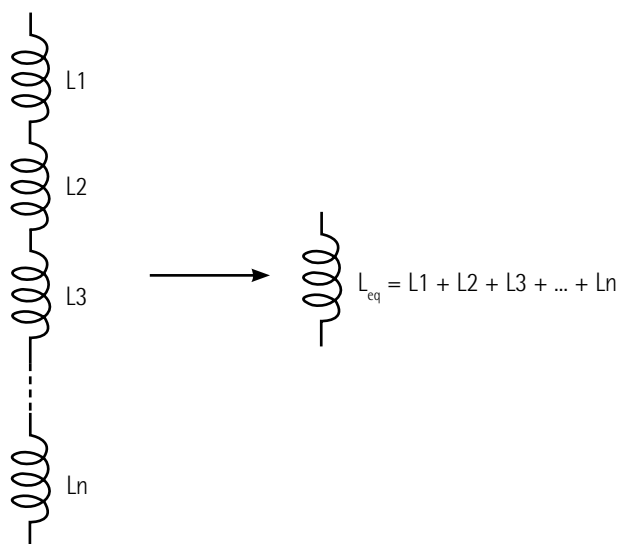


Figura 23 – Associação de n indutores em série

2.4.2 Cálculo de indutores em paralelo

Indutores associados em paralelo têm um comportamento diferente dos indutores associados em série, uma vez que, no caso paralelo, a corrente circulante pelo circuito irá dividir-se entre os indutores associados.

Por isso, o valor da indutância equivalente não pode ser calculado de forma direta, como é feito com a indutância da associação em série. O cálculo da associação em paralelo será dado pela regra de que **o inverso da indutância equivalente da associação será igual à soma dos inversos dos valores das indutâncias associadas em paralelo.**

Em resumo, a fórmula para o cálculo da indutância equivalente será:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

Assim, para uma situação com dois indutores associados em paralelo (figura 24), teremos:

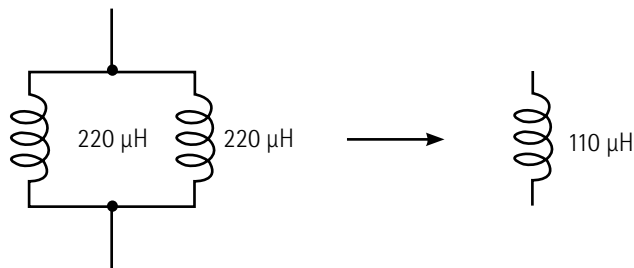


Figura 24 – Associação de dois indutores de 220 µH em paralelo, perfazendo uma indutância final de 110 µH

Um exemplo de aplicação da fórmula pode ser visto a seguir:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{220} + \frac{1}{220}$$

Que, para melhor visualização, pode ser considerada como o inverso do seguinte resultado:

$$L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{220} + \frac{1}{220}}$$

Perfazendo, ao final, um valor de indutância de 110 µH. Observe que, via de regra, o valor da indutância final de uma associação de indutores em paralelo será sempre menor que o valor do menor indutor associado. A mesma fórmula pode ser aplicada para associações com três ou mais indutores em paralelo, conforme a figura 25.

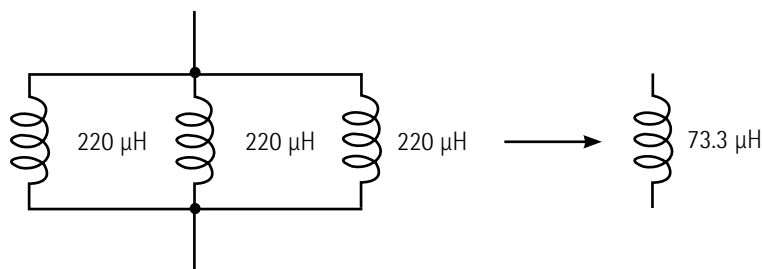


Figura 25 – Associação de três indutores de $220\ \mu\text{H}$ em paralelo, perfazendo um indutor equivalente de $132,1\ \mu\text{H}$

3 INDUÇÃO MÚTUA – TRANSFORMADORES

Dentre as diversas aplicações da indução eletromagnética, seja em elétrica ou eletrônica, um componente de importância especial é o transformador. Esses dispositivos utilizam-se da propriedade de indução mútua, verificada por Faraday e posteriormente pelo próprio Henry em seus experimentos, ainda no século XIX.

Tal propriedade determina que, se duas bobinas estiverem suficientemente próximas, e uma variação de corrente for produzida sobre uma delas – seja pelo ato de ligar e desligar uma bateria nos seus terminais, ou de aplicar a elas algum tipo de corrente alternada, como os 60 Hz da rede elétrica, ou um sinal de áudio – a mesma variação poderá ser percebida, medida e também aproveitada na outra bobina. Nessa situação, diz-se que as bobinas estão **acopladas**.

A presença de um núcleo de propriedades magnéticas como suporte comum às duas bobinas – seja de ferro ou ferrite – permite um grau de acoplamento ainda maior entre elas, permitindo que as variações aplicadas a uma das bobinas sejam bem perceptíveis na outra (e vice-versa).

Deste tipo de associação, surge uma nova classe de componentes eletrônicos derivados dos indutores: os **transformadores**. Como o próprio nome diz, eles destinam-se a **transformar energia** – de elétrica para magnética e novamente para elétrica –, permitindo usá-la em um sem-número de aplicações de enorme importância nos campos da eletricidade e da eletrônica. Nos transformadores, chamamos as bobinas acopladas em torno do núcleo de **enrolamentos** (figura 26).

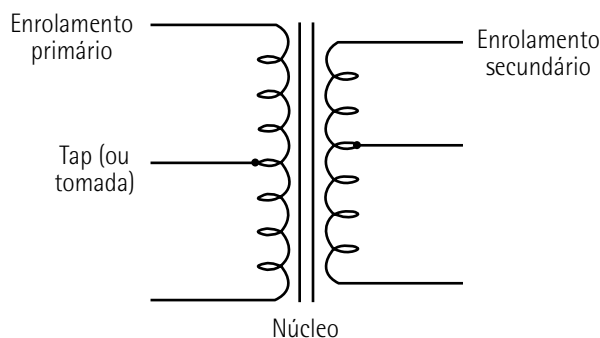


Figura 26 – Símbolo esquemático de um transformador com dois enrolamentos – primário e secundário – e núcleo de ferro

Esses enrolamentos são categorizados como primário ou secundário de acordo com a sua função: de entrada ou de saída. Um mesmo transformador pode ter mais de um primário e também mais de um secundário, da mesma forma que pode ser dotado de tomadas (ou taps), dividindo o enrolamento em uma ou mais partes.

Um detalhe importante é que os transformadores realizam essa transformação apenas em situações em que existe uma **variação de corrente elétrica**, como em **pulsos elétricos**, **sinais de áudio** ou em **corrente alternada** – como a da rede elétrica com tensão de 110 ou 220 V que vemos nas residências.

Conforme verificado pelos pioneiros Faraday e Henry, se ligarmos um transformador a uma **bateria** que alimente os enrolamentos com uma **corrente contínua**, conseguiremos mensurar no outro enrolamento apenas os **transientes** (ou variações de corrente) produzidos ao ligar ou desligar a bateria, não conseguindo medir nada além disso em qualquer outro momento.

Isto ocorre porque o transformador apenas consegue passar as variações de corrente elétrica de um enrolamento para o outro através do elo indutivo proporcionado por seu núcleo. Assim, costuma-se dizer que esses componentes são indicados para trabalhar apenas com correntes alternadas, que são do tipo que apresentam variações de intensidade ao longo do tempo.

Na figura 27, vemos o formato de onda obtido diretamente da rede elétrica, que oscila 60 vezes por segundo (ou com uma frequência de 60 Hz). Dessa forma, a corrente elétrica ora estará em 127 volts negativos (formando o vale da onda que vemos na imagem), passando a subir, em seguida, cruzando a linha que delimita os zero volts, para então subir até atingir o pico de 127 volts positivos, para logo voltar a descer novamente e assim por diante.

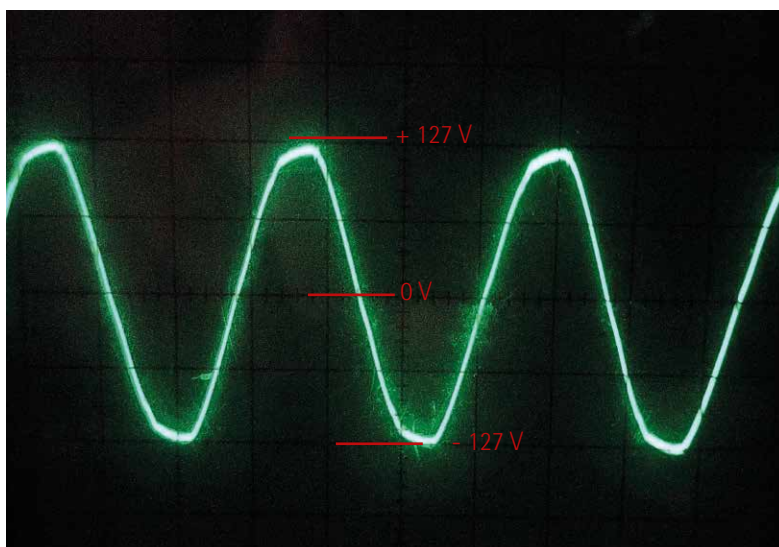


Figura 27 – Corrente alternada de 60 Hz, obtida a partir da rede elétrica residencial de 127 V e fotografada da tela de um osciloscópio

3.1 Relação de espiras entre enrolamentos

Um detalhe importante dos transformadores é a relação da quantidade de espiras entre enrolamentos. A tensão que pode ser obtida no enrolamento secundário de um transformador, quando aplicada uma corrente alternada em seu primário, dependerá de alguns fatores principais, a saber:

- a quantidade de espiras no primário;
- a quantidade de espiras no secundário e;
- a tensão aplicada no primário.

É possível estabelecer uma relação que pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Em que:

- **V1** é a tensão aplicada ao primário do transformador.
- **V2** é a tensão medida no secundário do transformador.
- **N1** é a quantidade de espiras no enrolamento primário.
- **N2** é a quantidade de espiras no enrolamento secundário.

Portanto, a relação destas grandezas é diretamente proporcional – o que permite que, ao variar a relação de espiras entre primário e secundário, seja possível aumentar ou abaixar a tensão obtida neste último dentro de um largo intervalo.

Essa é uma das principais razões pelas quais a corrente alternada é adotada nos serviços de produção e distribuição de energia elétrica em todo o mundo, uma vez que, mediante o uso de transformadores, é possível abaixá-la e aumentá-la à vontade, de modo a compensar perdas que podem surgir em longas linhas de transmissão, ou permitir que tensões altas que as atravessam sejam devidamente reduzidas possam ser repassadas aos domicílios, por exemplo.

Assim, se tivermos um transformador com um enrolamento primário com mil espiras de fio e um secundário com 5 mil espiras, podemos dizer que este último terá uma relação de 1 para 5, ou simplesmente 1:5 – ou seja, para cada espira no primário, teremos cinco no secundário.

Logo, se aplicarmos um pulso com uma tensão de 5 volts no enrolamento primário, obteremos, no secundário, um pulso com amplitude muito maior, de 25 volts. Essa tensão foi devidamente elevada pela relação entre as espiras do primário e do secundário, conforme ilustra a figura 28.

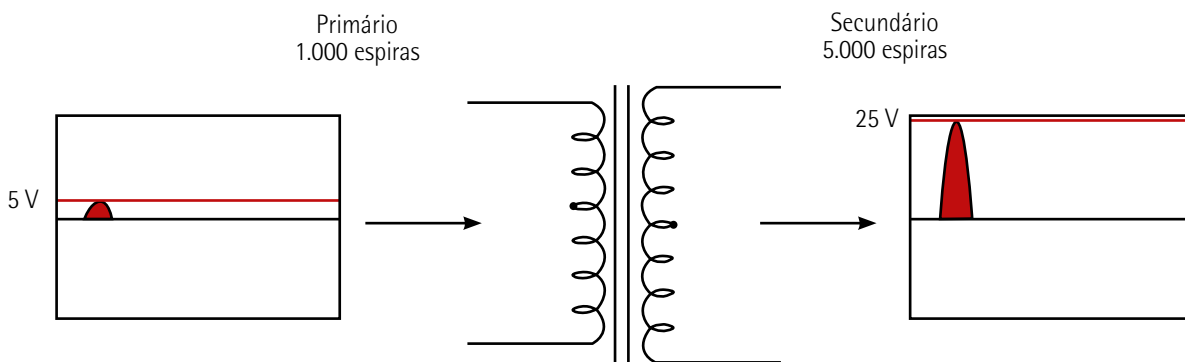


Figura 28 – Um pulso de 5 V, aplicado ao primário de um transformador com relação de 1:5, apresentando-se no secundário com uma tensão de 25 V

3.1.1 Relação de espiras e taps nos transformadores

É comum que os transformadores sejam fabricados com mais dois fios em cada um de seus enrolamentos. Nesses casos, os fios adicionais são tomadas (ou taps) que servem para acessar o enrolamento com uma quantidade menor de espiras, permitindo diferentes relações de transformação.

Assim, se aplicarmos um pulso elétrico a um transformador semelhante ao do exemplo anterior que possua um primário com mil espiras, mas um secundário com 5 mil espiras e dotado de um tap na 2.500ª espira, ele pode apresentar tanto uma relação de 1:5 como com uma relação de 1:2,5 – basta fazer a medição do pulso entre um dos extremos e a tomada intermediária do secundário, conforme a figura 29.

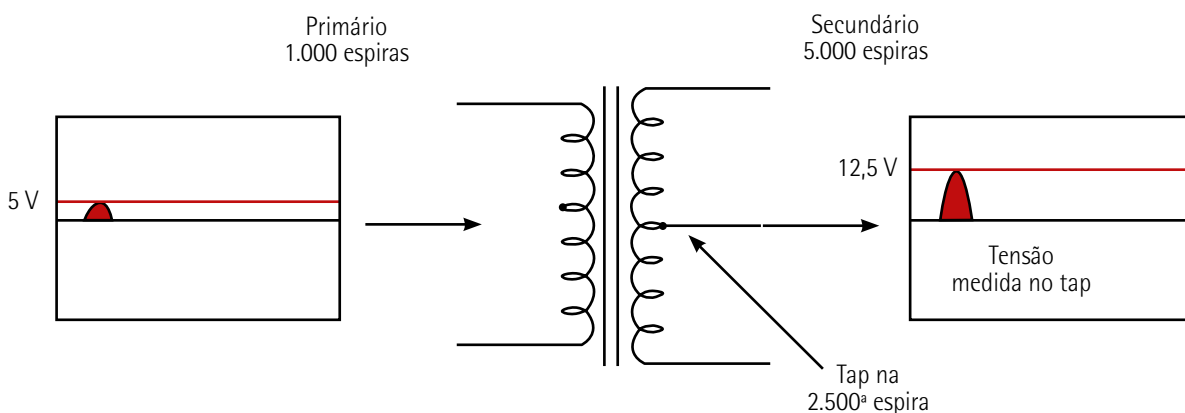


Figura 29 – Transformador com 'tap' no secundário, e relação de 1:5 e 1:2,5

Tal configuração é muito utilizada em transformadores de força destinados a fontes de alimentação, permitindo seu uso em redes elétricas com tensões de 110 ou 220 V. Também é comum o uso de uma chave comutadora atrelada ao enrolamento primário, tornando possível escolher alimentá-lo por meio do tap ou do extremo do enrolamento, permitindo duas tensões de operação (figura 30).

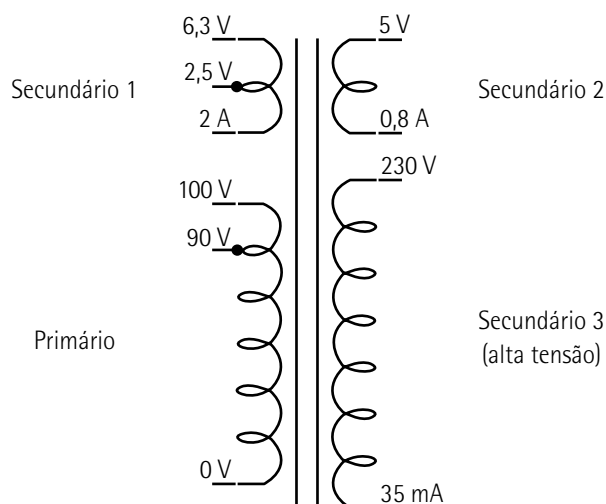


Figura 30 – Transformador de força para fontes de alimentação, com vários secundários

Observe que, dadas as relações das espiras entre primários e secundários, várias tensões – tanto **mais baixas** como **mais altas** que a do primário – podem ser obtidas por um único transformador. Outro detalhe importante é a **corrente elétrica** que pode ser oferecida na saída de cada enrolamento secundário: ela é **limitada** pela grossura do fio de cobre utilizado para o enrolamento, e **não deve ser excedida** sob o risco de provocar **sobreaquecimento** e **destruição** dos enrolamentos – não se pode exigir mais corrente do que a que um transformador pode oferecer.

Outra aplicação desses tipos de enrolamento é como transformadores para áudio, em que atuam fazendo o acoplamento entre os estágios de amplificação e o alto-falante. No último caso, um secundário com mais de um tap consegue acomodar da forma mais adequada as características de um amplificador a uma caixa acústica, por exemplo; vide a figura 31.

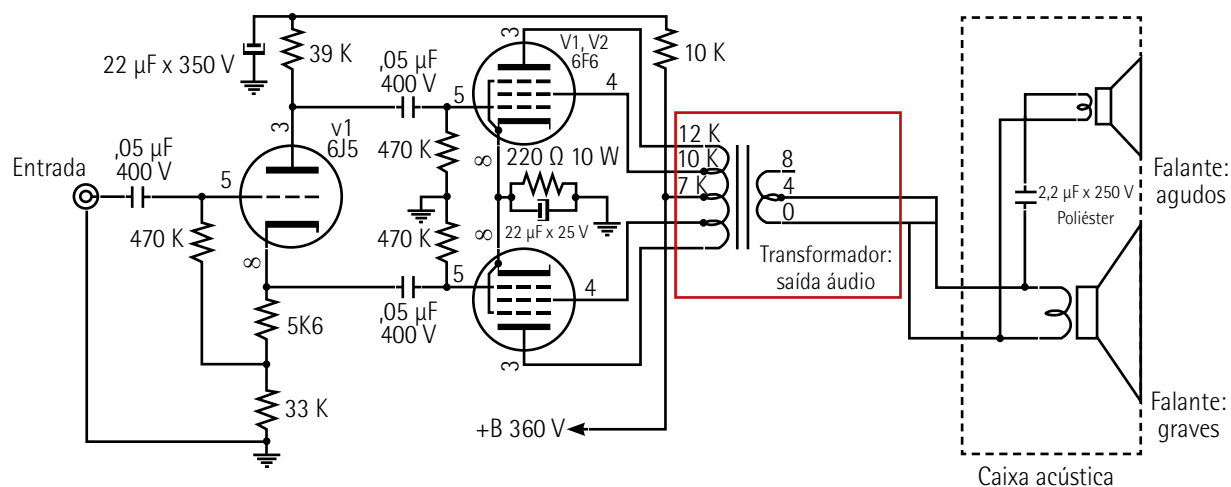


Figura 31 – Uso de transformador com múltiplos 'taps' em circuito de áudio

3.2 Tipos de transformadores

Um transformador pode ser construído com diversas configurações diferentes de enrolamentos, que podem ser dotados de múltiplos taps para diversas relações de transformação, bem como de múltiplos enrolamentos primários e secundários, permitindo uma ampla gama de aplicações diferentes.

Este subtópico trata dessas variações e de três tipos principais de transformadores. A saber: os **transformadores isoladores**, os **autotransformadores** e os **autotransformadores variáveis** (ou simplesmente Variac).

3.2.1 Transformadores isoladores

Em tese, todo transformador que tenha dois ou mais enrolamentos irá proporcionar uma **isolação galvânica** entre eles. Essa propriedade provê isolação entre seções funcionais de um circuito elétrico ou eletrônico, evitando que **fluxos de corrente elétrica circulem diretamente** entre primário e secundário de um transformador, por exemplo.

Neste caso, como o núcleo do transformador provê um **elo indutivo** para a troca de energia entre os enrolamentos, e não existe nenhum caminho metálico de condução para a eletricidade, os circuitos ficam completamente separados, permitindo que trabalhem em diferentes potenciais elétricos e prevenindo que **correntes espúrias** ou indesejadas fluam entre eles (figura 32).

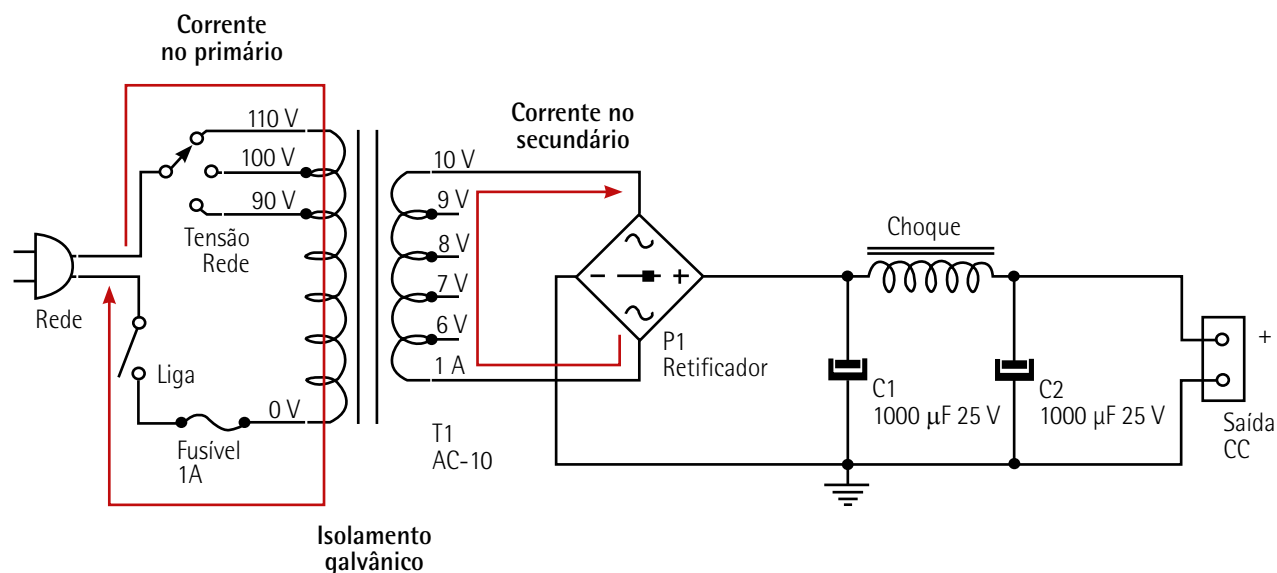


Figura 32 – Isolamento galvânico em fonte de alimentação

Uma aplicação bastante comum do isolamento galvânico é nas fontes de alimentação que trabalham ligadas a redes elétricas. Sabe-se que as tensões e correntes presentes em qualquer tomada residencial podem ser fatais se não houver precaução e cuidado ao manuseá-las. Por isso, é sempre desejável que o usuário de quaisquer aparelhos que funcionem conectados à rede elétrica estejam totalmente isolados, e o uso dos transformadores de isolamento é fundamental para esse fim e

para a segurança dos aparelhos; eles são, inclusive, itens obrigatórios, de acordo com várias normas internacionais – como a ABNT NBR IEC 60065 (ABNT, 2009).

Via de regra, a qualidade da isolamento galvânica proporcionada por um transformador depende da qualidade de sua fabricação, da distância entre os enrolamentos e da grossura do material isolante utilizado, bem como da qualidade do fio que o compõe – que usualmente é de cobre, recoberto por uma fina camada de verniz dielétrico especial para altas temperaturas, deixando o material bem isolado (figura 33).

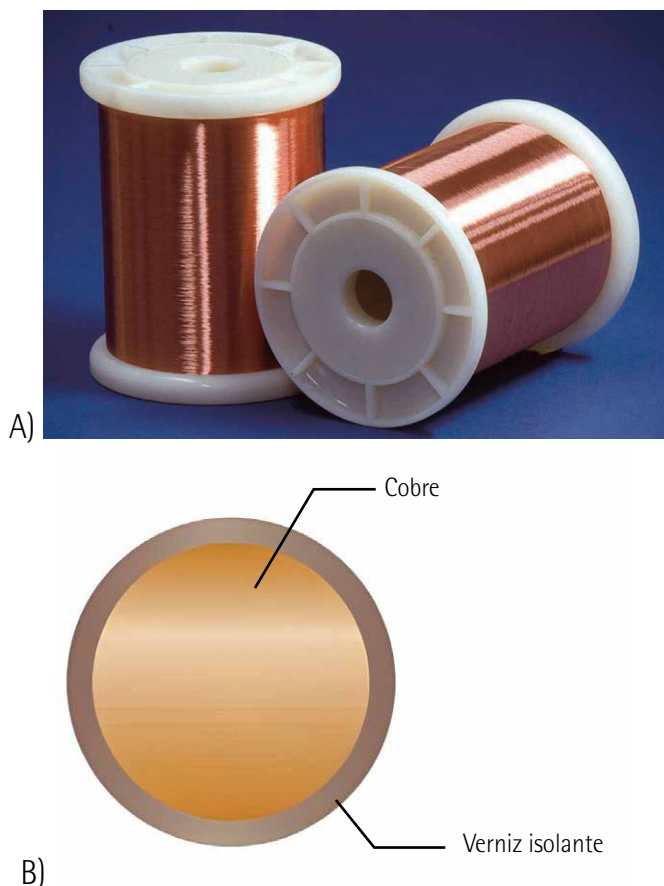


Figura 33 – A) Fio esmaltado utilizado em transformadores; B) A qualidade da cobertura de verniz é especialmente importante, visto que é apenas ele que isola o fio

Adaptada de: Furukawa (2021).

3.2.2 Autotransformadores

Os autotransformadores são uma classe de transformadores bastante utilizada principalmente por seu custo baixo, tamanho pequeno e facilidade de construção.

Eles são iguais aos transformadores convencionais, exceto por dispor de **apenas um enrolamento** e, pelos taps em sua extensão, por permitir abaixar ou elevar tensões pelo fenômeno de autoindutância – um processo simples que ocorre no próprio enrolamento, fazendo-o atuar como primário e secundário ao mesmo tempo (figura 34).

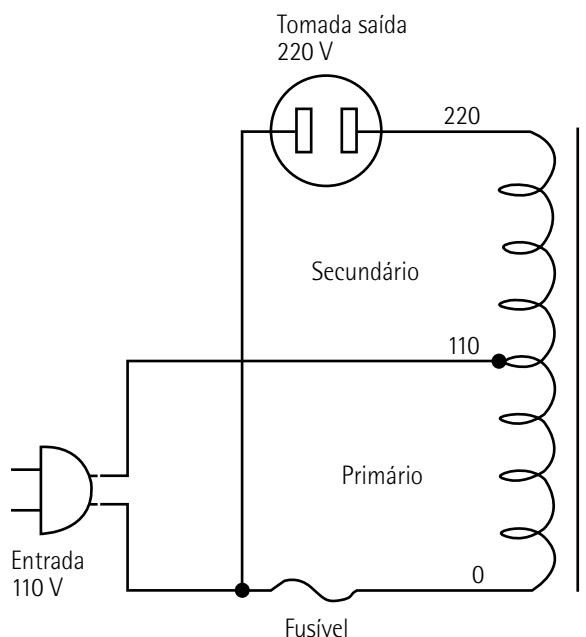


Figura 34 – Ligação em um autotransformador

Os autotransformadores são largamente empregados para simples conversão de tensões, como quando queremos ligar um aparelho 110 V em uma rede 220 V e vice-versa (como geladeiras, televisores, máquinas de lavar etc.). A maior parte desse tipo de transformador é comercializada para cumprir tal função (figura 35).



Figura 35 – Aspecto de um autotransformador para converter 110 V para 220 V e vice-versa, para uso doméstico

Adaptada de: <http://tinyurl.com/th8zm2cb>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Por dispor de apenas um enrolamento, os autotransformadores também não têm nenhum tipo de isolamento galvânica, de forma que usá-lo em aplicações direcionadas para a rede elétrica exige todas as precauções possíveis e necessárias para impedir choques elétricos, que podem ser fatais.

Esse tipo de precaução pode ser tomado com alguns cuidados, tais como:

- Isolar, no aparelho, quaisquer partes metálicas que possam estar ligadas ao potencial da rede elétrica.
- Evitar instalar ou manusear o aparelho sem calçados, ou com os pés e/ou chão molhados.
- Observar um aterramento adequado, tanto no aparelho alimentado pela rede elétrica quanto nas próprias ferragens do transformador, para minimizar o risco de choque.

De qualquer forma, o uso de autotransformadores em residências vem caindo em desuso nos últimos anos em razão da quantidade cada vez maior de aparelhos bivolt, com comutação de voltagem automática, o que dispensa o uso do adaptador; além de novas e mais exigentes normas técnicas, que desaconselham o uso de componentes desse tipo em aplicações que envolvam a rede elétrica.

Contudo, os autotransformadores têm usos bastante específicos (importantes e regulamentados conforme normas rígidas) em aplicações industriais, linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, sistemas de subestações para eletrificação de ferrovias, e também em circuitos de áudio, situação em que as tensões envolvidas são baixas e não oferecem riscos.

3.2.3 Autotransformadores variáveis (Variac)

Muito embora os autotransformadores não ofereçam as mesmas vantagens e segurança dos transformadores convencionais, com isolamento galvânica, eles apresentam algumas características que os tornam preferíveis em aplicações específicas, como para obter diversas tensões através do uso de múltiplos taps fixos no enrolamento, ou por meio de um sistema que permite a variação contínua entre os extremos do aparelho, permitindo que seja obtida qualquer relação de espiras.

Esses autotransformadores variáveis são chamados de Variac, que foi uma marca registrada da companhia General Radio norte-americana.

Eles são construídos enrolando as espiras de fio em torno de um núcleo de ferro de formato toroidal, sobre o qual desliza um cursor que faz as vezes de tap (figura 36). Assim, ao posicioná-lo em qualquer ponto entre os extremos do enrolamento, conseguimos variar suavemente a tensão de saída obtida – desde zero até o valor máximo disponível na entrada.

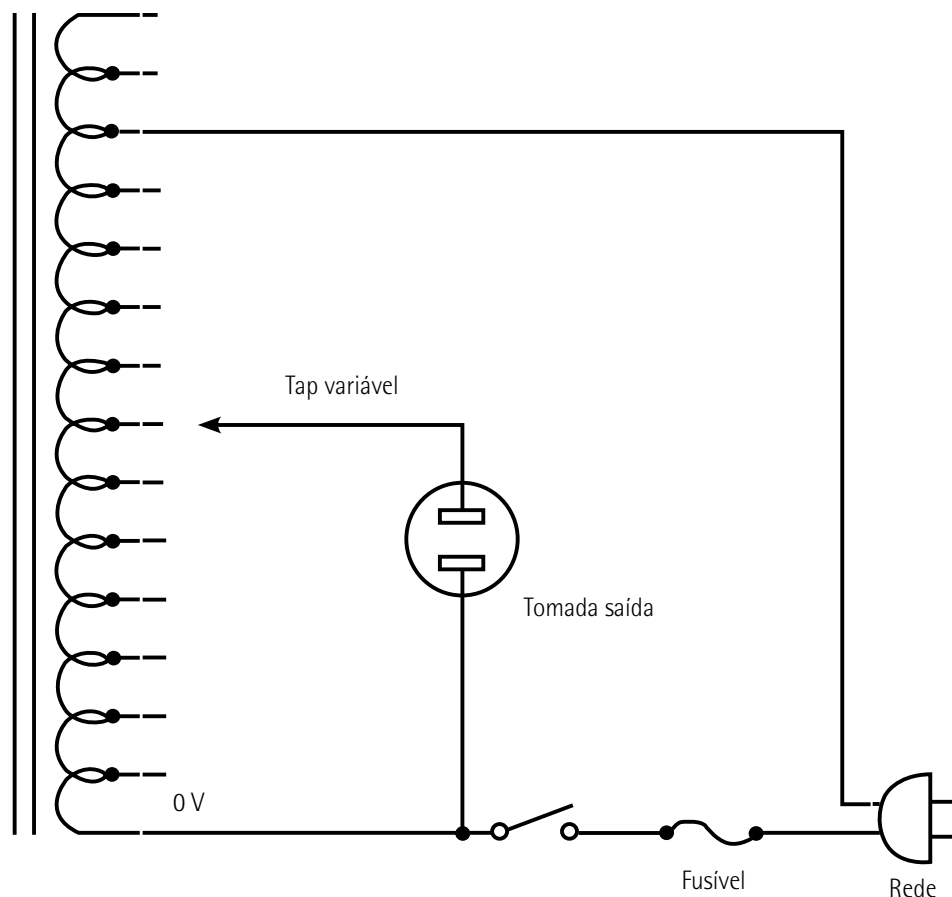


Figura 36 – Ligação de um transformador tipo Variac

Tais transformadores são importantes como instrumento para ensaios e testes com dispositivos elétricos e eletrônicos, e em laboratórios e oficinas especializadas, uma vez que tornam possível alimentar um aparelho diretamente da rede elétrica com uma tensão cujo valor pode ser ajustado à vontade.

Os Variacs podem ser classificados em duas categorias principais, a saber:

- Os de **ajuste manual**, em que a relação de transformação é ajustada diretamente através de um botão, que por sua vez movimenta os contatos que fazem contato com o enrolamento (figura 37).
- Os de **ajuste automático**, cujo eixo que movimenta os contatos é acionado por um motor, que por sua vez é controlado por um circuito eletrônico. Esse tipo de Variac é utilizado especialmente em aplicações industriais como dispositivo de controle destinado a manter uma tensão elétrica alternada sempre justa, evitando flutuações.



Figura 37 – Autotransformador tipo Variac de ajuste manual, visto de frente (esquerda) e com os contatos móveis à mostra

Fonte: RS Pro (2021).

Desses dois tipos, o mais empregado é o de ajuste manual por ser útil em oficinas e laboratórios de elétrica e eletrônica, além do preço mais acessível ao público em geral.

3.3 Identificação de transformadores desconhecidos

Muitas vezes, ao nos depararmos com transformadores de características desconhecidas retirados de aparelhos desmontados ou mesmo da sucata, não os aproveitamos justamente por não conhecermos suas características elétricas. No fim, os aparelhos se tornam meros "pesos de porta", fadados a serem desmontados para aproveitar as lâminas de ferro silício e o fio, ou mesmo destinados integralmente à lata de lixo.

Esta seção, portanto, destina-se a direcionar o estudante interessado em identificar características próprias dos transformadores, permitindo seu aproveitamento em montagens e projetos eletrônicos.

Vamos dividir este processo de identificação em uma sequência de três etapas, partindo das características mais óbvias do componente:

- reconhecimento visual das características externas do transformador;
- identificação dos enrolamentos primário e secundário;
- identificação da relação de espiras entre primário e secundário.

3.3.1 Reconhecimento das características externas do transformador

De início, todo o processo de identificação de qualquer peça ou componente – seja eletrônico ou não – deve partir de uma boa e detalhada inspeção visual. Alguns detalhes importantes para reparar são em relação ao tamanho do transformador, número de fios que apresenta e suas respectivas grossuras.

É comum que transformadores pequenos tenham fios mais finos, uma vez que trabalham com correntes mais baixas, enquanto transformadores maiores conterão fios de ligação mais grossos a fim de acomodar correntes maiores de operação. Embora o tamanho e a grossura do fio sejam bons indicativos da corrente máxima oferecida por um transformador, isso não é regra. É bom ter cautela em relação a estimativas, evitando correr o risco de danificar a peça por exceder o valor especificado no respectivo manual.

Também é importante atentar à quantidade de fios que um transformador tem. Via de regra deve-se considerar que o mínimo de fios que um único enrolamento pode ter é dois. Logo, um transformador com dois enrolamentos terá no mínimo quatro fios – isto se nenhum deles for dotado de um ou mais taps, o que aumentaria esse número na medida de um fio a mais para cada tap. Embora não seja possível estimar qual é a função de cada um dos fios por inspeção visual, é aconselhado reparar bem nesses detalhes, facilitando os passos posteriores.

Outro ponto importante é identificar para que tipo de circuito o transformador é destinado – se é para ser usado em uma fonte de alimentação, ligado à rede elétrica ou em circuitos de áudio. Para isso, basta olhar as extremidades do núcleo, formado pelas lâminas de ferrosilício:

- Se as lâminas estiverem trançadas, com as laminas do tipo E-I empilhadas, ora apontando para um lado, ora para o outro, trata-se de um componente para fontes de alimentação (figura 38);

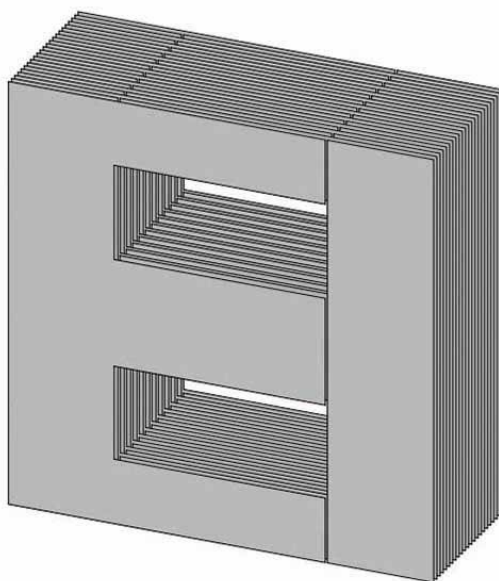


Figura 38 – Núcleo de um transformador para fonte de alimentação.
Observe a disposição das lâminas E – I, entrelaçadas

Disponível em: <http://tinyurl.com/bdd4v75m>. Acesso em: 3 jan. 2024.

- Se as lâminas estiverem todas orientadas em uma mesma direção, com todas as lâminas E e I empilhadas no mesmo sentido, trata-se de um transformador para áudio.

Essas disposições são adotadas porque a posição das lâminas e a forma como elas direcionam o campo magnético no núcleo produzem diferentes comportamentos do transformador em diversas

situações, tornando-o mais ou menos apto a trabalhar em determinadas faixas de frequência, como, por exemplo, em componentes destinados a circuitos de áudio (que devem operar desde algumas dezenas até vários milhares de hertz) ou naqueles destinados a fontes de alimentação (que sempre operam em uma frequência fixa, de 50 ou 60 hertz).

Nos transformadores para fontes de alimentação comuns, usualmente dotados de um primário e apenas um secundário de baixa tensão, a cor dos fios utilizados também segue um padrão de cores, o que facilita identificar quais pertencem ao primário, ao secundário e quais suas respectivas funções:

- O primário geralmente possui três fios de cores diferentes: preto, marrom e vermelho. Preto e vermelho são os extremos do enrolamento, enquanto o marrom é o tap. Para ligar o transformador a uma rede de 220 V, portanto, serão utilizados os fios correspondentes aos extremos (preto e vermelho), enquanto, para uma rede de 110 V, devem ser usados os fios preto e marrom ou marrom e vermelho, utilizando apenas metade do enrolamento.
- O secundário, por sua vez, pode dispor de dois fios de cor igual (caso não tenha um tap), ou três fios, dois de cor igual e um diferente – este último correspondente ao tap.

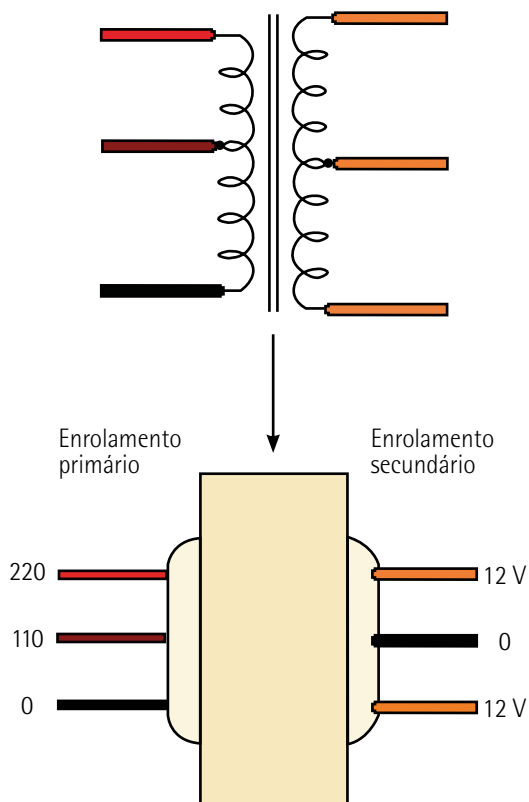


Figura 39 – Cores dos fios em um transformador

3.3.2 Identificação dos enrolamentos do transformador

Para identificar os enrolamentos do transformador, vamos precisar de um multímetro qualquer, analógico ou digital, com uma escala de medição de resistência elétrica e uma de tensões alternadas (ACV).

Este aparelho é um excelente aliado em grande parte dos serviços de reparação e identificação de componentes eletrônicos como leitor de valores de tensão, corrente e também de resistência elétrica, situação em que aplica ao componente uma pequena tensão elétrica, medindo, conforme o atravessa, sua corrente elétrica.



Figura 40 – Multímetro analógico e suas pontas de prova

Fonte: Sanwa (2015).

O multímetro deve ser colocado na escala de medição de Ohms $\times 1$ para então testar todos os fios do transformador com as suas duas pontas de prova. Quando o multímetro detectar que entre dois fios existe um enrolamento, ele acusará uma resistência elétrica, defletindo a agulha do medidor; se for um multímetro digital, um valor baixo deverá ser lido na tela. De acordo com o valor apresentado pelo multímetro, é possível identificar qual enrolamento estamos testando.

Se a leitura indicar qualquer valor entre 100 e 1.000 Ω , e o transformador for moderno, destinado a equipamentos com transistores e circuitos integrados, ele não possuirá enrolamento de alta tensão – o que será assegurado ao encontrar seu dispositivo primário.

Observe que, se o primário for para 110 e 220 V, ele deverá dispor de uma tomada tap, que indicará um valor de resistência mais baixo ao ser feita a medição entre ela e qualquer um dos outros extremos (figura 41).

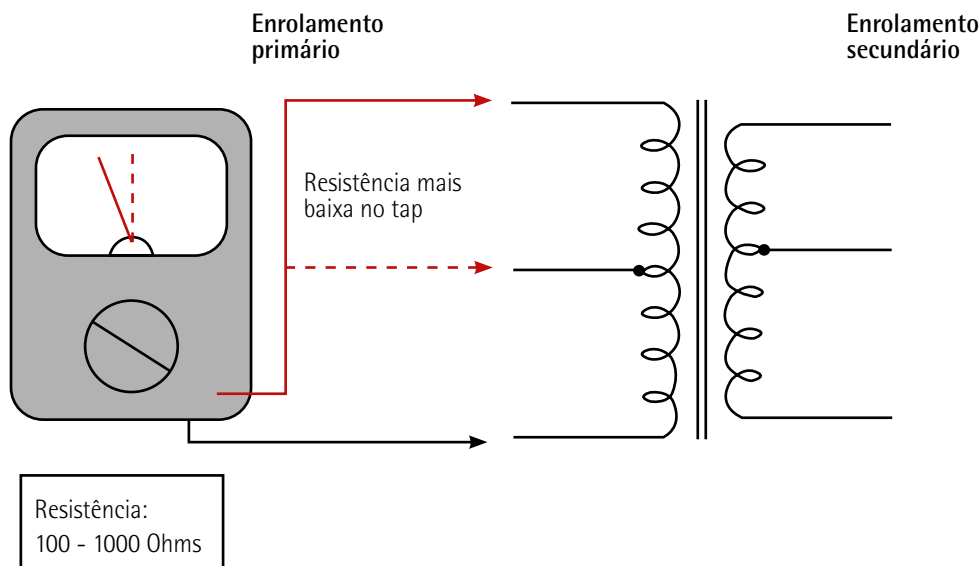


Figura 41 – Medição do primário do transformador com o multímetro.
Observe que uma resistência mais baixa será medida no tap

Quanto aos enrolamentos secundários, eles normalmente apresentarão resistências bem baixas (na casa de alguns Ohms, apenas). As mesmas regras para identificar o primário aqui se aplicam: ao medir os extremos do enrolamento, será obtida uma resistência mais alta; a medir o tap, por outro lado, para qualquer um dos extremos a resistência será menor (normalmente 50% do que é obtido medindo o enrolamento inteiro).

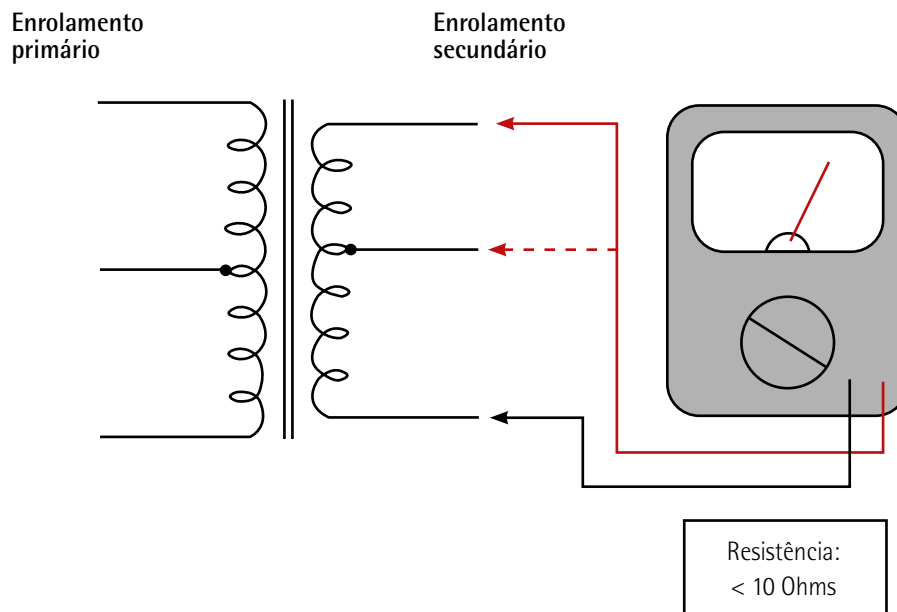


Figura 42 – Medição do secundário do transformador com o multímetro

Caso o transformador seja proveniente de algum aparelho antigo à válvula, o enrolamento com maior resistência será o secundário de alta tensão, medindo em torno de 800 a 900 Ω , enquanto o primário terá uma resistência mais baixa, em torno de 400 ou 500 Ω (figura 43).

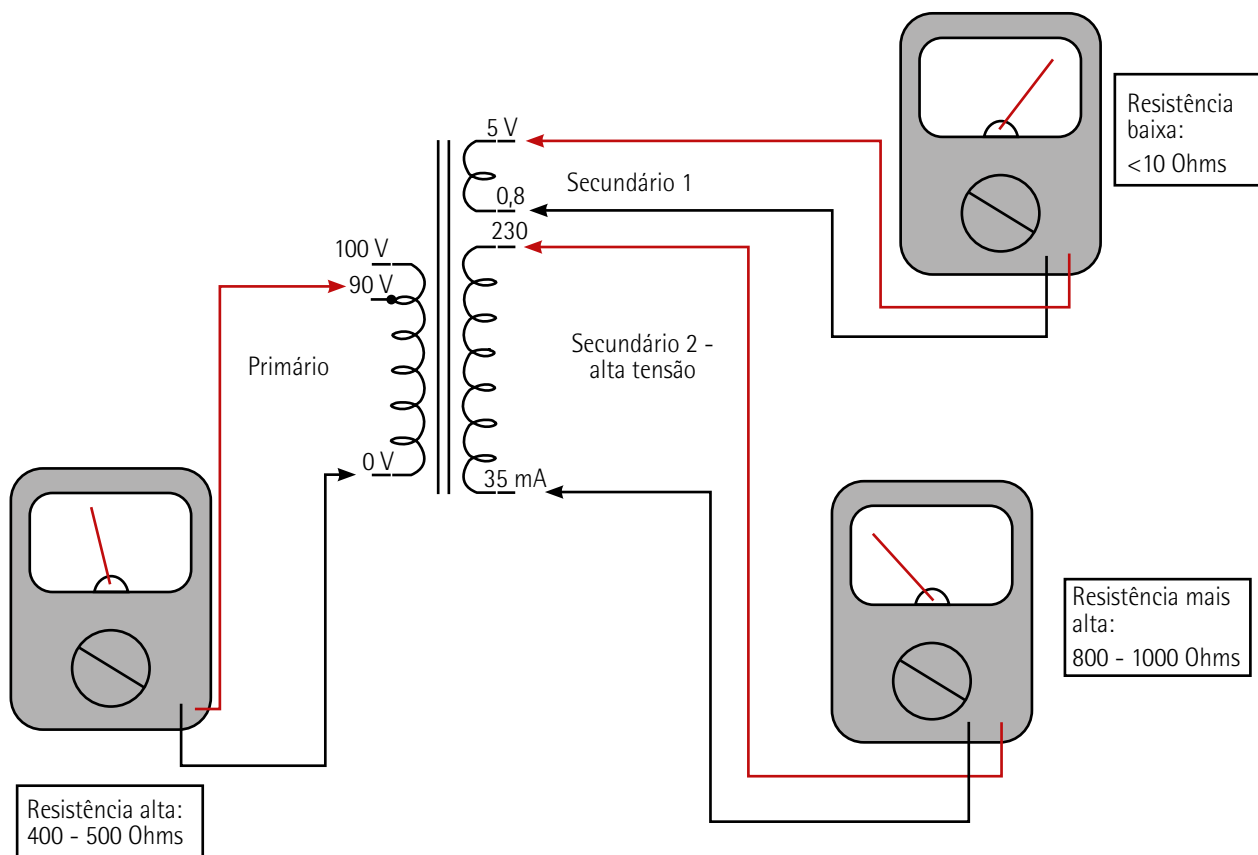


Figura 43 – Medição de um transformador com enrolamento de alta tensão

Estes transformadores já não são mais profusamente utilizados, e a maioria dos fabricantes não os produz em série há muitos anos. Os que restaram são destinados a aplicações específicas, usados em circuitos de áudio de alta-fidelidade, para instrumentos musicais, e em transmissores de rádio. São componentes mais volumosos, grandes e pesados, com muitos fios de ligação, conforme vemos a seguir (figura 44).



Figura 44 – Transformador de força para equipamentos valvulados (acima) e transformador para equipamentos transistorizados (abaixo). Observe que o tamanho deste último é muito menor, assim como a quantidade de fios de ligação

3.3.3 Identificação da relação entre espiras do transformador

Uma vez identificados os enrolamentos primários e secundários do transformador, resta saber quais tensões ele fornece, para que ele seja devidamente encaminhado a uma montagem ou etiquetado com as informações pertinentes para ser guardado na caixa de sucatas, à espera de uma aplicação.

Assim, não raramente o entusiasta opta pelo caminho mais óbvio e simplesmente liga o primário do transformador à rede elétrica, medindo a tensão no seu secundário com o multímetro em escala de volts AC (corrente alternada). Essa solução até funciona, mas é desaconselhada, dado que:

- caso o transformador não seja de força, o primário pode não ser adequado para ser ligado à rede elétrica;
- o primário ou o secundário podem estar em curto;
- qualquer ligação direta à rede elétrica oferece riscos, como choques, e deve ser feita apenas quando temos certeza de que o procedimento funcionará corretamente.

Nesses casos, para além dos óbvios danos ao componente em teste, também podem ocorrer estouros, faíscas elétricas, fumaça, queima de fusíveis ou disjuntores, entre outros muitos problemas que podem ser evitados se o teste for feito com parcimônia. Para isso, recomenda-se o uso de uma lâmpada em série em um conjunto conforme o exemplificado na figura 45.

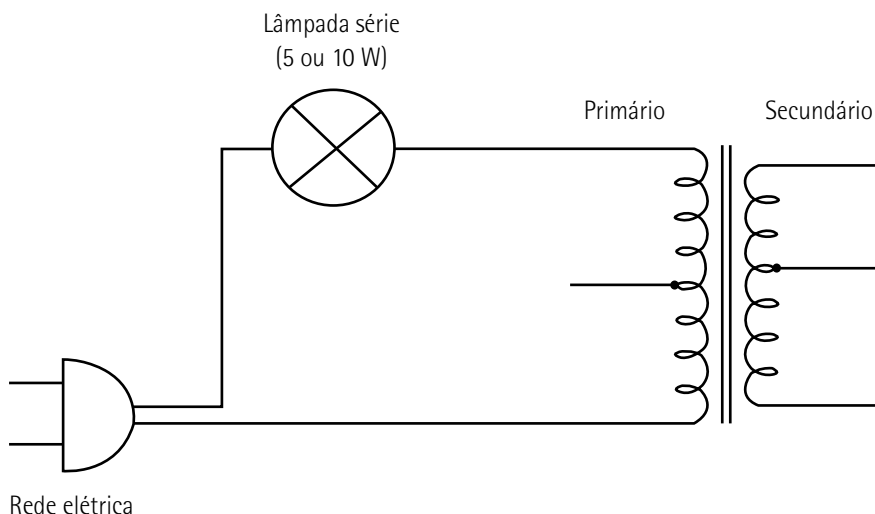


Figura 45 – Uso da lâmpada em série para o teste de um transformador desconhecido

Quando ligada em série com o primário do transformador, a lâmpada em série atuará como proteção: acenderá caso o componente esteja em curto, ou, em caso de confusão, ligarmos o secundário em vez do primário.

Com ela, o transformador permanecerá intacto caso algum erro seja cometido – mesmo que não fiquemos inteiramente isentos de choques ao manusearmos as conexões energizadas, motivo pelo qual o entusiasta deve ter cuidado, sobretudo ao tocar as diversas partes do circuito, atentando para que ele esteja totalmente desligado da rede elétrica.

Recomenda-se ter à mão várias lâmpadas de diversas potências para realizar esses testes, desde 15 W até 60 ou 100 W, mas lembrando que seu valor não é crítico. Elas podem ser do tipo incandescente (de filamento) ou suas equivalentes mais modernas, denominadas halógenas. Nesse caso, não servem as de tipo fluorescente ou LED.

Para um primeiro teste, conecta-se os extremos do enrolamento identificado como primário ao circuito com a lâmpada. Observe que a tensão da rede elétrica é importante, sendo recomendado fazer esse teste com 110 V usando também uma lâmpada série de mesma tensão de operação, por razões de segurança. Se tudo estiver correto, a lâmpada deverá permanecer apagada, ou apresentar leve iridescência em seu filamento, indicando que o consumo da corrente está dentro dos limites esperados e não há curto-circuito.

Ao se aproximar um ímã qualquer da ferragem do transformador, será possível sentir na ponta dos dedos a vibração dos 60 Hz da rede, provocada pelo campo magnético residual que dele escapa.

Esse expediente (figura 46) é muito útil em situações em que é preciso escolher a melhor posição para um transformador em algum projeto em desenvolvimento, minimizando a ação do campo magnético residual sobre outros componentes sensíveis, afastando-o a uma distância suficiente para que o campo não afete peças próximas.

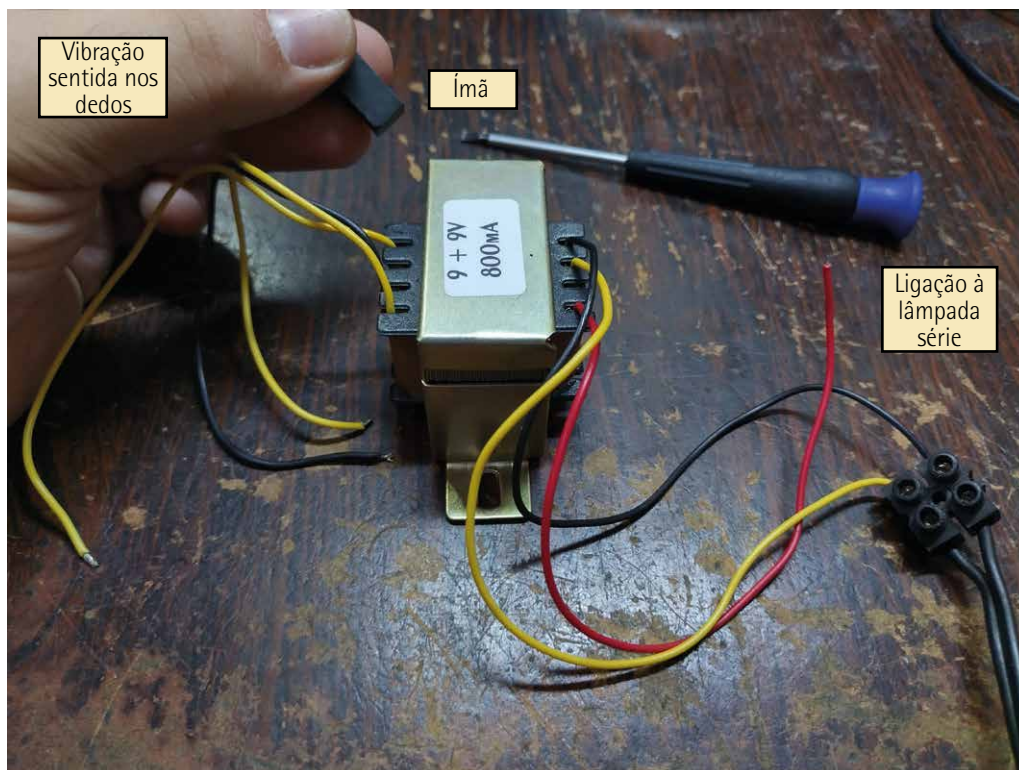


Figura 46 – Verificação do campo magnético residual de um transformador utilizando um ímã

A seguir, usando o multímetro na escala de volts AC, próprio para tensões alternadas, será medida a tensão sobre o enrolamento primário, que está ligado à rede através da lâmpada série. O valor de tensão medido deverá ser bem próximo do oferecido pela rede elétrica, confirmando que o enrolamento primário está bom e foi corretamente conectado. Um multímetro analógico funciona perfeitamente para esse tipo de leitura, mas, no exemplo da figura 47, foi adotada a representação de um instrumento digital para a demonstração direta dos valores apresentados.

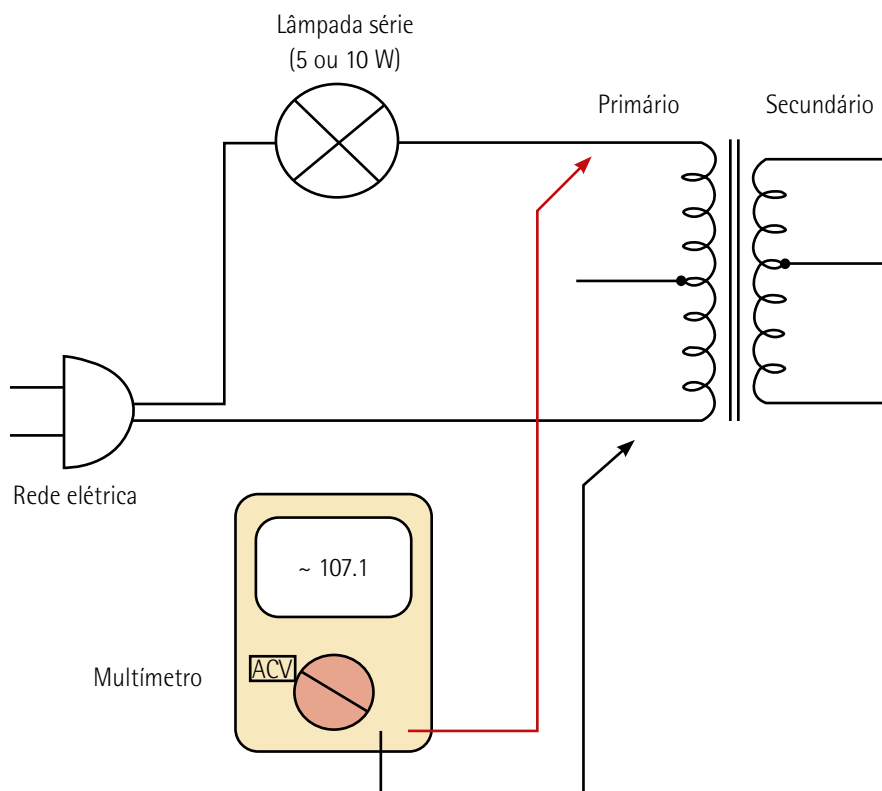


Figura 47 – Teste do primário do transformador com um multímetro digital

No exemplo, a tensão medida sobre o primário foi de aproximadamente 107 volts, valor bem próximo dos 110 V provenientes da rede elétrica. Esse é um bom indicativo por evidenciar que a maior queda de tensão está sobre o enrolamento, e não sobre a lâmpada. Em uma situação oposta a essa, com a maior queda da tensão sobre a lâmpada, ela estaria significativamente acesa, indicando curto ou ligação errada no transformador.

Em seguida, deve-se anotar a tensão lida em um papel e seguir para o teste do secundário. Não é necessário alterar qualquer ligação no circuito, e a lâmpada série deve ser mantida; basta mover as pontas de prova do multímetro para os fios provenientes do secundário, conforme a figura 48.

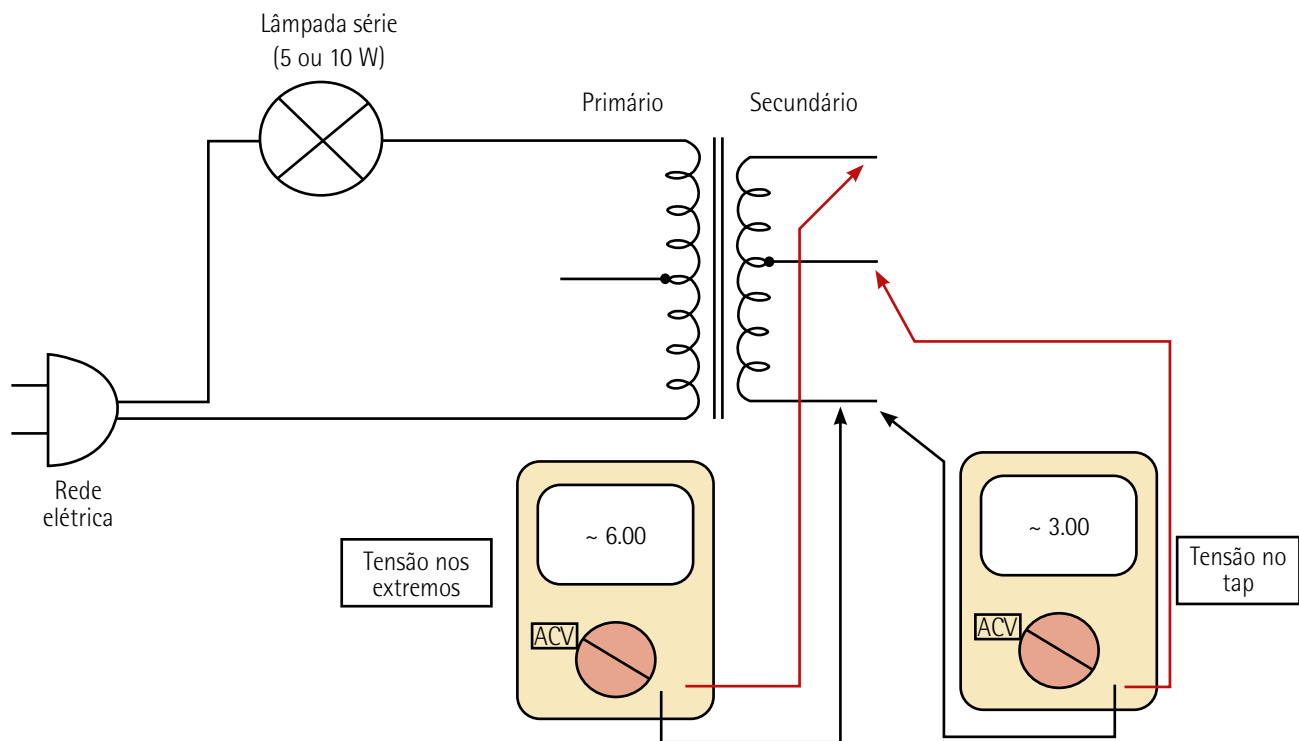


Figura 48 – Medições de tensão no secundário do transformador

Observe que as tensões medidas no secundário devem ser bem mais baixas se comparadas aos valores do primário, evidenciando a redução da tensão proporcionada pelo transformador. Ao ligar as pontas de prova nos extremos do transformador, deve-se obter uma tensão mais alta – no exemplo, de aproximadamente 6 volts – se comparada com a medida no tap, que deverá ser menor – no exemplo, de aproximadamente 3 volts.

As tensões também devem ser anotadas, e então já é possível calcular a relação entre espiras por meio da seguinte fórmula:

$$Rel_{\text{espiras}} = \frac{V_{\text{primário}}}{V_{\text{secundário}}}$$

Em que o valor da relação de espiras entre primário e secundário será igual à tensão medida sobre o primário, em volts, dividida pela tensão medida sobre os extremos do secundário, também em volts. Aplicando os valores obtidos à fórmula, teremos:

$$Rel_{\text{espiras}} = \frac{107,1}{6} = 17,85$$

Esse valor pode ser arredondado para 18, concluindo que a relação será de 18 espiras no primário para cada uma das espiras no secundário, perfazendo um valor final de aproximadamente **18:1**. Assim,

pode-se dizer que, para qualquer tensão aplicada ao primário do transformador, a tensão obtida no secundário será aproximadamente **dezoito vezes menor**.

Se até aqui o transformador seguiu ligado em série com a lâmpada, agora ele já pode ser desligado. Ao colocar a mão sobre ele, a temperatura deverá ser sentida como praticamente igual à do ambiente ou no máximo alguns graus acima (dado que a passagem de corrente pelo primário deverá fazê-lo aquecer um pouco). Qualquer aquecimento que seja detectado pelo tato, provocando incômodo ao tocar a ferragem ou acompanhado de qualquer cheiro, indica que o transformador tem algum curto parcial em seu interior e não está adequado para uso, devendo ser descartado.

3.4 Circuitos com indutores: os filtros

Nas mais diversas aplicações elétricas e eletrônicas que apresentam sinais – sejam de áudio, de radiofrequência ou qualquer outro –, os **filtros** cumprem um importante papel na seleção e limpeza de informações excedentes, e fazem isso por meio da filtragem seletiva de determinadas frequências. Esses filtros são de grande serventia na hora de eliminar interferências indesejadas em sinais destinados a alimentar dispositivos de hardware e em conversores analógico-digitais, como em sistemas de aquisição de dados e similares, por exemplo.

Filtros podem ser construídos usando componentes bastante comuns, como capacitores e indutores, separados ou combinados em arranjos específicos, possibilitando as mais diversas características e performances. Circuitos que combinam os dois primeiros componentes citados são chamados de **filtros indutor/capacitor**, ou apenas **LC**.

3.4.1 Filtros com indutores e capacitores

Para abordarmos de forma detalhada o funcionamento desses circuitos, vamos primeiro enumerar as características dos indutores e dos capacitores ao serem submetidos a diversos tipos de sinais, e como eles se portam quando combinados entre si em um filtro, eliminando ou permitindo a passagem de determinadas faixas de frequências.

Para além de bloquearem a corrente contínua – deixando passar ao mesmo tempo a corrente alternada –, os capacitores têm mais facilidade para deixar passar sinais alternados de frequências mais altas (acima de alguns milhares de ciclos por segundo, ou quilohertz), ao mesmo tempo que bloqueiam os sinais de frequências mais baixas.

Usemos de exemplo um filtro muito rudimentar que faz uso de apenas um capacitor de uso comum em caixas acústicas com dois alto-falantes: um para os graves (também chamado de *woofer*) e um para os agudos (também denominado *tweeter*), conforme a figura 49. Embora essa aplicação possa parecer pouco relacionada com a área da computação, os princípios aplicados são os mesmos, valendo para filtros destinados a qualquer função em diversos dispositivos de hardware e servindo de analogia para compreender melhor seu funcionamento.

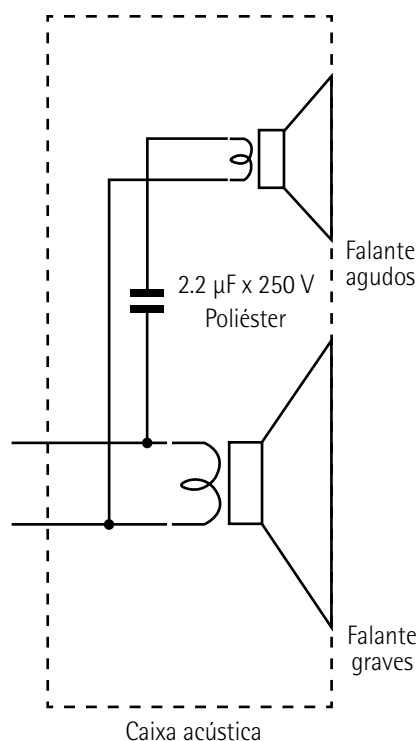


Figura 49 – Esquema de uma caixa acústica, com filtro construído apenas com um capacitor, de forma a permitir apenas a passagem de frequências altas (agudos) para o *tweeter*

Observe que o capacitor, do tipo poliéster e com valor de 2,2 µF, elimina do sinal de áudio todas as frequências que estejam abaixo de um determinado patamar, permitindo que apenas os sons de frequência mais alta (e consequentemente mais agudos) cheguem ao *tweeter*, que os reproduz com mais clareza – coisa que o *woofer* não consegue fazer.

Um detalhe curioso é que, muito embora o *tweeter* receba apenas os sons agudos já filtrados pelo capacitor, o woofer recebe um sinal tanto com graves quanto com agudos. Mas por que o sinal que vai para o alto-falante responsável pelos graves também não é filtrado para eliminar os agudos?

A resposta é simples: como os *woofers* têm eficácia muito baixa (na verdade, quase nula) para reproduzir os sons de frequências altas, não é necessário filtrá-los, já que eles não atrapalharão a reprodução dos sons graves.

De forma análoga ao que acontece com os capacitores em relação aos sinais, os indutores atuam de forma semelhante, mas fazendo o caminho inverso: ao mesmo tempo que permitem livremente a passagem de correntes contínuas, eles resistem à passagem das correntes alternadas, notadamente opondo-se aos sinais das frequências mais altas, enquanto permitem a passagem quase livre das mais baixas.

Ou seja, os capacitores e os indutores são componentes com propriedades elétricas completamente distintas e opostas, mas que permitem diversas combinações que proporcionam funções úteis no campo da eletrônica, como a eliminação de ruídos indesejados em sinais de áudio, telefonia, rádio e gravações. Eles também identificam e realçam os sinais fracos em instrumentos de testes e em telecomunicações.

A seguir, abordaremos alguns dos principais filtros que combinam indutores e capacitores, explicaremos sua função e seu comportamento, e mostraremos algumas de suas aplicações práticas.

Filtro passa-baixo (*Low-pass filter* – LPF)

Os filtros do tipo passa-baixo são circuitos que permitem a passagem livre de correntes contínuas e de sinais de frequências baixas, eliminando ao mesmo tempo todos os sinais de alta frequência que estejam acima de um dado limite determinado pelos valores do indutor (L) e do capacitor (C), como ilustra a figura 50.

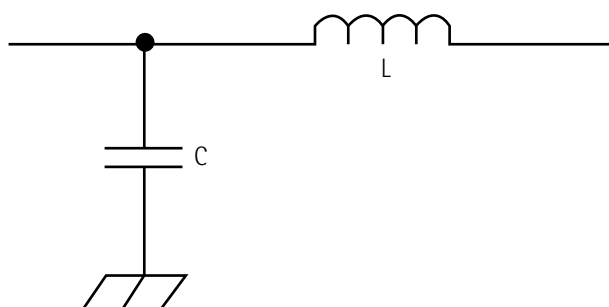


Figura 50 – Circuito de um filtro passa-baixos

Neste circuito, o sinal ainda não filtrado entra no ponto de junção entre o indutor e o capacitor, saindo já filtrado no outro extremo do indutor. Note que, enquanto o capacitor fica com um de seus terminais ligados à terra, desviando para o negativo do circuito boa parte dos sinais de alta frequência, o indutor atuará bloqueando quaisquer resíduos desses sinais.

Esses circuitos figuram entre os tipos de filtros mais usados, especialmente em aplicações de redução de ruídos e em circuitos de áudio – sobretudo em caixas acústicas –, melhorando significativamente arranjos como o apresentado na figura 52 por impedir a passagem de quaisquer sons agudos para o falante de graves (*woofer*). Sua curva de resposta é ilustrada na figura 51.

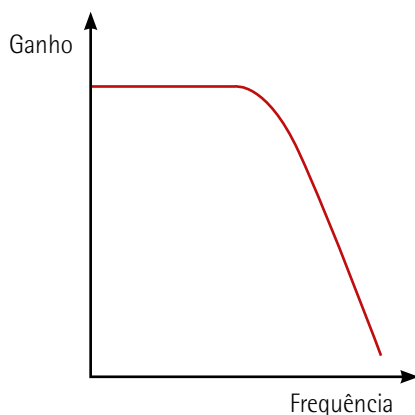


Figura 51 – Curva de resposta de um filtro passa-baixos (LPF)

Observe que, de acordo com o gráfico da curva de resposta, o filtro passa-baixo permitirá a passagem total do sinal até uma determinada frequência, momento em que sua intensidade (ou ganho) começará a diminuir progressivamente, conforme a frequência aumenta.

Várias combinações de indutores e capacitores podem ser ajustadas no circuito, alterando suas características de resposta; deslocando o início do ponto de corte para frequências mais altas ou mais baixas; e alterando o ângulo da linha vermelha do gráfico, tornando a ação do filtro mais seletiva (curva mais vertical) ou menos seletiva (curva mais horizontal).

Filtro passa-alto (*High-pass filter* – HPF)

Os filtros do tipo passa-alto são circuitos com características bem diferentes dos filtros passa-baixo que acabamos de apresentar.

Estes circuitos eliminam totalmente correntes contínuas e todas as frequências baixas que estejam abaixo de um determinado patamar, ao mesmo tempo que permitem a passagem livre de todas as frequências altas que estejam acima dele. O nível do patamar é determinado pelos valores do indutor (L) e do capacitor (C), conforme a figura 52.

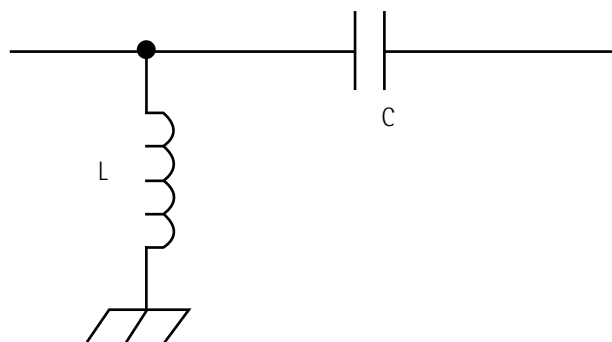


Figura 52 – Circuito de um filtro passa-altos

Nesse arranjo circuitual, o sinal não filtrado é alimentado no ponto médio entre o indutor e o capacitor, enquanto o sinal já filtrado é disponibilizado no outro extremo deste último. Assim, já que o indutor fica ligado à terra por um de seus terminais, ele irá agir como curto-circuito para qualquer tensão contínua que surja na entrada, ao mesmo tempo que desvia para o negativo toda frequência baixa. O capacitor em série com o sinal termina de eliminar qualquer resquício de corrente contínua e qualquer sinal de frequência baixa que possa remanesecer.

Tais circuitos são usados para filtrar ruídos de baixa frequência – normalmente denominados *rumble* –, que estão muito presentes em sinais de áudio provenientes de toca-discos de vinil mais antigos: por estarem com motores alimentados diretamente pela corrente alternada da rede elétrica, eles produzem vibrações físicas difíceis de eliminar, e que são facilmente captadas pela agulha fonocaptora.

Conforme demonstra o gráfico da figura 53, o filtro passa-alto eliminará todos os sinais abaixo de uma determinada frequência, dando passagem livre aos outros sinais que estejam acima desse patamar.

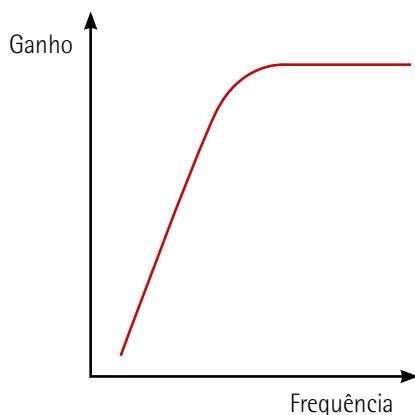


Figura 53 – Curva de resposta de um filtro passa-altos

Filtros passa-banda (*band-pass filter* – BPF)

Enquanto os filtros do tipo passa-baixo e passa-alto eliminam frequências abaixo ou acima de um determinado patamar, os filtros do tipo passa-banda apresentam características diferentes, permitindo a passagem somente de frequências dentro de uma determinada faixa enquanto eliminam todas as outras e bloqueiam qualquer corrente contínua que esteja em sua entrada.

Via de regra, esses filtros utilizam mais de um indutor e também mais de um capacitor em seu arranjo, como ilustra a figura 54.

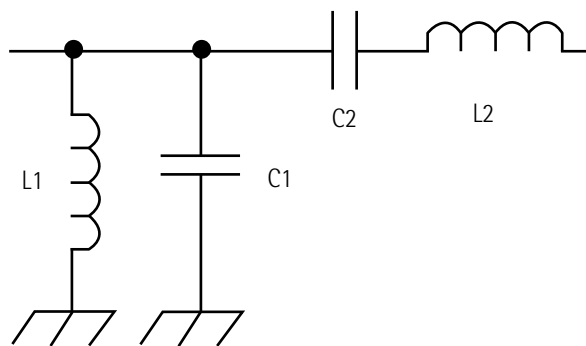


Figura 54 – Circuito de um filtro passa-banda

Nesse tipo de filtro é comum a existência de dois indutores e dois capacitores ligados em uma configuração série/paralelo. O sinal é alimentado na junção entre o indutor L1 e os capacitores C1 e C2, e sai filtrado no terminal oposto do indutor L2. Logo na entrada do circuito, o indutor L1 está ligado à terra por um de seus terminais; portanto, qualquer corrente contínua permanece, e parte dos sinais de baixa frequência é desviada para o negativo. Enquanto isso, o capacitor C1 corta parte dos sinais de alta frequência, desviando-os também para a terra.

Ao mesmo tempo, o capacitor C2 atua eliminando qualquer resquício de corrente contínua, e filtra as frequências baixas restantes. Por sua vez, o indutor L2 atua filtrando quaisquer frequências altas indesejadas que estejam presentes.

A resposta desse filtro pode ser conferida na figura 55. Observe que no tipo de filtro passa-banda, mais do que nos exemplos anteriores, os valores dos resistores e capacitores têm um papel bem crítico no formato da curva do gráfico: eles podem ampliar a parábola, deslocando-a para cima (permite a passagem de uma faixa de frequências mais alta) ou achatá-la, deslocando-a para baixo (permite uma faixa de frequências mais baixa), e também gerar um formato mais aberto (filtro com menos seletividade) ou mais fechado (filtro com mais seletividade).

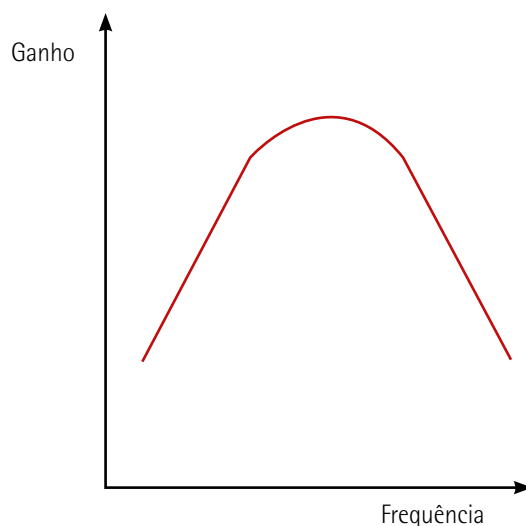


Figura 55 – Curva de respostas de um filtro passa-banda

Os filtros do tipo passa-banda são muito utilizados em circuitos de radiofrequência (qualquer rádio comum dispõe de um circuito do tipo), especialmente na etapa de sintonizar, em que o ajuste da frequência da emissora de rádio é feito. Outras aplicações são em áudio, na construção de filtros seletivos, de tonalidade (que veremos a seguir), bem como em projetos de caixas acústicas de alta performance, com três ou mais alto-falantes, destinados a graves, médios e agudos.

Outros tipos de filtros

Muito embora os indutores e os capacitores por si só já eliminem frequências e ruídos indesejados, a combinação desses componentes em circuitos com arranjos mais elaborados constitui filtros com elevado grau de eficiência e eficácia.

Indutores conectados em série com um sinal conseguem bloquear sinais de alta frequência, e capacitores conectados em série com o mesmo sinal também conseguem fazê-lo de forma muito semelhante, desviando-o para o negativo. Desta forma, combinando essas propriedades, alguns filtros com performances bastante interessantes podem ser facilmente construídos.

O primeiro desses filtros, o **filtro tipo L**, nada mais é do que um filtro passa-baixo com algumas características diferentes. Na figura 56, note que o indutor encontra-se antes do capacitor, e não depois, como em um LPF convencional.

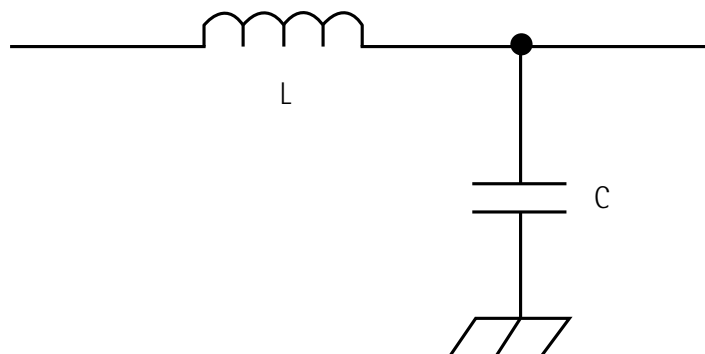


Figura 56 – Filtro tipo L

Esse arranjo circuitual diferente de um LPF convencional permite uma impedância menor de entrada – isto é, uma vez que o indutor dá passagem direta à corrente contínua e de baixas frequências, esse filtro será interpretado pelo circuito imediatamente anterior a ele como um dispositivo de baixa resistência, ou seja, como um resistor de baixo valor. Em compensação, como o capacitor está em paralelo com a saída do filtro, ele será interpretado pelo circuito adiante como um resistor de valor bem mais alto.

A seguir, um dos filtros mais interessantes (e também muito utilizado) é o **filtro tipo pi**. Ele é um filtro que também se comporta como um passa-baixo, com alta impedância tanto na entrada quanto na saída. O desenho de seu circuito permite a analogia com a letra grega de mesmo nome, o π .

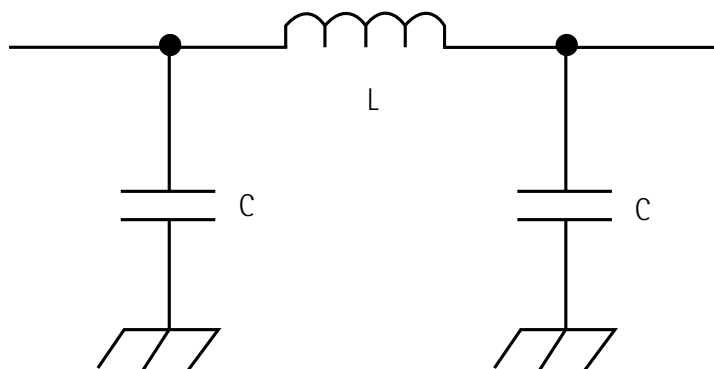


Figura 57 – Filtro do tipo pi

Estes filtros são muito utilizados em fontes de alimentação para eliminar qualquer resíduo de ondulação de 60 Hz que tenha escapado à filtragem convencional (ver figura 57). Além disso, são usados em equipamentos transmissores de radiofrequência, eliminando da transmissão os harmônicos indesejados que podem perturbar frequências vizinhas, bem como outras transmissões que possam ocorrer próximas.

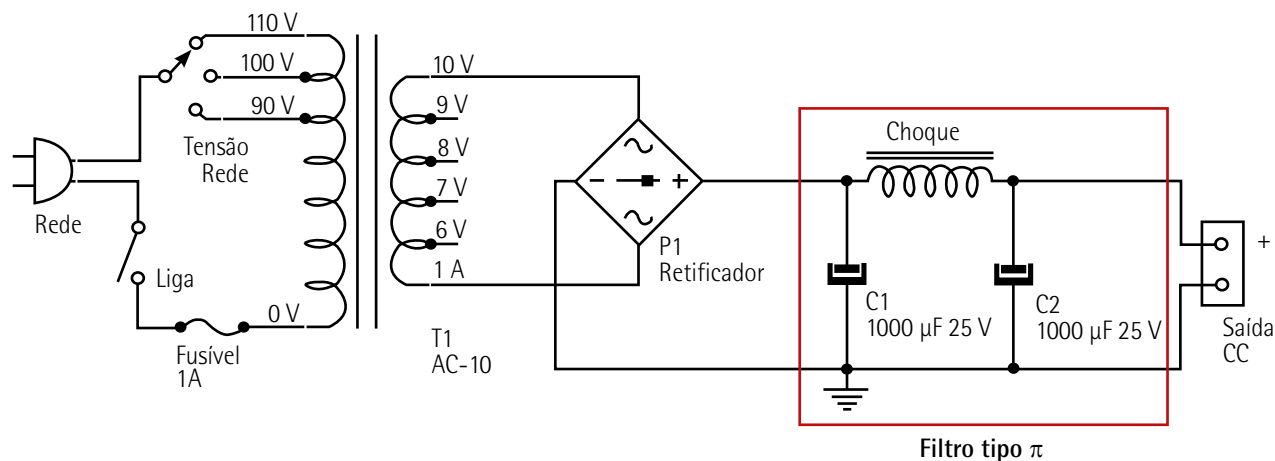


Figura 58 – Filtro tipo pi, em um circuito de fonte de alimentação. O indutor deve ser de valor alto e núcleo de ferro, bem como os capacitores devem ser eletrolíticos de valor também alto

O último dos filtros dos quais iremos falar é o **filtro tipo T**. Por dispor de dois indutores ligados em série, com um capacitor no meio, apresenta características de impedância baixa tanto em sua entrada como em sua saída, atuando de forma análoga a um LPF. Sua constituição, com o capacitor no meio ligado a terra, remete ao formato da letra T (ver figura 59).

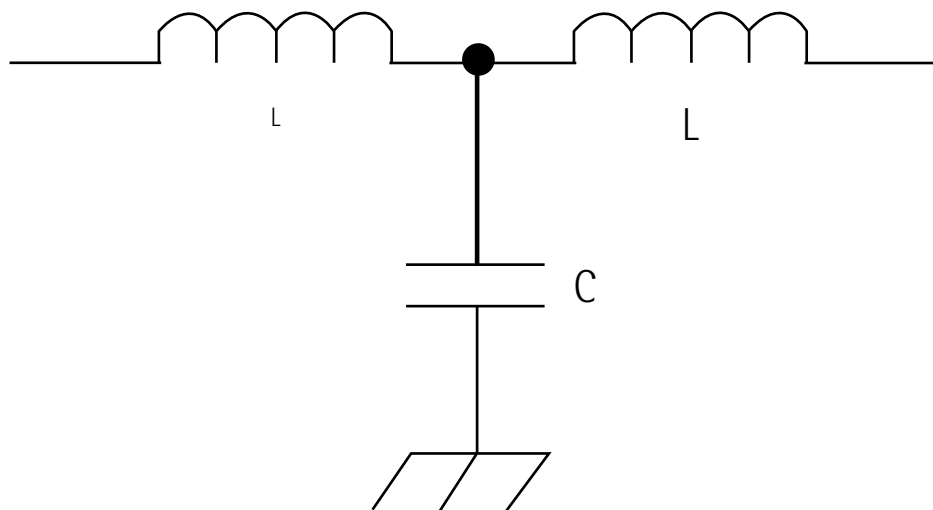


Figura 59 – Filtro tipo T

O filtro tipo T funciona de maneira muito similar ao filtro tipo pi. Com algumas modificações, ele se torna um filtro capaz de eliminar determinadas frequências de forma bem seletiva, passando a chamar-se **filtro trap** (do inglês *trap*, armadilha) ou simplesmente **notch filter**. Falaremos especificamente deste último no próximo tópico.

3.4.2 O filtro como controle de tonalidade

Uma série de aplicações muito atribuídas aos filtros é em circuitos de controle de tonalidade nos equipamentos de áudio dos mais diversos tipos, que volta e meia empregam indutores como forma de atenuar sinais de áudio de determinadas frequências. Eles proporcionam uma experiência mais agradável aos ouvintes e efeitos diferentes a instrumentos musicais, como guitarras elétricas, a princípio muito apreciadas pelos fãs de rock, mas praticamente onipresentes hoje em dia em todos os gêneros musicais.

Muitos são os circuitos de tonalidade. Neste livro-texto, mostraremos alguns dos principais, começando pelo **circuito Baxandall** (apresentado na figura 60).

O circuito em questão, proposto por P. J. Baxandall em 1952, permite o controle independente de graves e agudos em um sinal de áudio, e é estruturado em torno de um conjunto de resistores e capacitores, dispensando o uso de indutores (Baxandall, 1952). O circuito foi originalmente pensado para ser empregado com válvulas termiônicas tipo tríodo, muito embora tenha sido posteriormente reelaborado com o uso de transistores e amplificadores operacionais; inclusive, existem circuitos integrados que implementam todas as funções desse tipo em sua totalidade há vários anos no mercado – como o LM1306, produzido pela National Instruments.

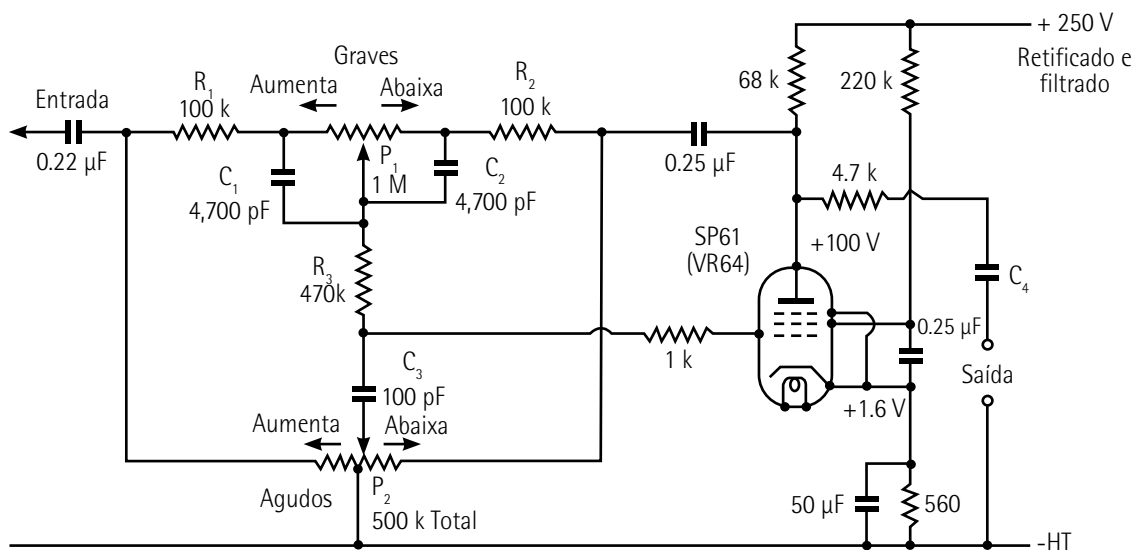


Figura 60 – Controle de tom tipo Baxandall

Adaptada de: Baxandall (1952).

As curvas do filtro Baxandall podem ser conferidas no gráfico da figura 61 a seguir; nela, os sinais correspondentes aos graves e aos agudos são tanto atenuados quanto reforçados pelos potenciômetros P1 e P2, o que proporciona uma ampla faixa de adequação do programa de áudio ao gosto do ouvinte.

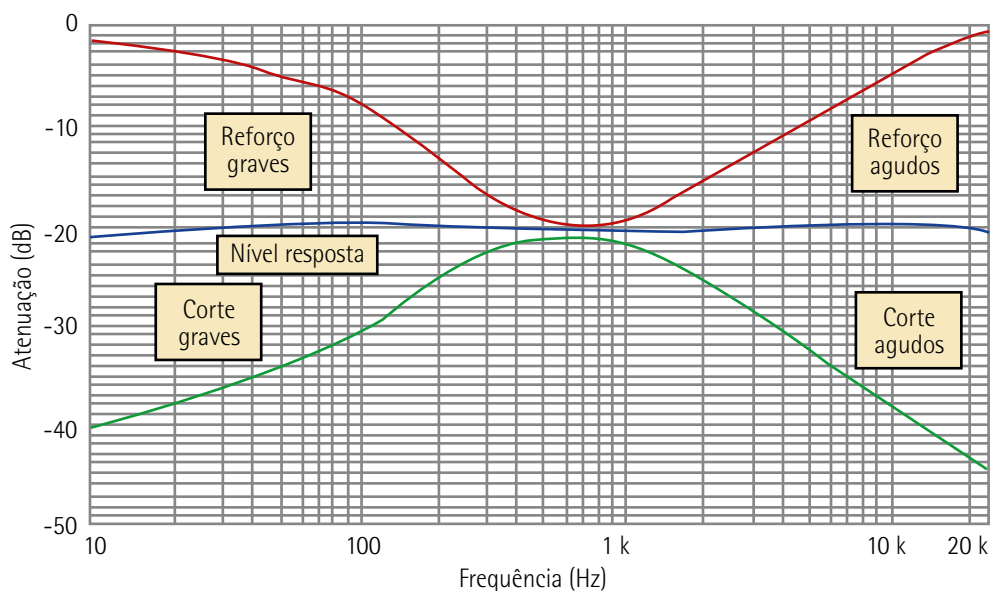


Figura 61 – Curva de resposta de um filtro tipo Baxandall

Adaptada de: Coates (2020).

Outro tipo de filtro bastante utilizado em aplicações específicas no ramo do áudio é o **filtro notch**, que pode ser implementado com ou sem o uso de um indutor.

Esse filtro é capaz de atenuar todo um conjunto de frequências, enquanto permite a passagem inalterada das demais. Ele também é conhecido como **filtro rejeitor** ou simplesmente **trap**, portando-se essencialmente como um filtro passa-banda de ação invertida (conforme gráfico da figura 62).

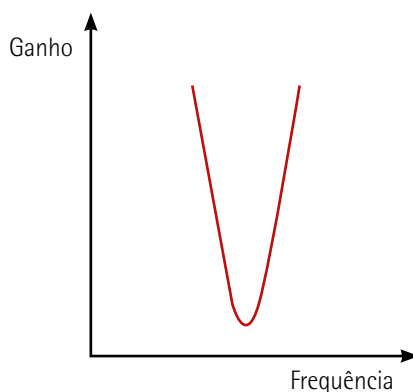


Figura 62 – Ação de um filtro tipo notch

O circuito correspondente a esse filtro consta na figura 63; no exemplo, ele está integrado a um circuito transistorizado, que torna a sua curva de resposta mais fechada e deixa a parábola em um formato mais próximo de um V do que de U – ou seja, o filtro fica mais seletivo. O filtro é estruturado em torno do indutor L1, de 500 microhenries e do capacitor de 4,7 μF .

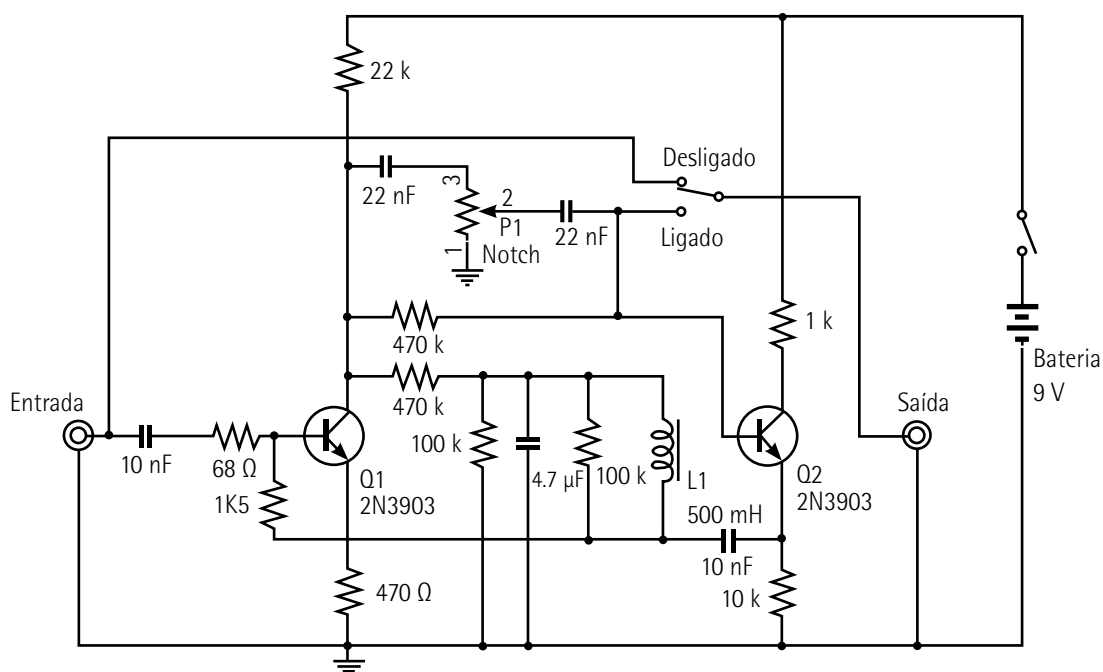


Figura 63 – Circuito de um filtro tipo notch com indutor

Esse tipo de arranjo é muito implementado desde 1960 em efeitos para guitarras elétricas, conferindo ao instrumento características que imitam a voz humana e o distintivo efeito wah-wah – que é obtido pela movimentação do eixo do potenciômetro P1, que desloca a parábola do filtro e atenua as frequências mais baixas (graves) ou mais altas (agudos), como mostra a figura 64.

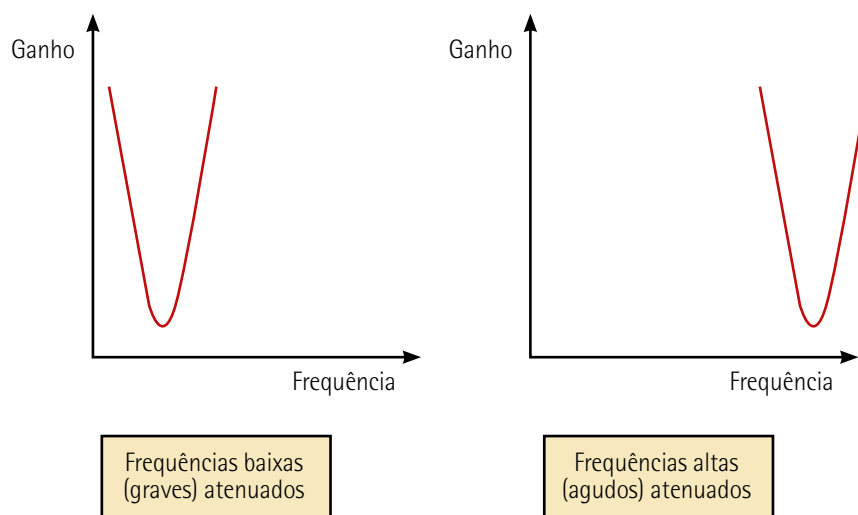


Figura 64 – Ação do filtro notch em um pedal wah-wah

Para a comodidade durante a execução do instrumento, o ajuste do controle é acionado por um pedal com um sistema de cremalheira, de forma que o eixo do potenciômetro gira de acordo com sua posição (figura 65). Ao final do curso, uma chave liga/desliga permite escolher entre o sinal com efeito ou sem efeito, encaminhando o sinal escolhido à saída do amplificador.



Figura 65 – Pedal de efeitos cry baby, fabricado pela Dunlop norte-americana, que utiliza um filtro notch com um indutor

Disponível em: <http://tinyurl.com/57ajew75>. Acesso em: 3 jan. 2024.

É possível também implementar um filtro do tipo notch sem o uso de indutores, valendo-se para isso de um circuito com resistores e capacitores exclusivamente, em uma configuração bastante conhecida como **duplo T**, como ilustra a figura 66.

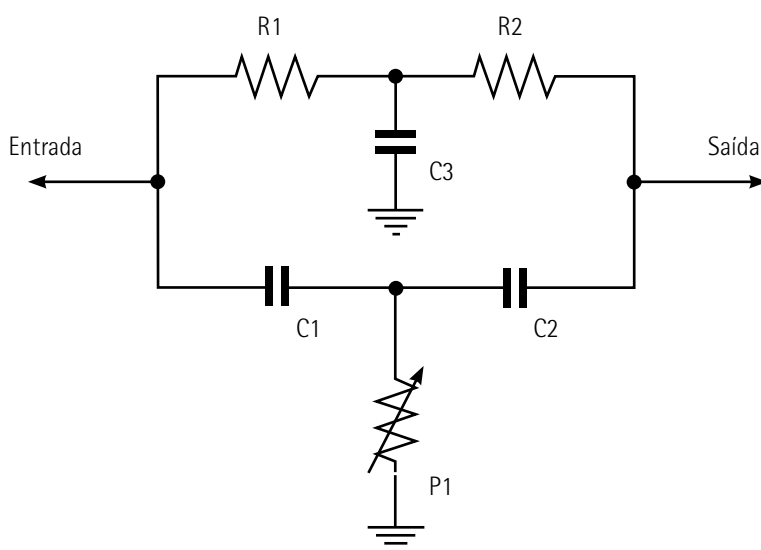


Figura 66 – Filtro tipo duplo T

O ajuste do ponto desse filtro é feito ao movimentar o eixo do potenciômetro P1, que, no final, assemelha-se à performance do filtro com o indutor, apesar de ser menos seletivo – ou seja, apresenta uma parábola um pouco mais aberta se considerarmos o gráfico da figura 64.

Nesse caso, a omissão do indutor acaba sendo atrativa para a economia de custos, uma vez que componentes do tipo custam um pouco mais do que um punhado de resistores e capacitores, e muitas vezes precisam ser enrolados sob encomenda para valores não padronizados e com características muito específicas – sobretudo quando destinadas a uso musical.

Esses filtros, embora não tão seletivos, são amplamente aplicáveis a equipamentos radioamadores como forma de eliminar ruídos indesejáveis na recepção de sinais de rádio muito fracos, e também a equipamentos musicais, possibilitando a criação de efeitos tipo wah-wah (como de fato feito comercialmente pela companhia inglesa Colorsound, nos anos 1970). Um filtro desse tipo, implementado em um circuito de pedais, pode ser visto na figura 67.

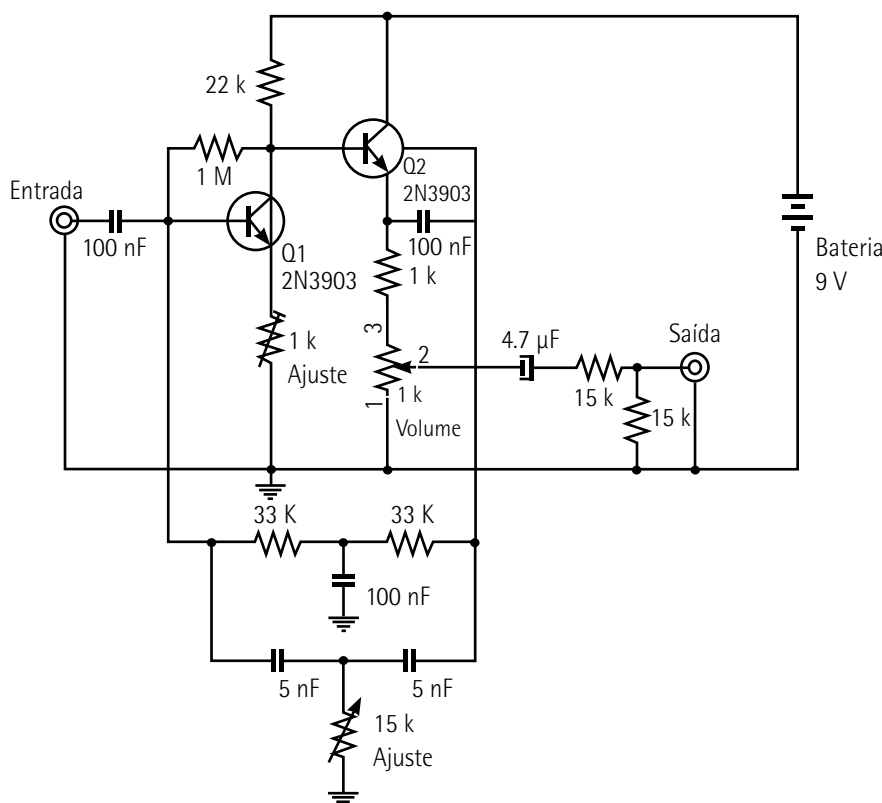


Figura 67 – Filtro notch do tipo duplo T, implementado em um circuito de wah-wah

Fonte: Keen (1999).

No emissor do transistor Q1 existe um resistor ajustável cujo papel é garantir a circulação correta das correntes, permitindo que o transistor em questão amplifique os sinais provenientes da entrada sem que eles oscilem e produzam um apito incômodo. O ponto ideal de funcionamento desse circuito é no limiar da oscilação, de forma que, se mal ajustado, ele se comportará mais como uma buzina do que como um filtro de áudio.

3.5 Indutores em altas frequências

Assim como podem ser aplicados em áudio e em muitas outras situações em que baixas frequências estão presentes, os indutores são encontrados em circuitos com a presença de frequências muito altas, partindo de vários quilohertz e chegando até muitos gigahertz.

Ao operar sob essas frequências – seja em circuitos com filtros sintonizadores, osciladores de RF ou amplificadores –, a criticidade da escolha de seus valores aumenta progressivamente. Paralelamente, a frequência trabalhada também cresce, tornando necessários diversos cuidados ao dimensionar e escolher os indutores para esses circuitos. Neste tópico trabalharemos algumas aplicações dos indutores em circuitos sintonizadores para radiofrequência – ou simplesmente RF –, apresentando sua aplicação mais difundida.

3.5.1 Circuitos sintonizadores

Os **circuitos sintonizadores** (também chamados de **circuitos tanque**) são normalmente aplicados em situações em que é preciso selecionar uma dentre várias frequências presentes em um determinado espectro, e, portanto, agem como um filtro passa-banda.

Um exemplo é o controle de sintonia de um receptor de rádio comum: a frequência da emissora sintonizada pode ser mudada com o giro de um botão, o que altera a posição da curva de um filtro formado por um indutor em paralelo com um capacitor variável, conforme a figura 68.

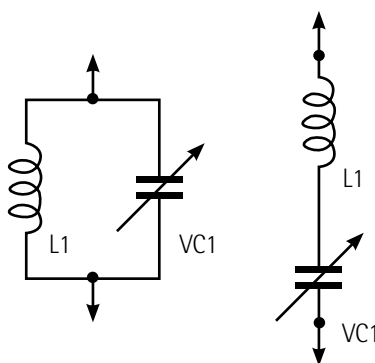


Figura 68 – Circuito sintonizador tipo tanque, em paralelo (esquerda) e em série (direita)

Observe que, paralelamente, o valor do capacitor varia quando seu eixo é movimentado, e sua frequência de ressonância irá se deslocar para cima ou para baixo, permitindo a escolha da emissora que queremos ouvir.



Observação

Também é possível sua implementação utilizando um capacitor fixo, que varia a indutância da bobina, configuração que apresenta comportamento bem semelhante.

Esses circuitos podem ser estruturados tanto com o capacitor ligado em série como em paralelo à bobina, permitindo diferentes curvas de resposta e seletividade – que, a rigor, serão similares ao apresentado na figura 69.

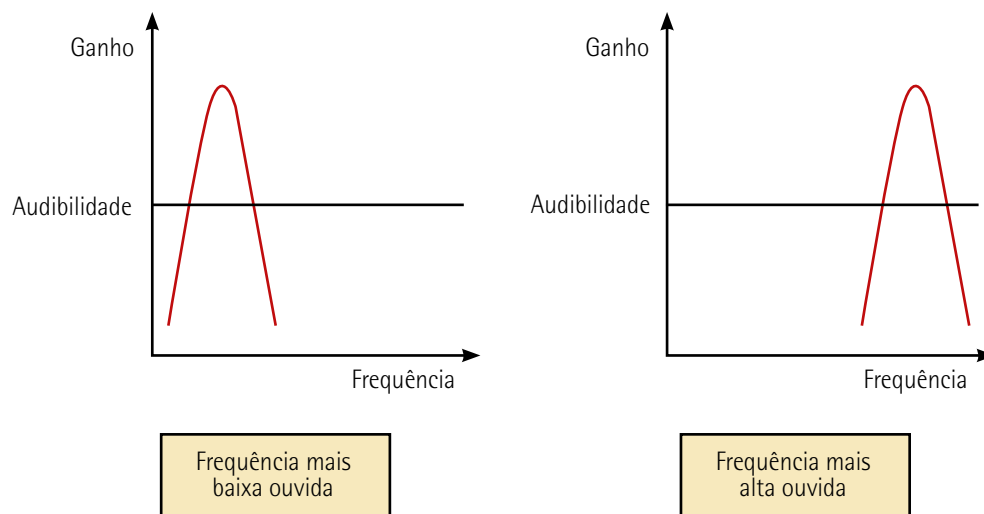


Figura 69 – Ação de um filtro sintonizador

A frequência de ressonância deste tipo de circuito é dada pelos valores tanto do indutor quanto do capacitor, e pode ser obtida com uma fórmula relativamente simples, expressa por Braga (2018b):

$$f_0 = \frac{5.033}{\sqrt{L \times C}}$$

Em que:

- f_0 é a frequência central do circuito sintonizador, dada em quilohertz (KHz);
- **5.033** é um valor constante da fórmula;
- **L** é o valor do indutor, dado em milihenries (mH) e;
- **C** é o valor do capacitor, em picofarads (pF).

4 TESTE DE INDUTORES

Determinar se o fio de um indutor qualquer está inteiro é relativamente fácil, bastando para tanto um multímetro (conforme já abordamos em outro ponto deste livro-texto); agora, estabelecer o seu valor exato em henries já não é uma tarefa tão simples, sendo necessário usar um equipamento específico denominado **indutímetro**.

É também igualmente especializado o teste de curtos internos em um indutor. Por serem compostos de diversas espiras de fio (na casa das muitas centenas), enroladas em torno de um núcleo, qualquer desgaste na isolação do fio pode estabelecer um contato elétrico que não deveria ocorrer, provocando um curto de difícil detecção entre espiras e que somente pode ser identificado por um aparelho chamado **ring tester**.

Trataremos, a seguir, desses dois importantes equipamentos de teste: **indutímetro** e **ring tester**.

4.1 O indutímetro

Como o próprio nome diz, o **indutímetro** é o instrumento responsável por medir, adequada e precisamente, o valor da indutância de uma bobina qualquer. Seu princípio de funcionamento não é complicado, e sua construção pode ser levada a cabo por qualquer entusiasta com alguma prática com ferro de solda e demais componentes eletrônicos.

O indutímetro por si só não é um instrumento tão comum, sendo normalmente usado como uma funcionalidade em medidores que já têm a capacidade de medir resistores e capacitores – isso permite que indutores sejam medidos pelo mesmo **hardware**. Isso ocorre porque esses testadores utilizam o princípio da **ponte de medidas** para a determinação de seus valores, comparando o valor do componente sob medição com o de outro, de valor conhecido, que esteja montado no interior do aparelho.

Um exemplo de instrumento capaz de medir indutâncias por esse princípio é o **M-Tester**, um testador digital com software e hardware abertos, desenvolvido pelo radioamador suíço **Markus Frejek** em torno de um microcontrolador da família AVR, e aperfeiçoado posteriormente por vários outros entusiastas ao redor do mundo (figura 70).



Figura 70 – O teste universal M-Tester, montado em case customizado pelo autor

Esses testadores operam com bateria de 9 V, e, mediante modificação, podem funcionar com um par de pilhas de lítio tipo 14500, de 3,7 V montadas em série em um suporte para duas pilhas AA,

que servem perfeitamente e fornecem grande durabilidade e ainda permitem recarga quando as baterias se esgotam.

4.2 Ring testers

Um tipo de instrumento dedicado de grande importância é o chamado *ring tester*, capaz de identificar se um indutor está com algum curto entre suas espiras – algo muito difícil de identificar ao simplesmente medir sua indutância ou a continuidade elétrica do fio.

Seu princípio de operação é baseado no circuito sintonizador tipo tanque, que, quando submetido a um pulso elétrico, reage de forma muito particular: ele produz uma ressonância característica, em forma de um conjunto oscilações amortecidas, que se apresenta como ilustra a figura 71.

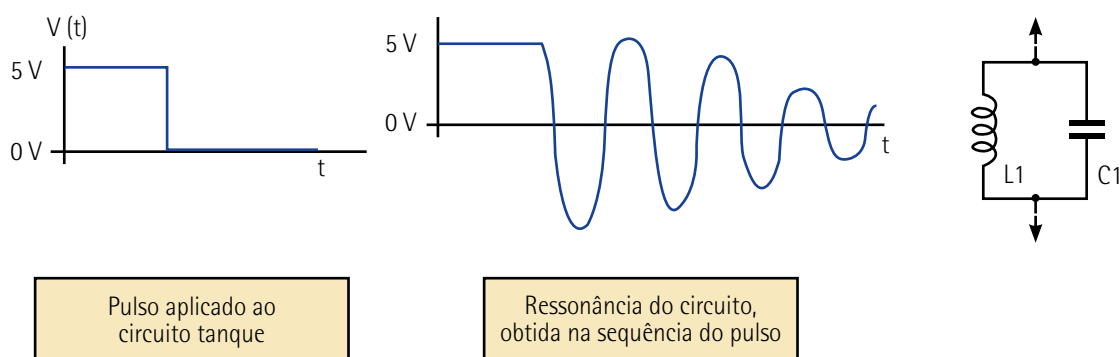


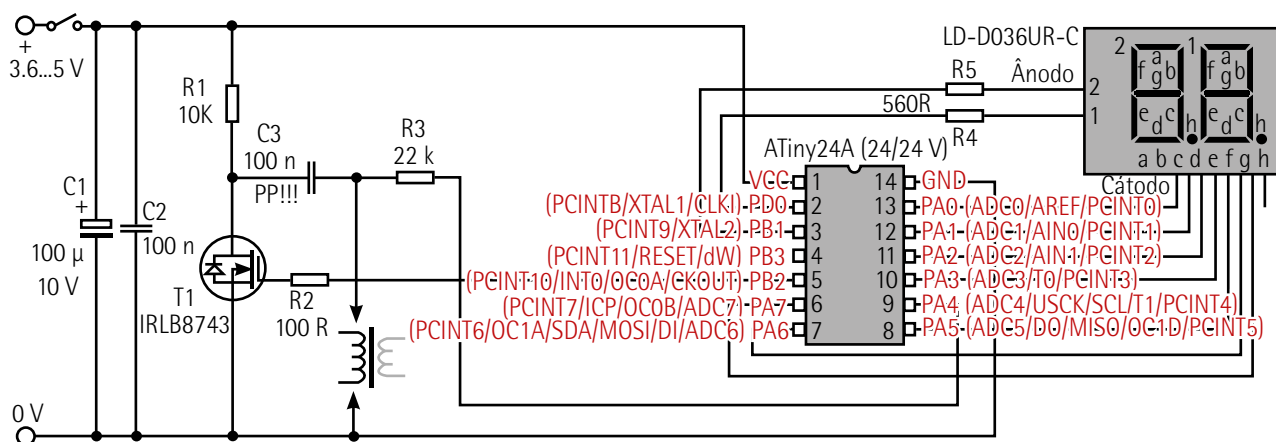
Figura 71 – Ressonância em um circuito tanque

Adaptada de: Bhandari (2021).

Note que, se o indutor estiver em boas condições, ele entrará em ressonância com o capacitor, produzindo um conjunto de diversas oscilações (ou rings), algo que não acontecerá caso ele esteja com espiras em curto – situação em que seria produzida apenas uma, ou, quando muito, duas oscilações. Isso ocorre porque o curto introduz perdas significativas no circuito tanque, diminuindo drasticamente sua capacidade de oscilar.

Para determinar se o indutor tem espiras em curto ou não, use um capacitor de valor conhecido em paralelo com o indutor sob teste; aplique um conjunto de pulsos elétricos no indutor, e, usando um circuito capaz de contar a quantidade de oscilações produzidas como ressonância, é possível determinar se o indutor tem espiras em curto ou não.

Um exemplo de *ring tester* bem simples e de fácil execução é o exibido na figura 72, estruturado sobre um simples microcontrolador ATtiny24A:



independente e isolada do sinal de controle, dado que a bobina e os contatos não têm nenhuma conexão elétrica entre si.

A estrutura de um relê com um conjunto de três contatos (dois fixos e um móvel) pode ser conferida na figura 73.

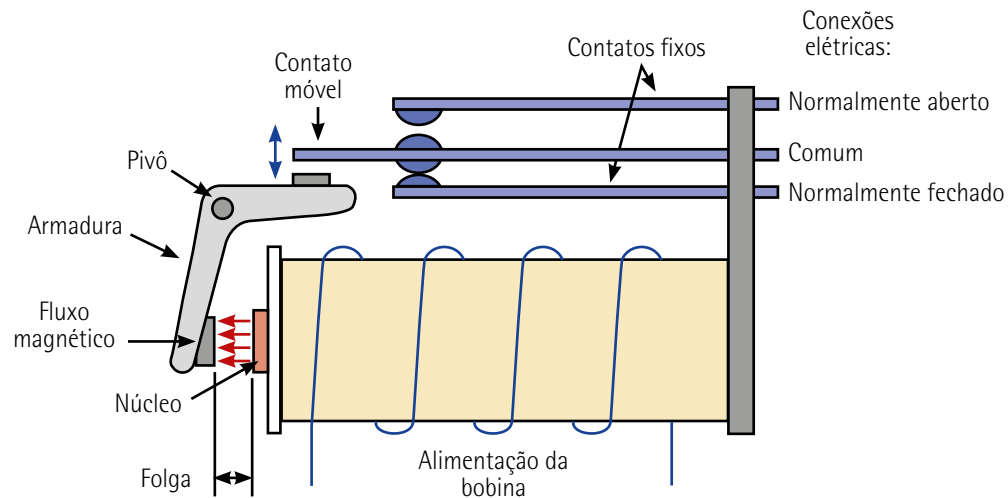


Figura 73 – Estrutura interna de um relê

Adaptada de: Dickinson (2022).

O contato móvel do relê também é denominado comum, já que provê ligação com qualquer um dos outros dois contatos. Estes, por sua vez, são denominados normalmente aberto e normalmente fechado.

Essas denominações são dadas aos contatos móveis pela posição que assumem quando a bobina do relê não se encontra energizada: o contato **normalmente fechado** ficará ligado mesmo quando a bobina estiver desligada, e o **normalmente aberto** apenas se ligará ao ser energizada a bobina, permanecendo desligado a maior parte do tempo.

4.3.1 Funções lógicas com relês

É possível implementar as funções lógicas AND e OR, assim como de inversores NOT, mediante o uso de relês – de tal forma que é possível construir portas lógicas eficientes, rápidas e também de circuitos digitais complexos.

Tais arranjos foram bastante implementados nos primeiros tempos da computação, notavelmente em centrais telefônicas, em que faziam o chaveamento que permitia um usuário chamar o telefone de outro de forma totalmente automática; mesmo em computadores inteiros, como o Z3 – desenvolvido pelo engenheiro alemão Konrad Zuse nos anos 1940 – e os FACOM – desenvolvidos pela companhia japonesa Fujitsu nos anos 1950.

Na figura 74 vemos uma porta lógica AND (E) implementada com dois relês de contatos simples, ou seja, que apresentam conexões do tipo normalmente aberto. Como as chaves comandadas pelos dois relês estão em série, a tensão de 5 V de alimentação apenas será disponibilizada na saída caso ambas as chaves estejam acionadas, necessitando, para tanto, que ambas as bobinas estejam energizadas com uma tensão presente nas entradas A e B.

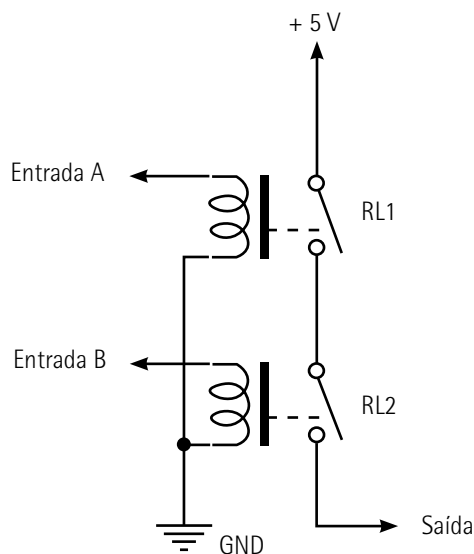


Figura 74 – Porta AND com relês

Esse mesmo arranjo com dois relês também pode ser reorganizado para executar uma função lógica OR (OU), bastando que as chaves comandadas pelos relês sejam ligadas em paralelo (como na figura 75). Nesse caso, bastará que quaisquer destas esteja acionada para que a tensão de 5 V de alimentação esteja na saída, bastando para isso que qualquer uma das entradas – A ou B – esteja energizada.

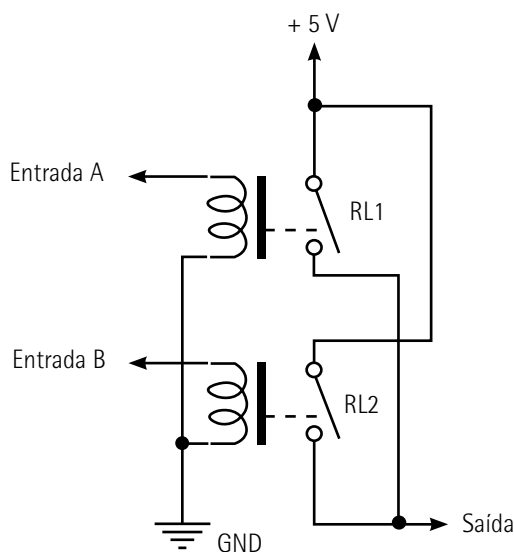


Figura 75 – Porta lógica OR, com relês

Um simples inversor lógico (ou porta NOT) pode ser também construído com um relê com dois contatos móveis, conforme figura 76. Nesse caso, a tensão de alimentação de 5 V é fornecida à saída pelo contato normalmente fechado, de forma que quando a bobina se encontra desenergizada (entrada em nível baixo), a saída se encontra em nível alto, e vice-versa.

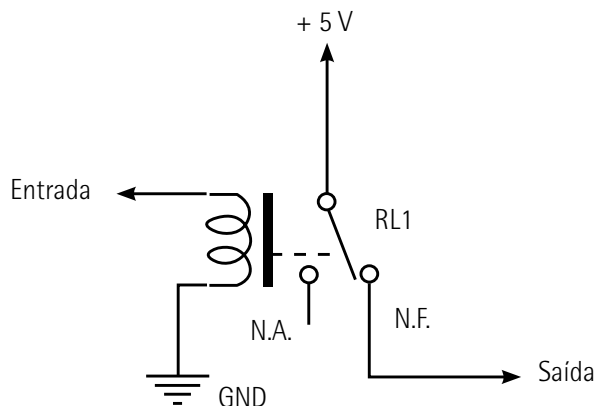


Figura 76 – Inversor lógico (porta NOT) com relê

Contudo, os relês apresentam algumas desvantagens quando utilizados em aplicações lógicas, especialmente no quesito velocidade – uma vez que existe um tempo de atraso no acionamento dos contatos, normalmente pela distância entre eles – e no consumo de eletricidade, já que as bobinas, quando estão energizadas, consomem uma corrente que pode ser bastante elevada ao se considerar todos os relês empregados acionados ao mesmo tempo.

Exemplo de aplicação

A aplicação dos relês na execução de funções lógicas em computadores pode ser verificada em diversos exemplos históricos, como no caso do computador FACOM-128, desenvolvido pela companhia japonesa Fujitsu a partir de 1956.

Esse modelo sucedeu o FACOM-100, um protótipo desenvolvido dois anos antes e que não chegou a ser comercializado. Ambos tinham em comum a mesma característica: eram inteiramente eletromecânicos, baseados em portas lógicas com relês, que era, na época de construção da máquina, mais barata e utilizava uma tecnologia acessível no Japão pós-guerra, ainda em reconstrução.

O primeiro FACOM-128 produzido foi destinado ao Ministério da Educação japonês, e era utilizado para cálculos matemáticos e estatísticos. Ele tinha como dispositivos de entrada um teclado numérico – bastante diferente dos que conhecemos hoje – e dois leitores: um de cartão perfurado e outro de fita. A saída dos dados era via uma impressora matricial e também de um painel com lâmpadas, onde os bits podiam ser lidos diretamente (figura 77).



Figura 77 – Computador FACOM-128, com seus painéis de relês e sua mesa de comando

Disponível em: <http://tinyurl.com/4chzm568>. Acesso em: 1º fev. 2024.

Atualmente, apenas um FACOM-128 segue integralmente preservado e funcional. Ele está exposto no Ikeda Memorial Room, no complexo industrial da Fujitsu, em Numazu, no Japão.



Resumo

Nesta primeira unidade apresentamos algumas características básicas dos indutores e as definições fundamentais da eletricidade, do magnetismo e da indutância.

Abordamos também o conceito da reatância indutiva – isto é, a capacidade que um indutor qualquer tem de comportar-se como um resistor – quando submetido a uma corrente alternada.

Também falamos a respeito dos principais tipos de indutores e do material utilizado para sua construção: se utilizam núcleo de ar, de ferro ou ferrite (pó de ferro prensado). Em seguida, foram abordados alguns dos tipos de indutores mais encontrados no comércio: com encapsulamento moldado, feitos em plástico e epóxi, com enrolamento entrelaçado honeycomb, de valor ajustável, e os de fabricação artesanal, normalmente encontrados em montagens caseiras.

Logo depois foram exibidas as associações de indutores em série e paralelo, com seus respectivos cálculos e fórmulas para obter os valores equivalentes.

O fenômeno da indução mútua e os transformadores também foram tratados: foi detalhada a importância da relação entre espiras no enrolamento dos transformadores e os tipos mais utilizados em aplicações comerciais, seguido de um conjunto de procedimentos para identificar transformadores com características desconhecidas.

Os filtros com indutores e capacitores também foram estudados (filtro passa-alta, passa-baixa etc.), além das diversas formas de testar um indutor (indutímetro e *ring-tester*).

Finalmente, apresentamos os relês, componente importante em diversas aplicações, e seu uso pioneiro em portas lógicas, nos primitivos circuitos computacionais.



Exercícios

Questão 1. Em um circuito eletrônico, temos a montagem mostrada a seguir.

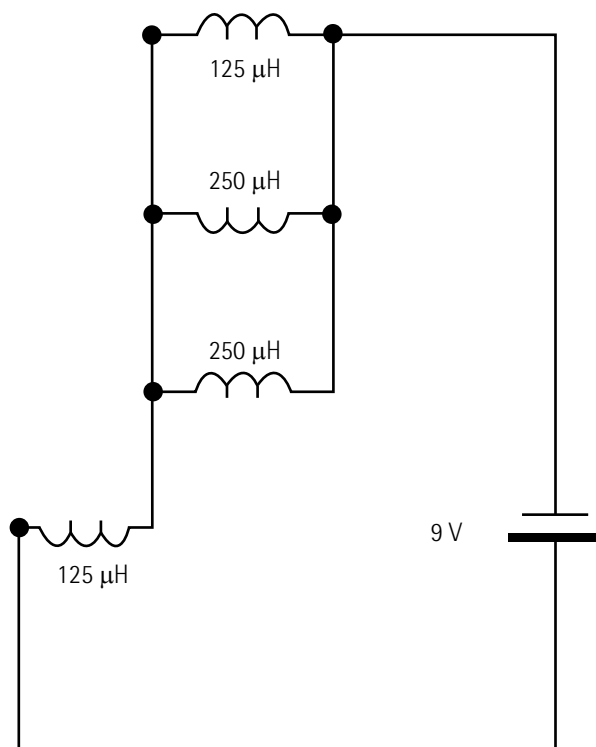


Figura 78

No diagrama apresentado, a indutância equivalente do circuito é igual a:

- A) 125 μH .
- B) 250 μH .
- C) 750 μH .
- D) 187,5 μH .
- E) 62,5 μH .

Resposta correta: alternativa D.

Análise da questão

Para indutores em série, a indutância equivalente (L_{eq}) é a soma das indutâncias dos indutores. Ou seja:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

Para indutores em paralelo, a indutância equivalente é determinada por:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

Para o circuito apresentado na figura a seguir, os indutores que estão destacados pelo círculo em vermelho estão em paralelo.

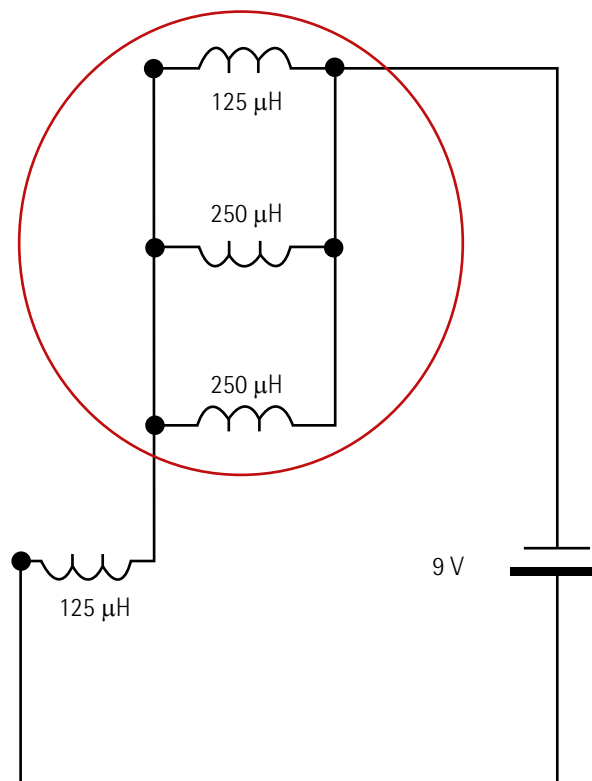


Figura 79

Para esses indutores, a indutância equivalente fica:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{125 \mu\text{H}} + \frac{1}{250 \mu\text{H}} + \frac{1}{250 \mu\text{H}}$$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{2+1+1}{250 \mu H} + \frac{4}{250 \mu H} + \frac{1}{62,5 \mu H}$$

Com isso, a indutância equivalente dos indutores em paralelo fica:

$$L_{eq} = 62,5 \mu H$$

Assim, os três indutores em paralelo são equivalentes a um indutor de 62,5 μH , como mostra a figura a seguir.

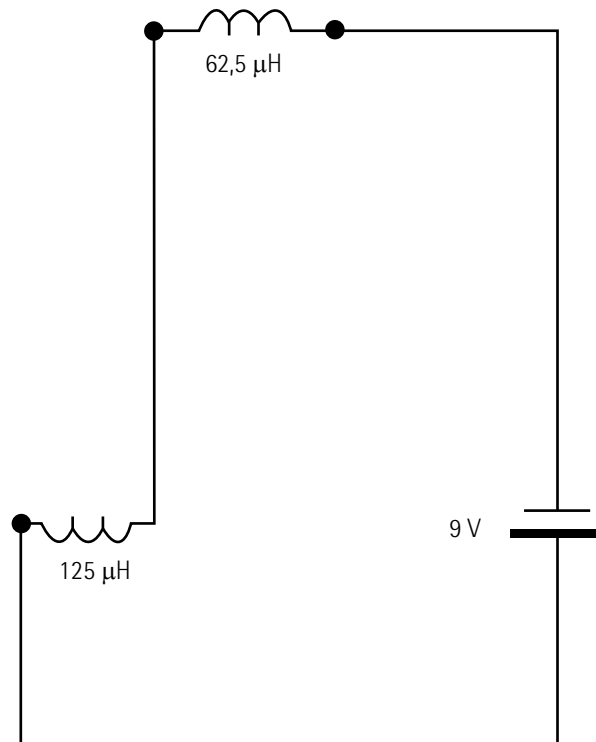


Figura 80

Neste caso, os dois indutores estão em série e, portanto, a indutância equivalente é igual à soma entre as indutâncias. Ou seja:

$$L_{eq} = 62,5 \mu H + 125 \mu H$$

$$L_{eq} = 187,5 \mu H$$

Questão 2. Um transformador com um enrolamento primário com 10 mil espiras é usado para transformar a tensão de entrada de 220 V em uma tensão de saída igual a 110 V.

Para esse transformador, avalie as afirmativas a seguir.

I – O número de espiras do secundário é igual a 5 mil.

II – Para a mesma transformação, se o número de espiras no primário for o dobro do mostrado no enunciado, o número de espiras no secundário deve dobrar.

III – Se no transformador original for colocado um tap na metade do secundário, a tensão no tap será a metade da tensão de saída.

É correto o que se afirma em:

A) I, apenas.

B) I e II, apenas.

C) I e III, apenas.

D) II e III, apenas.

E) I, II e III.

Resposta correta: alternativa E.

Análise das afirmativas

I – Afirmativa correta.

Justificativa: a relação entre a tensão no primário e a tensão no secundário é igual à relação entre o número de espiras no primário e o número de espiras no secundário. Ou seja:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{220\text{ V}}{110\text{ V}} = \frac{10.000}{N_2}$$

$$N_2 = \frac{10.000 \cdot 110\text{ V}}{220\text{ V}}$$

$N_2 = 5.000$

II – Afirmativa correta.

Justificativa: entre o primário e o secundário, a relação entre o número de espiras é igual à relação entre as tensões. Assim, mantida a relação entre as tensões, deve ser mantida a relação entre os números de espiras. Portanto, se dobrarmos o número de espiras do primário, para manter a relação entre as tensões, deve ser dobrado o número de espiras do secundário.

III – Afirmativa correta.

Justificativa: se no secundário for colocado um tap, na metade do secundário a tensão no tap será a metade da tensão de saída. Isso ocorre porque o número de espiras até o tap é a metade do número do secundário. Veja a figura a seguir.

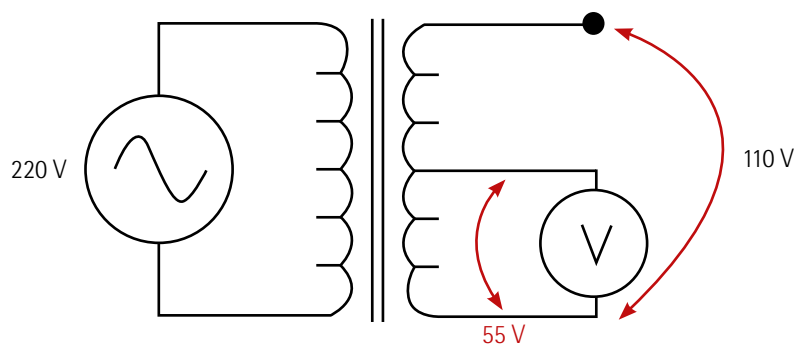


Figura 81