

# CONSTRUÇÃO DE BOBINAS TOROIDAIS

Por Joseph J. Carr

**E**m muitas montagens electrónicas, especialmente as concebidas por radioamadores, utilizam-se bobinas ou transformadores de radiofrequência (RF) em que os enroladores são feitos sobre núcleos toroidais. Um toroide é um objecto com a forma de um *donut*, ou seja, um cilindro achatado (muitas vezes com bordos arredondados) com um orifício central (Fig. 1). A forma toroidal é desejável para os núcleos das bobinas, porque permite obter um valor relativamente elevado de indutância com poucas espiras de fio, devido à grande permeabilidade do núcleo ( $\mu$ ) e, o que é talvez ainda mais importante, porque a forma do núcleo reduz as fugas do campo magnético. Esta última característica faz que as bobinas toroidais sejam mais desejáveis nos circuitos de RF. As bobinas com núcleo rectilíneo possuem um campo magnético que se estende bem para fora dos enrolamentos, po-

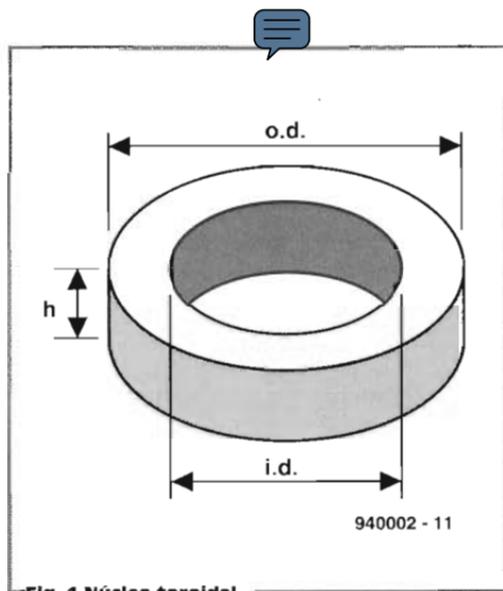


Fig. 1 Núcleo toroidal.

dendo assim interferir com bobinas que estejam próximas, ou com outros componentes. Os acoplamentos indutivos indesejáveis podem causar sérios problemas nos circuitos electrónicos de RF e, por isso, devem ser evitados tanto quanto possível.

A utilização de bobinas toroidais, com o seu limitado campo magnético exterior, torna possível instalar a bobina próximo de outras bobinas (e outros componentes) sem que ocorra grande interferência.

## Materiais dos núcleos toroidais

Os núcleos toroidais são fabricados a partir de vários materiais, que se podem normalmente agrupar em duas categorias; pó de ferro e ferrite. Estes grupos subdividem-se, conforme descrevemos a seguir.

## Pó de ferro

Os núcleos com pó de ferro são de dois tipos básicos: ferro carbônico e ferro reduzido a hidrogênio. Os núcleos de ferro carbônico são muito apreciados devido à sua estabilidade face a variações de temperatura e a possuírem valores de permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) entre 1 e cerca de 35. Os núcleos de ferro carbônico fornecem altos valores de "Q" para frequências de 200 MHz. Utilizam-se em aplicações de potência elevada bem como em osciladores de frequência variável e sempre que a estabilida-

de de temperatura seja um factor importante. Deve porém notar-se que nenhum núcleo de pó de ferro ou de ferrite é totalmente imune às variações de temperatura, pelo que, para um funcionamento correcto, os osciladores que utilizam estes núcleos devem ser compensados em função da temperatura.

Os núcleos de ferro reduzido a hidrogênio possuem valores de permeabilidade relativa que atingem 90, mas fornecem valores de "Q" inferiores aos do ferro carbônico. Utilizam-se principalmente nos filtros contra interferên-

| Material | $\mu_r$ | Observações   |
|----------|---------|---|
| 0        | 1       | Utilizado até 200 MHz. A indutância varia com o método de enrolamento.  |
| 1        | 20      | Constituído por Carbonyl C. Idêntico à liga n.º 3, mas é mais estável e tem maior resistividade.  |
| 2        | 10      | Constituído por Carbonyl E. Possui um Q elevado e boa resistividade entre 1 a 30 MHz.   |
| 3        | 35      | Constituído por Carbonyl HP. Possui uma estabilidade muito boa e bom Q na gama de 50 kHz a 500 kHz.   |
| 6        | 8       | Constituído por Carbonyl SF. Idêntico à liga n.º 2, mas possui um Q mais elevado na gama de 20 a 50 MHz.  |
| 10       | 6       | Pó de ferro do tipo W. Possui um bom Q e elevada estabilidade entre 40 e 100 MHz.   |
| 12       | 3       | Constituído por um óxido sintético. Possui um bom Q mas a estabilidade é moderada na gama de 50 a 100 MHz.  |
| 15       | 25      | Constituído por Carbonyl GS6. Possui estabilidade excelente e bom Q na gama entre 0,1 a 2 MHz. Recomendado para ser utilizado em aplicações de AM, BCB e VLF. |
| 17       | 3       | Constituído por Carbonyl idêntico à liga n.º 12, mas tem uma maior estabilidade de temperatura embora um menor Q.   |
| 26       | 75      | Constituído por ferro reduzido a hidrogênio. Tem uma permeabilidade muito elevada. É utilizado em filtros EMI e bobinas de choque para C.C.                   |

Tabela 1. Materiais dos núcleos de pó de ferro.

## M-Z: Manganês-Zinco

| Material | $\mu_r$ | Observações   |
|----------|---------|---|
| 33       | 850     | M-Z. Utilizado na gama de 1 kHz a 1 MHz para núcleos de antena. Possui baixa resistividade.   |
| 43       | 850     | N-Z. Utiliza-se em bobinas de onda média e transformadores de banda larga até 50 MHz. Atenuação elevada desde 30 a 400 MHz. Possui elevada resistividade.   |
| 61       | 125     | N-Z. Possui um Q elevado entre 0,2 e 15 MHz. Possui uma estabilidade de temperatura moderada. Utilizado nos transformadores de banda larga até 200 MHz.   |
| 63       | 40      | Q elevado entre 15 e 25 MHz. Possui uma permeabilidade baixa e alta resistividade.  |
| 67       | 40      | N-Z. Q elevado entre 10 e 80 MHz. Densidade de fluxo relativamente elevada e boa estabilidade de temperatura. É idêntico ao tipo 63, mas possui uma resistividade inferior. Utiliza-se em transformadores de banda larga até 200 MHz. |
| 68       | 20      | N-Z. Possui excelente estabilidade de temperatura e Q elevado entre 80 e 180 MHz. Possui resistividade elevada.   |
| 72       | 2000    | Q elevado até 0,50 MHz, mas utiliza-se em filtros EMI entre 0,50 e 50 MHz. Possui baixa resistividade.  |
| J/75     | 5000    | Utiliza-se em transformadores de impulsos e de banda larga entre 1 kHz e 1 MHz e nos filtros EMI entre 0,50 e 20 MHz. Possui baixa resistividade e pequenas fugas magnéticas.   |
| 77       | 2000    | Utilizado em transformadores de banda larga e em conversores de potência (0,001 a 1 MHz) e em filtros EMI e de ruído entre 0,5 e 50 MHz.  |
| F        | 3000    | É semelhante ao tipo 77, mas oferece maior resistividade, maior permeabilidade inicial e maior densidade de saturação de fluxo. Utiliza-se em conversores de potência, em filtros EMI e filtros de ruído, entre 0,50 e 50 MHz.        |

Tabela 2. Materiais de ferrite.

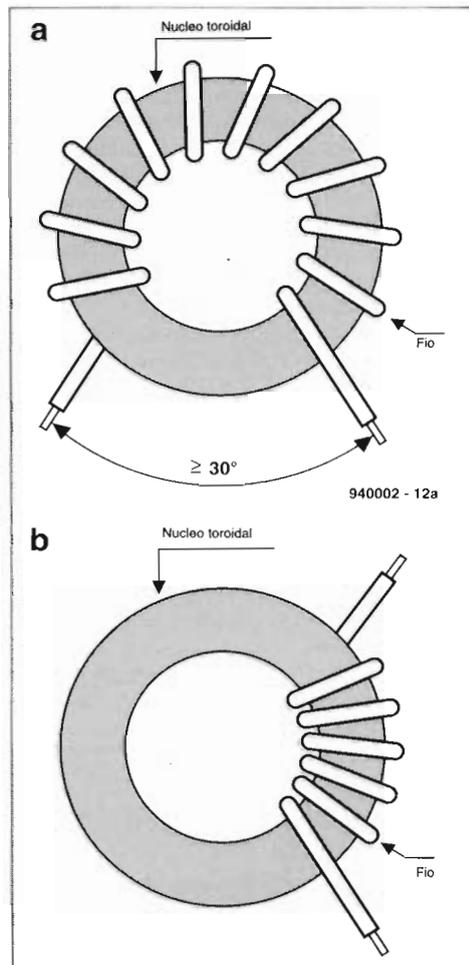


Fig. 2 Tipos de enrolamentos toroidais: a) espiras espaçadas; b) espiras encostadas.

cias electromagnéticas (filtros EMI). A Tabela 1 apresenta vários materiais de pó de ferro.

## Ferrites

A palavra «ferrite» sugere que o material se baseia em ferro, o que não é verdadeiro. As ferrites são agrupadas em dois tipos: níquel-zinco e manganês-zinco. A liga de níquel-zinco possui uma resistividade e um "Q" elevados na gama de 0,50 a 100 MHz. Porém, a estabilidade com variações de temperatura é apenas moderada. A permeabilidade dos materiais de níquel-zinco situam-se na gama de 125 a 850.

As ligas de manganês-zinco possuem permeabilidades relativas mais elevadas que as de níquel-zinco, variando de 850 a 5000. A liga de manganês-zinco apresenta um valor elevado de "Q" na gama de 1 kHz a 1 MHz. Possui uma resistividade baixa e uma densidade de saturação de fluxo moderada. Utilizam-se em fontes de alimentação comutadas de 20 a 100 kHz, e na atenuação das interferências electromagnéticas (EMI) na gama de 20 a 400 MHz. Consulte a Tabela 2 para mais informações sobre materiais de ferrite.

## Nomenclatura dos núcleos toroidais

Apesar de existirem diferentes formas de designar os núcleos toroidais, a utilizada pela Amidon Associates (2216 East Gladwick, Dominguez Hills, CA, 90220, USA) é talvez a mais divulgada nas publicações de radioama-

dores. Apesar de as unidades de medida serem as do Sistema Inglês, em vez do Sistema Internacional (SI), o seu emprego no caso dos toroides parece generalizado. A designação que caracteriza o núcleo tem três elementos: xx-yy-zz. O elemento "xx" é constituído por uma ou duas letras que designa a classe geral do material, isto é, pó de ferro (xx=T) ou ferrite (xx=TF). O elemento "yy" representa o diâmetro exterior aproximado do núcleo, em centésimas de polegada (37 indica um núcleo de 0,37 polegadas, ou seja, 9,53 mm, enquanto 50 representa um núcleo de 0,50 polegadas, ou seja, 12,7 mm). O elemento "zz" indica o tipo de material (liga). Um núcleo de pó de ferro feito de liga n.º2 e com 0,50 polegadas de diâmetro exterior será designado por T-50-2. Os núcleos são coloridos de acordo com um código, para auxiliar a sua identificação.

## Indutância de bobinas toroidais

A indutância (L) de uma bobina com núcleo toroidal depende da permeabilidade relativa do material do núcleo, do número de espiras, do diâmetro interior (d.i.) do núcleo, do diâmetro exterior (d.e.) do núcleo e da espessura do núcleo (h) - ver Fig. 1 - e pode calcular-se aproximadamente com a seguinte expressão:

$$L = 0,011684 h N^2 \mu_r \frac{\text{d.e.}}{\text{d.i.}} \text{ (H)} \quad [1]$$

Porém, esta equação raramente é utilizada pelos radioamadores, visto que os fabricantes de toroides fornecem um parâmetro designado por  $A_L$ , cujo valor indica qual a indutância que se consegue com 100 ou 1000 espiras de fio. As Tabelas 3 e 4 mostram o valor de  $A_L$ , respectivamente para núcleos de ferrite e de pó de ferro. A Tabela 5 indica outras características dos núcleos de pó de ferro.

## O enrolamento das bobinas toroidais

Existem duas formas principais de fazer o enrolamento de uma bobina toroidal: usando

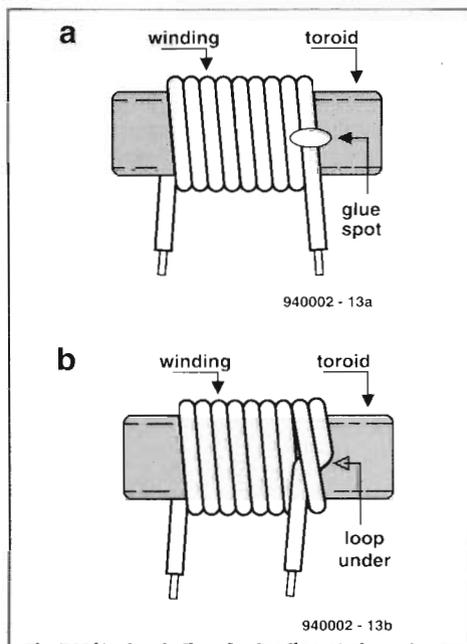


Fig. 3 Métodos de fixação dos fios: a) pingo de cola; b) prisão por laço.

espiras encostadas ou espiras espaçadas. Nas bobinas toroidais espaçadas, as espiras são distribuídas de forma uniforme ao longo da circunferência do núcleo, com exceção de um espaço de 30° que fica situado entre as extremidades do fio (Fig. 2a). O espaço de 30° reduz a capacidade parasita da bobina. Portanto, o enrolamento distribui-se apenas por 270° da circunferência do núcleo. Nas bobinas toroidais de espiras encostadas, estas estão enroladas de forma que duas espiras consecutivas se toquem. Neste caso, a capacidade parasita do enrolamento é maior, o que vai influenciar a frequência de ressonância, mas normalmente não há inconveniente. Duma forma geral, utilizam-se espiras encostadas nas bobinas para circuitos sintonizados de banda estreita, enquanto o enrolamento com espiras afastadas se utiliza em situações em que é necessária uma banda larga, tal como nos transformadores normais e transformadores BALUN para RF. A forma de efectuar o enrolamento altera um pouco a indutância

final da bobina. Por isso, a indutância final de uma bobina pode ser ajustada dentro de certos limites no próprio circuito, bastando aproximar ou afastar um tanto as espiras.

## Cálculo do número de espiras

Em todas as bobinas, o número de espiras de fio determina a sua indutância. Nos núcleos de pó de ferro, o valor  $A_L$  que caracteriza o núcleo, é utilizado para prever com razoável credibilidade, o número de espiras necessárias.

Para núcleos de pó de ferro:

$$N = 100 \sqrt{(L/A_L)} \quad [2]$$

onde:

$N$  é o número de espiras;

$L$  é a indutância desejada em microhenrys ( $\mu\text{H}$ );

$A_L$  caracteriza o material e a dimensão do núcleo ( $\mu\text{H}/100$  ou  $\mu\text{H}/1000$  espiras, conforme indicação do fabricante).

Exemplo

Calcule o número de espiras necessárias para obter uma indutância de 6  $\mu\text{H}$  utilizando um núcleo de pó de ferro T-50-2, vermelho com  $A_L = 49$ .

$$N = 100 \sqrt{(6\mu\text{H}/49)} = 35 \text{ espiras}$$

Para núcleos de ferrite:

$$N = 1000 \sqrt{(L/A_L)} \quad [3]$$

Onde:

$L$  é a indutância desejada em milihenrys (mH);

$A_L$  caracteriza o material e a dimensão do núcleo (mH/1000 espiras).

Exemplo

Quantas espiras é necessário enrolar num núcleo de ferrite FT-50A-43 ( $A_L = 570$  mH/1000 espiras) para obter uma bobina com a indutância de 200  $\mu\text{H}$ ?

$$N = 1000 \sqrt{(0,2/570)} = 18,7 \text{ espiras}$$

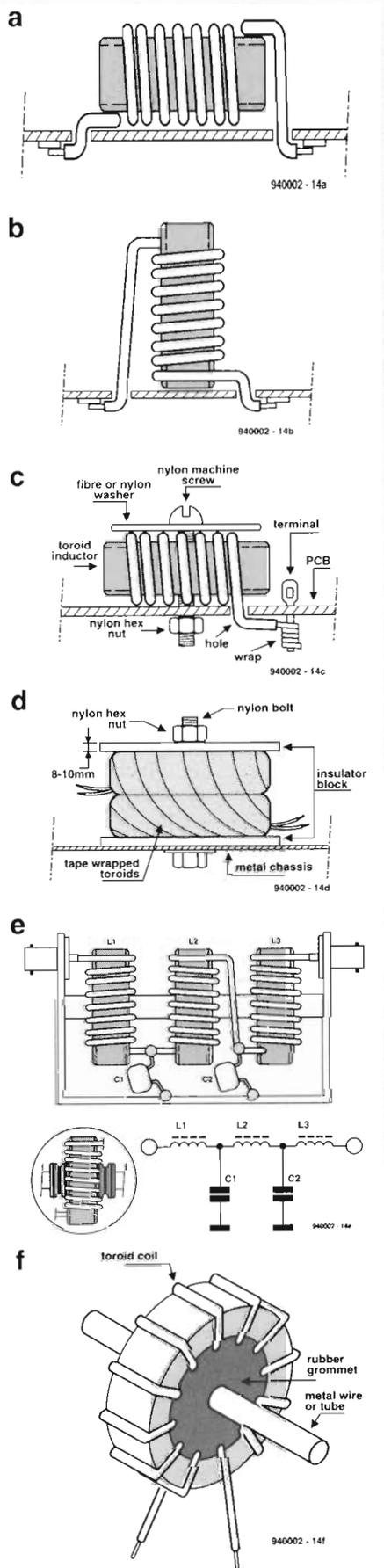
O número de espiras obtido vem por vezes expresso em fracções de espira. É claro que temos de fazer um arredondamento para o número inteiro mais próximo. Em alguns casos pode arredondar-se para a meia espira mais próxima, mas na prática não é fácil construir meias espiras.

## Construção de bobinas toroidais

Os enrolamentos das bobinas ou transformadores toroidais normalmente são feitos utilizando fio esmaltado. Nas aplicações de baixa potência (receptores, osciladores de frequência variável, etc.) o fio geralmente utilizado possui um calibre SWG22 a SWG36 (sendo o mais vulgar o fio SWG26). Nas aplicações de alta potência, tal como transmissores e amplificadores de potência de RF, torna-se necessá-

| Tipo de núcleo: FT-yy-zz |                  |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------------------|------|------|------|------|------|
| Dimensão do núcleo       | Tipo de material |      |      |      |      |      |
|                          | 43               | 61   | 63   | 72   | 75   | 77   |
| 23                       | 188              | 24.8 | 7.9  | 396  | 990  | 356  |
| 37                       | 420              | 55,3 | 17,7 | 884  | 2210 | 796  |
| 50                       | 523              | 68   | 22   | 1100 | 2750 | 990  |
| 50A                      | 570              | 75   | 24   | 1200 | 2990 | 1080 |
| 50B                      | 1140             | 150  | 48   | 2400 | ---  | 2160 |
| 82                       | 557              | 73,3 | 22,8 | 1170 | 3020 | 1060 |
| 114                      | 603              | 79,3 | 25,4 | 1270 | 3170 | 1140 |
| 114A                     | ---              | 146  | ---  | 2340 | ---  | ---  |
| 240                      | 1249             | 173  | 53   | 3130 | 6845 | 3130 |

Tabela 3. Valores de  $A_L$  para núcleos de ferrite vulgares.



**Fig. 4** a) montagem horizontal; b) montagem vertical; c) montagem com parafusos; d) montagem para transformadores ou bobinas toroidais de grande potência ou elevada tensão; e) montagem de bobinas toroidais numa caixa blindada; f) transformador com enrolamento primário de uma só espira, para instrumentos de medida de RF (Watts) ou VSWR.

rio um fio mais grosso. Para aplicações de alta potência de radioamadores, usam-se normalmente fios SWG14 ou SWG12, apesar de se utilizar também fio SWG6 em algumas aplicações comerciais. Tal como anteriormente, por norma o fio é esmaltado ou então isolado a formvar. Nas aplicações de alta potência é provável que existam tensões altas. Nos amplificadores de RF de alta potência, tal como os utilizados por radioamadores de muitos países, as tensões aplicadas num circuito de 50 Ω podem atingir centenas de volts. Nestes casos, é prática comum forrar o núcleo com fita isoladora, por exemplo o Scotch 27.

As aplicações de alta potência também exigem um toroide de maiores dimensões. Normalmente utilizam-se núcleos dos tipos FT-150-zz a FT-240-zz, ou T-130-zz a T-500-zz. Em algumas aplicações de alta potência sobrepõem-se vários toróides iguais e unem-se com fita, para aumentar a capacidade de absorver potência. Este método é geralmente utilizado nos amplificadores de potência de RF e de unidades de sintonia de antena.

**Fixação dos fios**

Por vezes acontece que os fios que constituem a bobina toroidal ou o transformador ficam lassos. Alguns construtores fixam o fio ao núcleo utilizando um dos métodos indicados na Fig. 3.

A Fig. 3a mostra-nos a utilização dum pingo de cola de silicone, ou de vedante de alta tensão como o Glyptol, para fixar a extremidade do enrolamento ao núcleo toroidal.

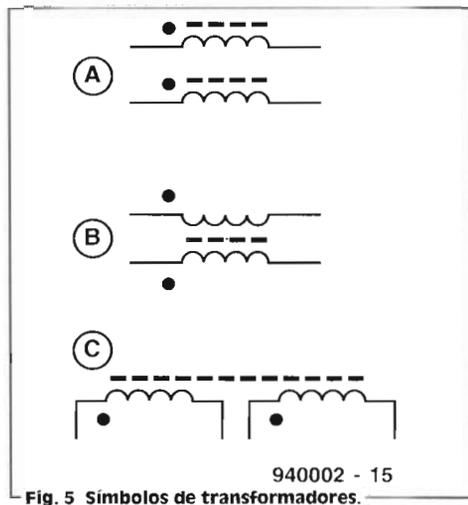
Outros construtores preferem o método indicado na Fig. 3b. Neste caso, a extremidade do fio é introduzida por baixo da primeira espira. Este método fixa realmente o fio, mas há quem diga que dá origem a uma anomalia do campo magnético que pode provocar interferências com os componentes vizinhos. Na prática, nunca verifiquei qualquer problema desse tipo.

Quando o enrolamento estiver pronto, com o número de espiras e espaçamento correcto, então as espiras podem ser fixadas ao núcleo e a bobina pode ser montada no circuito.

Uma forma de se obter uma boa fixação do enrolamento é aplicar uma camada de verniz isolante.

**Montagem das bobinas toroidais**

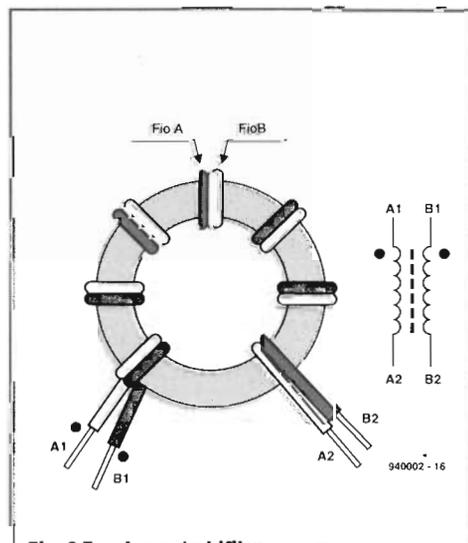
Por vezes, as bobinas toroidais são um pouco mais difíceis de montar que as bobinas de núcleos rectilíneo, mas os cuidados a ter com a montagem são menores. A razão desta menor exigência é que a bobina toroidal, desde que correctamente construída, não irradia praticamente energia, e por isso os componentes vizinhos são menos sujeitos a interferências (isto não significa que não se tomem alguns cuidados). Por exemplo, no caso das bobinas de núcleo rectilíneo, a distância entre duas bobinas e a sua disposição relativa são factores importantes. Bobinas montadas em locais próximos, a menos que fiquem perfeitamente blindadas, devem estar colocadas, fazendo um ângulo recto entre si, por forma a reduzir o acoplamento mútuo. Contudo, as bobinas toroidais podem estar próximas umas das



**Fig. 5** Símbolos de transformadores.

outras e colocadas no mesmo plano ou em planos perpendiculares. Embora deva existir algum espaçamento entre duas bobinas toroidais, visto que a sua construção nunca é perfeita, a distância necessária é menor do que no caso das bobinas de núcleo rectilíneo.

Em qualquer bobina (na realidade em qualquer componente electrónico), temos de considerar a estabilidade mecânica da montagem. Na maioria dos casos, a bobina pode ser directamente montada numa placa de circuito impresso (PCI) tal como é indicado nas figuras 4a e 4b. Na Fig. 4a, a bobina toroidal é montada encostada à placa; os terminais do enrolamento atravessam a placa em dois orifícios e são soldados nas pastilhas de cobre existentes na face inferior. Na Fig. 4b a bobina toroidal é montada perpendicularmente à placa, mas utiliza igualmente os dois fios terminais, soldados a pastilhas de cobre. É conveniente utilizar uma pequena quantidade de cola de silicone para fixar a bobina à PCI. No caso de equipamentos sujeitos a vibrações, pode empregar-se um método idêntico ao indicado na Fig. 4c, em que o toróide é bem fixado na PCI, usando um parafuso e porca de plástico e um disco de fibra. Nas unidades de sintonia de antenas emisoras, é vulgar encontrar-se um arranjo idêntico ao da Fig. 4d. Neste caso, vários núcleos toroidais são individualmente revestidos de fita isoladora e o conjunto é por



**Fig. 6** Enrolamento bifilar.

sua vez revestido com a mesma fita, formando uma só unidade. O conjunto é depois montado entre dois discos isoladores de plástico, cerâmica ou fibra, que são mantidos unidos em «sanduíche», por meio de um parafuso e porca de plástico.

A Fig. 4e mostra um método em que as bobinas toroidais ficam suspensas no interior de uma caixa blindada. Eu próprio empreguei este método para construir filtros passa-baixo de 5 elementos. As bobinas toroidais ficam apoiadas num varão feito de qualquer material isolador tal como madeira, plástico, *plexiglass*, fibra, etc. Se o varão tiver as dimensões apropriadas, as bobinas ficam perfeitamente ajustadas, não necessitando de qualquer outra fixação.

Se for necessário, pode usar-se um pouco de cola de silicone para ajudar a fixação.

Existem construtores que utilizam um par de anéis de borracha enfiados no varão, a fazerem pressão sobre os lados da bobina (ver Fig. 4e). Se os anéis estiverem bastante apertados, nada mais é necessário fazer, mas também podem ser colados ao varão.

Utiliza-se um método semelhante para construir transformadores de corrente para medidores de potência de RF (Fig. 4f). Neste caso, adapta-se um tampão de borracha à parte central do toróide e pelo orifício central do tampão passa-se um pequeno eixo de latão ou cobre (condutor). O condutor central funciona como uma espira do enrolamento primário, pelo que a corrente de RF que circula no condutor central é acoplada magneticamente ao enrolamento toroidal.

| Dimensão do núcleo | Tipo do material da liga |     |     |     |     |     |    |    |      |
|--------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
|                    | 26                       | 3   | 15  | 1   | 2   | 6   | 10 | 12 | 0    |
| 12                 | --                       | 60  | 50  | 38  | 20  | 17  | 12 | 7  | 3    |
| 16                 | --                       | 61  | 55  | 44  | 22  | 19  | 13 | 8  | 3    |
| 20                 | -                        | 90  | 65  | 52  | 27  | 22  | 16 | 10 | 3,5  |
| 37                 | 275                      | 120 | 90  | 80  | 40  | 30  | 25 | 15 | 4,9  |
| 50                 | 320                      | 175 | 135 | 100 | 49  | 40  | 31 | 18 | 6,4  |
| 68                 | 420                      | 195 | 180 | 115 | 57  | 47  | 32 | 21 | 7,5  |
| 94                 | 590                      | 248 | 200 | 160 | 84  | 70  | 58 | 32 | 10,6 |
| 130                | 785                      | 350 | 250 | 200 | 110 | 96  | -- | -- | 15   |
| 200                | 895                      | 425 | --  | 250 | 120 | 100 | -- | -- | --   |

Tabela 4. Valores de Al para núcleos de pó vulgares

## Transformadores toroidais de RF

Tanto os transformadores de RF de banda estreita como os de banda larga, podem utilizar núcleos toroidais de pó de ferro e de ferrite. A Fig. 5 mostra símbolos que representam transformadores. Estes símbolos são equivalentes e todos eles aparecem nos livros técnicos. Na Fig. 5a mostram-se dois enrolamentos com dois núcleos (linhas a tracejado), que na prática são o mesmo. O núcleo pode representar-se por uma ou mais linhas rectas, ou por linhas tracejadas, como se mostra na figura. O método indicado na Fig. 5b é semelhante ao da representação convencional dum transformador, em que os enrolamentos estão justapostos um ao outro e o núcleo se situa entre eles. Na Fig. 5c o núcleo é mais alongado e os dois enrolamentos situam-se ambos num dos lados do núcleo.

Em todas as representações de transformadores da Fig. 5 aparecem pontos junto a um dos terminais dos enrolamentos. Estes pontos servem para indicar o sentido em que se faz o enrolamento e portanto o sentido da corrente eléctrica. Isto é, se for utilizado um terceiro enrolamento para excitar o transformador usando uma fonte de alimentação de RF, a fase dos sinais nos terminais assinalados com um ponto é a mesma.

Os enrolamentos dos transformadores toroidais podem ser ficar separados e espaçados ao longo da circunferência do toróide, quando o transformador é de banda estreita, mas se este for de banda larga utiliza-se um enrolamento bifilar (Fig. 6). Neste tipo de enrolamento, os fios A e B, quando são enrolados em torno do núcleo, são mantidos juntos um do outro. Quando o trabalho estiver pronto, os terminais com a mesma fase (A1 e B1 e A2 e B2) estarão no mesmo local do núcleo.

## Transformadores convencionais

Nos circuitos de RF os transformadores utilizam-se principalmente para transformar impedâncias. Quando se liga o enrolamento secundário de um transformador a uma impedância de carga, a impedância vista pelo primário é o produto da impedância de carga pela razão entre o número de espiras do pri-

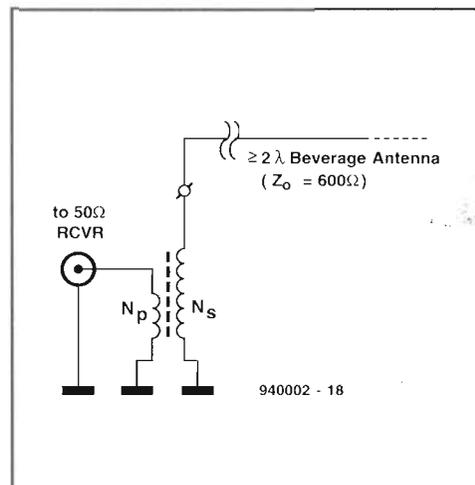


Fig. 8 Transformador a acoplar uma antena Beverage de 600 ohms a uma entrada de um receptor com 50 ohms.

mário e do secundário do transformador (Fig. 7a). A relação é:

$$(N_p / N_s) = \sqrt{(Z_p / Z_s)} \quad [4]$$

Com esta equação pode fazer-se o equilíbrio das impedâncias da fonte de alimentação e de carga nos circuitos de RF.

### Exemplo

Admita que temos um transistor amplificador de RF (3 a 30 MHz) com uma impedância de entrada da base ( $Z_s = 4 \Omega$ ) e que o transistor amplificador tem de ser equilibrado com uma impedância de saída da fonte de sinal,  $Z_p = 50 \Omega$ , como se mostra na Fig. 7b. Qual a razão de espiras necessária para efectuar o equilíbrio de impedâncias? Efectuemos o cálculo:

$$N_p / N_s = \sqrt{(50/3)} = 3,53:1$$

Uma regra expedita para calcular o valor da indutância do transformador é considerar que a reactância indutiva à frequência mais baixa, deve ser igual a quatro vezes a impedância que está ligada ao enrolamento. No caso acima referido, em que ao primário do transformador está ligada uma impedância de  $50 \Omega$ , a reactância indutiva do enrolamento primário deverá ser  $4 \times 50 \Omega$ , ou seja,  $200 \Omega$ . A indutân-

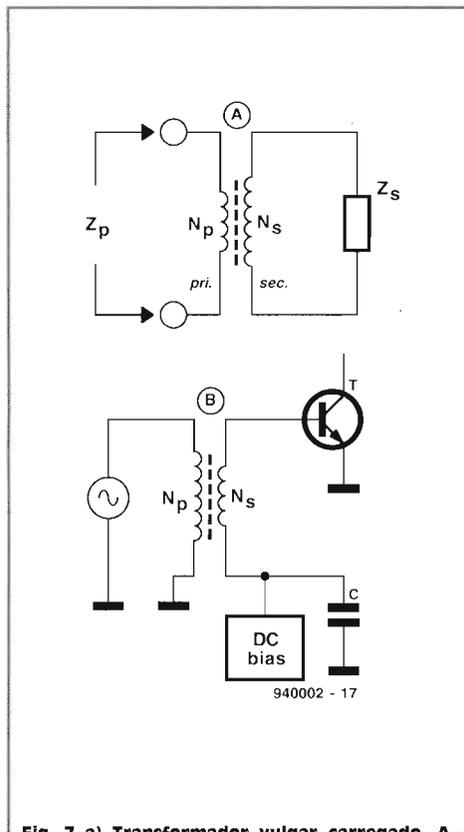


Fig. 7 a) Transformador vulgar carregado. A impedância vista pelo primário depende da impedância do secundário e da razão entre as espiras dos enrolamentos; b) Transformador abaixador de impedância acoplando uma entrada de  $50 \Omega$  a um transistor de RF.

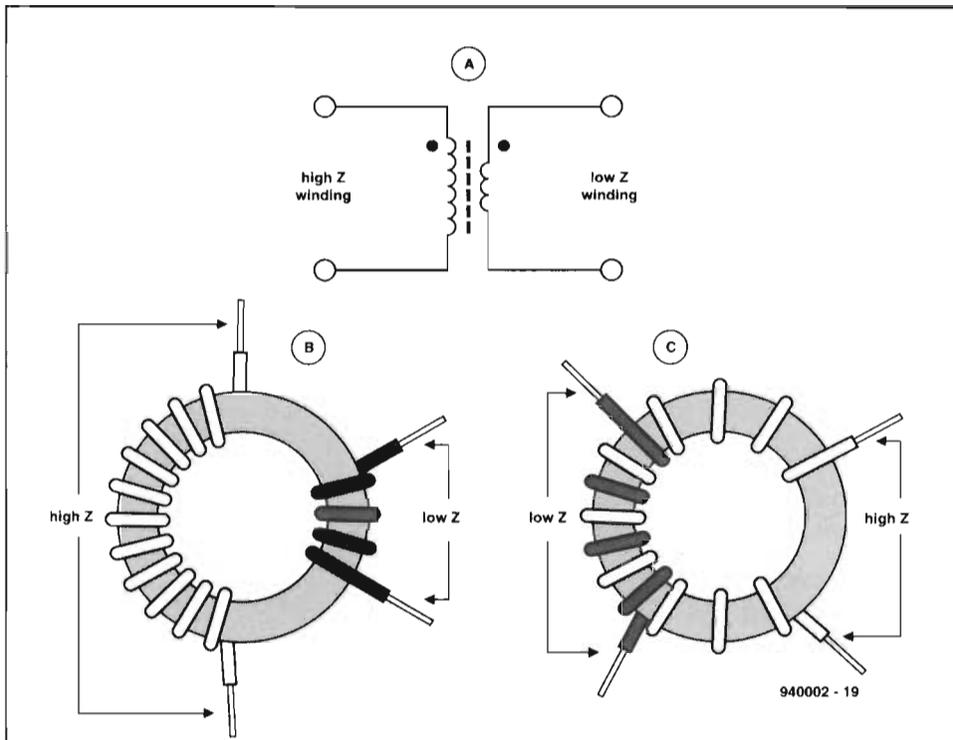


Fig. 9 a) Transformador de RF com dois enrolamentos; b) enrolamentos separados; c) enrolamentos intercalados.

cia deverá ser:

$$L = \frac{200 \Omega \cdot 10^6}{2 \pi F}$$

$$L = \frac{200 \Omega \cdot 10^6}{2 \pi \cdot 3000 \cdot 000} = 10,6 \mu\text{H}$$

Agora que já sabemos ser necessária uma indutância de 10,6 μH, podemos escolher um núcleo toroidal e calcular o número de espiras necessário. O núcleo T-50-2 (vermelho) abrange a banda de frequência correcta e tem uma dimensão que torna fácil a construção. Este núcleo tem um valor de  $A_L$  igual a 49, pelo que o número de espiras do primário deverá ser:

$$N = 100 \sqrt{(10,6 \mu\text{H}/49)} = 47 \text{ espiras}$$

Como a razão de espiras entre o primário e o secundário é 3,53 para 1, temos que o número de espiras do secundário terá de ser:

$$N_s = 47/3,53 = 13,3 \text{ espiras}$$

Se o enrolamento do primário tiver 47 espiras e o secundário 13 espiras, então transformaremos a impedância da base do transistor de 4 Ω para 50 Ω.

**Exemplo**

Construiu-se uma antena Beverage Wage para a banda de radiodifusão AM (530 a 1700 KHz) que apresenta uma impedância característica  $Z_o$  de 600 Ω. Qual é a razão de espiras de um transformador para alimentar a antena (Fig. 8) de forma a ficar equilibrada com a impedância de entrada do receptor que é de 50 Ω?

$$(N_s/N_p) = \sqrt{(600\Omega / 50\Omega)} = 3,46:1$$

O enrolamento do secundário deve possuir uma reactância indutiva de  $4 \times 600 \Omega$  ou seja, de 2400 Ω. Para se conseguir esta reactância indutiva à frequência de operação mais baixa, torna-se necessária uma indutância de:

$$L = \frac{2400 \Omega \cdot 10^6}{2 \pi \cdot 530 \cdot 000} = 721 \mu\text{H}$$

Analisando uma tabela de núcleos toroidais de pó de ferro, verifica-se que a liga n.º15

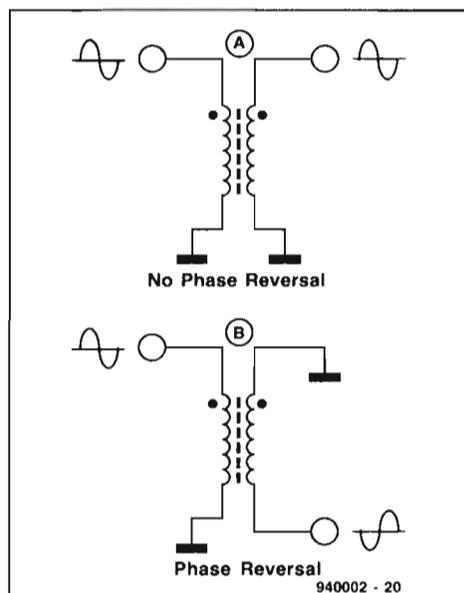


Fig. 10 Ligações do transformador: a) sem Inversão de fase; b) com Inversão de fase.

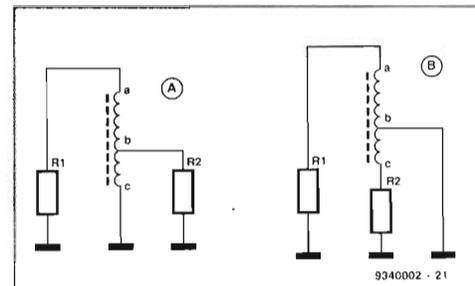


Fig. 11 Ligações do autotransformador: a) sem Inversão de fase; b) com Inversão de fase.

(vermelho/branco) funcionará bem na banda de 0,1 a 2 MHz. O núcleo T-106-15 possui um  $A_L$  de 345. Assim, o número de espiras necessário para criar uma impedância de 721 μH será:

$$L = 100 \sqrt{(721/345)} = 145 \text{ espiras}$$

e o enrolamento do primário deverá ter:

$$N_p = 145/3,46 = 42 \text{ espiras}$$

**Construção de transformadores convencionais**

Quando os enroladores de um transformador convencional são iguais, isto é, quando a razão de espiras é 1:1, é prática corrente efectuar os dois enrolamentos pelo método bifilar já

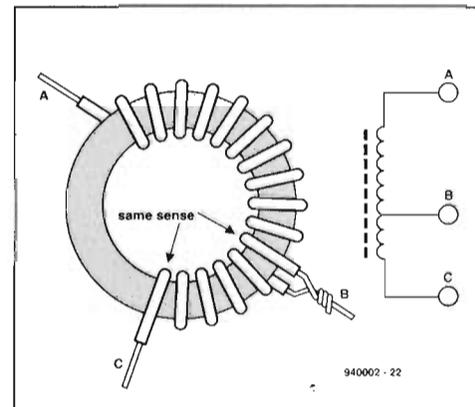


Fig. 12 Pormenor de um autotransformador.

atrás referido (Fig. 6). Um caso especial de transformadores de RF, que se denominam BALUN, utiliza apenas este método de enrolamento. Quando os enrolamentos não possuem o mesmo número de espiras, existem três formas de efectuar os enrolamentos. A Fig. 9a mostra um transformador de RF em que são utilizados enrolamentos de alta impedância (alta-Z) e de baixa impedância (baixa-Z). As duas formas de efectuar o enrolamento das bobinas mostram-se nas Figs. 9b e 9c. Com o método indicado na Fig. 9b o primário e o secundário ficam separados um do outro. Este método é o mais apropriado para utilizar em aplicações de banda estreita, como por exemplo no circuito de sintonia de um receptor de rádio. No método da Fig. 9c, as espiras dos dois enrolamentos ficam intercaladas. Este método pode utilizar-se em aplicações de banda estreita ou de banda relativamente larga. Mas se quisermos realmente um

transformador de banda larga, a melhor forma é fazermos os enrolamentos de baixa-Z e de alta-Z, utilizando o método bifilar. Vão-se enrolando os dois fios ao mesmo tempo até que o enrolamento de baixa-Z tenha o número de espiras necessário e a partir daí continua-se apenas com o fio do enrolamento de alta-Z.

## Ligação ao circuito

O símbolo dum transformador de RF convencional pode incluir dois pontos ou qualquer outro sinal gráfico, para indicar o sentido dos enrolamentos. O sinal também pode utilizar-se

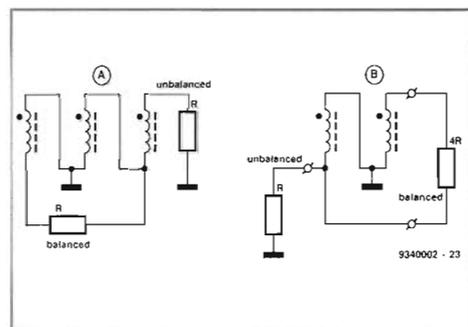


Fig. 13 a) Transformador BALUN 1:1; b) transformador BALUN 4:1.

para indicar a fase do sinal transmitido através do transformador. Na Fig. 10a os terminais correspondentes de ambos os enrolamentos estão ligados à massa, e assim o sinal de saída está em fase com o sinal de entrada. Na Fig. 10b, os terminais opostos dos dois enrolamentos estão ligados à massa e assim o sinal de saída está 180 graus desfasado em relação ao sinal de entrada.

## Autotransformadores

Os autotransformadores diferem dos transformadores convencionais por apenas possuírem um enrolamento, o qual, mediante uma tomada, fornece dois valores de espiras e de impedâncias. A Fig. 11 mostra duas ligações diferentes de um autotransformador. A ligação indicada no esquema da Fig. 11a origina um sinal de saída sem inversão de fase, enquanto a da Fig. 11b origina uma inversão de fase através da carga.

Existem duas formas de construção. Num dos métodos, o enrolamento é constituído por um fio contínuo. No ponto da tomada, executa-se uma pequena dobra do fio ou ponto de soldadura, que constitui a tomada de sinal que vai ligar ao circuito. Como se mostra na Fig. 12, no outro método as duas secções do enrolamento são separadas em dois enrolamentos distintos A-B e B-C. A ligação à tomada é feita com solda, para garantir boa condutividade eléctrica e rigidez mecânica. É muito importante que os dois enrolamentos conservem o mesmo sentido, pelo que os enrolamentos A-B e B-C devem ser executados na mesma direcção.

## BALUN, BAL-BAL e UN-UN

Existe um tipo especial de transformadores de RF, que por vezes é designado por «transformador de linhas de transmissão». Estes componentes estão comercializados em várias formas, dependendo do tipo de carga de cada enrolamento e da razão de impedân-

| Tipo de material | Código de cores   | $\mu r$ | Frequência(MHz) |
|------------------|-------------------|---------|-----------------|
| 41               | verde             | 75      | ---             |
| 3                | cinzento          | 35      | 0,05 - 0,5      |
| 15               | vermelho/branco   | 25      | 0,1 - 2         |
| 1                | azul              | 20      | 0,5 - 5         |
| 2                | vermelho          | 10      | 1 - 30          |
| 6                | amarelo           | 8       | 10 - 90         |
| 10               | preto             | 6       | 60 - 150        |
| 12               | verde/branco      | 3       | 100 - 200       |
| 0                | castanho (bronze) | 1       | 150 - 300       |

Tabela 5. Características dos diversos tipos de núcleos de pó de ferro.

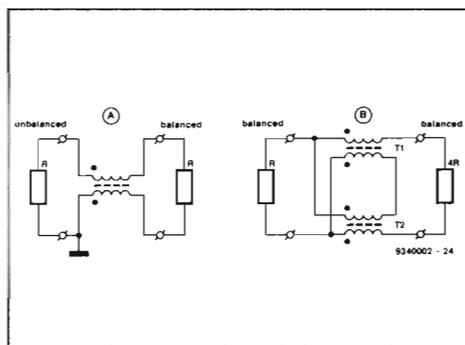


Fig. 14 a) Transformador Isolador (pseudo BALUN) de RF; b) transformador BAL-BAL, 4:1.

cias. O transformador BALUN retira o seu nome de BALanced-UNbalanced (equilibrado-desequilibrado), ou seja o tipo de fonte e de carga. No BALUN, uma das cargas fica desequilibrada em relação à massa (por exemplo, um cabo coaxial de saída de um emissor de 50  $\Omega$ ), enquanto a outra carga ficará equilibrada em relação à massa (por exemplo, a ligação a uma antena dipolo). Os radioamadores de onda curta (SWL) utilizam muitas vezes transformadores BALUN com uma razão de impedância 1:1 no ponto de alimentação de um dipolo e de outras antenas equilibradas, porque isso garante que o diagrama de recepção tenha a forma dum 8 e seja quase idealmente bidireccional. Existem comercializados outros tipos de transformadores BALUN vulgares, com uma razão de impedância de 4:1. Estes componentes podem utilizar-se para equilibrar a impedância do ponto de alimentação de uma antena de alta impedância, tal como a G5RV, o duplo dipolo, ou antena unifilar.

A Fig. 13 mostra os dois tipos mais vulgares de transformador de tensão BALUN. Na versão com a razão de impedâncias 1:1 mostrada na Fig. 13a existem três enrolamentos bifilares no mesmo núcleo, enquanto na versão 4:1 da Fig. 13b apenas existem dois enrolamentos bifilares. Em ambos os casos, é muito importante o sentido dos enrolamentos, que deve ser rigorosamente observado.

A Fig. 14 mostra um par de transformadores de RF. Embora o transformador da Fig. 14a seja vulgarmente designado nos livros técni-

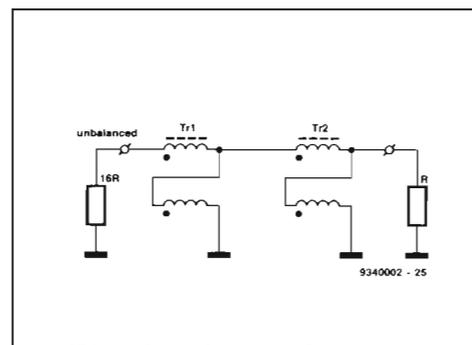


Fig. 15 Transformador UN-UN de RF.

cos por transformador BALUN 1:1, tecnicamente não pertence a esta categoria. Na verdade é um transformador de isolamento de RF. Desempenha a função de converter uma carga equilibrada numa carga não equilibrada que seja compatível com uma entrada não equilibrada.

O transformador que se mostra na Fig. 14b é do tipo BAL-BAL (equilibrado-equilibrado), pois possui uma carga equilibrada em ambos os terminais. A razão de impedâncias deste transformador é de 4:1. Pode ser utilizado para transformar em baixa impedância a alta impedância dos pontos de alimentação da antena, conservando o equilíbrio. É também utilizado ocasionalmente em circuitos de amplificação de potência. Na realidade, este circuito é constituído por dois transformadores interligados. O circuito da Fig. 15 mostra um transformador UN-UN, que tem uma carga não equilibrada em ambos os terminais. Na realidade, este componente é constituído por dois transformadores 4:1 em cascata, que originam uma razão de impedâncias de 16:1. Uma das utilizações deste transformador é a de transformar impedâncias extremamente baixas em 50  $\Omega$ , como pode ser necessário em amplificadores de potência de RF ou em algumas antenas verticais. Um exemplo pode ser a impedância da base (3 a 4  $\Omega$ ) de um transistor bipolar de um amplificador de potência de RF. Para fazer o equilíbrio com uma impedância de entrada de 50  $\Omega$ , pode utilizar-se o transformador UN-UN 16:1 que se mostra na Fig. 15. ■