



construa seu transformador de modulação

Por ALCIDES C. MORAES, PY1DBR

(Especial para ELETRÔNICA POPULAR)

Por destinar-se somente às frequências de voz, o transformador de modulação para estações de radioamador pode ser calculado empiricamente e construído com resultados satisfatórios.

NECESSITAVA de um transformador de modulação para 75 watts de áudio e por ser mais cômodo e bem mais rápido, dirigi-me às lojas especializadas para adquirir um que preenchesse os requisitos desejados.

Não foi fácil encontrar; além disso, o QSJ pedido por êle deixava-me um pouco assustado. Os oferecidos gentilmente por colegas não atendiam às exigências impostas pelo circuito a experimentar.

Graças a êsses fatores ou, talvez, mais por vaidade, resolvi ler um pouco sobre o assunto e, resumindo, partir para uma prova real. Cheguei a uma conclusão que considero satisfatória, tendo em vista as reportagens recebidas.

Desta feita, despido de vaidade, movido apenas pelo espírito de coleguismo, venho oferecer, a quem se interessar, êste modestíssimo trabalho, solicitando, inclusive, aos que dispuserem de tempo e conhecimento, que apresentem críticas.

Farei uma explanação sem detalhes matemáticos, ou de alta tecnologia, usando, também, êste vocabulário simples, como simples é o próprio transformador em seu aspecto físico.

Concluída a explanação, vamos calcular, como exemplo, o transformador que está sendo usado pelo colega que ora lhes escreve.

Vamos ao assunto:

1.ª ETAPA: Relação de Transformação

A carga no secundário do transformador em aprêço será constituída pelas amplificadoras finais do estágio de R.F. Esta carga, para efeito de cálculos, será considerada puramente resistiva e seu valor será dado pelo quociente entre a tensão anódica (E_a) do referido estágio e a intensidade da corrente de placa a ser usada (I_a); chamaremos a carga simplesmente de R, obtida pela expressão

$$R = \frac{E_a}{I_a}$$

A impedância das válvulas moduladoras, conhecida por Z_p , será encontrada nos manuais de características com o nome de resistência de carga de placa-a-placa, e esta é a resistência que o transformador equilibrará com R, isto é, R/Z_p .

Chamemos a relação de transformação de n, e que será expressa pela equação

$$n = \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{Z_p}}$$

2.ª ETAPA: Determinar a Seção Transversal do Núcleo de Ferro

Para êsta etapa, é necessário conhecer a potência de entrada de R.F., operação conhecida de todos os PY, expressa:

$$W = E_a \cdot I_a$$

onde

W é a potência em watts;
 E_a e I_a , tensão e corrente anódicas em volts e ampères, respectivamente.

O secundário do transformador deverá entregar uma potência de áudio equivalente a 50% da potência de entrada de R.F., como é requerido para 100% de modulação em placa (N. R. 1)

A potência de áudio é que nos interessa para o cálculo da seção do núcleo, determinada pela fórmula

$$A = 17 \cdot \sqrt{\frac{W}{f}}$$

onde

A é a área da seção em centímetros quadrados;
 17, constante;
 W é a potência de áudio;
 f é a frequência de áudio, tomada no limite prático inferior de 50 Hz.

3.ª ETAPA: Número de Espiras do Secundário

Simplem emprêgo da fórmula

$$N_s = 0,31 \times \frac{E_a \times 10^5}{A \times B \times f}$$

onde

N_s é o número de espiras do secundário;
 0,31 e 10^5 são constantes;
 E_a é a tensão anódica de R.F.;
 A é a área da seção em centímetros quadrados;
 f é a frequência de áudio (50 Hz) (N. R. 2)
 B é a densidade magnética, devendo-se empregar ferro de boa qualidade, 10.000 linhas por cm^2 , no mínimo.

4.ª ETAPA: Número de Espiras do Primário

Já se conhecem a relação de transformação (n, 1.ª etapa) e o número de espiras do secundário (N_s , 3.ª etapa).

O quociente resultante de N_s por n será N_p (número de espiras do primário). Expressão:

$$N_p = \frac{N_s}{n}$$

Convém notar que N_p será o total das espiras do primário, isto é, entre os extremos ligados às placas das válvulas moduladoras.

5.ª ETAPA: Determinação dos Fios a Empregar

A determinação da seção, diâmetro ou calibre do fio poderá ser feita pelo menos de duas formas: pela técnica ou pela prática; ambas darão resultados satisfatórios.

Considerando a solução técnica, têm-se, ainda, duas alternativas:

Uma delas seria adotar a orientação do engenheiro Norman L. Turner ("Teoria y Técnica del Bobinado de Maquinas Electricas"). Conforme tabela apresentada neste trabalho, diz êle que deve-se eleger uma densidade de corrente para os transformadores auto-esfriados, entre 0,496 e 0,81 milímetro quadrado por ampère.

Nos exemplos apresentados por Turner, êle utiliza a densidade de 0,5 mm^2 por ampère. Adotando esta técnica, a seção do condutor (S) seria igual ao produto da corrente (I) que circulará no enrolamento pela densidade (0,5). Assim, $S = I \cdot 0,5$; a corrente será tomada em ampères.

O diâmetro pode ser calculado partindo-se da seção, que é a área de um círculo e uma fórmula é:

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$

onde

TABELA AWG (Resumo)			
Nº	Diâmetro em mm		Corrente em ampères
	Nu	Esmaltado	
36	0,13	0,14	0,039
35	0,14	0,16	0,046
34	0,16	0,18	0,060
33	0,18	0,20	0,076
32	0,20	0,22	0,096
31	0,23	0,25	0,124
30	0,25	0,27	0,147
29	0,29	0,31	0,196
28	0,32	0,35	0,242
27	0,36	0,39	0,306
26	0,40	0,44	0,378
25	0,45	0,48	0,427
24	0,51	0,55	0,612
23	0,57	0,61	0,765
22	0,64	0,69	0,965
21	0,72	0,77	1,220
20	0,81	0,86	1,540
19	0,91	0,96	1,950
18	1,02	1,07	2,450
17	1,15	1,20	3,120
16	1,29	1,34	3,900
15	1,45	1,50	4,950
14	1,63	1,68	6,270
13	1,83	1,88	7,880
12	2,05	2,11	9,900

d é o diâmetro em mm

$$\pi = 3,14.$$

Pelo diâmetro ou seção, recorrendo-se a uma tabela de calibre de fios, obtemos o número correspondente.

Outra técnica seria a ensinada por A. A. Ferriol ("Electricidad"). Esta inicia-se determinando a densidade da corrente, sendo elemento de cálculo a medida menor da janela do núcleo de ferro.

Em seguida, calcula-se a seção do condutor e, posteriormente, o diâmetro.

As fórmulas são as seguintes:

1.º — Para densidade:

$$D = \frac{2,8}{\sqrt{b}}$$

onde

D é a densidade;

b é a medida menor da janela, em centímetros;

2,8 é constante.

2.º — Fórmula para seção do fio a ser usado no primário:

$$S = \frac{I_p}{D}$$

onde

S é a seção, em mm²;

I_p é a corrente anódica do primário, em ampères;

D é a densidade.

3.º — Seção do fio a ser empregado no secundário:

$$S = \frac{1,22 \times I_s}{D}$$

onde

1,22 é constante;

I_s é a corrente anódica do secundário, em ampères;

D é a mesma densidade para o primário.

A "solução" prática, como foi feita, será explicada por ocasião do exemplo prometido no início.

EXEMPLO

Para exemplo, são dadas as características do XMTR e do modulador, ambos de construção caseira, simples circuitos convencionais:

XMTR — Válvulas: uma 6AG7, uma 6L6 e duas 6DQ5 em paralelo como amplificadores finais de R.F.

Modulador — Amplificador classe AB1. Válvulas: uma 12AX7, uma 6C4 e duas 807.

Neste exemplo, seguiremos às etapas da explanação:

1.º ETAPA

Dados: R.F., duas 6DQ5 em paralelo

$$E_a = 600 \text{ volts (nas placas);}$$

$$I_a = 0,25 \text{ A (250 mA);}$$

Moduladoras: duas 807

$$600 \text{ volts em placa}$$

$$Z_p = 6.900 \Omega$$

Calculando R :

$$R = \frac{E_a}{I_a} = \frac{600}{0,25} = 2.400 \Omega$$

A relação de transformação será:

$$n = \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{Z_p}} = \frac{\sqrt{2.400}}{\sqrt{6.900}} = 0,58$$

ou seja, 0,58 espira no **secundário** para cada espira no primário, de extremo a extremo. Lembramos, na oportunidade, que o primário será provido de uma tomada central para entrada de $\pm B$ das 807.

2.º ETAPA

Potência de entrada de R.F.:

$$W = E_a \times I_a = 600 \times 0,25 = 150 \text{ W}$$

Potência de áudio necessária:

$$W = \frac{150}{2} = 75 \text{ W}$$

ou seja, 50% da potência de R.F.

Área da seção transversal do núcleo:

$$A = 17 \times \sqrt{\frac{W}{f}} = 17 \times \sqrt{\frac{75}{50}} = 20,74$$

podemos aproximar para 21 centímetros quadrados.

Um detalhe: considere-se 21 cm² como sendo a área líquida, elemento que vai figurar na fórmula da 3.º etapa; porém, na montagem, consideremos o verniz isolante das lâminas, irregularidades, etc., devendo-se acrescentar uma percentagem de, no mínimo, 5% da área líquida. A área líquida mais o acréscimo será a área bruta e esta de-

terminará as medidas internas da fôrma para o enrolamento.

Observação: em nosso caso, a área bruta é de 23,37 cm² (3,8 × 6,15), quase tôdas as lâminas com ferrugem!...

3.ª ETAPA

Número de espiras do secundário (N_s)

Dados: E₂ = 600 volts

A = 21 cm² (área líquida);

B = 10.000;

f = 50 Hz;

10⁸ = 100.000.000

$$N_s = 0,31 \times \frac{600 \times 100.000.000}{21 \times 10.000 \times 50} = 1.771$$

ou, aproximando, N_s = 1.770 espiras.

4.ª ETAPA

Números de espiras do primário (N_p)

Dados: N_s = 1.771

n = 0,58;

$$N_p = \frac{1771}{0,58} = 3.053$$

podemos abandonar uma espira, para ficar um número par, ou seja, 1.526 espiras de cada extremo à tomada central.

5.ª ETAPA

Determinar os fios. Solução prática ou, mais prôpriamente, "no grito".

A corrente de repouso nas 807 está ajustada em 0,036 (36 mA); consideramos a média das cristas como sendo de 150 mA e estabelecemos outra média entre repouso e cristas. Assim, 0,036 + 0,15 = 0,186

$$\frac{0,186}{2} = 0,093 \text{ A, isto é, } 93 \text{ mA.}$$

Verifiquei na tabela AWG que o fio n.º 32 é para regime de trabalho contínuo a 96 mA e "por coincidência" era o fio que possuía. Dêste modo, ficou determinado o condutor para o primário.

Para o secundário foi mais fácil, considerando que a corrente anódica não varia quando se aplica modulação ao estágio de R.F. (modulação em placa). Sendo o regime de trabalho do transmissor de 250 mA nas 6DQ5, recorri à tabela e verifiquei ser o de n.º 28 para 242 mA e o n.º 27 para 306 mA.

Não dispunha de nenhum dos dois; por isso, depois de verificar o espaço necessá-

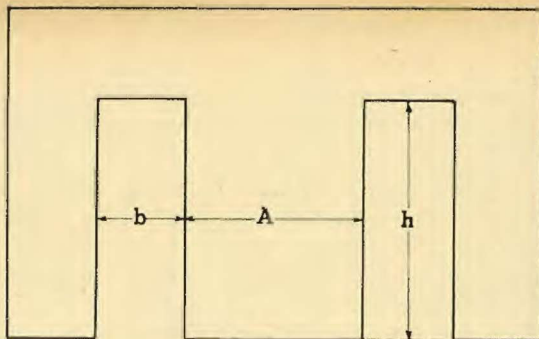


FIG. 1 — O núcleo utilizado em nosso exemplo tinha as seguintes dimensões: A = 3,8 cm; b = 1,9 cm; h = 5,7 cm; as outras medidas são proporcionais.

rio ao enrolamento, tendo em vista o núcleo de ferro, adquirei o fio n.º 27 para o secundário.

Este processo poderá afetar o equilíbrio de impedâncias, mas se isto acontecer, não chegará a ser observado pela audição normal.

Nota: Este transformador trabalha frio (temperatura ambiente).

Agora, para comparação entre o que foi feito e a orientação técnica, vamos recalcular por este segundo método, considerando os dados do nosso transformador.

Segundo Turner: Primário:

$$I_p = 0,093 \text{ A}$$

$$\text{Densidade: } D = 0,5 \text{ A/mm}^2$$

Seção do fio:

$$S = 0,093 \times 0,5 = 0,0465 \text{ mm}^2$$

Diâmetro:

$$d = \sqrt{\frac{4 S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0465}{3,14}} = 0,24 \text{ mm}$$

Isto corresponde ao fio n.º 30 (d = 0,25 mm), como se poderá ver na tabela AWG.

Secundário:

$$I_s = 0,25 \text{ A}$$

$$D = 0,5$$

$$S = 0,25 \times 0,5 = 0,125 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0,125}{3,14}} = 0,39 \text{ mm}$$

O fio n.º 26 seria o indicado (d = 0,4 mm).

Segundo A. A. Ferriol:

O núcleo de ferro é constituído de lâminas do tipo "EI", com 0,5 mm de espessura, como se vê na Fig. 1. Para o cálculo da den-

sidade, há que subtrair de b o espaço ocupado pelo isolamento. Ocupou-se teoricamente 0,54 cm. Ficará então:

$$b = 1,9 - 0,54 = 1,36 \text{ cm.}$$

$$\text{Densidade: } D = \frac{2,8}{\sqrt{b}} = \frac{2,8}{\sqrt{1,36}} = 2,5$$

Seção do fio (primário):

$$S = \frac{l_p}{D} = \frac{0,093}{2,5} = 0,0372 \text{ mm}^2$$

Diâmetro do fio:

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,0372}{3,14}} = 0,21 \text{ mm}$$

O fio seria o n.º 31, de pouquíssima diferença do n.º 32 encontrado em nosso cálculo prático e do n.º 30 calculado pelo método de Turner.

Seção do fio (secundário):

$$S = \frac{1,22 \times l_s}{D} = \frac{1,22 \times 0,25}{2,5} = 0,122 \text{ mm}^2$$

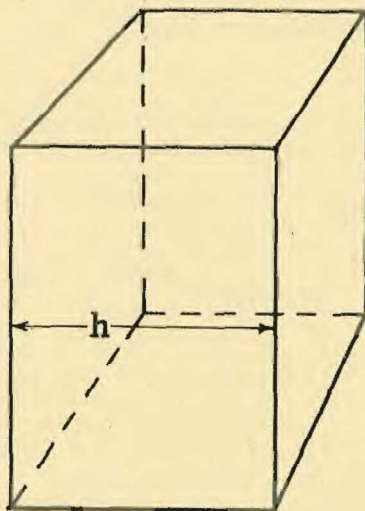
Diâmetro:

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,122 \times 4}{3,14}} = 0,39 \text{ mm}$$

Seria o fio n.º 26 ($d = 0,40 \text{ mm}$), conforme tabela AWG.

É fácil concluir que o diâmetro dos fios a empregar não constitui medida crítica.

FIG. 2 — Forma sobre a qual será feito o enrolamento. A medida h é a mesma da Fig. 1, isto é, 5,7 cm.



FÔRMA

Nota: Para não causar decepção e prejuízo aos colegas, devemos informar que este transformador foi enrolado a máquina e ocupou quase totalmente a janela do ferro. Quem fôr aproveitar os cálculos do exemplo oferecido, enrolando a mão, deverá usar ferro com janela um pouco maior, atentando para a área da seção do núcleo.

Há várias maneiras de verificar se a janela do núcleo do ferro comporta todo o enrolamento, sendo tôdas elas puramente "teóricas", mas dão uma idéia do que sucederá na prática.

A que se usou em nosso caso foi a seguinte:

No primário, fio n.º 32: diâmetro com esmalte = 0,22 mm.

Não é possível ocupar todo o espaço h, pois o enrolamento não pode tocar o ferro. Iniciou-se deixando um milímetro para cada lado, dispondo-se, portanto, de 55 mm.

Se uma espira ocupa 0,22 mm, 55 mm conterão x espiras. Daí,

$$x = \frac{55 \times 1}{0,22} = 250$$

x é, pois, o número de espira por capa ou camada de espiras.

O número de capas será:

Número de espiras do enrolamento

Número de espiras por camada

$$\text{No primário: } \frac{3052}{250} = 12,2$$

Consideremos 13 camadas.

Entre uma camada e outra há isolamento de aproximadamente 0,1 mm (papel). Temos 12 entrecapas, perfazendo uma espessura de 1,2 mm. A altura seria o produto do número de camadas pelo diâmetro (0,22 mm), mais a espessura do papel. Portanto,

$$h = (13 \times 0,22) + 1,2 = 4,06 \text{ mm.}$$

Esta a altura teórica a ser ocupada pelo primário.

O mesmo raciocínio será feito para o secundário, acrescentando-se, em um e outro, no mínimo, 10% para enrolamento a máquina e 20% quando fôr a mão. Não esquecer que a fôrma, o acabamento e o isolante entre primário e secundário ocupam espaço.

A título de ilustração:

EDIÇÕES "ARBÓ"

(em espanhol)

001 — ARRL — The Radio Amateur's Handbook — Última edição (1971) em espanhol. Cr\$ 56,00 *

009 — RCA — Valvulas de Recepton Manual RC-27 — Características, aplicações, circuitos típicos para montagem de aparelhos e demais informações sobre válvulas de recepção para rádio e TV da série RCA. Cr\$ 22,00 *

013 — Philips — Manual de Valvulas Miniwatt — Características das válvulas Miniwatt de rádio-recepção, áudio e TV; aplicações, circuitos e esquemas típicos. Cr\$ 32,00 *

018 — Everitt — Ingeniería de Comunicaciones — Livro fundamental para o estudo da engenharia de telecomunicações, notadamente a análise e a síntese das redes lineares, bem como sistemas de modulação e transformação de transitórios. Cr\$ 45,00 *

080 — Ramo — Introducción a las Micro Ondas — Elementos básicos da transmissão e recepção de rádios em frequências muito elevadas. Cr\$ 11,00 *

291 — Font — Arme su Primer Televisor — Livro prático para montadores de TV, descrevendo os componentes e a realização prática de um receptor típico de televisão, com esquemas simbólicos e chapeados. Cr\$ 18,00 *

368 — D'Airo — Service de Receptores a Transistores — Circuitos transistorizados para rádio-recepção; técnica de consertos em rádios de transistor; substituição e equivalência de transistores. Cr\$ 11,00 *

393 — Terman — Ingeniería Electronica y de Radio — Obra consagrada, p/engenheiros eletrônicos e técnicos adiantados, sobre análise e cálculo dos circuitos de rádio e eletrônica. Cr\$ 63,00 *

514 — Terman & Petit — Mediciones Electronicas — Livro p/Engenheiros e técnicos adiantados, especialmente dedicado à técnica de medidas na moderna eletrônica. Cr\$ 40,00 *

840 — Stacy — Electronica Biologica y Medica — Manual prático sobre equipamentos eletrônicos para consultórios médicos e laboratórios de análises, sua escolha, instalação e diagnóstico de defeitos. Cr\$ 18,00 *

1040 — Hooton — Antenas para Radioaficionados — Monografia prática sobre antenas p/radioamadores: fundamentos, escolha, projeto, construção e ajuste. Cr\$ 31,00 *

1146 — RCA — Circuitos Integrados Lineales IC-42 — O que são, como se utilizam e quais as características dos circuitos integrados; 160 esquemas de aplicações práticas. Cr\$ 36,00 *

* Preços sujeitos a alteração.

(Instruções e Fórmula de Pedidos na primeira página desta revista)

LOJAS DO LIVRO ELETRÔNICO

RIO DE JANEIRO — SÃO PAULO

Av. Mal. Floriano, 148 — Rua Vitória, 379/383

Reembolso: Caixa Postal 1131 — ZC-00 — Rio de Janeiro — GB

Altura do primário	4,06 mm
Altura do secundário	6,40 mm
	10,46 mm
Mais 10%	1,04 mm
Total primário + secundário	11,50 mm

Prosseguindo:

Enrolamentos	11,50 mm
Fôrma	1,50 mm
Isolante entre prim. e sec.	1,00 mm
Acabamento	0,50 mm
TOTAL	14,50 mm
Janela do ferro	19,00 mm
Diferença	4,50 mm

Como se vê, deveria sobrar um espaço de 4,50 mm, mas na prática não houve tanta sobra; ficou uma folga de pouco mais que um milímetro.

Observações: O secundário deverá ser enrolado sobre o primário. Coloque entre capas, isolamento de papel, cuja espessura não necessita exceder a um décimo de milímetro. Empregue material isolante de boa qualidade.

Concluído o enrolamento, aqueça-o numa estufa e mantenha-o aquecido durante 2 a 3 horas à temperatura de aproximadamente 45°C. Não deixe queimar antes da experiência!...

Mergulhe somente o enrolamento ainda quente em um verniz apropriado para transformadores durante uns 10 minutos. Não empregue verniz cujo solvente seja água ou álcool.

O núcleo foi montado cruzando as lâminas de 4 em 4 (N. R. 3) (OR 675)

N. R. 1 — A potência nominal do modulador deverá ser algo maior que esta "potência no secundário", a fim de compensar as perdas no transformador.

N. R. 2 — Para frequências de voz, poder-se-ia adotar frequência mais alta, mas em se tratando de cálculo simplificado, sem finalidades industriais, é aceitável o valor indicado.

N. R. 3 — Devido à corrente contínua no secundário, poderá resultar mais vantajoso não cruzar as lâminas, deixando-se, em vez disso, um entreferro com espessura adequada. A fórmula prática para o entreferro será: $L_e = L \times 0,0023$, onde L_e é a espessura do entreferro e L o comprimento médio do circuito magnético, ambos em centímetros.