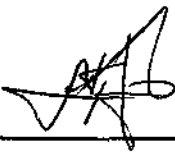


1. Publicação nº <i>INPE-2313-NTE/179</i>	2. Versão	3. Data <i>Fev., 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DEE</i>	Programa <i>BALÃO</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>FILTRO HELICOIDAL</i> <i>FILTRO UHF</i>			
7. C.D.U.: <i>621.372.54</i>			
8. Título <i>FILTRO HELICOIDAL DE TRÊS SEÇÕES EM 240 MHz</i>		<i>INPE-2313-NTE/179</i>	10. Páginas: <i>58</i>
			11. Última página: <i>A.3</i>
			12. Revisada por <i>Plinio Tissi</i>
9. Autoria <i>Satoshi Koshima</i>			13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i>
Assinatura responsável 			
14. Resumo/Notas <i>Este relatório apresenta o projeto de um filtro helicoidal de três seções que opera em 240 MHz. Resultados experimentais constataram a excelente qualidade desse tipo de filtro, caracterizado pela baixa perda. Sem cuidados extremos, foi obtido um filtro com perda de inserção menor que 0,6 dB com característica plana dentro da faixa e com atenuação fora da faixa maior que 50 dB. Com a douração das espiras e alodinação do corpo de filtro obteve-se um filtro com perda de inserção menor que 0.3 dB.</i>			
15. Observações			

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de citar meus agradecimentos a Noburu Sato pela colaboração indispensável na realização física do filtro helicoidal. Também ao Dr. Carlos Eduardo Santana pelas sugestões que muito ajudaram para se chegar à configuração final do filtro, e ao Eng. Wilton Fleming pela ajuda inestimável na ocasião do ajuste e medição do filtro protótipo, assim como ao Dr. Plínio Tissi pelas sugestões para a melhoria desse relatório.

ABSTRACT

This report presents the design of a three-section helical filter operating in 240 MHz. Experimental results confirmed the exceptional quality of this type of filter, characterized by low loss. Without extreme care, a filter was obtained with insertion loss under 0.6 dB, good flatness in the passband, and a stopband attenuation greater than 50 dB. With the gilding of the helical spiral and covering of the filter body with alodine it was possible to achieve a filter with insertion loss less than 0.3 dB.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	<i>vii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>ix</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>xi</i>
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - MÉTODOS E FORMULÁRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DO FILTRO</u>	3
2.1 - Determinação dos parâmetros do ressoador	3
2.1.1 - Frequência de ressonância do ressoador helicoidal	3
2.1.1.1 - Restrições existentes sobre os parâmetros	5
2.1.2 - Dimensionamento dos parâmetros do ressoador	5
2.1.3 - Cálculo da impedância característica do ressoador	8
2.2 - Determinação do número de ressoadores	9
2.2.1 - Instruções para utilização do nomôgrafo para filtros Butterworth	11
2.3 - Cálculo da perda de inserção do filtro	12
2.3.1 - Q do ressoador	12
2.3.2 - Cálculo da perda de inserção	12
2.3.3 - Determinação da dimensão D do filtro	15
2.4 - Determinação dos acoplamentos	16
2.4.1 - Acoplamento de entrada/saída	16
2.4.2 - Acoplamento entre os ressoadores	18
2.4.2.1 - Determinação das aberturas das janelas de acoplamento .	19
<u>CAPÍTULO 3 - DIMENSIONAMENTO DO FILTRO HELICOIDAL PARA TELEMETRIA</u>	
<u>EM 240 MHz</u>	21
3.1 - Especificação do filtro de telemetria	21
3.2 - Determinação do número de ressoadores	22
3.3 - Determinação da dimensão D	22
3.3.1 - Cálculo da perda de inserção	22
3.4 - Dimensionamento do ressoador	24
3.5 - Acoplamento de entrada/saída	25
3.6 - Acoplamento entre os ressoadores	26

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO 4 - CONSTRUÇÃO DO FILTRO HELICOIDAL</u>	27
<u>CAPÍTULO 5 - TESTES DOS FILTROS CONSTRUÍDOS</u>	29
5.1 - Teste do filtro protótipo	29
5.2 - Teste do filtro definitivo	30
5.2.1 - Perda de transmissão	31
5.2.2 - Perda de retorno	32
5.2.3 - Perda de inserção	34
<u>CAPÍTULO 6 - INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA PARA AJUSTE E MEDIÇÃO DO</u> <u>FILTRO</u>	37
6.1 - Ajuste de sintonia e acoplamento	37
<u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES</u>	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE A - TABELA DE VALORES PARA k e q (3 dB ABAIXO) PARA FILTROS BUTTERWORTH	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Corte de uma seção ressoadora do filtro helicoidal	4
2.2 - Nomógrafo para ressoadores helicoidais de blindagem com seções quadradas	8
2.3 - Nomógrafo para filtros Butterworth	10
2.4 - Mínimo relativo de Q descarregado, para filtros Butterworth e Chebyshev	14
2.5 - Acoplamento de saída/entrada por derivação	16
2.6 - Corte ilustrativo de abertura de acoplamento entre os ressoadores	19
4.1 - Corte ilustrativo de detalhe construtivo do filtro helicoidal	28
5.1 - Resposta em frequência do filtro helicoidal definitivo	31
5.2 - Perda de retorno do acesso 1 do filtro helicoidal definitivo	33
5.3 - Perda de retorno do acesso 2 do filtro helicoidal definitivo	33
5.4 - Perda de inserção do filtro helicoidal definitivo	35
6.1 - Instrumentação para medição e ajuste do filtro	37

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Equações de perda de inserção para respostas Butterworth de baixa perda	12
2.2 - Equações de perda de inserção para qualquer tipo de resposta	13
2.3 - Valores de q_1 para filtros Butterworth	18
3.1 - Especificação desejada do filtro	21
5.1 - Características medidas do filtro protótipo	30
5.2 - Características medidas do filtro definitivo	32

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_{\max} - Máxima ondulação da resposta do efeito na faixa de passagem.
- A_{\min} - Mínima rejeição do filtro na frequência estipulada.
- B - Banda na frequência de rejeição.
- $B_{3\text{dB}}$ - Banda de 3 dB.
- b - Comprimento axial total da espira helicoidal.
- C - Capacitância por polegada do comprimento axial do ressoador helicoidal.
- D - Diâmetro da blindagem da seção circular do ressoador.
- d - Diâmetro médio da espira helicoidal.
- d_o - Diâmetro t.
- f_o - frequência central do filtro.
- H - Altura total da blindagem cilíndrica de seção circular.
- h_{12} - Altura da abertura de acoplamento entre os ressoadores 1 e 2.
- h_{13} - Altura da abertura de acoplamento entre os ressoadores 2 e 3.
- h_p - Altura do ponto de derivação em relação ao ponto terminal da terra.
- K - coeficiente de acoplamento do filtro.
- L - Indutância por polegada de comprimento axial do ressoador helicoidal.
- N - Número de espiras do ressoador helicoidal.
- n - Número de espiras por polegada do ressoador.
- Q_o - Fator de mérito a ser introduzido nas equações de perda de inserção.
- Q_d - Fator de mérito duplamente carregado.
- Q_{\min} - Mínimo valor de fator de mérito descarregado.
- Q_u - Fator de mérito descarregado do ressoador.

- R_{tap} - Impedância no ponto de derivação (normalmente 50Ω).
- Z_0 - Impedância característica do ressoador.
- Ω - razão entre $B/B_{3\text{dB}}$.
- τ - Passo da espira helicoidal.
- θ - Ângulo elétrico do ponto de mínima de tensão.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O custo de um filtro helicoidal é relativamente elevado, encarecendo mais ainda quanto mais restrigente for a exigência de baixa perda, isso devido à precisão exigida nas dimensões das cavidades ressonantes, assim como das espiras helicoidais, além do tratamento superficial necessário nas paredes metálicas dos ressoadores.

Entretanto, quando se deseja um filtro de baixa perda na faixa de VHF e UHF, o filtro helicoidal é uma opção a ser considerada, isto por duas razões principais: baixa perda de inserção e sua dimensão reduzida.

A parte teórica do filtro helicoidal está apresentada detalhadamente no livro de Zverev (1967), onde podem ser encontrados toda a formulação e os diagramas para o cálculo das dimensões de filtros helicoidais com seções quadradas e circulares, para qualquer número de seções e para diversos tipos de filtros. Assim sendo, foi incluído neste relatório, tão somente a formulação de Zverev, apresentada na forma mais concisa, para projetar filtros helicoidais com respostas Butterworth.

Essa formulação foi aplicada para projetar um filtro helicoidal de três seções circulares, que foi construído e testado.

O filtro protótipo não funcionou inicialmente devido à insuficiência de acoplamento entre as seções ressonantes, mas, uma vez verificada essa deficiência, foram feitas algumas modificações, após o que foi obtida uma configuração final para o filtro helicoidal, que satisfaz a contento a especificação requerida.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS E FORMULÁRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DO FILTRO

Para o dimensionamento de filtro, recorreu-se à referência citada, que apresenta com detalhes, projetos de filtros helicoidais de seções quadradas e circulares, para número de seções quaisquer e para diversos tipos de filtros.

Limitou-se a apresentar neste trabalho, de forma mais concisa, a formulação, as tabelas e as cartas necessárias para se projetar filtros helicoidais do tipo Butterworth.

2.1 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO RESSOADOR

As dimensões do filtro são derivadas basicamente da fórmula da frequência de ressonância, válida para determinados intervalos dos parâmetros em questão.

2.1.1 - FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DO RESSOADOR HELICOIDAL

Conforme Zverev (1967) a indutância e a capacitância do ressoador helicoidal são determinadas pelas fórmulas abaixo:

$$L = 0,025 n^2 d^2 [1 - (d/D)^2] \mu\text{H por polegada de comprimento axial} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{0,75}{\text{Log}_{10}(D/d)} \mu\text{F por polegada de comprimento axial} \quad (2.2)$$

onde os parâmetros geométricos estão indicados na Figura 2.1 e são:

L: indutância equivalente do ressoador em μH por polegada de comprimento axial.

C: capacitância equivalente do ressoador em μF por polegada de comprimento axial.

d: diâmetro médio da espira helicoidal em polegadas.

D: diâmetro interno da blindagem em polegadas.

$n = \frac{1}{\tau}$: número de voltas por polegada, onde τ é o passo da hêlice em polegada.

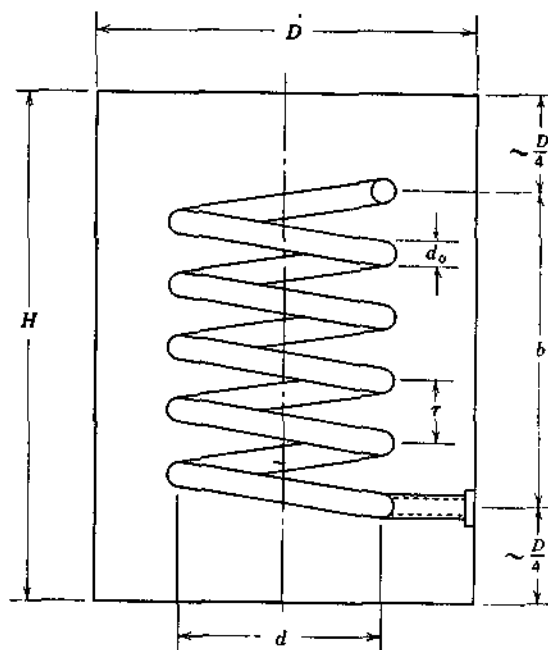


Fig. 2.1 - Corte de uma seção ressoadora do filtro helicoidal.

A frequência de ressonância é encontrada, usando-se a fórmula abaixo

$$f_0 = \frac{235}{b \sqrt{LC}} \quad \text{em MHz} \quad (2.3)$$

onde b é o comprimento axial total da hêlice, conforme a Figura 2.1.

Essa fórmula foi obtida impondo-se que o comprimento total da espira seja igual a $\lambda/4$ da onda guiada, levando-se em conta o efeito das bordas e a capacitância própria da espira.

Substituindo-se as Fórmulas 2.1 e 2.2 em 2.3 e considerando-se que $b\tau = N$, número total de espiras, segue a expressão abaixo:

$$f_0 = \frac{1720}{ND} \left\{ \frac{\text{Log}_{10}\left(\frac{D}{d}\right)}{\left(\frac{d}{D}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]} \right\} \quad (2.4)$$

2.1.1.1 - RESTRICÇÕES EXISTENTES SOBRE OS PARÂMENTROS

A fórmula para frequência de ressonância 2.4 é válida tão somente quando todas as restrições abaixo forem satisfeitas:

$$1,0 < \frac{b}{d} < 4,0 \quad (2.5)$$

$$0,45 < \frac{d}{D} < 0,6 \quad (2.6)$$

$$0,4 < \frac{d_0}{\tau} < 0,6 \quad \text{para} \quad \frac{b}{d} = 1,5 \quad (2.7)$$

$$0,5 < \frac{d_0}{\tau} < 0,7 \quad \text{para} \quad \frac{b}{d} = 4,0 \quad (2.8)$$

$$\tau < \frac{d}{2} \quad (2.9)$$

2.1.2 - DIMENSIONAMENTO DOS PARÂMENTROS DO RESSOADOR

Como pode ser visto na Fórmula 2.4, a frequência de ressonância do filtro helicoidal é função de três variáveis, ou seja, N , D e da relação D/d . Sendo assim, pode-se escolher arbitrariamente, mas

satisfazendo ainda as restrições já citadas, duas dessas variáveis e determinar a terceira, recorrendo-se à Expressão 2.4.

Zverev (1967) em seu trabalho sugere tomar $\frac{d}{D} = 0.55$. Assim, entrando-se com esse valor na Expressão 2.4, tem-se

$$N = \frac{1900}{f_0 D} \text{ voltas} \quad (2.10)$$

Desse modo é possível determinar tanto d e N quando se impõem valores para f_0 e D.

O comprimento axial total b é encontrado impondo-se $\frac{b}{d} = 1.5$, segundo a sugestão de Zverev (1967), valor esse que está no intervalo permitido, conforme a Expressão 2.5. Como $d = 0.55 D$, obtêm-se então:

$$b = 0,825 D \quad (2.11)$$

O comprimento axial da cavidade ressonante H, conforme recomendação de Zverev (1967) deve ser dado pela Expressão:

$$H = b + \frac{D}{2} \quad (2.12)$$

O diâmetro d_0 deve ser escolhido de forma que seja satisfeita a Expressão 2.7.

Resumindo, são empregadas as seguintes fórmulas para a determinação dos parâmetros do ressonador, em função de f_0 e D:

$$d = 0,55 D \quad (2.13)$$

$$N = \frac{1900}{f_0 D} \quad (2.14)$$

$$b = 1,5 d = 0,825 D \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{l}{n} = \frac{b}{N} = \frac{f_0}{2303} D^2 \quad (2.16)$$

$$0,4 < \frac{d_0}{\tau} < 0,6 \quad (2.17)$$

$$H = b + \frac{D}{2} \quad (2.18)$$

Formulário semelhante é apresentado por Zverev para filtro helicoidal com seção quadrada, sendo s a largura do quadrado com $s = D/1,2$, tendo-se assim:

$$d = 0,66 s \quad (2.19)$$

$$N = \frac{1600}{f_0 s} \quad \text{para} \quad \frac{d}{D} = 0,55 \quad (2.20)$$

$$b = s \quad \text{para} \quad \frac{b}{d} = 1,5 \quad (2.21)$$

$$\tau = \frac{l}{n} = \frac{b}{N} = \frac{f_0 s^2}{1600} \quad (2.22)$$

$$H = 1,6 s \quad (2.23)$$

Esse formulário está sintetizado no nomograma da Figura 2.2, reproduzido da página 502 do texto de Zverev (1967).

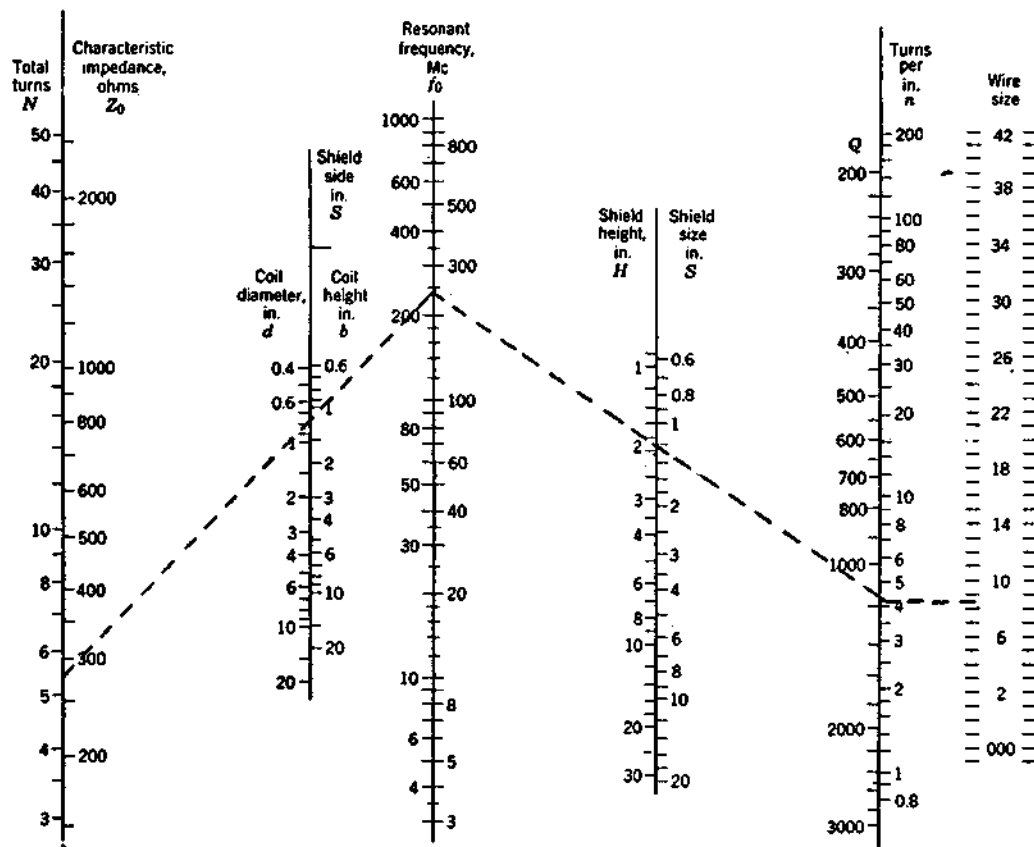


Fig. 2.2 - Nomôgrafo para ressoadores helicoidais de blindagem com seções quadradas.

2.1.3 - CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DO RESSOADOR

A impedância característica do ressoador é um parâmetro que vai ser utilizado no cálculo do acoplamento de entrada/saída e é derivado das expressões para L e C, respectivamente 2.1 e 2.2, segundo fórmula conhecida, ou seja:

$$Z_0 = 1000 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.24)$$

Substituindo-se L e C tem-se

$$Z_0 = 183 n d \left[\left(1 - \frac{d}{D}\right)^2 \text{Log}_{10} \frac{D}{d} \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

Ao se impor $\frac{d}{D} = 0.55$ e $n = \frac{2303}{f_0 D^2}$, na expressão acima, obtêm-se:

$$Z_0 = \frac{98000}{f_0 D} \quad (2.26)$$

2.2 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE RESSOADORES

O número de ressoadores deve ser escolhido baseado nas considerações: a) o filtro deve satisfazer à especificação pedida; b) deve ter o menor número possível de seções.

A segunda condição decorre da exigência quanto à simplicidade de construção e também por minimizar a perda de inserção, que é crescente com o número de seções.

O cálculo do número de ressoadores dependerá da escolha do tipo de filtro, existindo tabelas que facilitam essa tarefa. Para esse projeto em particular, foi decidido em favor do filtro Butterworth por possuir boa resposta em fase e resposta aceitável em amplitude, aliado à simplicidade de implementação.

Para o cálculo do número de elementos, recorreu-se ao nôgrafa segundo a Figura 3.3, extraído da página 140 de Zverev (1967).

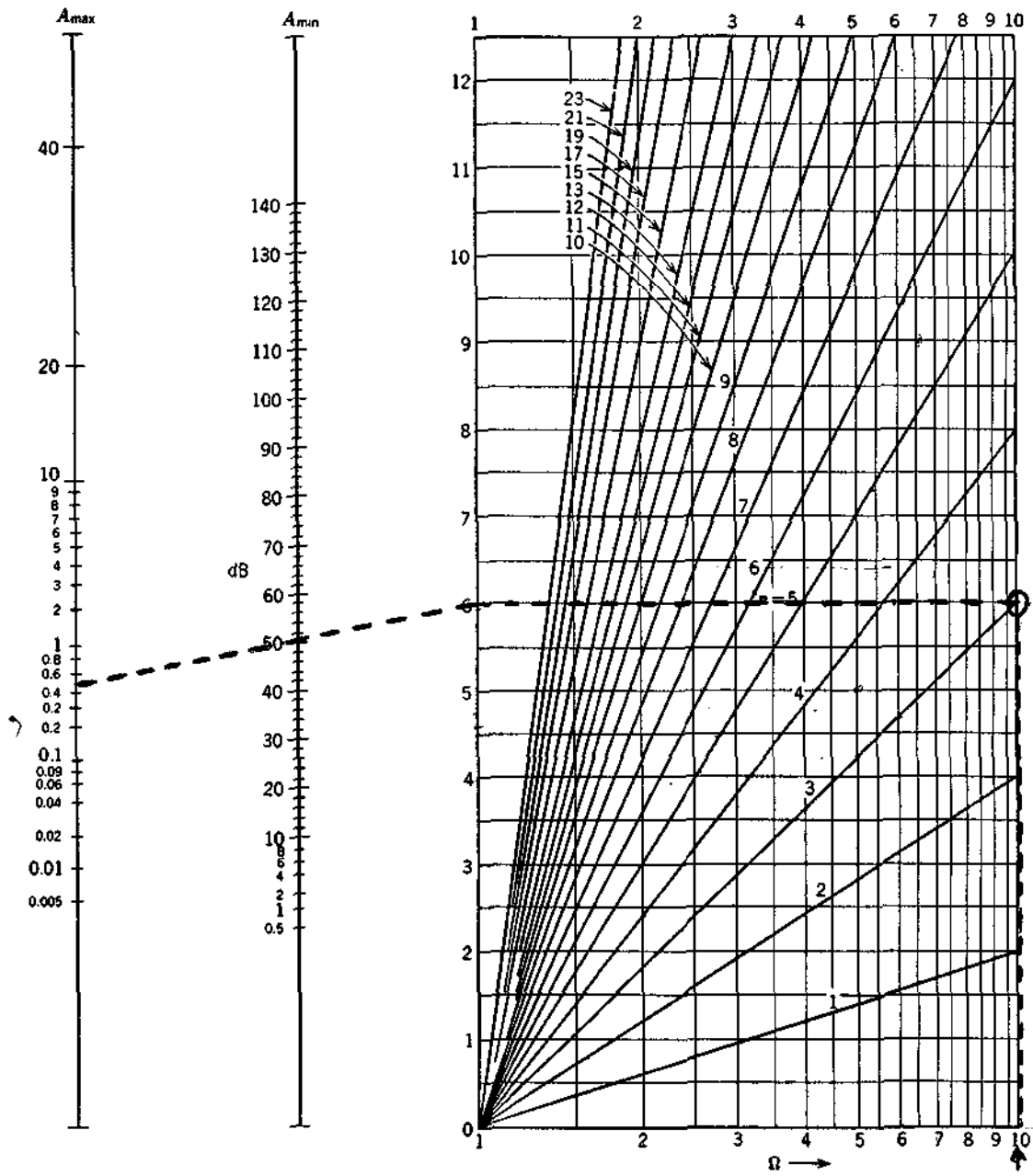


Fig. 2.3 - Nomôgrafo para filtros Butterworth.

2.2.1 - INSTRUÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO NOMÓGRAFO PARA FILTROS BUTTERWORTH

No nomógrafo aparecem três variáveis, a saber: A_{max} , A_{min} e Ω , sendo:

A_{max} : máxima ondulação da resposta de atenuação do filtro na faixa de passagem;

A_{min} : mínima atenuação na faixa de rejeição do filtro;

$\Omega = \frac{B}{B_{3dB}}$, onde B e B_{3dB} são larguras de banda na frequência de rejeição e de 3 db respectivamente.

O número de seções é encontrado do seguinte modo:

- i) Marcar os valores de A_{max} e A_{min} , requeridos pela especificação do filtro nos eixos correspondentes.
- ii) Traçar a reta, ligando esses dois pontos localizados nos eixos A_{max} e A_{min} , estendendo até o terceiro eixo vertical.
- iii) Da interseção da reta traçada e do terceiro eixo, traçar uma reta paralela ao eixo Ω .
- iv) Ao se tomar essa vertical a partir do valor Ω em que se deseja a atenuação, essa linha vai encontrar a horizontal traçada, conforme o passo 3.
- v) Esse ponto deve estar entre duas curvas numeradas. Escolher o maior n, como número de seções a ser adotado.

2.3 - CÁLCULO DA PERDA DE INSERÇÃO DO FILTRO

2.3.1 - Q DO RESSOADOR

O fator de mērito Q do ressoador descarregado pode ser determinado,utilizando-se a fōrmula apresentada por Zverev (1967), na qual foram consideradas as perdas na hēlice e na blindagem:

$$Q_n = Q_u D \sqrt{f_0} \quad (2.27)$$

A fōrmula acima ē vāvida com precisō da ordem de 10%, considerando-se tanto a hēlice como a blindagem de cobre.

2.3.2 - CÁLCULO DA PERDA DE INSERÇÃO

A perda de inserção ē calculada,empregando-se fōrmulas das Tabelas 2.1 e 2.2 conforme a perda seja baixa ou nāo, tabelas essas reproduzidas da pāgina 510 do Zverev (1967).

TABELA 2.1

EQUAÇÕES DE PERDA DE INSERÇÃO PARA RESPOSTAS BUTTERWORTH
DE BAIXA PERDA

$n = 2$	$IL = 20 \log \left(\frac{1.414}{Q_0} + 1 \right)$
$n = 3$	$IL = 20 \log \left(\frac{2}{Q_0^2} + \frac{2}{Q_0} + 1 \right)$
$n = 4$	$IL = 20 \log \left(\frac{2.62}{Q_0^3} + \frac{3.41}{Q_0^2} + \frac{2.62}{Q_0} + 1 \right)$
$n = 5$	$IL = 20 \log \left(\frac{3.24}{Q_0^4} + \frac{5.23}{Q_0^3} + \frac{5.23}{Q_0^2} + \frac{3.24}{Q_0} + 1 \right)$
$n = 6$	$IL = 20 \log \left(\frac{3.84}{Q_0^5} + \frac{7.42}{Q_0^4} + \frac{9.11}{Q_0^3} + \frac{7.43}{Q_0^2} + \frac{3.84}{Q_0} + 1 \right)$
$n = 7$	$IL = 20 \log \left(\frac{4.46}{Q_0^6} + \frac{10.0}{Q_0^5} + \frac{14.5}{Q_0^4} + \frac{14.6}{Q_0^3} + \frac{10.0}{Q_0^2} + \frac{4.46}{Q_0} + 1 \right)$

TABELA 2.2

EQUAÇÕES DE PERDA DE INSERÇÃO PARA QUALQUER TIPO DE RESPOSTAS

$n = 2$	$IL = 20 \log \left[\frac{\sqrt{q_n/q_1}}{k_{12}} \left(\frac{1}{Q_0} + \frac{1}{q_2} \right) \right]$
$n = 3$	$IL = 20 \log \left[\frac{\sqrt{q_n/q_1}}{k_{12}k_{23}} \left(\frac{1}{Q_0^2} + \frac{1}{q_n Q_0} + k_{23}^2 \right) \right]$
$n = 4$	$IL = 20 \log \left\{ \frac{\sqrt{q_n/q_1}}{k_{12}k_{23}k_{34}} \left[\frac{1}{Q_0^3} + \frac{1}{q_n Q_0^2} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2)}{Q_0} + \frac{k_{23}^2}{q_n} \right] \right\}$
$n = 5$	$IL = 20 \log \left\{ \frac{\sqrt{q_n/q_1}}{k_{12}k_{23}k_{34}k_{45}} \left[\frac{1}{Q_0^4} + \frac{1}{q_n Q_0^3} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2 + k_{45}^2)}{Q_0^2} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2)}{q_n Q_0} + k_{23}^2 k_{45}^2 \right] \right\}$
$n = 6$	$IL = 20 \log \left\{ \frac{\sqrt{q_n/q_1}}{k_{12}k_{23}k_{34}k_{45}k_{56}} \left[\frac{1}{Q_0^5} + \frac{1}{q_n Q_0^4} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2 + k_{45}^2 + k_{56}^2)}{Q_0^3} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2 + k_{45}^2)}{q_n Q_0^2} + \frac{(k_{23}^2 k_{56}^2 + k_{23}^2 k_{45}^2 + k_{34}^2 k_{56}^2)}{Q_0} + \frac{k_{23}^2 k_{45}^2}{q_n} \right] \right\}$
$n = 7$	$IL = 20 \log \left\{ \frac{\sqrt{q_n/q_1}}{k_{12}k_{23}k_{34}k_{45}k_{56}k_{67}} \left[\frac{1}{Q_0^6} + \frac{1}{q_n Q_0^5} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2 + k_{45}^2 + k_{56}^2 + k_{67}^2)}{Q_0^4} + \frac{(k_{23}^2 + k_{34}^2 + k_{45}^2 + k_{56}^2)}{q_n Q_0^3} + \frac{(k_{23}^2 k_{56}^2 + k_{23}^2 k_{67}^2 + k_{23}^2 k_{45}^2 + k_{34}^2 k_{56}^2 + k_{34}^2 k_{67}^2 + k_{45}^2 k_{67}^2)}{Q_0^2} + \frac{(k_{23}^2 k_{45}^2 + k_{23}^2 k_{56}^2 + k_{34}^2 k_{56}^2)}{q_n Q_0} + k_{23}^2 k_{45}^2 k_{67}^2 \right] \right\}$

A Tabela 2.1 é preferida devido à sua simplicidade, porém, caso $Q_u < 10 Q_{\min}$, deve-se forçosamente usar a fórmula exata, dada na Tabela 2.2. Q_{\min} é calculado segundo a fórmula abaixo:

$$Q_{\min} = q_{\min} \cdot \frac{f_0}{B_{3\text{dB}}} \quad (2.28)$$

Quanto a q_{\min} é calculado entrando-se no gráfico segundo a Figura 2.4.

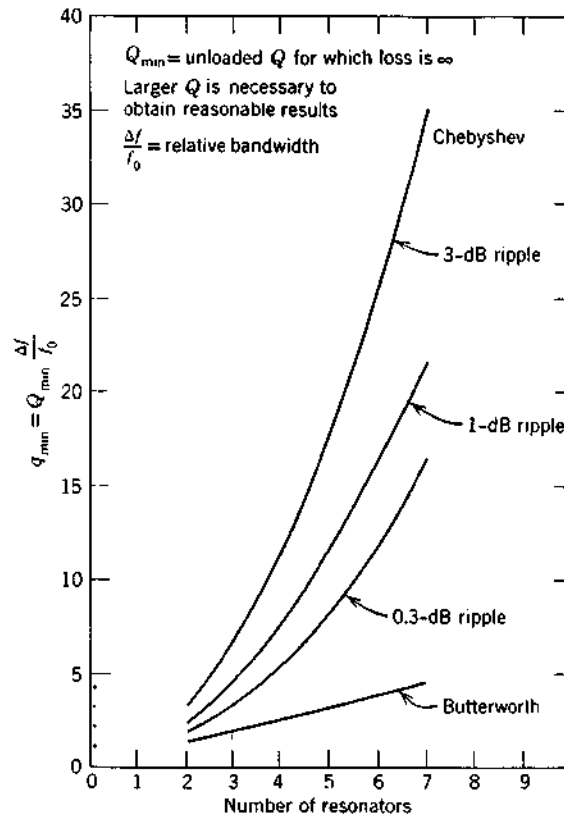


Fig. 2.4 - Mínimo relativo de Q descarregado, para filtros Butterworth e Chebyshev.

Os valores de q e k , que surgem nas fórmulas da Tabela 2.2, são dados no trabalho de Zverev, para diversos tipos de filtros. Neste relatório está reproduzida no Apêndice A, apenas a tabela de valores de k e q (para 3 db abaixo), aplicável a filtros Butterworth.

O valor de Q_0 é calculado segundo a fórmula abaixo:

$$Q_0 = Q_n \cdot \frac{B_{3\text{dB}}}{f_0} \quad (2.29)$$

Q_u é determinado usando-se a Expressão 2.27, e com valor de Q_0 acima, recorre-se à fórmula da Tabela 2.1 e 2.2, para calcular a perda de inserção.

2.3.3 - DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO D DO FILTRO

Como pode ser visto nos formulários que englobam as Expressões 2.13 a 2.18, todas as dimensões do ressoador dependem apenas de f_0 e D .

O valor de D é encontrado segundo as considerações abaixo:

- a) A dimensão D deve ser a menor possível por razão de economia de material e também de volume.
- b) O valor de D deve ser tal que a perda de inserção seja inferior à especificação requerida do filtro.

A perda de inserção pode ser calculada uma vez que se saiba o número de seções do filtro e a dimensão D (definindo-se D). Desse modo o diâmetro da cavidade ressoante D é encontrado, seguindo o procedimento abaixo:

- i) Estimar um valor inicial para D .
- ii) Calcular Q_n conforme a expressão 2.27, e com esse valor determinar Q_0 .
- iii) Usar o formulário da Tabela 2.1 ou 2.2 e calcular a perda de inserção.
- iv) Se a perda de inserção for bastante inferior à especificação requerida, escolher um valor de D menor e retomar o passo 2. Se for bem maior, aumentar o valor de D e retomar o passo 2.
- v) Se a perda de inserção calculada for aceitável, o valor de D está definido.

Sugere-se o método acima, visto que de outro modo deve
rã ser encontrada a solução de uma equação transcendental, o que nã
ẽ justificado pela complexidade exigida e também pela falta da nece
sidade de extrema precisão no valor de D.

2.4 - DETERMINAÇÃO DOS ACOPLAMENTOS

O problema de acoplamento ẽ dividido em duas partes: a)
acoplamento de entrada/saída e b) acoplamento entre os ressoadores.

2.4.1 - ACOPLAMENTO DE ENTRADA/SAIDA

Como pode ser visto na Figura 2.5, o acoplamento por de
rivação foi escolhido pelas seguintes razões: a) vantagem do ponto
de vista de produção e b) boa estabilidade relativa ao choque e ã vi
bração.

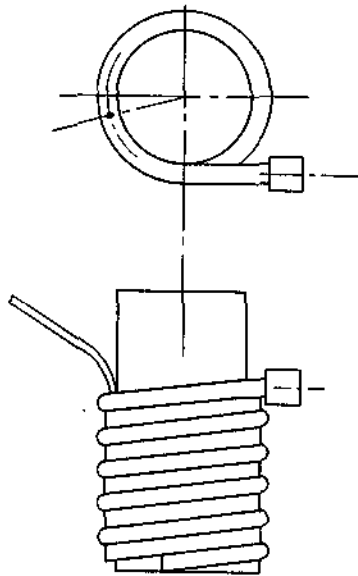


Fig. 2.5 - Acoplamento de saída/entrada por derivação.

A posição aproximada do ponto de derivação pode ser cal
culada, utilizando-se fórmulas abaixo; no entanto, o posicionamento
mais preciso requer ajuste experimental no laboratório.

As fórmulas abaixo apresentadas por Zverev (1967) foram derivadas baseadas na teoria de linha de transmissão, particularmente linhas ressoantes:

$$\frac{R_b}{Z_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{Q_d} - \frac{1}{Q_n} \right) \quad (2.30)$$

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{R_b}{2 Z_0} \cdot \frac{R_{\text{tap}}}{Z_0}} \quad (2.31)$$

onde R_{tap} é a impedância desejada no ponto de derivação, ou seja, em geral 50Ω , e Z_0 é a impedância característica do ressoador calculada conforme a Expressão 2.26.

O fator de mérito Q_d é o Q duplamente carregado de ressoadores de entrada e saída e é dado pela fórmula seguinte:

$$Q_d = Q_1 = Q_n = \frac{1}{2} \cdot q_1 \cdot \frac{f_0}{B_{3 \text{ dB}}} \quad (2.32)$$

onde:

n = número de ressoadores do filtro;

q_1 = fator de qualidade normalizado, dado nas tabelas de valores k e q , conforme a Tabela A1 no Apêndice A.

Para o caso especial de filtros Butterworth pode ser utilizada a Tabela 2.3.

TABELA 2.3

VALORES DE q_1 PARA FILTROS BUTTERWORTH

NÚMERO DE RESSOADORES	q_1
2	1.414
3	1.000
4	0.766
5	0.618
6	0.518
7	0.445

Na Fôrmla 2.31, θ é o ângulo elétrico a partir do ponto mínimo da tensão estacionária, no caso da terra da hélice. O ponto de derivação é então colocado a $N\theta/90$ voltas do terminal de terra da hélice, ou seja

$$N_0 = \frac{N\theta}{90} \quad (2.33)$$

2.4.2 - ACOPLAMENTO ENTRE OS RESSOADORES

No caso presente de filtro helicoidal, o acoplamento entre os ressoadores é feito através de janelas. Como pode ser visto na Figura 2.6, essas janelas não são nada mais que aberturas no topo ou no fundo, que interconectam as seções dos ressoadores.

A abertura no topo fornece acoplamento capacitivo, ao passo que no fundo esse acoplamento seria indutivo. Prefere-se a abertura no topo, pois com acoplamento capacitivo é possível realizar o ajuste fino de acoplamento por meio da inserção do parafuso colocado no topo da tampa metálica do ressoador.

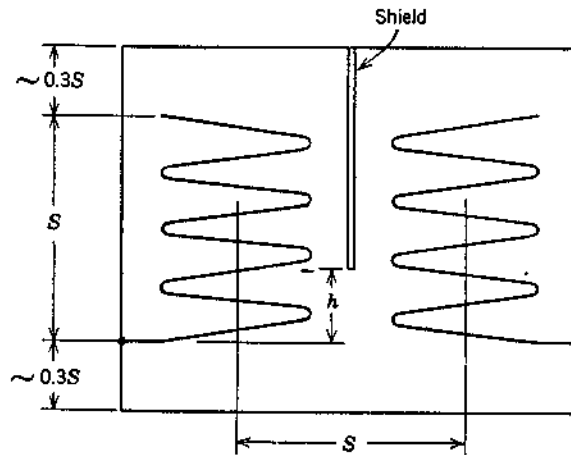


Fig. 2.6 - Corte ilustrativo de abertura de acoplamento entre os ressoadores.

2.4.2.1 - DETERMINAÇÃO DAS ABERTURAS DAS JANELAS DE ACOPLAMENTO

O problema de determinação precisa da dimensão da abertura da janela de acoplamento não foi resolvido ainda. Assim, há necessidade de se recorrer a tentativas experimentais.

A altura h da abertura pode ser determinada em primeira aproximação, usando-se a expressão obtida experimentalmente, conforme Zverev (1967):

$$K = 0.071 \left(\frac{h}{d}\right)^{1.91} \quad (2.34)$$

A variável de acoplamento K é dada pela expressão:

$$K = k \frac{B_3 \text{ dB}}{f_0} \quad (2.35)$$

onde k é a variável de acoplamento normalizado, obtido da tabela dada no Apêndice A.

A altura h é encontrada então aplicando-se a expressão:

$$h = d \left(\frac{K}{0.071} \right)^{\frac{1}{1.91}} \quad (2.36)$$

A precisão desse método de projeto é da ordem de 6% para frequência na faixa de 30 MHz. No trabalho de Zverev, não há nenhuma menção sobre o procedimento a ser adotado em frequências afastadas de 30 MHz, de modo que, nesses casos, a altura h da abertura deve ser de terminada experimentalmente.

Uma observação a ser feita é que a Expressão 2.34 foi obtida com filtro experimental de seção quadrada e com parede lateral com espessura 1/32 de polegada. Para filtro com espessura de parede de 1/16" Zverev recomenda multiplicar h pelo fator 1.075.

CAPÍTULO 3

DIMENSIONAMENTO DO FILTRO HELICOIDAL PARA TELEMETRIA EM 240 MHz

As dimensões do filtro, cuja especificação está apresentada abaixo, foram determinadas empregando-se as fórmulas e os métodos descritos no capítulo anterior.

3.1 - ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO DE TELEMETRIA

Esse filtro vai ser utilizado no sistema de antenas de rastreamento de balões estratosféricos, com a finalidade principal de rejeitar o sinal de telecomando de 460 MHz, emitido por uma antena transmissora localizada em terra. Caso esse filtro não fosse utilizado, o forte sinal de telecomando saturaria o receptor destinado a captar o sinal de telemetria emitido pelo balão estratosférico em 240 MHz.

O funcionamento do sistema de antenas impõe assim a especificação do filtro, apresentada na Tabela 3.1.

TABELA 3.1

ESPECIFICAÇÃO DESEJADA DO FILTRO

Frequência central = 235 MHz
Pontos de 1 dB = 230 e 240 MHz
Pontos de 3 dB = 225 e 245 MHz
Ondulação máxima na faixa = 0,5 dB
Perda por inserção = 0,5 dB
Atenuação fora da faixa \geq 60 dB
$Z_{in} = Z_{out} = 50 \Omega$

3.2 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE RESSADORES

Da especificação do filtro tem-se

$$B_{3dB} = 20 \text{ MHz}$$

$$A_{\max} = 0,5 \text{ dB}$$

$$A_{\min} = 60 \text{ dB para } \Omega = \frac{B}{B_{3dB}} \cong 20$$

Seguindo os passos descritos na Seção 2.2, quando se tem o filtro com 3 seções, do tipo Butterworth, em $\Omega = 20$ (onde se situa aproximadamente a frequência de telecomando em 460 MHz a ser rejeitado) tem-se um valor de A_{\min} maior que 60 dB, caso seja extrapolada a curva do nomógrafo da Figura 2.3 ($n = 3$).

Assim sendo resolveu-se por um filtro de três seções, tendo-se em vista a economia de material e principalmente a facilidade de ajuste da resposta do filtro.

3.3 - DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO D

Considerando-se o compromisso entre a simplicidade de montagem e a minimização da dimensão do filtro, foi escolhido o valor de 1 1/2 polegadas para D. Caso a perda de inserção calculada for muito distante do valor máximo especificado, 0,5 dB, esse valor de D deveria ser alterado.

3.3.1 - CÁLCULO DA PERDA DE INSERÇÃO

Da Expressão 2.27 tem-se

$$Q_n = 50 D \sqrt{f_0} = 50 \cdot 1,5 \sqrt{235} = 1150$$

Calculando Q_{\min} segundo a Fôrmla 2.28, com $q_{\min} = 2.0$ re tirado da Figura 2.4:

$$Q_{\min} = q_{\min} \frac{f_0}{B_3 \text{ dB}} = 2 \times \frac{235}{20} = 23.5$$

Como $Q_n > 10 Q_{\min}$, pode ser utilizada a fôrmla mais sim ples da Tabela 3.1. Para três seções tem-se:

$$I L = 20 \text{ Log} \left(\frac{2}{Q_0^2} + \frac{2}{Q_0} + 1 \right) \quad (3.1)$$

com Q_0 dado conforme a Expressão 2.29, ou seja:

$$Q_0 = Q_u \cdot \frac{B_3 \text{ dB}}{f_0} = 1150 \cdot \frac{20}{235} = 98$$

Substituindo-se esse valor de Q_0 na fôrmla da perda de in serção 3.1, obtêm-se:

$$I L = 0.18 \text{ dB}$$

Deve-se observar, que o valor de Q_0 fo calculado impondo -se que as espiras helicoidais e o corpo do filtro fossem de cobre. No presente caso, a espira helicoidal é de cobre dourado e o corpo de fil tro é de alumínio alodinizado, o que vai acarretar maior perda de in serção que o valor inicialmente calculado, 0.18 dB.

No caso em que tanto a espira helicoidal como o corpo do filtro fossem de mesmo material, ter-se-ia a seguinte proporcionalidade:

$$Q_0 \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (3.2)$$

onde ρ é a resistividade do material. Como $\rho_{Al} \approx 1.66 \rho_{Cu}$ em 20 °C tem -se a seguinte relação:

$$Q_{o_{Al}} \cong 0,77 Q_{o_{Cu}} \quad (3.3)$$

Recalculando-se a Expressão 3.1 seria encontrada uma perda de inserção de 0,23 dB. Assim, a perda teórica de filtro deveria situar-se entre 0,18 dB e 0,23 dB, pois o filtro tem hlice de cobre do rado e corpo de alumínio alodinizado.

3.4 - DIMENSIONAMENTO DO RESSOADOR

Tomando-se as Expressões 2.13 e 2.18 obtêm-se

$$\alpha = 0,55 D = 0,825 \text{ polegadas} = 21 \text{ mm}$$

$$N = \frac{1900}{f_o D} = \frac{1900}{235 \cdot 1,5} = 5,4 \text{ voltas}$$

$$b = 0,825 D = 0,825 \cdot 1,5 = 1,24 \text{ polegadas} = 31,5 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{b}{N} = \frac{31,5}{5,4} = 5,8 \text{ mm}$$

$$H = b + \frac{D}{2} = 1,24 + \frac{1,5}{2} = 1,99 \text{ polegadas} = 50,5 \text{ mm}$$

Para a confecção das espiras helicoidais, utilizou-se um fio tubular de cobre comercial AWG8, cujo diâmetro é 0,1285 polegadas, o que forneceria a relação $d_o/\tau = 0,56$, que satisfaz, portanto, a ex pressão 2.27, ou seja:

$$0.4 < \frac{d_o}{\tau} < 0.6.$$

3.5 - ACOPLAMENTO DE ENTRADA/SAÍDA

A impedância de entrada do ressonador é dada segundo a Expressão 2.26:

$$Z_o = \frac{98000}{f_o D} = \frac{98000}{135 \cdot 1.5} = 278 \text{ ohms}$$

Usando-se a Tabela 2.3 obtêm-se $q_1 = 1$ para $n = 3$. Decorre então:

$$Q_d = \frac{1}{2} q_1 \cdot \frac{f_o}{B_{3\text{dB}}} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \frac{235}{20} = 5.88$$

$$\frac{R_b}{Z_o} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{Q_d} - \frac{1}{Q_n} \right) = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{5.88} - \frac{1}{1150} \right) = 0.133$$

$$\text{Sen } \theta = \sqrt{\frac{R_b}{2 Z_o} \cdot \frac{R_{\text{tap}}}{Z_o}} = \sqrt{\frac{0.133}{2} \cdot \frac{50}{278}} = 0.1044$$

$$\theta = 6.3^\circ$$

Conforme a Expressão 2.33 ter-se-ia:

$$N_D = \frac{N\theta}{90} = \frac{5.4 \cdot 6.3}{90} = 0.38 \text{ voltas da terra}$$

A altura do ponto de derivação em relação ao terminal terra é dada por:

$$h_D = N_D \cdot \tau = 0.38 \cdot 5.8 = 2.2 \text{ mm}$$

3.6 - ACOPLAMENTO ENTRE OS RESSOADORES

Como primeira aproximação foram empregadas as fórmulas experimentais de Zverev (1967), válidas para frequências na faixa de 30 MHz, para o cálculo da altura das aberturas de acoplamento entre os ressoadores.

Os valores de k_{12} e k_{23} podem ser encontrados na Tabela A1 do Apêndice A, sendo $k_{12} = k_{23} = 0.7071$.

Tem-se então:

$$K_{12} = K_{23} = k_{12} \cdot \frac{B_3}{f_0} = 0.7071 \cdot \frac{20}{235} = 60.2 \times 10^{-3}$$

Da Expressão 2.36 sucede que:

$$\frac{h_{12}}{d} = \frac{h_{23}}{d} = \left(\frac{K_{12}}{0.071} \right)^{\frac{1}{1.91}} = 0.92$$

Por consequência:

$$h_{12} = h_{23} = 0.92 \cdot 21 = 19.2 \text{ mm}$$

Tomando-se o fator de correção de 1.1 pois a espessura mé dia de parede que separa os ressoadores da seção circular é maior que $\frac{1}{16}$ polegada, obtem-se

$$h_{12} = h_{23} = 21.1 \text{ mm.}$$

CAPÍTULO 4

CONSTRUÇÃO DO FILTRO HELICOIDAL

O desenho em corte mostrado na Figura 4.1 ilustra o modo como foi implementado esse filtro. Estão descritos abaixo os detalhes da construção:

- O corpo 9 do filtro, como mostrado na Figura 4.1, foi usinado a partir do bloco maciço de alumínio, fresando-se três furos não passantes de diâmetro D .
- A altura h da abertura de acoplamento é conseguida através de fresamento.
- As hlices são fixadas no corpo do filtro por meio de soldagem à bucha de latão 7 que trabalha sob pressão.
- Os parafusos mais grossos, indicados por 1, atuam como ajustes de frequências de ressonâncias dos ressoadores.
- Os parafusos mais finos, indicados por 2 servem de ajustes fi nos de acoplamentos entre os ressoadores.
- O corpo do filtro é alodinizado. Alodinização é um processo de proteção superficial, para peças de alumínio, contra corrosão, com produto comercial denominado ALODINE, que forma capa prote tora contra corrosão sem alterar a propriedade elétrica do alu mínio.
- As peças helicoidais 6, por sua vez, foram douradas para evitar a deterioração da característica do filtro com o tempo, devido à oxidação do cobre, inevitável em ambiente úmido.
- As peças de teflon 10 têm por finalidade amortecer as vibrações mecânicas ambientais das hlices.

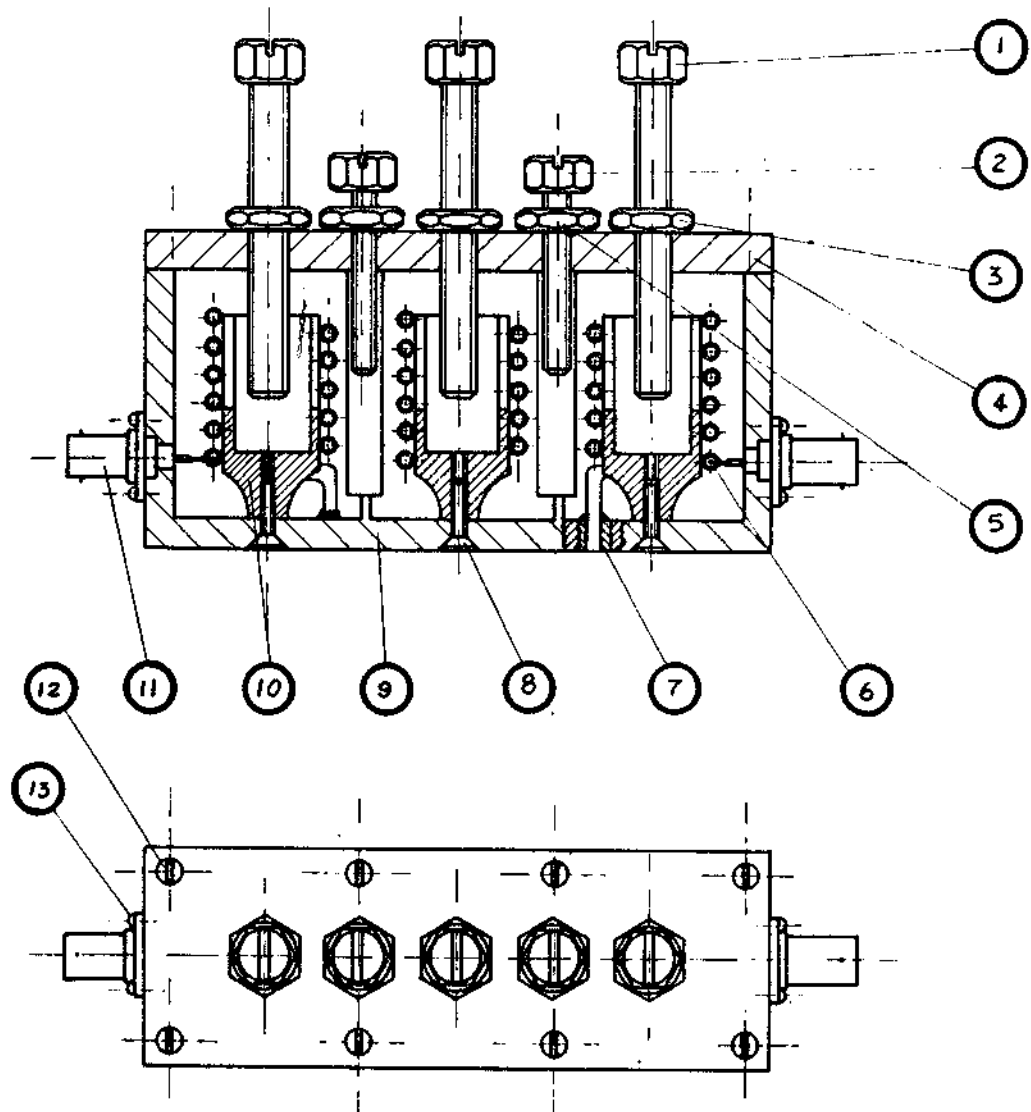


Fig. 4.1 - Corte ilustrativo de detalhe construtivo do filtro helicoidal.

As peças de teflon 10 foram dispensadas, posto que com bitola de $(1/8)^u$ - aproximadamente (AWG 8), as hēlices possuem suficiente rigidez, alḗm do que nāo operam em condiçōes ambientais desfavorāveis quanto ā vibraçāo. Essas peças de teflon introduziriam perdas adicionais, o que nāo seria conveniente no caso.

CAPÍTULO 5

Baseado nos cálculos apresentados no Capítulo 3, foi construído um filtro helicoidal, porém esse filtro não funcionou inicialmente devido ao acoplamento insuficiente entre os ressoadores. Como consequência, foi necessário modificar o diâmetro médio das hélices, assim como foram aumentadas as aberturas de acoplamento entre os ressoadores.

Após essas alterações foi conseguido um filtro protótipo com características que satisfizeram a especificação requerida, a menos da perda de inserção um pouco acima do limite desejado de 0.5 dB. Esse filtro possuía o corpo de alumínio usinado e peças helicoidais de cobre tubular.

Para confecção do filtro definitivo foram reproduzidas as mesmas dimensões do filtro protótipo, a menos da alodinação do corpo do filtro e da douração das peças helicoidais.

5.1 - TESTE DO FILTRO PROTÓTIPO

O filtro protótipo que foi construído tem as seguintes dimensões:

$D = 1 \frac{1}{2}$ polegadas	$H = 50.5$ mm
$d = 23$ mm	$d_o = \text{AWG8} = 0.1285$ polegadas
$N = 5.4$ voltas	$N_D = 0.38$ voltas da terra
$b = 31.5$ mm	$h_D = 2.2$ mm
$\tau = 5.8$ mm	$h_{12} = h_{23} = 45$ mm

Esse filtro apresentou as características apresentadas na Tabela 5.1.

TABELA 5.1

CARACTERÍSTICAS MEDIDAS DO FILTRO PROTÓTIPO

- Perda de Inserção < 0.7 dB (entre 224 a 238 MHz)
- Ondulação na faixa de passagem < - 0.3 dB
- Perda de Retorno na entrada e saída < - 10 dB
- Faixa de passagem
1 dB: 222.5 a 238.5 MHz
3 dB: 221.0 a 240.5 MHz
30 dB: 217.0 a 260.5 MHz
50 dB: 210.0 a 340.0 MHz
- Rejeição > 50 dB para frequências > 340 e < 210 MHz

5.2 - TESTE DO FILTRO DEFINITIVO

O filtro definitivo é exatamente a reprodução do filtro protótipo, exceto os tratamentos superficiais de alodinação do corpo do filtro e da douração das peças helicoidais.

As medições efetuadas mostraram as excelentes qualidades desse filtro. Comparada com o filtro protótipo, a perda de inserção foi bem mais baixa, enquanto a ondulação na faixa de passagem tam bém foi menor.

5.2.1 - PERDA DE TRANSMISSÃO

Como pode ser visto no gráfico da Figura 5.1, o filtro tem característica de corte mais abrupta em frequências inferiores, não sendo simétrica, portanto, a resposta em frequência do filtro. Isso é normal em filtro e pode ser explicado pelo acoplamento capacitivo das janelas de acoplamento.

A rejeição fora da faixa é menor que 50 dB, porém o valor exato não é possível de ser determinado devido ao nível de ruído existente.

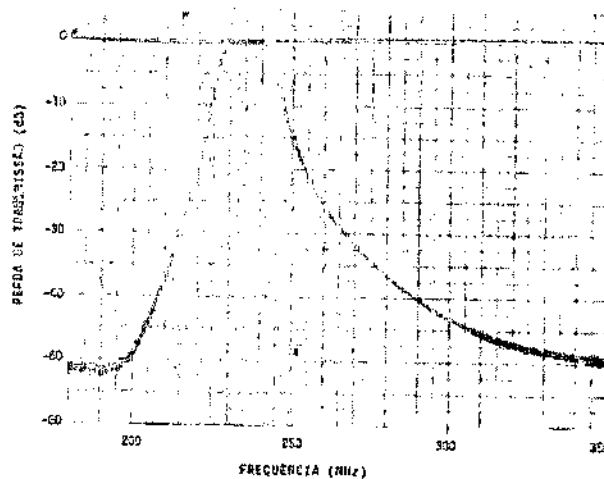


Fig. 5.1 - Resposta em frequência do filtro helicoidal definitivo.

O gráfico da perda de transmissão, apresentada conforme a Figura 5.1, foi traçado usando-se o traçador XY da HP, entrando-se com o sinal de varredura do gerador HP 8690B no eixo X e o sinal proporcional à amplitude do parâmetro $|S_{12}|^2$, proveniente do analisador de circuitos HP 8410B no eixo y. Os valores das atenuações, assim como das frequências na curva apresentada, não são muito precisos, devido à dificuldade de calibração do traçador XY, servindo assim mais para observar o comportamento da curva.

Valores mais exatos dos pontos de atenuação foram obtidos, medindo-se ponto a ponto, utilizando-se um freqüencímetro digital e o "display" de magnitude HP-8412A, e estão apresentados na especificação do filtro, dada na Tabela 5.2.

TABELA 5.2

CARACTERÍSTICAS MEDIDAS DO FILTRO DEFINITIVO

- Perda de inserção	< 0.3 dB
(entre 232 a 238 MHz)	
- Ondulação máxima	< 0.05 dB
(entre 232 a 239 MHz)	
- Perda de retorno na entrada e saída	< - 25 dB
(entre 230 a 240 MHz)	
- Faixa de passagem	
1 dB:	228.5 a 241.9 MHz
3 dB:	226.7 a 243.8 MHz
10 dB:	223.6 a 248.1 MHz
20 dB:	218.9 a 256.8 MHz
30 dB:	213.0 a 270.6 MHz
40 dB:	203.9 a 299.1 MHz
- Rejeição	> 50 dB para frequências < 190 MHz e > 350 MHz

5.2.2 - PERDA DE RETORNO

O filtro apresentou excelente resposta quanto à perda de retorno, pois, na faixa de passagem, esse parâmetro excede 25 dB indicando assim um valor de VSWR < 1.1, significando um perfeito casamento de impedância entre 230 a 240 MHz.

As curvas de perda de retorno foram traçadas, usando-se um traçador de gráfico XY e medindo-se os parâmetros S_{12} e S_{22} , e estão representadas nas Figuras 5.2 e 5.3 respectivamente.

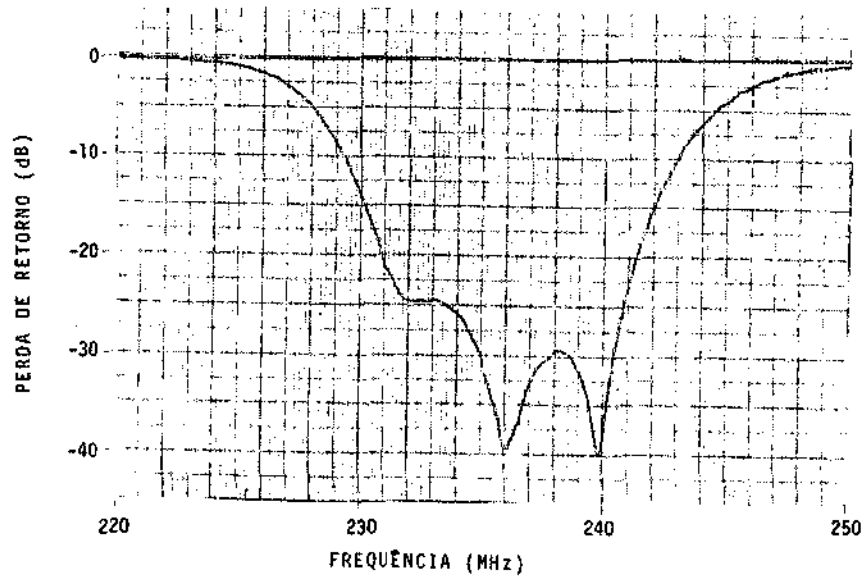


Fig. 5.2 - Perda de retorno do acesso 1 do filtro helicoidal definitivo.

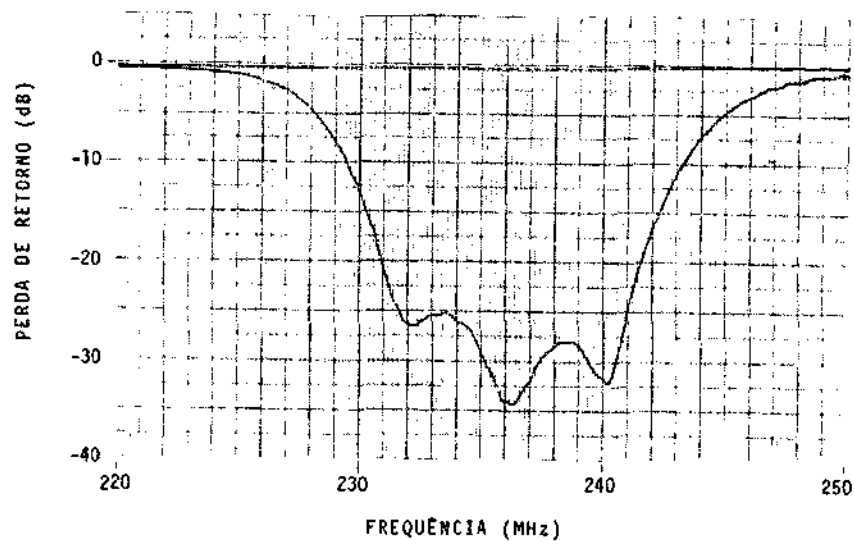


Fig. 5.3 - Perda de retorno do acesso 2 do filtro helicoidal definitivo.

Os três pólos devido a três ressoadores estão presentes nitidamente tanto na curva de $|S_{11}|^2$ como naquela de $|S_{22}|^2$ e a diferença existente entre elas é perfeitamente aceitável, pois ocorre para níveis bastante baixos (< 25 dB).

5.2.3 - PERDA DE INSERÇÃO

A perda de inserção observada no filtro foi bastante baixa, sendo da ordem de 0.25 dB entre 232 a 238 MHz, valor bastante coerente com a perda de inserção teórica prevista (valor entre 0.18 a 0.23 dB).

Para a determinação da perda de inserção do filtro, foi utilizado o gerador da Rhode Schwarz, bastante estável quanto à frequência e nível de sinal, medindo-se os níveis de potência existente primeiro sem filtro e depois com filtro. Para detecção do nível de potência foi empregado o medidor de potência digital HP-436A, um instrumento de alta precisão (erro na medição da potência < 0.02 dB). Para eliminar erros causados por eventuais descasamentos, inseriram-se atenuadores de 10 dB antes e depois do filtro.

A curva mostrada na Figura 5.4 foi obtida, medindo-se ponto a ponto, variando-se a frequência e verificando-se as diferenças de níveis de potências entre os casos sem filtro e com filtro, conforme o processo descrito acima.

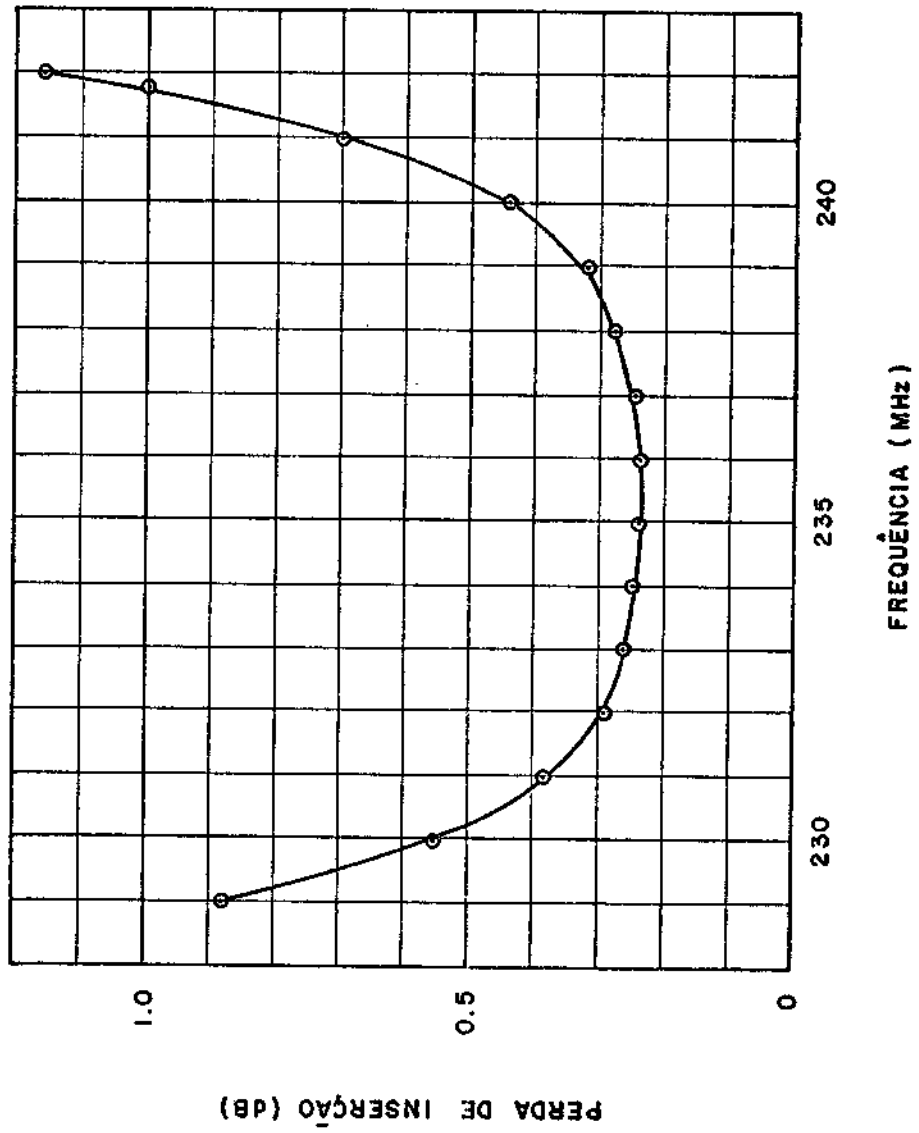


Fig. 5.4 - Perda de inserção do filtro helicoidal definitivo.

CAPÍTULO 6

INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA PARA AJUSTE E MEDIÇÃO DO FILTRO

Para o ajuste do filtro é necessário sintonizar os resoadores para que os pólos de perda de retorno se situem de tal forma que seja obtida a característica desejada do filtro.

Isso foi possível graças à utilização do gerador de varredura HP-8690B e do analisador de circuitos HP-8410B. A disposição dos pólos torna-se visível na tela do "display" HP-8412A, ao se medir S_{11} ou S_{22} , ao passo que a resposta em frequência do filtro pode ser vista medindo-se S_{12} ou S_{21} .

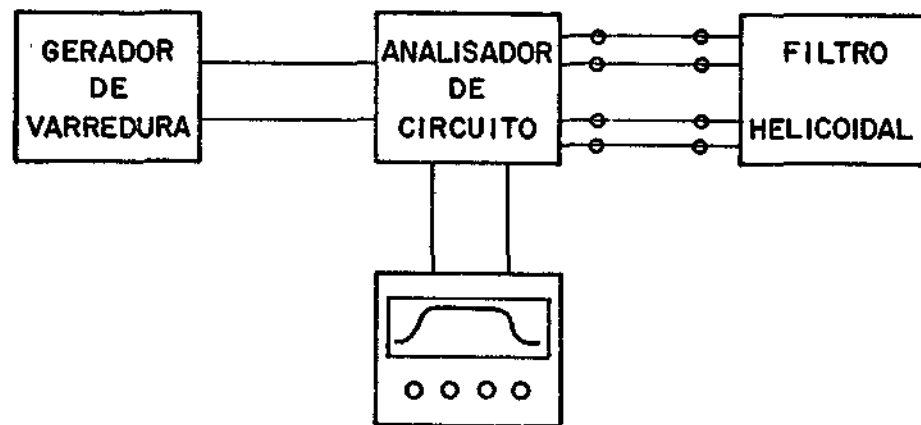


Fig. 6.1 - Instrumentação para medição e ajuste do filtro.

6.1 - AJUSTE DE SINTONIA E ACOPLAMENTO

O ajuste do filtro é conseguido, variando-se as inserções dos parafusos de sintonia e de acoplamento, verificando-se as alterações ocasionadas na tela do "display".

No entanto, muitas vezes, movendo-se apenas esses parafusos, não se consegue obter a característica desejada do filtro. Nesses casos, é ainda possível recorrer ao artifício descrito abaixo, para variar as frequências de ressonâncias dos ressoadores, sem implicar alterações mecânicas complicadas.

Como pode ser observado na Expressão 3.4 para frequência de ressonância, f_0 depende de N ; d e d/D não são possíveis de serem alterados facilmente, enquanto com relação a N , basta ir cortando as espiras gradativamente.

A frequência de ressonância é inversamente proporcional a N , ou seja ao se reduzir N , aumenta-se a frequência de ressonância. Dessa forma, sugere-se para valor inicial de N , um número de espiras pouco maior que o calculado conforme a Expressão 3.14, obtendo-se assim sintonia em frequências deslocadas para baixo. Para a obtenção da resposta em faixa desejada, basta reduzir paulatinamente as dimensões N de todas as espiras, o que aumenta as frequências de ressonância.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Foi apresentado neste relatório o projeto de um filtro helicoidal de três seções circulares, acompanhado de formulários e figuras, assim como de métodos a serem utilizados para projetar filtros helicoidais de qualquer número de seções.

Todas as informações utilizadas podem ser encontradas na referência, porém espera-se que este trabalho simplifique o projeto, pois procurou-se dar ênfase à concisão.

O projeto apresentado neste relatório foi o de um filtro helicoidal de três seções circulares com características do tipo Butterworth. O projeto de filtros com características diferentes só se diferencia em dois aspectos:

- a) Cálculo do número de ressoadores para o qual precisa-se utilizar nomógrafo específico.
- b) Valores de k e q específicos a serem introduzidos nas expressões de alturas das janelas de acoplamento e de perda de inserção.

Na obra de Zverev (1967) podem ser encontrados todos os nomógrafos como as tabelas de k e q para filtros com características usuais.

A maior dificuldade na implementação desse tipo de filtro localizou-se na determinação do acoplamento entre os ressoadores. No presente projeto, os cálculos das alturas de janelas descritos por Zverev (1967) mostraram-se inadequados. Isso porque a fórmula apresentada por esse autor é válida para cavidades com seções quadradas, enquanto no presente caso trata-se de ressoadores com seções circulares.

Essa dificuldade foi solucionada mediante alteração experimental das alturas das janelas de acoplamento e do aumento do diâmetro médio da hélice.

Felizmente, para o presente caso, precisou-se modificar apenas uma vez para se conseguir característica desejada, mas é possível que em geral sejam necessárias algumas tentativas até a obtenção da configuração final. Recomenda-se, desse modo, que se inicie com pequena altura de janela de acoplamento e ir efetuando-se a ampliação da janela, baseando-se nos resultados observados com as alturas das janelas preliminares.

Um filtro protótipo foi testado, apresentando resultado bastante razoável quanto às faixas de passagem, tendo porém perda de inserção um pouco acima do valor aceitável. Esse filtro foi testado operacionalmente numa missão de lançamento de balão estratosférico, eliminando-se totalmente o problema de saturação do receptor de telemetria em 240 MHz, ocasionado pelo sinal proveniente da antena de telecomando em 460 MHz, localizada nas imediações da antena de telemetria.

Filtros definitivos reproduzidos a partir do filtro protótipo, com melhor proteção contra as intempéries, serão utilizadas operacionalmente em duas estações rastreadoras de balão em São José dos Campos e Cachoeira Paulista e também na estação móvel ("trailer"):

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ZVEREV, A.I. *Handbook of filter synthesis*. New York, John Wiley, 1967.

APENDICE A

TABELA DE VALORES PARA k e q (3 dB ABAIXO) PARA FILTROS BUTTERWORTH

3-db DOWN k AND q VALUES

BUTTERWORTH RESPONSE

n	q ₀	1. L.	q ₁	q _n	k ₁₂	k ₂₃	k ₃₄	k ₄₅
2	INF.	0.000	1.4142	1.4142	0.7071			
	14.142	0.915	1.4142	1.4142	0.7071			
	7.071	1.934	1.4142	1.4142	0.7071			
	4.714	3.099	1.4142	1.4142	0.7071			
	3.536	4.437	1.4142	1.4142	0.7071			
	2.828	6.021	1.4142	1.4142	0.7071			
	2.357	7.959	1.4142	1.4142	0.7071			
	2.020	10.458	1.4142	1.4142	0.7071			
	3	INF.	0.000	1.0000	1.0000	0.7071	0.7071	
20.000		0.958	0.8041	1.4156	0.7687	0.6582		
10.000		2.052	0.8007	1.5359	0.7388	0.6716		
6.667		3.300	0.9087	1.6301	0.7005	0.6879		
5.000		4.742	0.8226	1.7115	0.6567	0.7060		
4.000		6.443	0.8406	1.7844	0.6077	0.7256		
3.333		8.512	0.8625	1.8497	0.5524	0.7470		
2.857		11.157	0.8884	1.9068	0.4883	0.7706		
4		INF.	0.000	0.7654	0.7654	0.8409	0.5412	0.8409
	26.131	1.007	0.5376	1.4782	1.0927	0.5668	0.6670	
	13.066	2.162	0.5355	1.6875	1.0745	0.5546	0.6805	
	8.710	3.489	0.5417	1.8605	1.0411	0.5373	0.6992	
	6.533	5.020	0.5521	2.0170	1.0004	0.5161	0.7207	
	5.226	6.822	0.5656	2.1621	0.9547	0.4905	0.7444	
	4.355	9.003	0.5819	2.2961	0.9051	0.4592	0.7706	
	3.733	11.772	0.6012	2.4159	0.8518	0.4192	0.7998	
	5	INF.	0.000	0.6180	0.6180	1.0000	0.5559	0.5559
32.361		1.045	0.4001	1.5527	1.4542	0.6946	0.5285	0.6750
32.361		1.045	0.5662	0.7261	1.0947	0.5636	0.5800	0.8106
16.180		2.263	0.3990	1.8372	1.4414	0.6886	0.5200	0.6874
16.180		2.263	0.5777	0.7577	1.0711	0.5408	0.6160	0.7452
10.787		3.657	0.4036	2.0825	1.4088	0.6750	0.5080	0.7066
10.787		3.657	0.5927	0.7869	1.0408	0.5144	0.6520	0.6860
8.090		5.265	0.4111	2.3118	1.3670	0.6576	0.4927	0.7290
8.090		5.265	0.6100	0.8157	1.0075	0.4844	0.6887	0.6278
6.472		7.151	0.4206	2.5307	1.3195	0.6374	0.4732	0.7542
6.472		7.151	0.6293	0.8449	0.9722	0.4501	0.7267	0.5681
5.393		9.425	0.4321	2.7375	1.2675	0.6148	0.4479	0.7821
5.393		9.425	0.6508	0.8748	0.9355	0.4103	0.7663	0.5048

n	q ₀	I. L.	q ₁	q _n	k ₁₂	k ₂₃	k ₃₄	k ₄₅	k ₅₆	k ₆₇
6	INF.	0.000	0.5176	0.5176	1.1688	0.6050	0.5176	0.6050	1.1688	
	38.637	1.084	0.3179	1.5276	1.8246	0.8492	0.5986	0.5162	0.6403	
	38.637	1.084	0.6091	0.4721	1.0792	0.5589	0.5705	0.5779	1.2068	
	19.319	2.354	0.3173	1.9792	1.8142	0.8457	0.5955	0.5089	0.6916	
	19.319	2.354	0.6334	0.4413	1.0553	0.5272	0.6111	0.5503	1.1587	
	12.879	3.808	0.3208	2.2924	1.7811	0.8326	0.5873	0.4991	0.7108	
	12.879	3.808	0.6573	0.4922	1.0299	0.4936	0.6503	0.5233	1.1101	
	9.659	5.481	0.3264	2.5936	1.7375	0.8151	0.5762	0.4862	0.7336	
	9.659	5.481	0.6819	0.5043	1.0039	0.4571	0.6896	0.4950	1.0610	
	7.727	7.439	0.3334	2.8876	1.6873	0.7948	0.5631	0.4693	0.7594	
7.727	7.439	0.7076	0.5174	0.9776	0.4171	0.7297	0.4637	1.0113		
6.440	9.791	0.3416	3.1707	1.6324	0.7722	0.5479	0.4466	0.7882		
6.440	9.791	0.7348	0.5315	0.9510	0.3724	0.7713	0.4276	0.9610		
7	INF.	0.000	0.4450	0.4450	1.3424	0.6671	0.5268	0.5268	0.6671	1.3424
	44.940	1.121	0.2636	1.6995	2.1977	1.0104	0.6940	0.5579	0.5118	0.6835
	44.940	1.121	0.3360	0.7110	1.7554	0.8400	0.6101	0.5029	0.5938	0.8089
	44.940	1.121	0.4272	0.4897	1.3980	0.7143	0.5146	0.5740	0.5745	1.1986
	44.940	1.121	0.6568	0.3496	1.0599	0.5533	0.5702	0.5299	0.7351	1.6355
	22.470	2.437	0.2633	2.1126	2.1883	1.0076	0.6929	0.5558	0.5050	0.6942
	22.470	2.437	0.3391	0.7562	1.7324	0.8328	0.6092	0.4872	0.6313	0.7251
	22.470	2.437	0.4366	0.5047	1.3622	0.7090	0.4901	0.6171	0.5397	1.1487
	22.470	2.437	0.6939	0.3533	1.0377	0.5146	0.6111	0.5151	0.7117	1.6005
	14.980	3.943	0.2661	2.4907	2.1541	0.9941	0.6854	0.5499	0.4962	0.7132
	14.980	3.943	0.3449	0.7933	1.6958	0.8191	0.6043	0.4688	0.6691	0.6559
	14.980	3.943	0.4475	0.5193	1.3225	0.7006	0.4636	0.6586	0.5071	1.1727
	14.980	3.943	0.7270	0.3591	1.0173	0.4756	0.6499	0.4999	0.6873	1.5584
	11.235	5.674	0.2703	2.8626	2.1087	0.9757	0.6748	0.5418	0.4846	0.7362
	11.235	5.674	0.3521	0.8271	1.6530	0.8023	0.5974	0.4471	0.7075	0.5914
	11.235	5.674	0.4594	0.5341	1.2810	0.6908	0.4342	0.6999	0.4737	1.0585
11.235	5.674	0.7593	0.3660	0.9976	0.4347	0.6885	0.4828	0.6622	1.5129	

n	q ₀	I. L.	q ₁	q _n	k ₁₂	k ₂₃	k ₃₄	k ₄₅	k ₅₆	k ₆₇	k ₇₈	
7	8.988	7.694	0.2756	3.2330	2.0563	0.9542	0.6622	0.5318	0.4691	0.7622		
	8.988	7.694	0.3605	0.8593	1.6063	0.7836	0.5893	0.4212	0.7470	0.5278		
	8.988	7.694	0.4723	0.5493	1.2383	0.6801	0.4010	0.7418	0.4378	1.0151		
	8.988	7.694	0.7920	0.3738	0.9784	0.3910	0.7278	0.4623	0.6362	1.4654		
	7.490	10.113	0.2818	3.5954	1.9988	0.9304	0.6480	0.5201	0.4477	0.7915		
	7.490	10.113	0.3699	0.8903	1.5568	0.7633	0.5800	0.7898	0.7879	0.4623		
	7.490	10.113	0.4863	0.5650	1.1945	0.6688	0.3630	0.7849	0.3976	0.9723		
	7.490	10.113	0.8255	0.3824	0.9595	0.3436	0.7687	0.4365	0.6092	1.4164		
	INF.	0.000	0.3902	0.3902	0.3902	1.5187	0.7357	0.5537	0.5098	0.5637	0.7357	1.5187
	51.258	1.155	0.2251	1.7676	2.5714	1.1739	0.7958	0.6243	0.5105	0.5367	0.5105	0.6854
51.258	1.155	0.3584	0.4508	1.6793	0.8252	0.6208	0.4937	0.5740	0.5740	0.5783	1.2471	
51.258	1.155	0.3258	0.5156	1.7864	0.8475	0.6164	0.4983	0.5787	0.5787	0.5691	1.1813	
51.258	1.155	0.7059	0.2784	1.0408	0.5475	0.5709	0.5151	0.6144	0.6144	0.9230	2.0623	
25.629	2.513	0.2250	2.2379	2.5673	1.1712	0.7952	0.6242	0.5351	0.5351	0.5039	0.6955	
25.629	2.513	0.3650	0.4646	1.6485	0.8148	0.6234	0.4697	0.6230	0.6230	0.5402	1.1842	
25.629	2.513	0.3302	0.5366	1.7524	0.8369	0.6134	0.4783	0.6229	0.6229	0.5282	1.1325	
25.629	2.513	0.7561	0.2802	1.0213	0.5035	0.6102	0.5082	0.5978	0.5978	0.9066	2.0352	
17.086	4.065	0.2272	2.6783	2.5271	1.1570	0.7874	0.6193	0.5303	0.5303	0.4957	0.7145	
17.086	4.065	0.3732	0.4773	1.6108	0.8001	0.6227	0.4436	0.6652	0.6652	0.5065	1.1299	
17.086	4.065	0.3363	0.5552	1.7107	0.8226	0.6075	0.4564	0.6652	0.6652	0.4908	1.0906	
17.086	4.065	0.7988	0.2839	1.0054	0.4606	0.6471	0.5003	0.5806	0.5806	0.8865	1.9960	
12.815	5.848	0.2306	3.1201	2.4800	1.1376	0.7762	0.6120	0.5237	0.5237	0.4848	0.7375	
12.815	5.848	0.3823	0.4898	1.5699	0.7834	0.6206	0.4147	0.7070	0.7070	0.4730	1.0794	
12.815	5.848	0.3433	0.5731	1.6654	0.8066	0.6009	0.4316	0.7072	0.7072	0.4532	1.0517	
12.815	5.848	0.8193	0.2885	0.9910	0.4165	0.6837	0.4903	0.5624	0.5624	0.8647	1.9513	
10.252	7.923	0.2347	3.5677	2.4257	1.1149	0.7630	0.6031	0.5155	0.5155	0.4700	0.7637	
10.252	7.923	0.3022	0.5023	1.5271	0.7652	0.6177	0.3822	0.7493	0.7493	0.4374	1.0310	
10.252	7.923	0.3511	0.5908	1.6179	0.7894	0.5921	0.4030	0.7497	0.7497	0.4137	1.0146	
10.252	7.923	0.8793	0.2938	0.9775	0.3704	0.7210	0.4768	0.5432	0.5432	0.8418	1.9034	
8.543	10.401	0.2396	4.0118	2.3661	1.0899	0.7481	0.5929	0.5056	0.5056	0.4493	0.7934	
8.543	10.401	0.4030	0.5149	1.4878	0.7459	0.6140	0.3452	0.7924	0.7924	0.3976	0.9841	
8.543	10.401	0.3597	0.6086	1.5687	0.7714	0.5831	0.3691	0.7930	0.7930	0.3705	0.9789	
8.543	10.401	0.9195	0.2998	0.9643	0.3214	0.7602	0.4577	0.5276	0.5276	0.8180	1.8531	