
Sociedade de Engenharia de Áudio

Artigo de Convenção

Apresentado na IX Convenção Nacional

11 - 13 de Abril de 2005, São Paulo, SP

Este artigo foi reproduzido do original entregue pelo autor, sem edições, correções e considerações feitas pelo comitê técnico deste evento. Outros artigos podem ser adquiridos através da Audio Engineering Society, 60 East 42nd Street, New York, New York 10165-2520, USA, www.aes.org. Informações sobre a seção brasileira podem ser obtidas em www.aesbrasil.org. Todos os direitos reservados. Não é permitida a reprodução total ou parcial deste artigo sem autorização expressa da AES Brasil.

Indicadores de Sintonia em

Caixas Bass Reflex e Band Pass

Revisão 28 02 2005

Homero Sette Silva

Eletrônica Selenium S. A.
92.480-000, Nova S^{ta}. Rita, RS

homero@selenium.com.br

Resumo

A verificação da sintonia em caixas tipos Bass Reflex e Band Pass é uma necessidade prática, presente no dia a dia dos profissionais que lidam com esses sistemas.

Os pontos de amplitude mínima, e de fase nula, na curva de impedância da bobina são, tradicionalmente, usados como indicadores da frequência de sintonia.

Embora muito convenientes, devido à simplicidade do procedimento, essas informações sofrem influência da indutância da bobina L_e , e até do fator de qualidade Q_L .

As limitações deste procedimento são aqui analisadas e um método alternativo é sugerido para a aferição da sintonia de caixas Bass Reflex e Band Pass de 6^a e 4^a ordens.

Este trabalho foi apresentado originalmente na VIII Convenção Nacional da AES, realizada em S.P. de 7 a 9 de Junho de 2004 sem o item, agora incluído, a respeito de caixas Band Pass de 4^a Ordem.



Audio Engineering Society
BRASIL

Indicadores de Sintonia em Caixas Bass Reflex e Band Pass

Homero Sette Silva

homero@selenium.com.br

A verificação da sintonia em caixas tipos Bass Reflex e Band Pass é uma necessidade prática, presente no dia a dia dos profissionais que lidam com esses sistemas.

Os pontos de amplitude mínima, e de fase nula, na curva de impedância da bobina são, tradicionalmente, usados como indicadores da frequência de sintonia.

Embora muito convenientes, devido à simplicidade do procedimento, essas informações sofrem influência da indutância da bobina L_e , e até do fator de qualidade Q_L .

As limitações deste procedimento são aqui analisadas e um método alternativo é sugerido para a aferição da sintonia de caixas Bass Reflex e Band Pass de 6ª e 4ª ordens.

Introdução

Tradicionalmente, as informações presentes nas curvas de módulo e fase da impedância da bobina vêm sendo usadas como indicadores de sintonia em caixas Bass Reflex (Refletores de Graves). Os trabalhos de Thiele e Small mostraram esse caminho com clareza, onde o ponto de impedância mínima (e fase nula) compreendido entre os dois picos existentes na curva da impedância da bobina do falante, instalado em caixas Bass Reflex (ou Band Pass de 4ª ordem) seria o indicador da frequência de sintonia, F_b .

O Autor do presente trabalho, aplicando a metodologia acima, em caixas Band Pass, notou discrepâncias significativas entre os indicadores de sintonia, fornecidos pela curva de impedância e a frequência de sintonia efetivamente obtida.

A teoria de Thiele e Small não leva em conta a indutância da bobina, tendo a influência dela sido considerada como geralmente desprezível, para fins de sintonia de caixas Refletores de Graves. Em caixas Band Pass de 6ª ordem, uma das câmaras é sintonizada em torno de uma oitava acima da outra câmara. Esta frequência de sintonia, muito elevada para o comum das caixas Refletores de Graves, faz com que a influência de L_e torne-se significativa e não possa ser desconsiderada.

Esses e outros aspectos serão investigados, a seguir.

Os Falantes ao Ar Livre

Para apoiar a análise, escolhemos dois alto-falantes, de 18", muito usados em caixas desenvolvidas para sistemas de sonorização profissionais. O modelo 18SW2P, devido à sua bobina de quatro camadas, apresenta uma indutância maior que a encontrada no modelo 18SW1P, conforme podemos ver na Fig. 1. A Fig. 2 compara as reatâncias das bobinas dos dois falantes, onde constatamos que em 100 Hz a reatância da bobina do 18SW1P vale 4 Ohms enquanto que no 18SW2P este valor ultrapassa 5 Ohms.

As equações (0.1) e (0.2) permitem o cálculo dessas componentes, onde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, e os valores das constantes K_{rm} , E_{rm} , K_{xm} e E_{xm} encontram-se na Tabela (1).

$$L_e = K_{xm} \cdot \omega^{(E_{xm} - 1)} \quad \therefore \quad X_{L_e} = K_{xm} \cdot \omega^{E_{xm}} \quad (0.1)$$

$$R_{ed} = K_{rm} \cdot \omega^{E_{rm}} \quad (0.2)$$

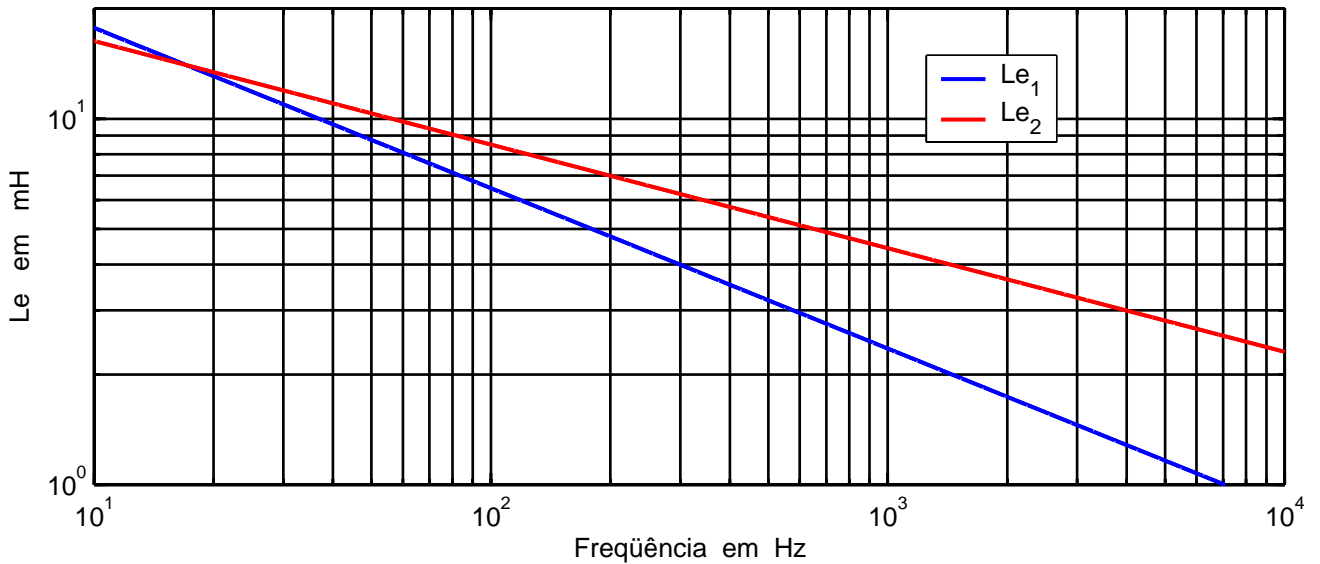


Fig. 1 – Indutância da bobina para os falantes 1 e 2, respectivamente 18SW1P e 18SW2P.

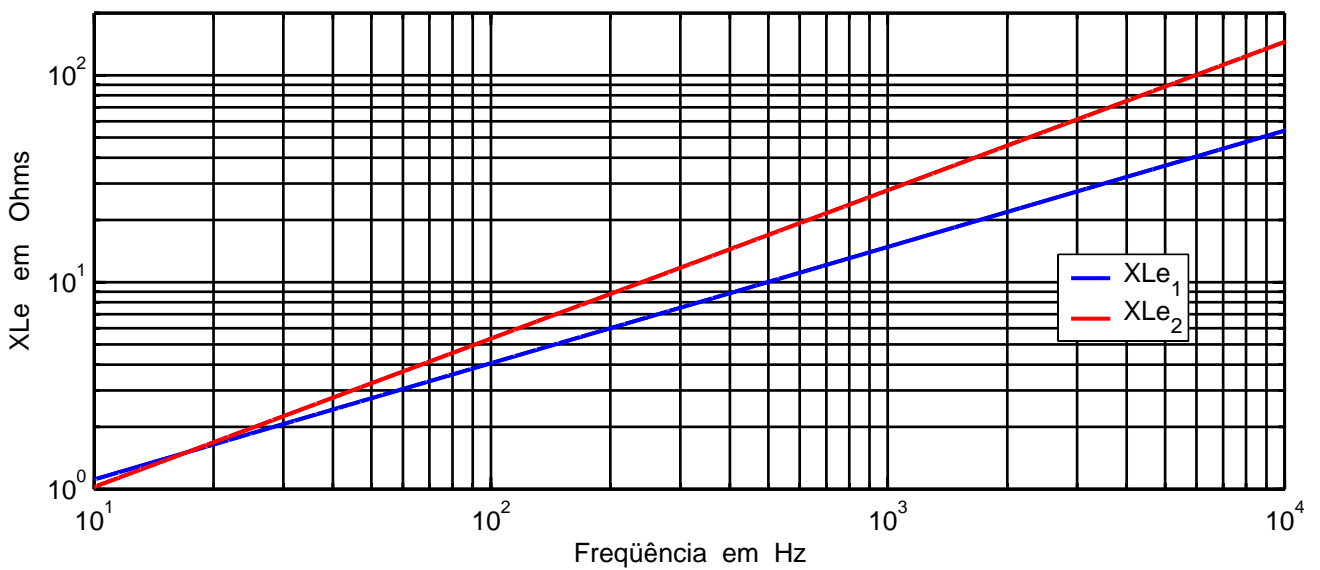


Fig. 2 – Reatância da bobina para os falantes 1 e 2, respectivamente 18SW1P e 18SW2P.

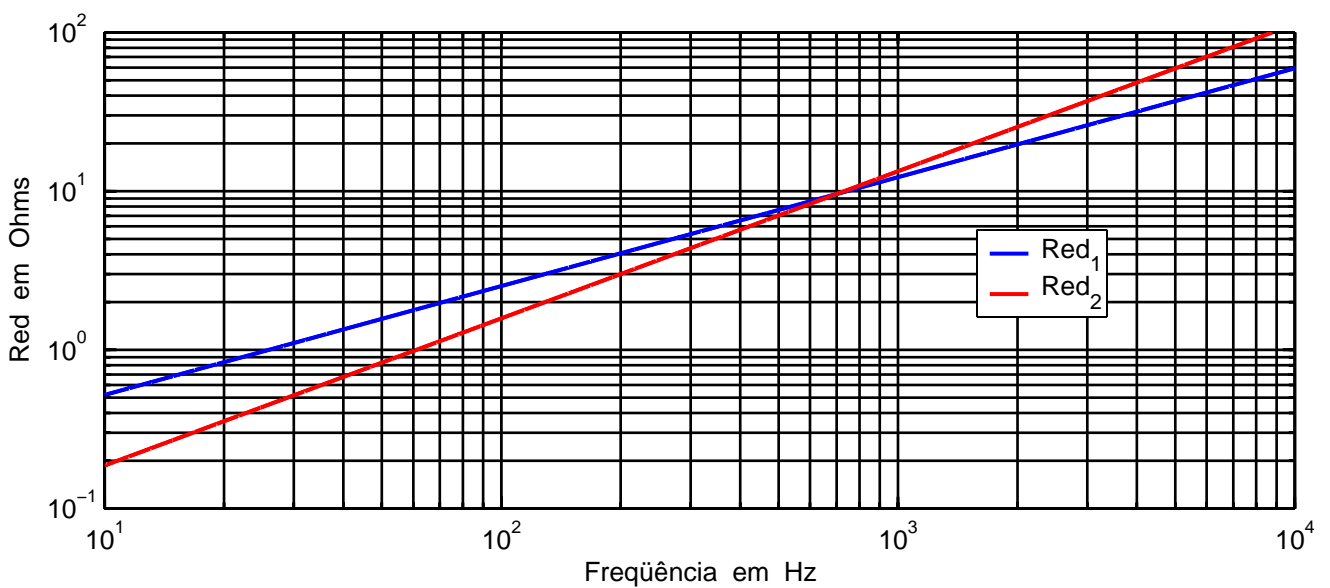


Fig. 3 – Componente resistiva variável com a frequência para os falantes 1 e 2, respectivamente 18SW1P e 18SW2P.

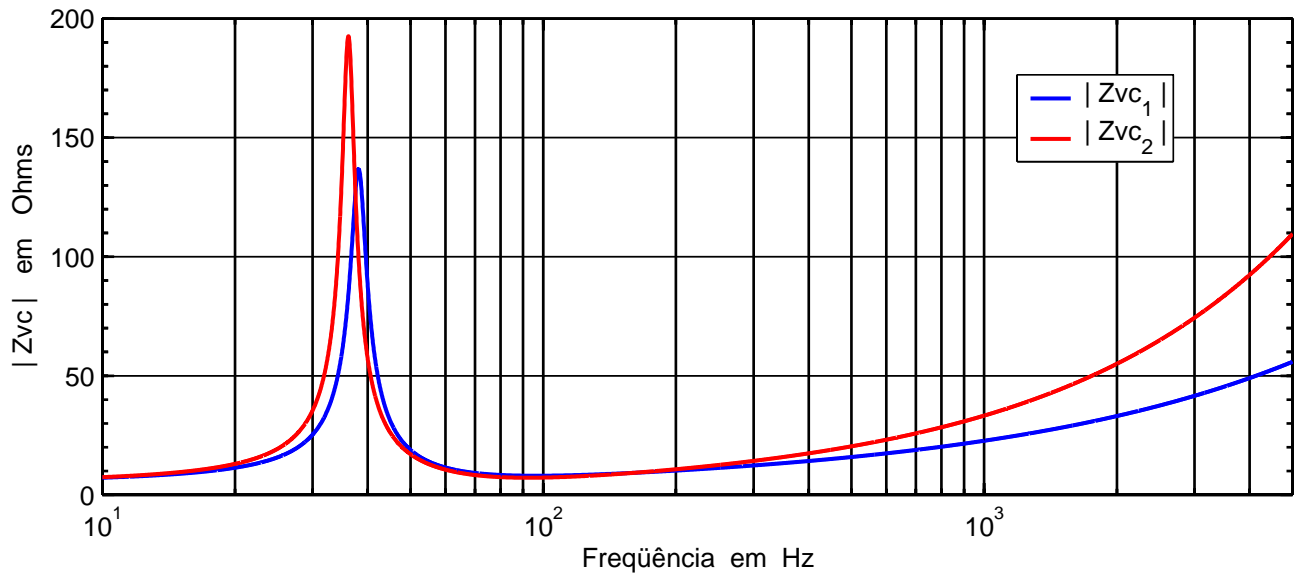


Fig. 4 – Módulos da impedância ao ar livre dos falantes 1 e 2, respectivamente 18SW1P e 18SW2P.

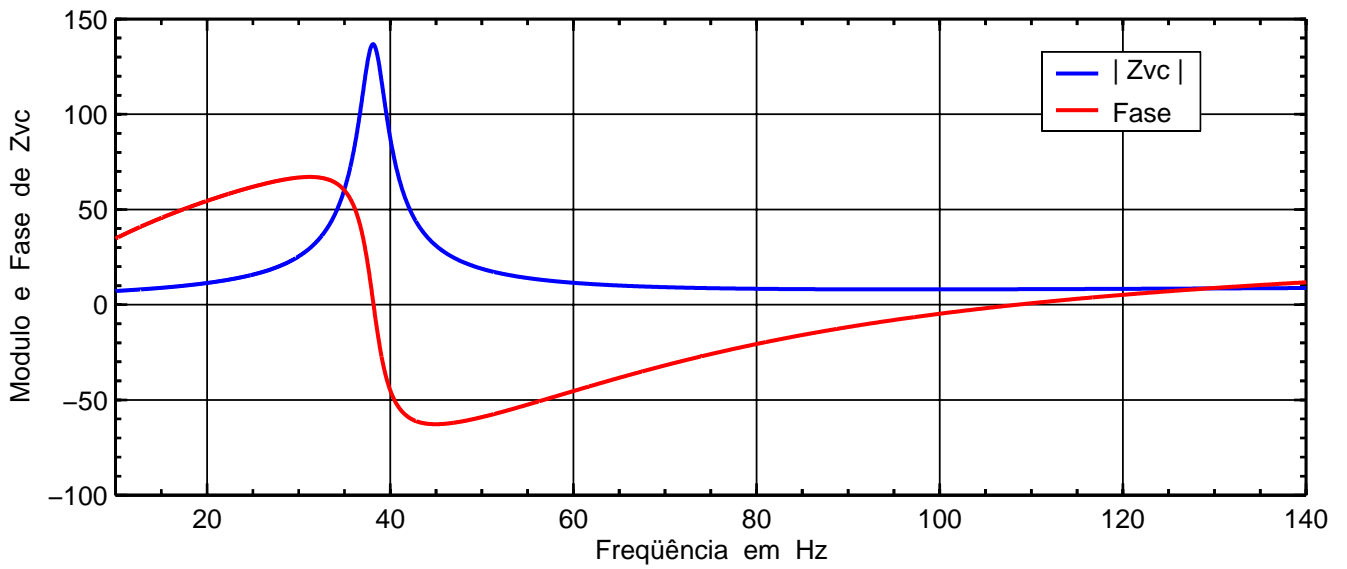


Fig. 5 – Modulo da impedância e curva de fase do falante 18SW1P, ao ar livre.

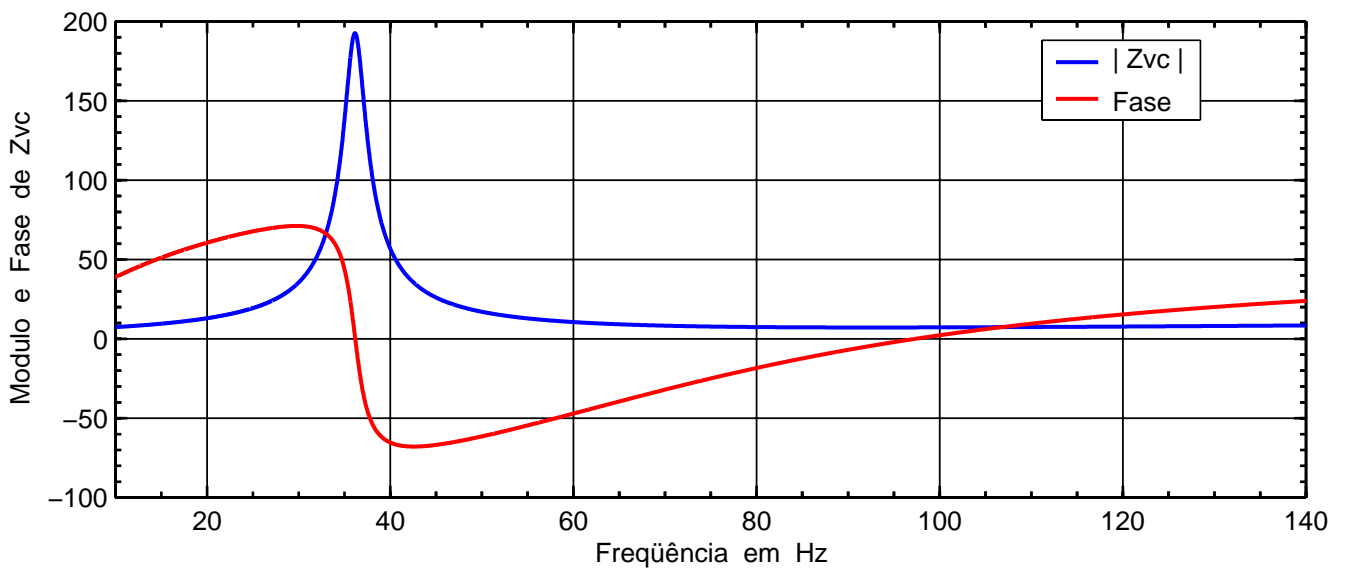


Fig. 6 – Modulo da impedância e curva de fase do falante 18SW2P, ao ar livre.

Tabela 1 - Falantes Utilizados			
Parâmetros	18SW1P	18SW2P	Unidades
Potência NBR 10303	800	600	Watts
Impedância Nominal	8	8	Ohms
Sensibilidade	97	95	dB (2,83V @ 1 m)
Fs	38,2	36,2	Hz
Vas	209,4	158,8	Litros
Qts	0,48	0,44	-
Qes	0,50	0,45	-
Qms	12,29	15,35	-
Sd	1194	1190	cm ²
Mms	165,35	241,07	G
Cms	105,2	80,3	µm / N
βL	20,5	25,8	Tesla x m
R _E	5,33	5,53	Ohms
K _{rm}	30,367	4,023	mili Ohm
E _{rm}	0,686	0,927	-
K _{xm}	108,652	52,649	mili Henry
E _{xm}	0,562	0,717	-

Os parâmetros dos falantes utilizados foram medidos no Audio Analyzer Brüel, modelo 2012, e os parâmetros não lineares da bobina foram obtidos, por processamento, no LMS versão 4.5, operando no modo LEAP, a partir das curvas do módulo da impedância e da fase, ao ar livre.

Na Fig. 4 vemos as curvas do módulo da impedância, ao ar livre, dos falantes 18SW1P e 18SW2P, onde o crescimento da impedância deste último, nas frequências altas é acentuado devido às componentes Red e Led.

Nas Figs. 5 e 6 temos, as curvas do módulo da impedância e da fase, focando os pontos de fase nula, respectivamente para os falantes 18SW1P e 18SW2P, onde podemos ver, pela coincidência em frequência dos pontos de máximo na impedância (pico na ressonância mecânica) e fase nula que a influência da indutância da bobina foi insignificante, neste caso.

Os Falantes em Caixa Refletora de Graves

Volume 100 litros e sintonia 40 Hz

Para investigar os indicadores de sintonia, foram feitas simulações com cada um dos dois falantes, individualmente instalados em duas caixas Refletoras de Graves: uma, de 100 litros, com sintonia em 40 Hz e a outra com 50 litros e sintonia em 95 Hz. Esses volumes e sintonias são os mesmos de uma caixa Band Pass, que foi construída e será analisada adiante.

Na Fig. 7, vemos que o ponto de impedância mínima (entre os picos) praticamente coincide com o primeiro ponto de fase nula, em aproximadamente 35 Hz. Como a caixa foi sintonizada em 40 Hz, temos um erro de - 12,5 % na indicação da sintonia.

A Fig. 8 mostra a pressão acústica na saída, P_O, e suas componentes que a constituem: a contribuição do falante P_D, a do duto P_P e a das perdas, P_L, onde fica evidenciada a vocação da componente produzida pelo falante na indicação da sintonia: um mergulho na resposta exatamente na frequência de sintonia. Esta indicação é muito pouco afetada pelas componentes não lineares da bobina.

A Fig. 9 combina as indicações elétricas e acústica da sintonia e permite uma visualização mais detalhada. O primeiro ponto de fase nula ocorre em 32,5 Hz e o de mínimo em 33,5 Hz, o que eleva o erro da indicação da sintonia para -19 %. A componente do falante tem seu mínimo em 40 Hz, o que precisamente indica a sintonia da caixa.

As Figs 10 a 12 referem-se ao 18SW2P instalado na mesma caixa de 100 litros, sintonizada em 40 Hz. Com este falante, o primeiro ponto de fase nula ocorreu em 34,5 Hz e o de mínimo em 35 Hz, sendo o erro na indicação da sintonia igual a - 14 %. A componente gerada pelo falante continua com seu mínimo em 40 Hz, praticamente independentemente do falante e precisamente indicando a sintonia da caixa.

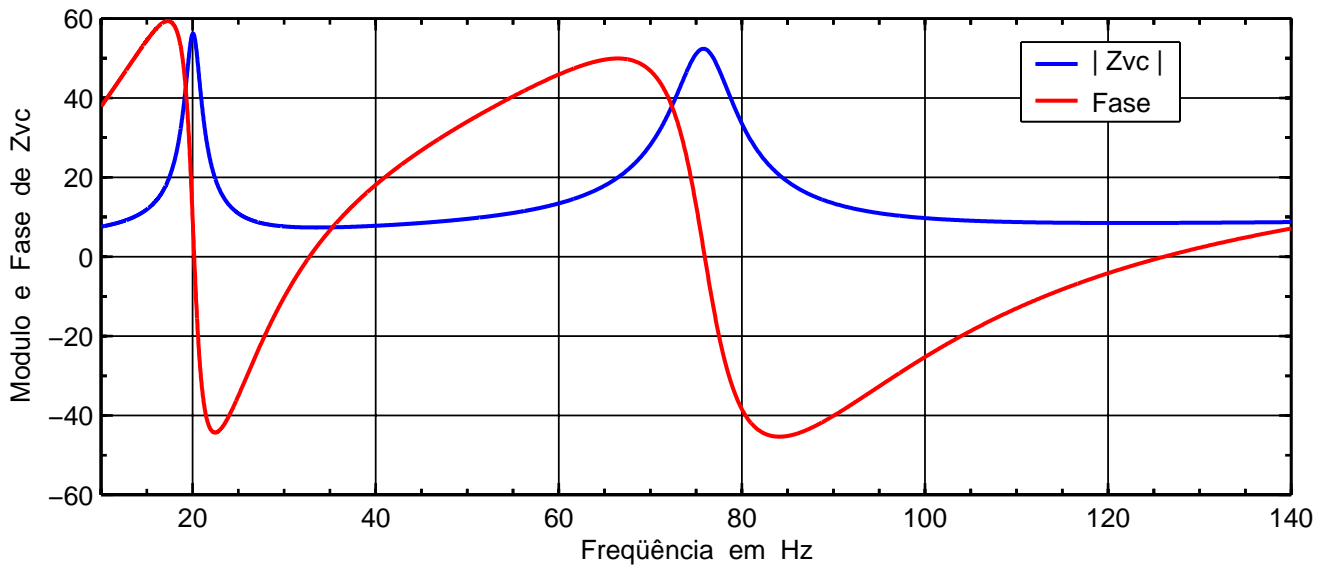


Fig. 7 – Modulo da impedância e fase do 18SW1P em caixa BR, de 100 litros, sintonizada em 40 Hz.

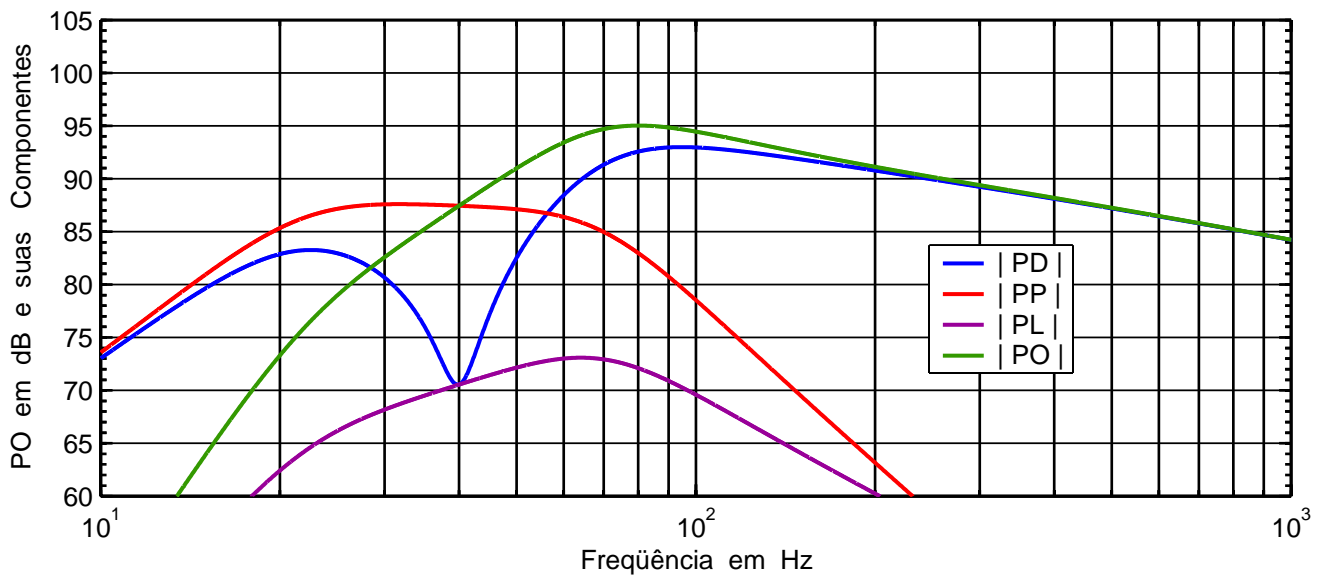


Fig. 8 – Componentes acústicas do 18SW1P em caixa BR, de 100 litros, sintonizada em 40 Hz.

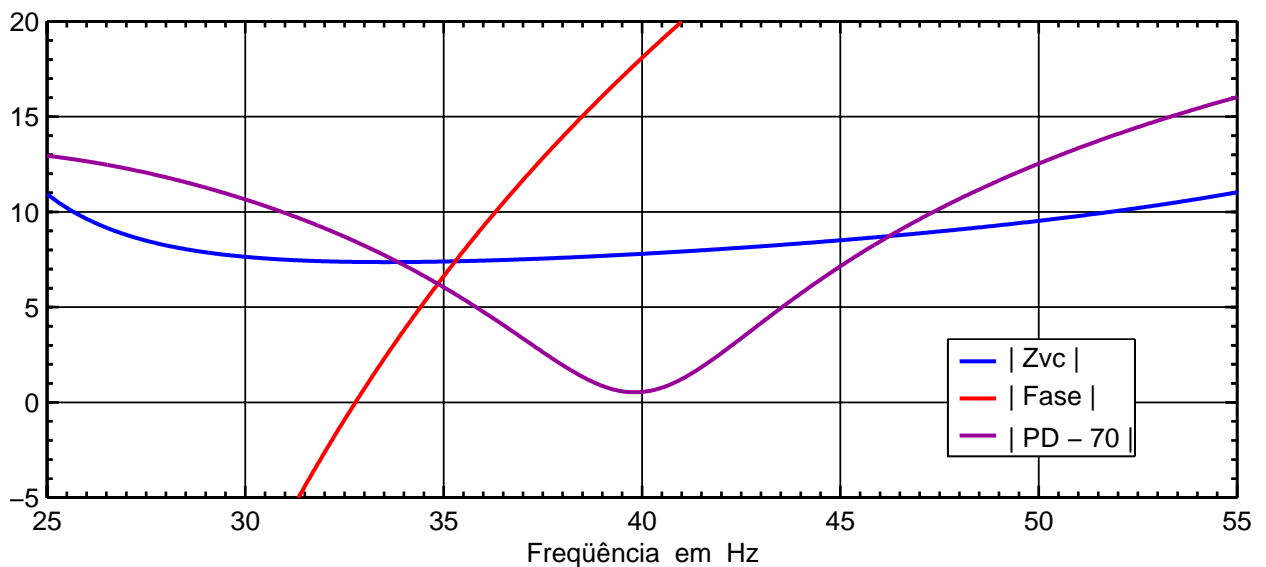


Fig. 9 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, de 100 litros, sintonizada em 40 Hz.

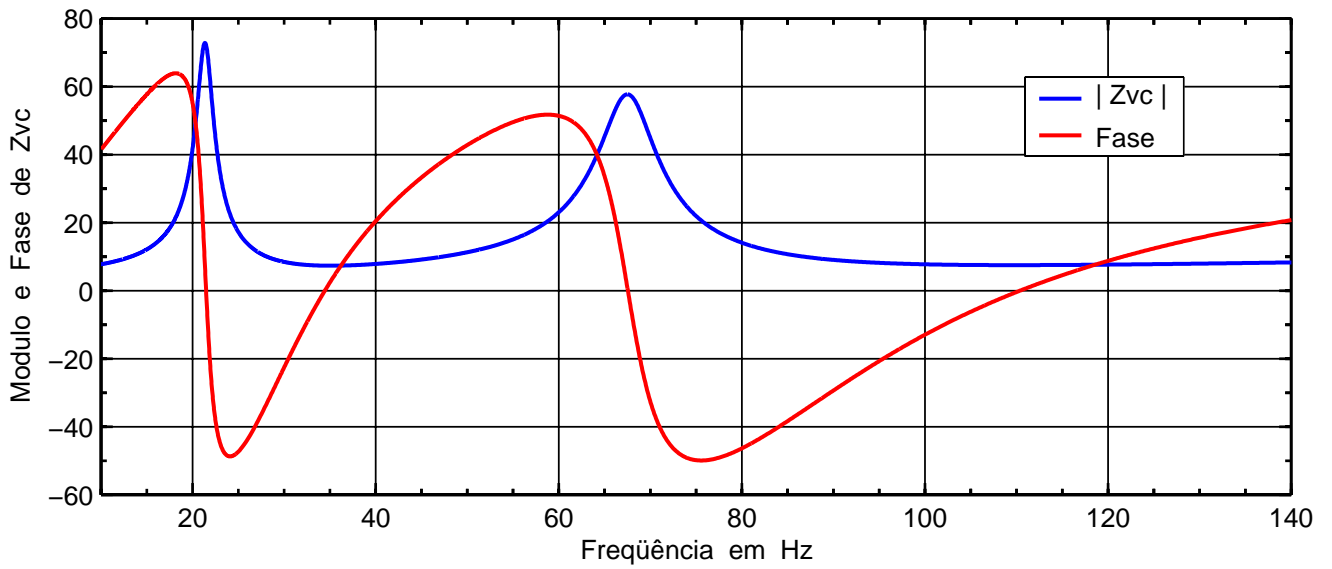


Fig. 10 – Modulo da impedância e fase do 18SW2P em caixa BR, de 100 litros, sintonizada em 40 Hz.

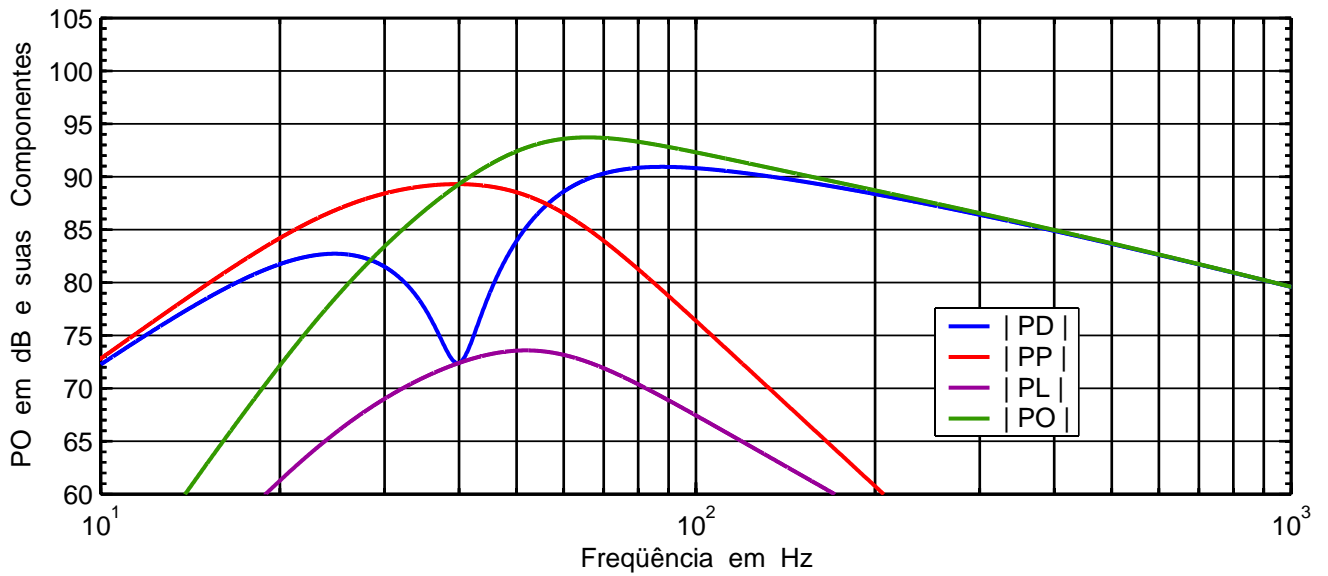


Fig. 11 – Componentes acústicas do 18SW2P em caixa BR, de 100 litros, sintonizada em 40 Hz.

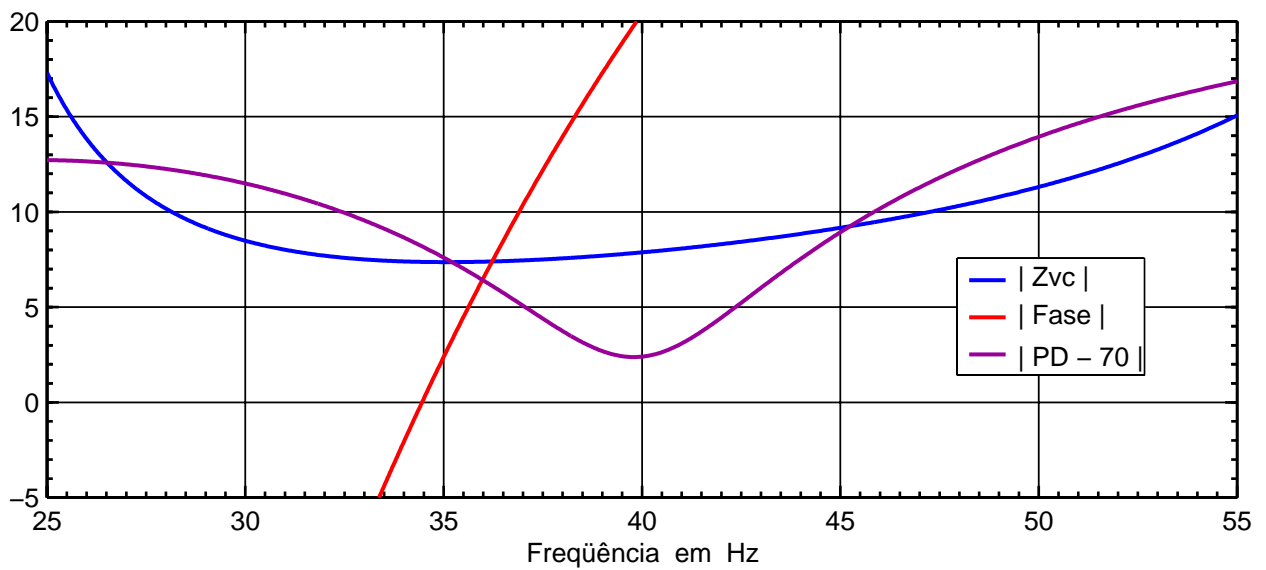


Fig. 12 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, de 100 litros, sintonizada em 40 Hz.

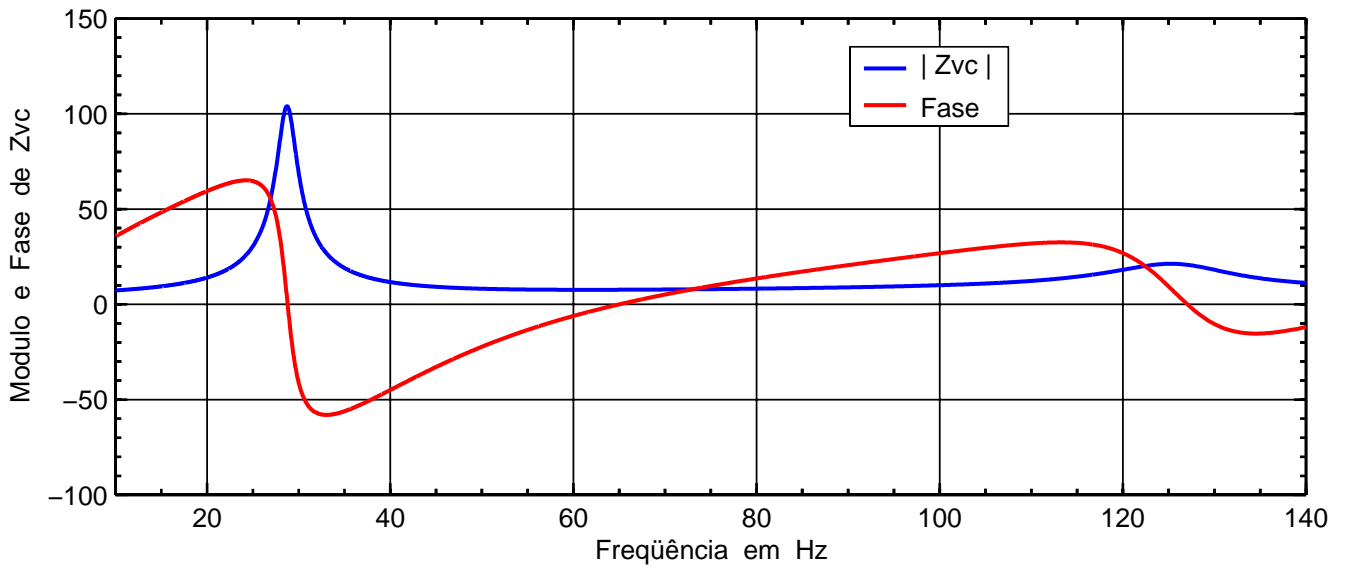


Fig. 13 – Modulo da impedância e fase do 18SW1P em caixa BR, de 50 litros, sintonizada em 95 Hz.

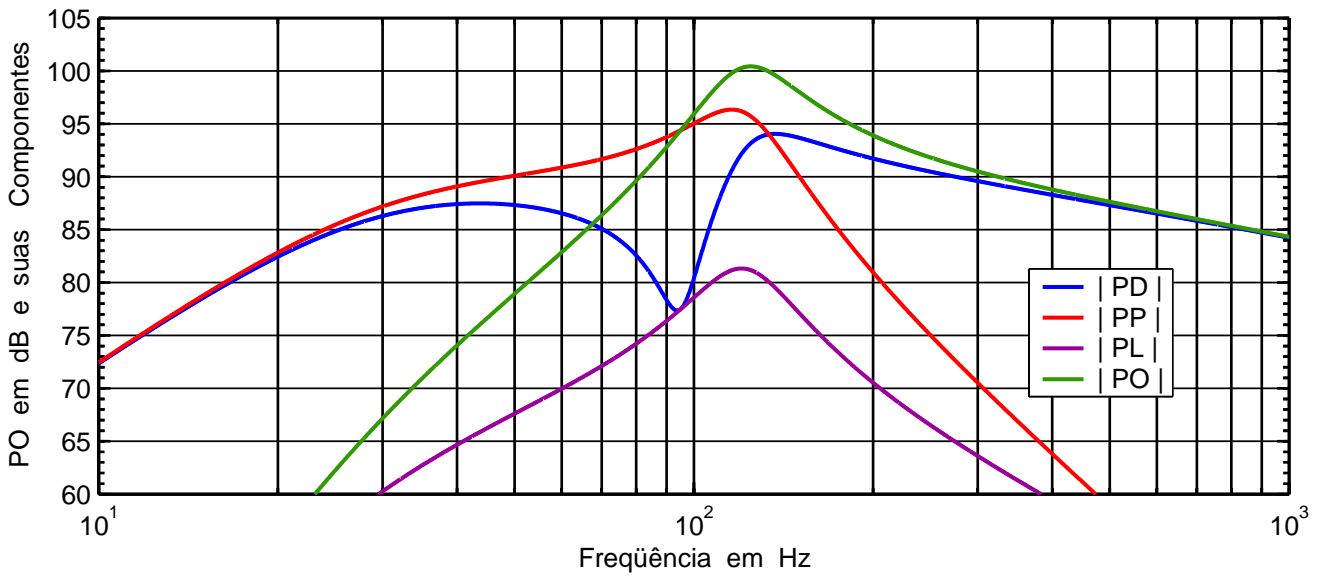


Fig. 14 – Componentes acústicas do 18SW1P em caixa BR, de 50 litros, sintonizada em 95 Hz.

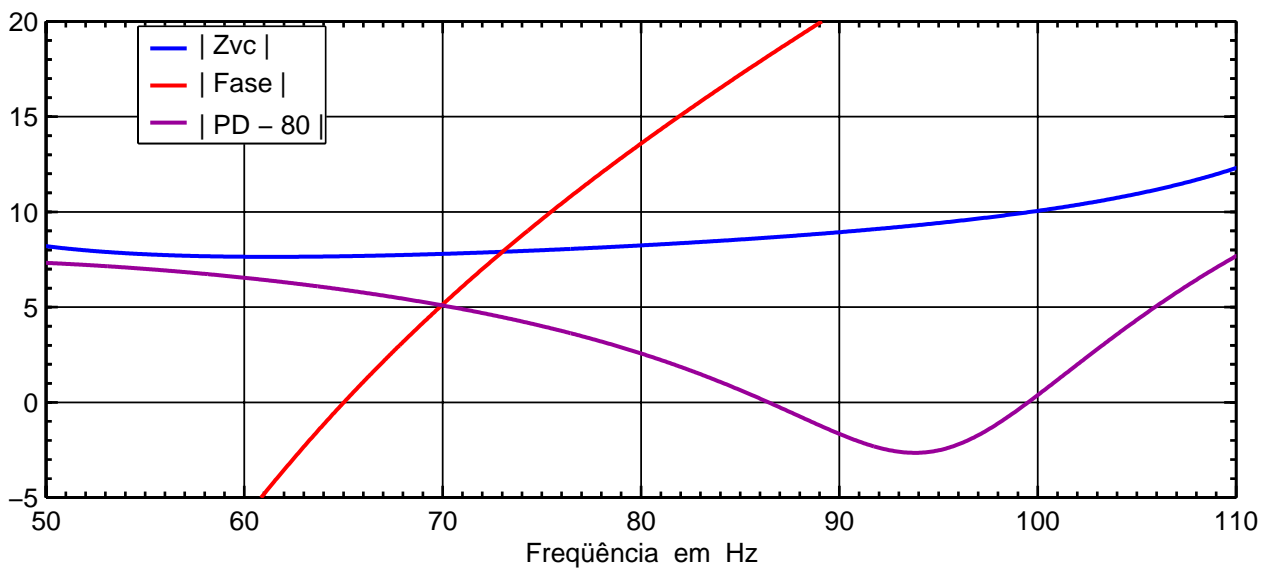


Fig. 15 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, de 50 litros, sintonizada em 95 Hz.

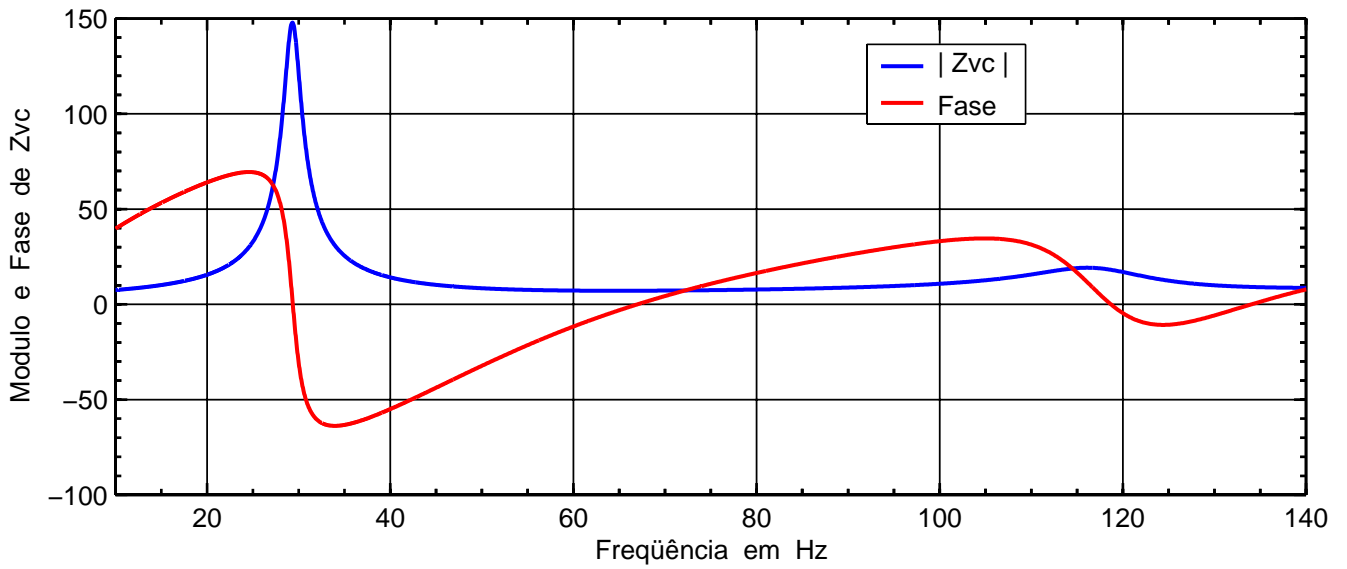


Fig. 16 – Modulo da impedância e fase do 18SW2P em caixa BR, de 50 litros, sintonizada em 95 Hz.

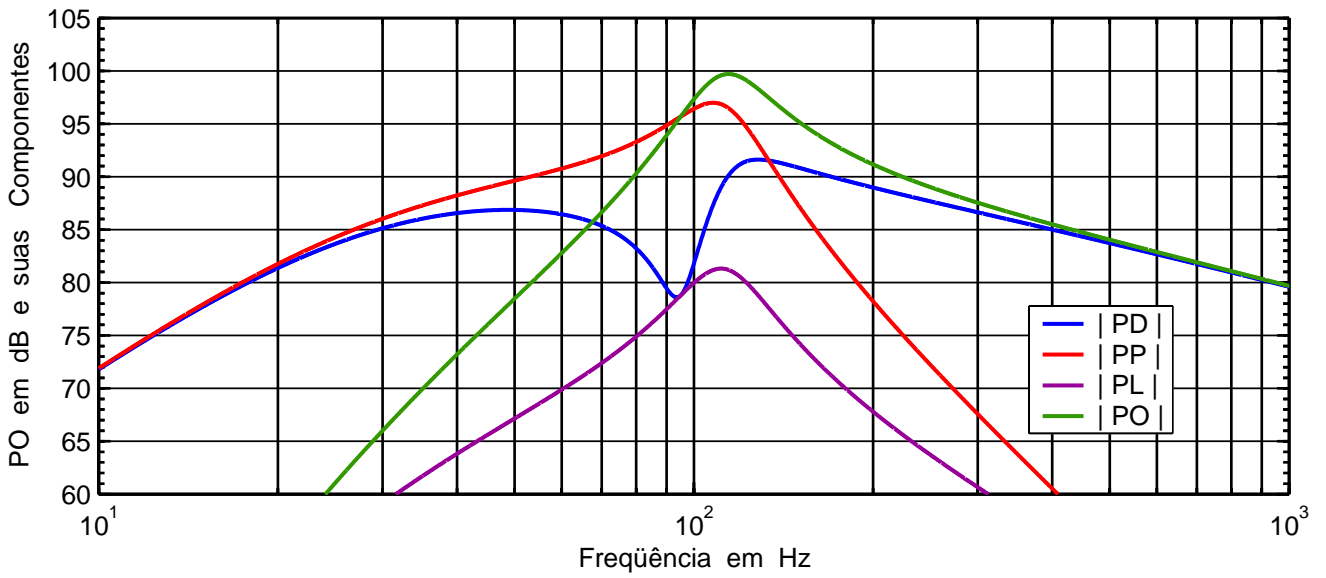


Fig. 17 – Componentes acústicas do 18SW2P em caixa BR, de 50 litros, sintonizada em 95 Hz.

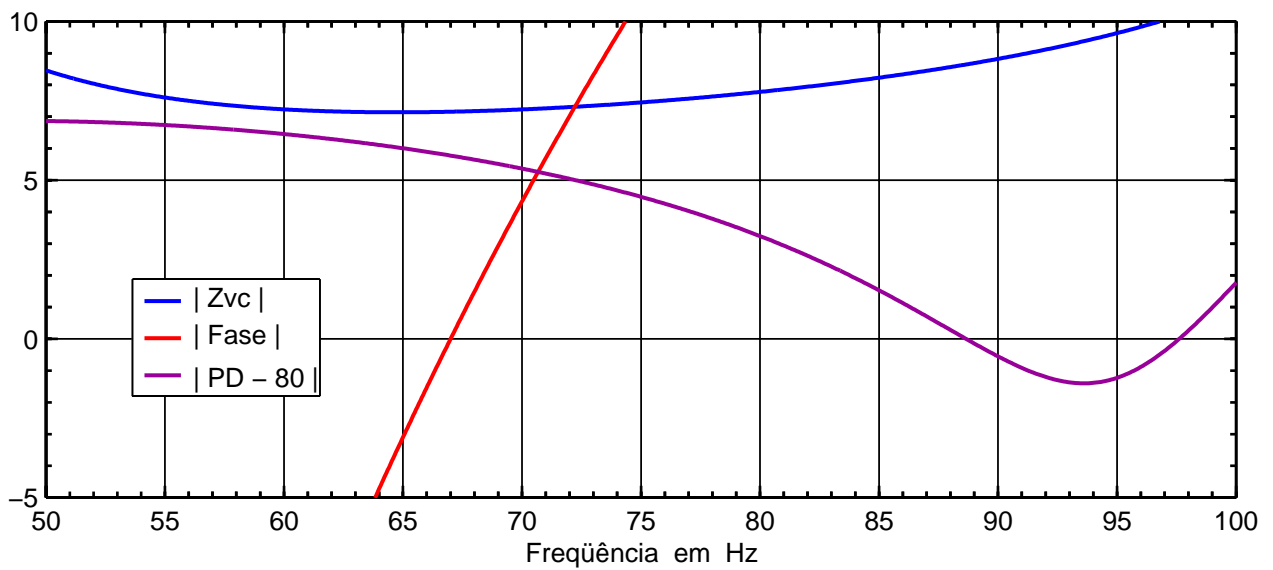


Fig. 18 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, de 50 litros, sintonizada em 95 Hz.

Volume 50 litros e sintonia 95 Hz

As Figs 13 a 15 referem-se ao 18SW1P, instalado em uma caixa de 50 litros, sintonizada em 95 Hz. O primeiro ponto de fase nula ocorreu em 65 Hz e o de mínimo no SPL do falante em 94 Hz, sendo o erro na indicação da sintonia igual a -31% .

Ns Figs 16 a 18 temos o correspondente para o 18SW2P, instalado na caixa acima. O primeiro ponto de fase nula ocorreu em 67 Hz e o de mínimo no SPL do falante em 93,5 Hz, sendo o erro na indicação da sintonia igual a -28% .

Como podemos constatar, os erros na indicação da sintonia aumentaram com a frequência, provavelmente devido à maior influência das componentes Le e Red.

Simulando a Ausência de Red e Le

Volume 100 litros e sintonia 40 Hz

As Figs. 19 e 22 mostram os indicadores de sintonia para o caso hipotético onde $Red = 0$ e $Le = 0$, respectivamente para os falantes 18SW1P e 18SW2P, onde podemos ver que o mínimo da impedância e o ponto de fase nula coincidiram entre si e com o ponto de mínimo no SPL produzido pelos cones dos falantes.

O mesmo aconteceu quando $Red \neq 0$ e $Le = 0$, conforme as Figs. 21 e 24.

Quando a indutância Le foi considerada, conforme as Figs. 20 e 23 vemos que o ponto de mínimo, na curva de SPL do driver, continuou em 40 Hz, mas os dois outros da impedância caíram significativamente. Desse modo, podemos concluir que apenas a indutância Le foi a responsável pela diferença entre os valores fornecidos pelos indicadores de sintonia.

Volume 50 litros e sintonia 95 Hz

As Figs. 25 e 28 mostram os indicadores de sintonia para o caso hipotético onde $Red = 0$ e $Le = 0$, para os falantes 18SW1P e 18SW2P, respectivamente, instalados em uma caixa de 50 litros, sintonizada em 95 Hz, onde podemos ver que os pontos de fase nula acontecerem em torno de 97 Hz e o ponto de mínimo no SPL ficou próximo de 93,5 Hz.

A coincidência entre o ponto de fase nula e o de mínimo no SPL não foi tão acentuada conforme aconteceu na câmara de 100 litros, fato que investigaremos adiante.

Algo semelhante aconteceu quando $Red \neq 0$ e $Le = 0$, conforme vemos nas Figs. 27 e 30.

Quando a indutância Le foi considerada, de acordo com as Figs. 26 e 29, o ponto de mínimo, na curva de SPL do driver, continuou em 95 Hz, aproximadamente, mas os dois outros, da curva de impedância, caíram significativamente em frequência.

Novamente confirmou-se que apenas a indutância Le foi a responsável pela diferença entre os indicadores de sintonia.

As Figs. 31 e 32 mostram que elevando para 25 o fator de qualidade das perdas por vazamento, Q_L (até então igual a 7), foi suficiente para fazer com que o ponto de fase nula coincidissem com o mínimo no SPL, tanto para o 18SW1P quanto para o 18SW2P.

Para um entendimento completo deste fato, partindo do circuito equivalente do refletor de Graves, visto pelos terminais da bobina do falante, mostrado na Fig. 33, foram obtidas as equações (0.3) a (0.22).

A equação (0.20) representa, na forma cartesiana, a impedância vista pelos terminais da bobina de um falante instalado em uma caixa Refletora de Graves. Como estamos interessados na frequência de sintonia F_b , e nesta frequência espera-se que a fase seja nula, devemos investigar as condições que anulam a parte imaginária da impedância, dada pela equação (0.22).

Desprezando a influência da indutância da bobina, o termo exponencial na equação (0.22) desaparece e a fase torna-se exatamente igual à zero, em uma caixa sem perdas ($Q_L = \infty$), devido ao termo $(\omega_b / \omega) - (\omega / \omega_b)$, que se anula em $\omega = \omega_b$. Conforme as Figs. 31 e 32 podemos constatar que mesmo com $Q_L = 25$ este fato foi praticamente confirmado. Resumindo, para a fase ser nula em F_b , além do efeito de Le ter que ser desprezível, as perdas na caixa também deveriam ser baixas, o que, na prática, muitas vezes, não acontece.

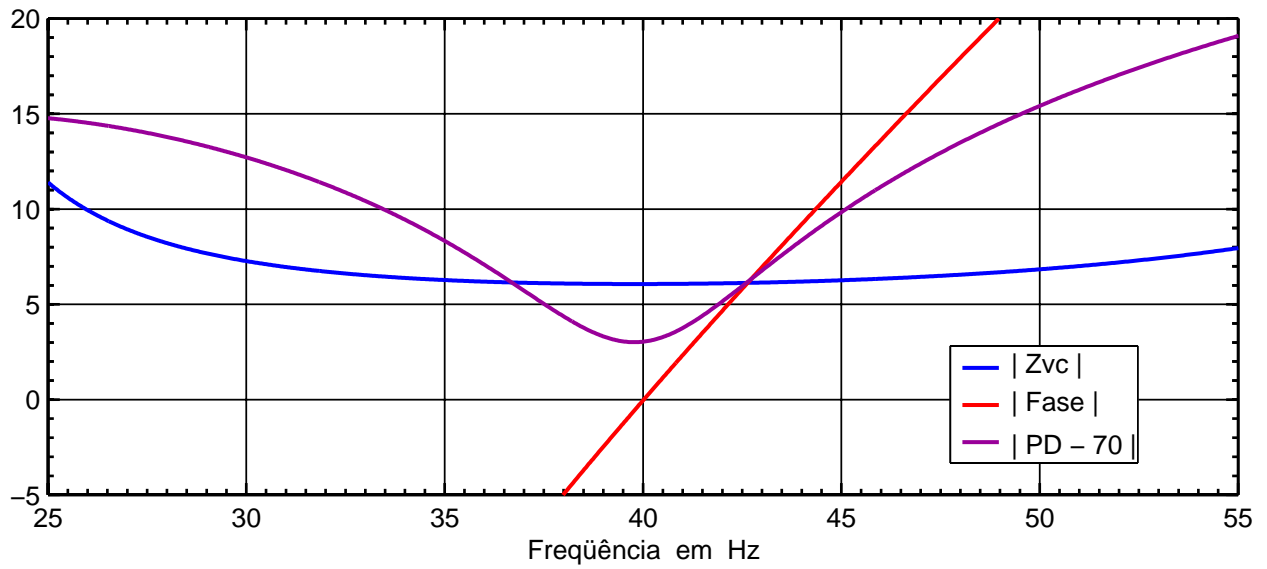


Fig. 19 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 100$ litros, $F_b = 40$ Hz. $Red = 0$, $Le = 0$.

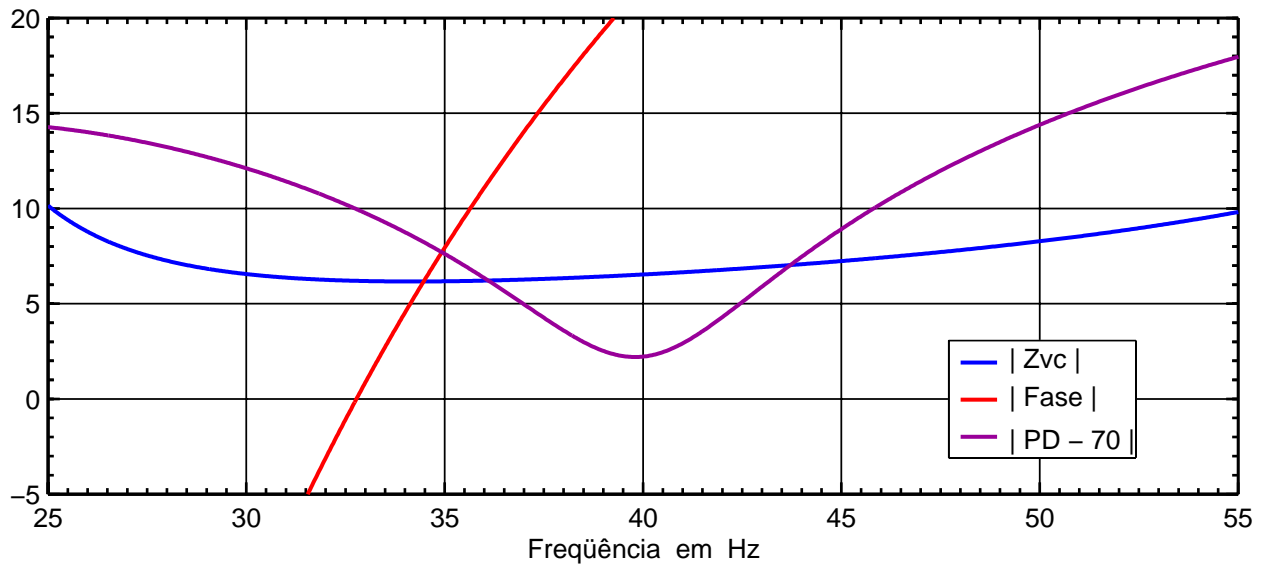


Fig. 20 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 100$ litros, $F_b = 40$ Hz. $Red = 0$, $Le \neq 0$.

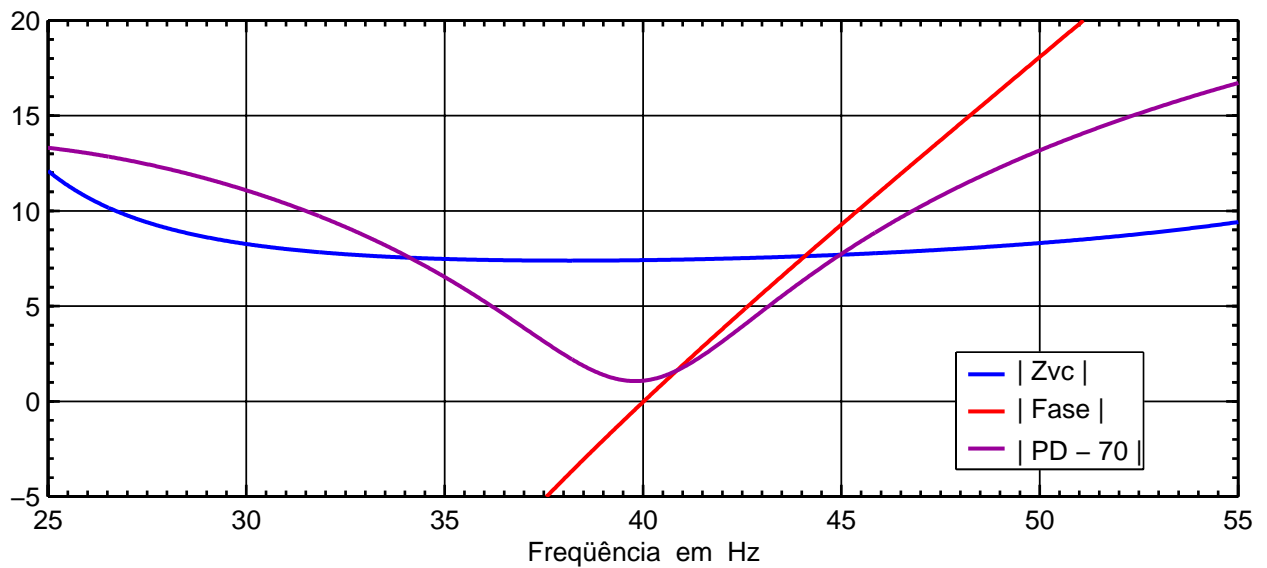


Fig. 21 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 100$ litros, $F_b = 40$ Hz. $Red \neq 0$, $Le = 0$.

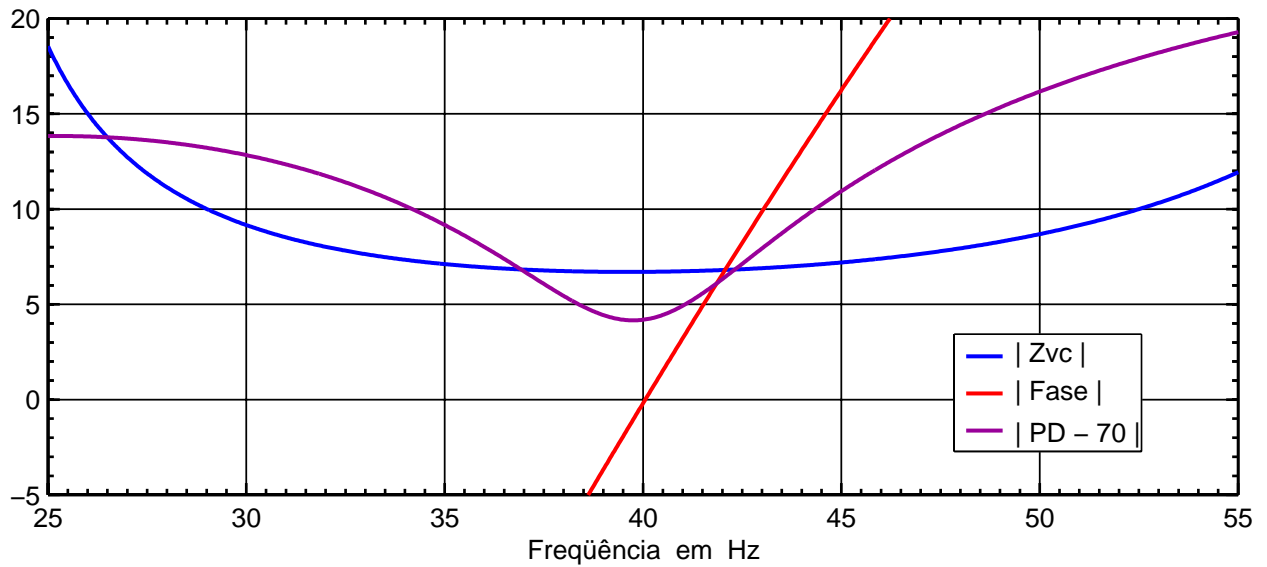


Fig. 22 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 100$ litros, $F_b = 40$ Hz. $Red = 0$, $Le = 0$.

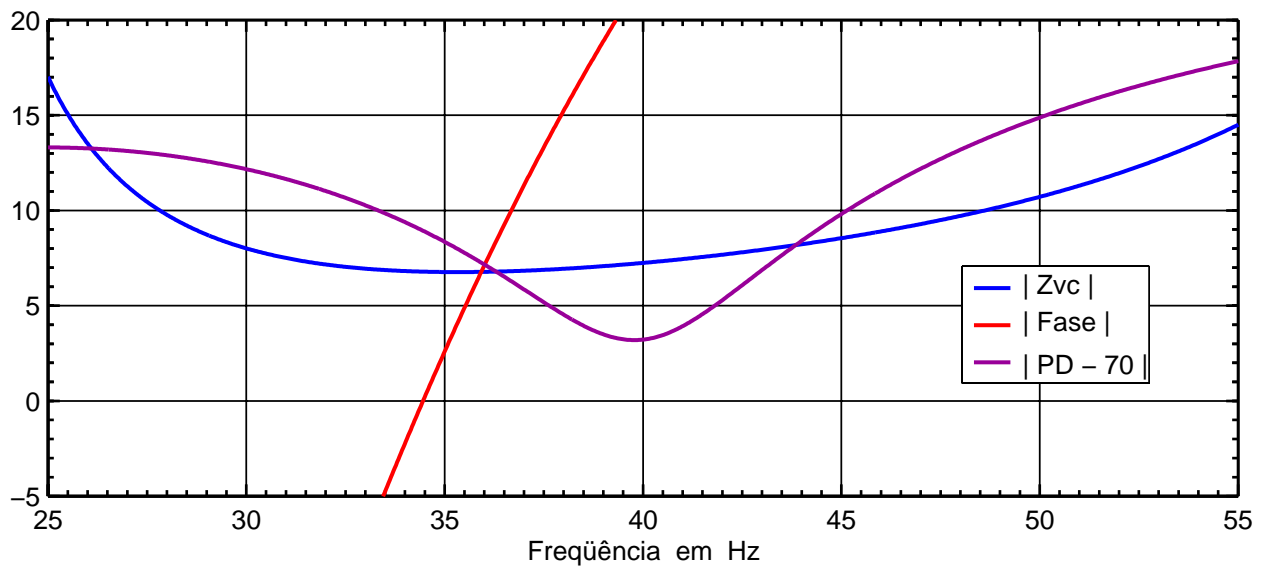


Fig. 23 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 100$ litros, $F_b = 40$ Hz. $Red = 0$, $Le \neq 0$.

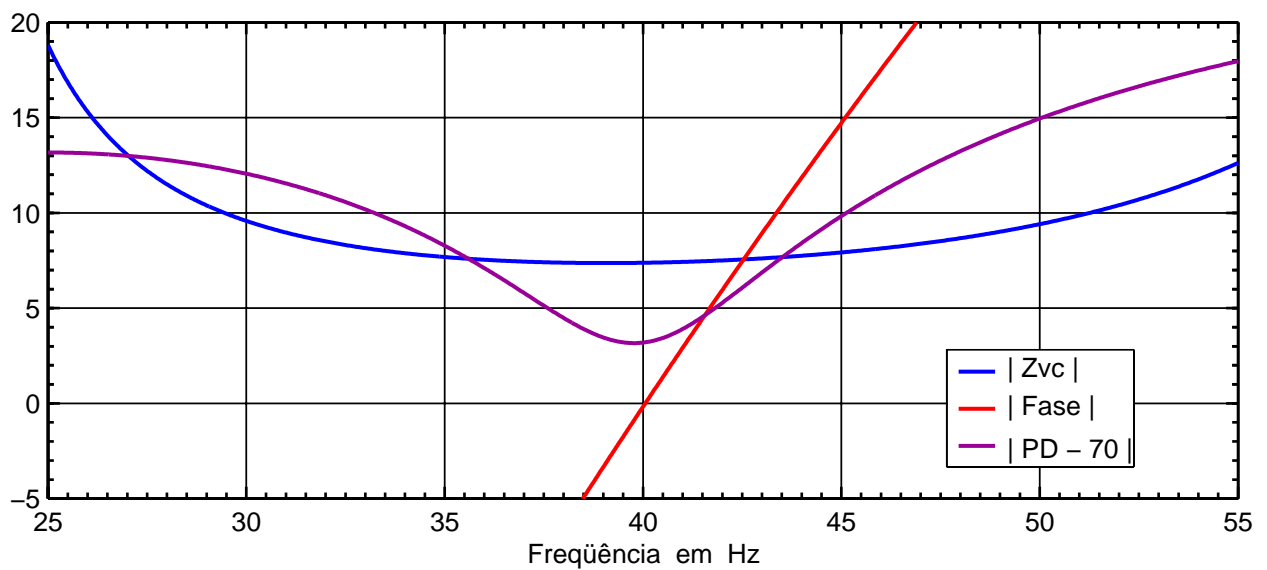


Fig. 24 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 100$ litros, $F_b = 40$ Hz. $Red \neq 0$, $Le = 0$.

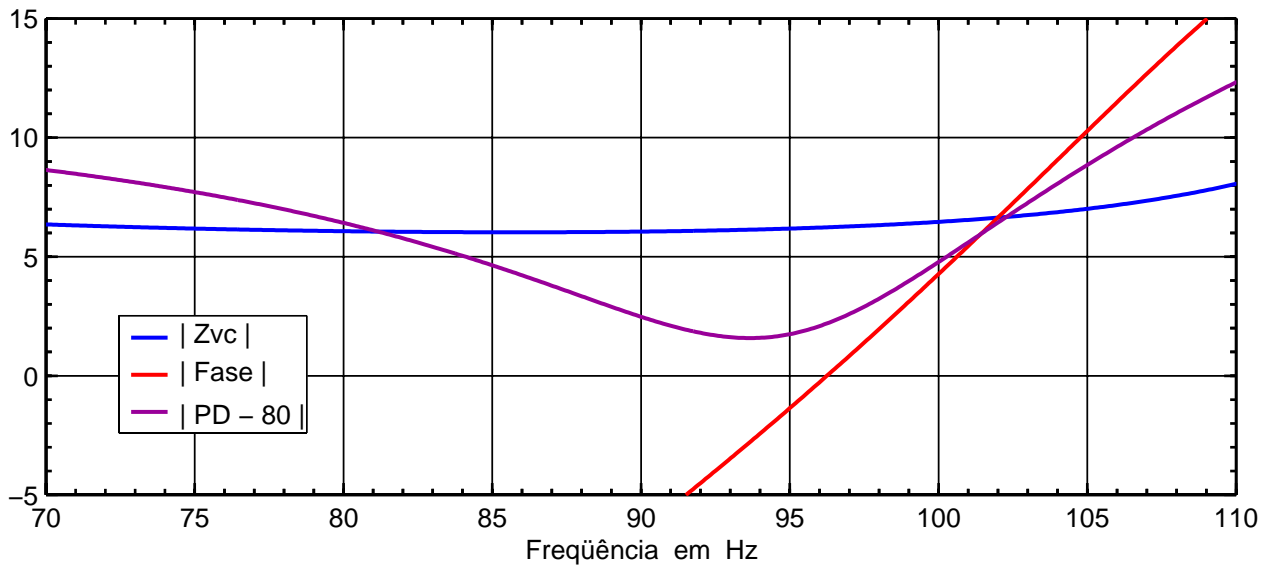


Fig. 25 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red = 0$, $Le = 0$.

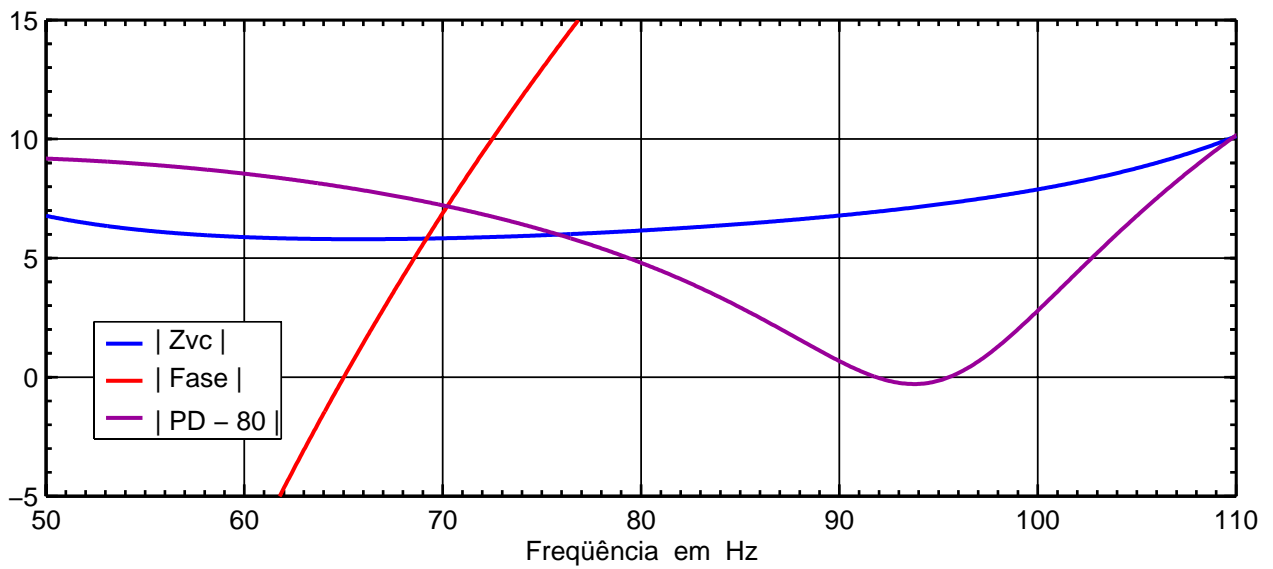


Fig. 26 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red = 0$, $Le \neq 0$.

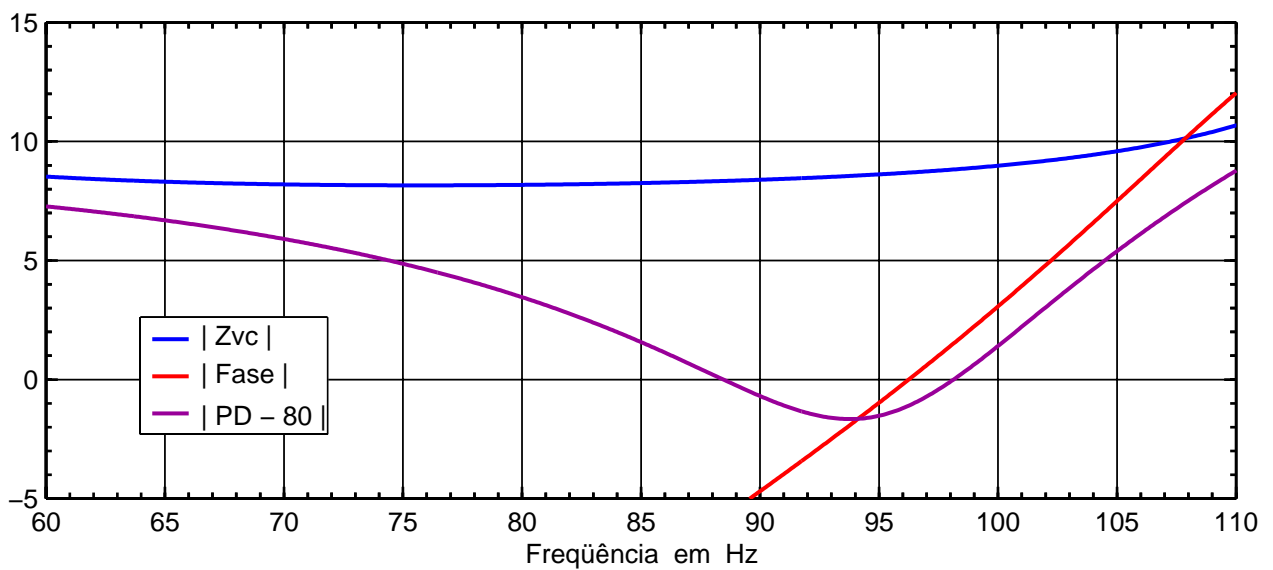


Fig. 27 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red \neq 0$, $Le = 0$.

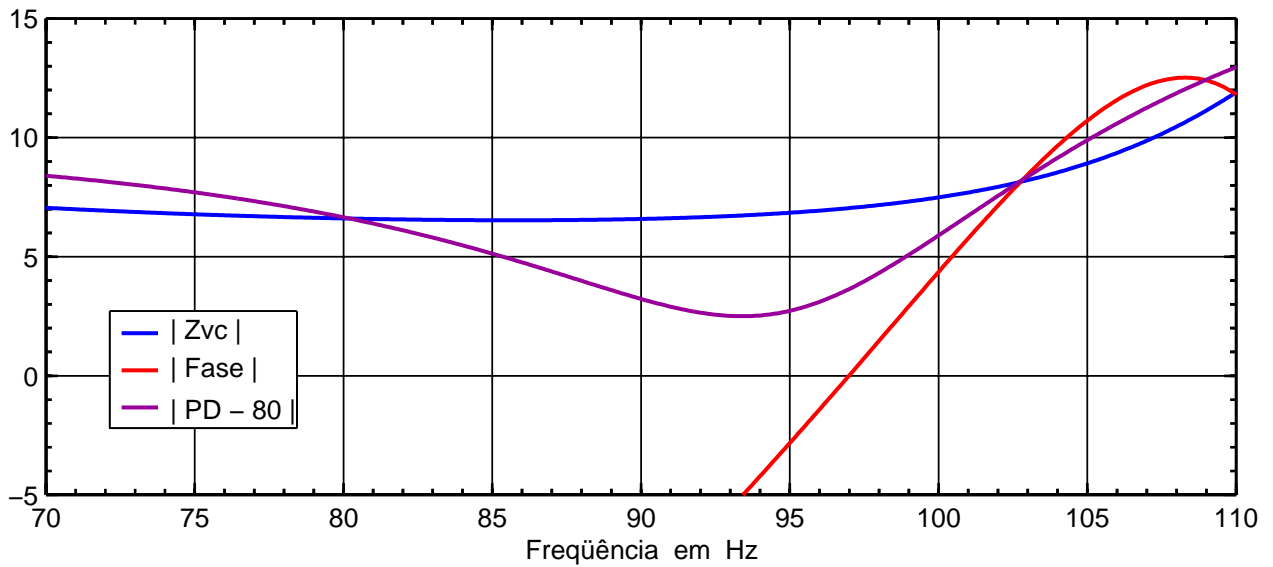


Fig. 28 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red = 0$, $Le = 0$.

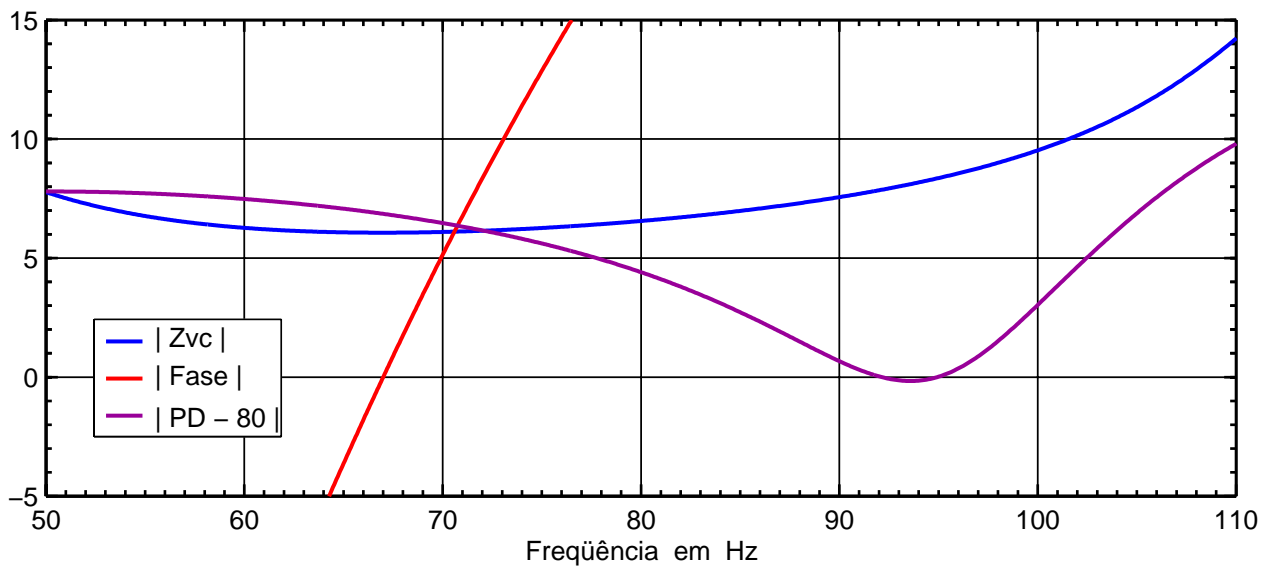


Fig. 29 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red = 0$, $Le \neq 0$.

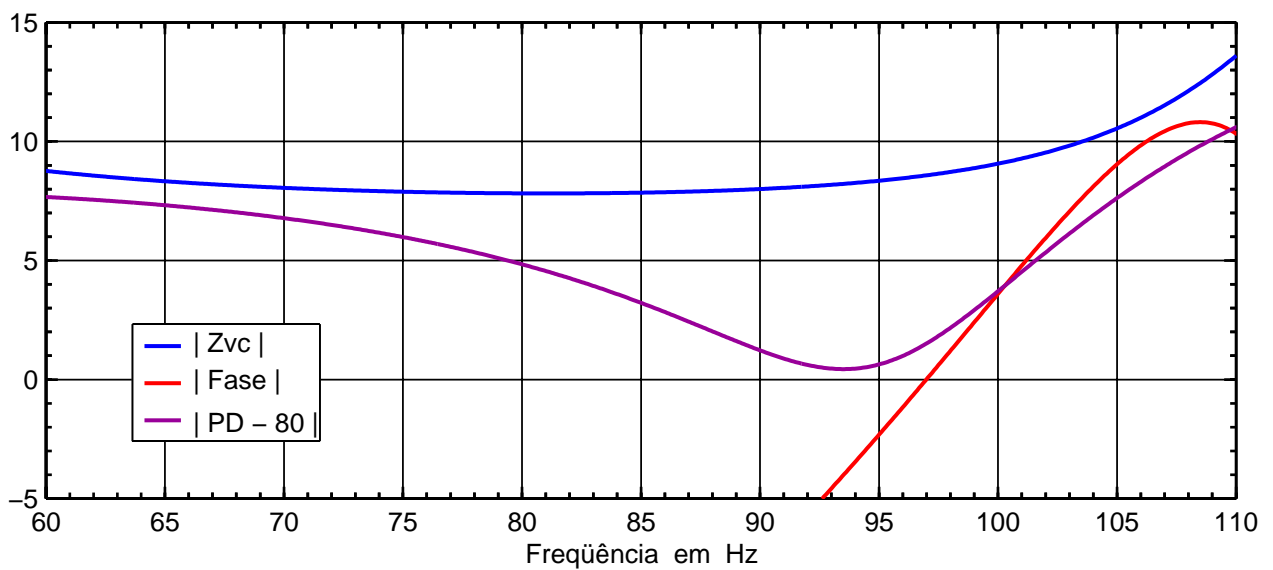


Fig. 30 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red \neq 0$, $Le = 0$.

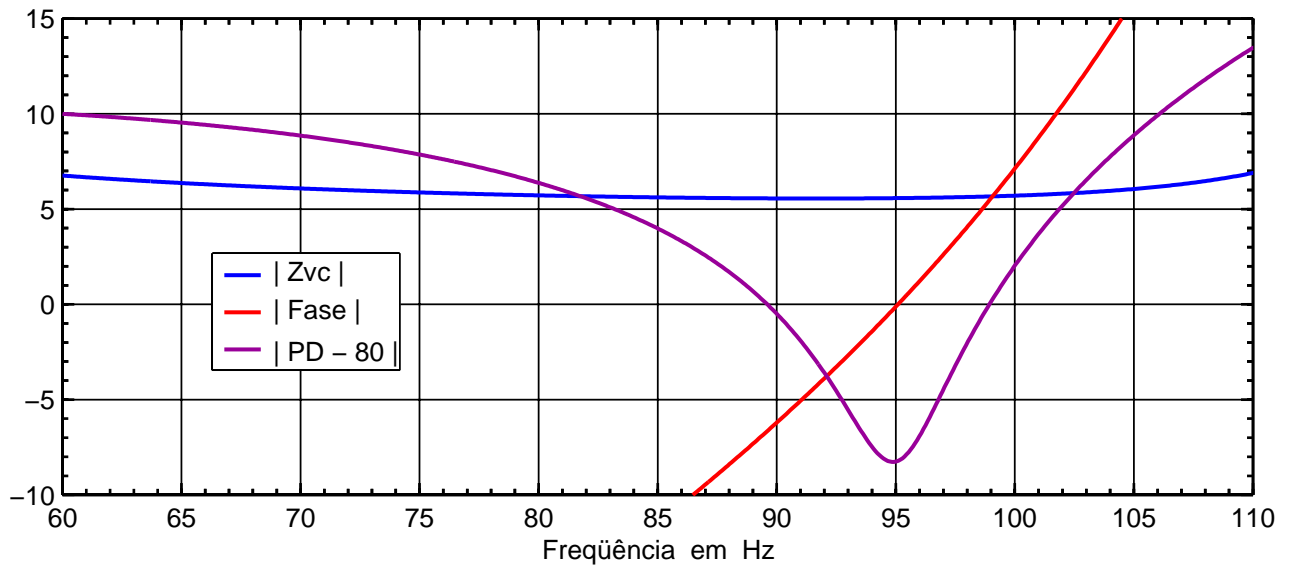


Fig. 31 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red = 0$, $Le = 0$ e $QL = 25$.

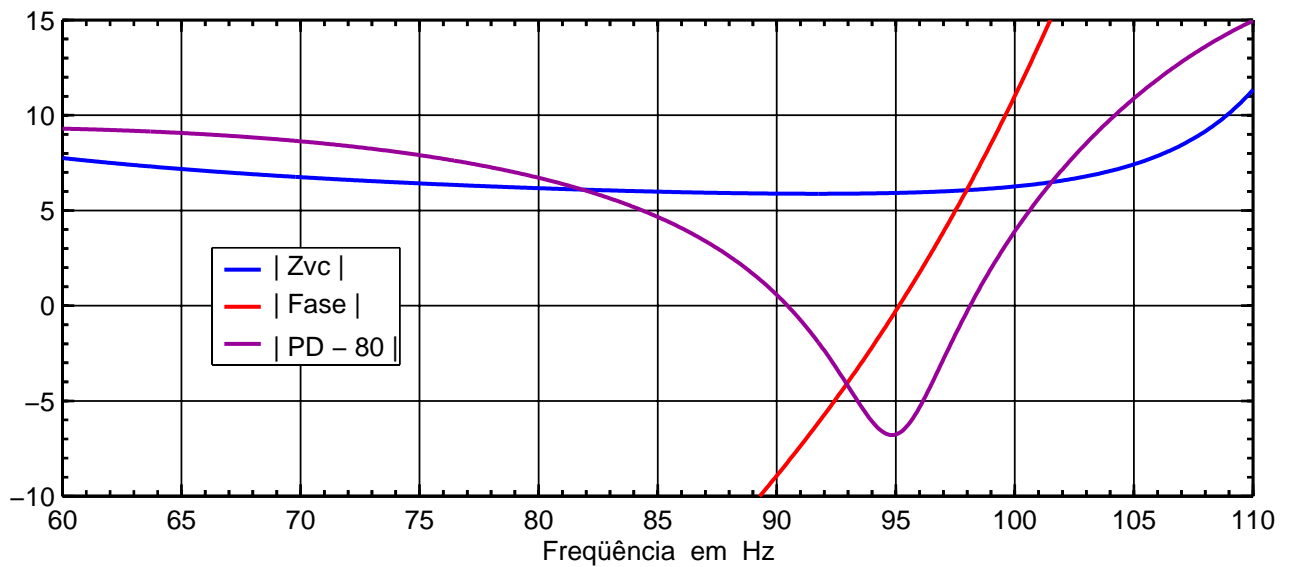


Fig. 32 – Indicadores de sintonia do 18SW2P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red = 0$, $Le = 0$ e $QL = 25$.

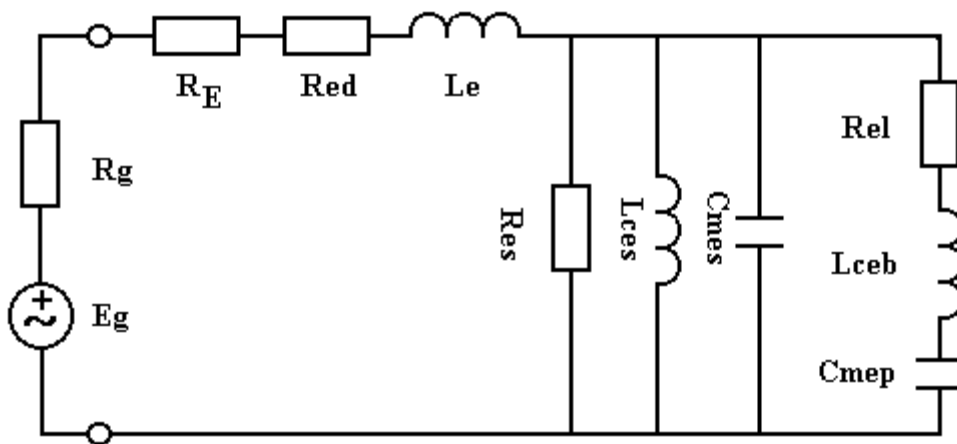


Fig. 33 – Circuito equivalente elétrico do Refletor de Graves, visto pela bobina.

$$Z_{vc(s)} = R_E + R_{ed} + s \cdot L_e + R_{es} \cdot Z_{e(s)} \quad (0.3)$$

$$Z_{e(s)} = \frac{\omega_s}{Q_{ms}} \cdot \left[\frac{s^3 + \frac{s^2 \cdot \omega_b}{Q_L} + s \cdot \omega_b^2}{Dz_{(s)}} \right] \quad (0.4)$$

$$Dz_{(s)} = s^4 + s^3 \cdot \left(\frac{\omega_s}{Q_{ms}} + \frac{\omega_b}{Q_L} \right) + s^2 \cdot \left[\omega_b^2 + \frac{\omega_s \cdot \omega_b}{Q_{ms} \cdot Q_L} + (1 + \alpha) \cdot \omega_s^2 \right] + \dots \quad (0.5)$$

$$\dots + s \cdot \omega_s \cdot \omega_b \cdot \left(\frac{\omega_b}{Q_{ms}} + \frac{\omega_s}{Q_L} \right) + \omega_s^2 \cdot \omega_b^2$$

Substituindo s por $j\omega$, vem:

$$Z_{vc(j\omega)} = R_E + R_{ed} + j\omega \cdot L_e + R_{es} \cdot Z_{e(s)} \quad (0.6)$$

$$Z_{e(s)} = \frac{\omega_s}{Q_{ms}} \cdot \frac{-j\omega^3 - \frac{\omega^2 \cdot \omega_b}{Q_L} + j\omega \cdot \omega_b^2}{Dz_{(j\omega)}} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms}} \cdot \frac{-j \frac{\omega^3}{\omega^2 \cdot \omega_b} - \frac{1}{Q_L} + j \frac{\omega \cdot \omega_b^2}{\omega^2 \cdot \omega_b}}{Dz_{(j\omega)}} \quad (0.7)$$

$$Z_{e(s)} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms}} \cdot \frac{-\frac{1}{Q_L} + j \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right)}{Dz_{(j\omega)}} \quad (0.8)$$

$$Dz_{(j\omega)} = \omega^4 - j\omega^3 \cdot \left(\frac{\omega_s}{Q_{ms}} + \frac{\omega_b}{Q_L} \right) - \omega^2 \cdot \left[\omega_b^2 + \frac{\omega_s \cdot \omega_b}{Q_{ms} \cdot Q_L} + (1 + \alpha) \cdot \omega_s^2 \right] + \dots \quad (0.9)$$

$$\dots + j\omega \cdot \omega_s \cdot \omega_b \cdot \left(\frac{\omega_b}{Q_{ms}} + \frac{\omega_s}{Q_L} \right) + \omega_s^2 \cdot \omega_b^2$$

$$Dz_{(j\omega)} = a_Z + j \cdot b_Z \quad (0.10)$$

$$a_Z = \omega^4 - \omega^2 \cdot \left[\omega_b^2 + \frac{\omega_s \cdot \omega_b}{Q_{ms} \cdot Q_L} + (1 + \alpha) \cdot \omega_s^2 \right] + \omega_s^2 \cdot \omega_b^2 \quad (0.11)$$

$$b_Z = -\omega^3 \cdot \left(\frac{\omega_s}{Q_{ms}} + \frac{\omega_b}{Q_L} \right) + \omega \cdot \omega_s \cdot \omega_b \cdot \left(\frac{\omega_b}{Q_{ms}} + \frac{\omega_s}{Q_L} \right) \quad (0.12)$$

$$Z_{e(j\omega)} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms}} \cdot \frac{-\frac{1}{Q_L} + j \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right)}{a_Z + j \cdot b_Z} \quad (0.13)$$

$$Z_{e(j\omega)} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms}} \cdot \frac{-\frac{1}{Q_L} + j \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right)}{a_z + j \cdot b_z} \cdot \frac{a_z - j \cdot b_z}{a_z - j \cdot b_z} \quad (0.14)$$

$$Z_{e(j\omega)} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms}} \cdot \frac{-\frac{a_z}{Q_L} + j \cdot a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + j \cdot \frac{b_z}{Q_L} + b_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right)}{a_z^2 + b_z^2} \quad (0.15)$$

$$Z_{e(j\omega)} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms}} \cdot \frac{b_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) - \frac{a_z}{Q_L} + j \cdot \left[a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + \frac{b_z}{Q_L} \right]}{a_z^2 + b_z^2} \quad (0.16)$$

$$Z_{e(j\omega)} = \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms} \cdot (a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[b_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) - \frac{a_z}{Q_L} \right] + j \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{Q_{ms} \cdot (a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + \frac{b_z}{Q_L} \right] \quad (0.17)$$

$$\begin{aligned} Z_{vc(j\omega)} &= R_E + R_{ed} + \frac{R_{es}}{Q_{ms}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[b_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) - \frac{a_z}{Q_L} \right] + \dots \\ &\dots + j \cdot \left\{ \omega \cdot L_e + \frac{R_{es}}{Q_{ms}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + \frac{b_z}{Q_L} \right] \right\} \end{aligned} \quad (0.18)$$

$$\frac{R_{es}}{Q_{ms}} = \frac{R_E}{Q_{es}} \quad (0.19)$$

$$\begin{aligned} Z_{vc(j\omega)} &= R_E + R_{ed} + \frac{R_E}{Q_{es}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[b_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) - \frac{a_z}{Q_L} \right] + \dots \\ &\dots + j \cdot \left\{ \omega \cdot L_e + \frac{R_E}{Q_{es}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + \frac{b_z}{Q_L} \right] \right\} \end{aligned} \quad (0.20)$$

$$\begin{aligned} Z_{vc(j\omega)} &= R_E + K_{rm} \cdot \omega^{Em} + \frac{R_E}{Q_{es}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[b_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) - \frac{a_z}{Q_L} \right] + \dots \\ &\dots + j \cdot \left\{ K_{xm} \cdot \omega^{Exm} + \frac{R_E}{Q_{es}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + \frac{b_z}{Q_L} \right] \right\} \end{aligned} \quad (0.21)$$

$$\mathbb{I}_{Z_{vc(j\omega)}} = K_{xm} \cdot \omega^{Exm} + \frac{R_E}{Q_{es}} \cdot \frac{\omega_s \cdot \omega_b \cdot \omega^2}{(a_z^2 + b_z^2)} \cdot \left[a_z \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_b} \right) + \frac{b_z}{Q_L} \right] \quad (0.22)$$

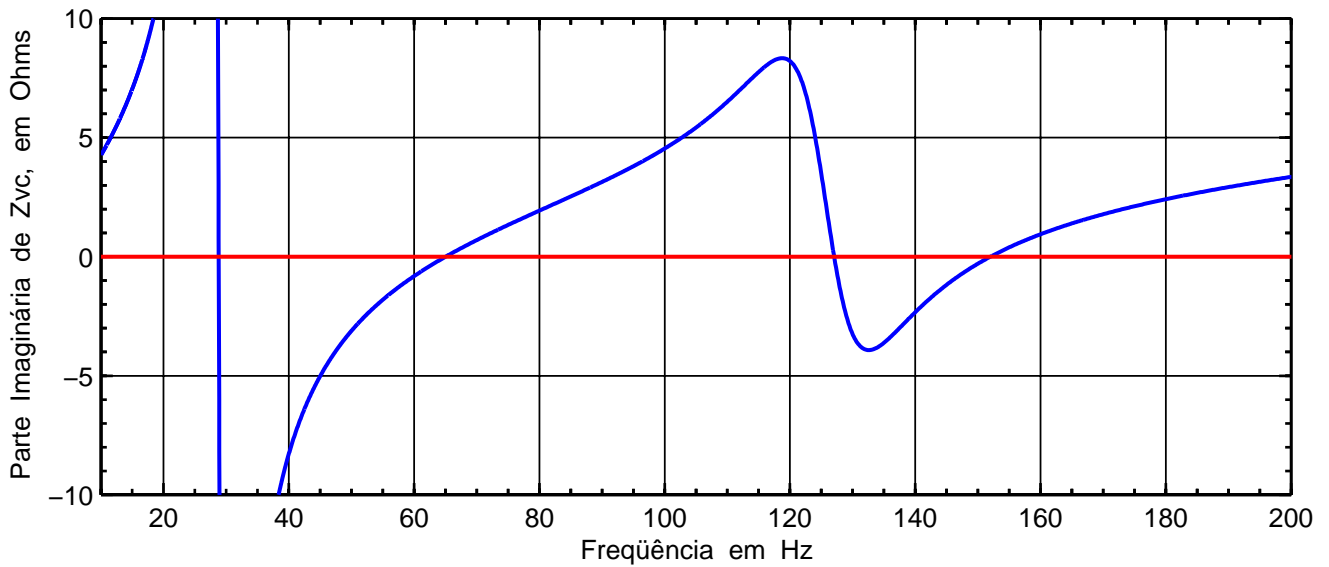


Fig. 34 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red \neq 0$, $Le \neq 0$ e $QL = 7$.

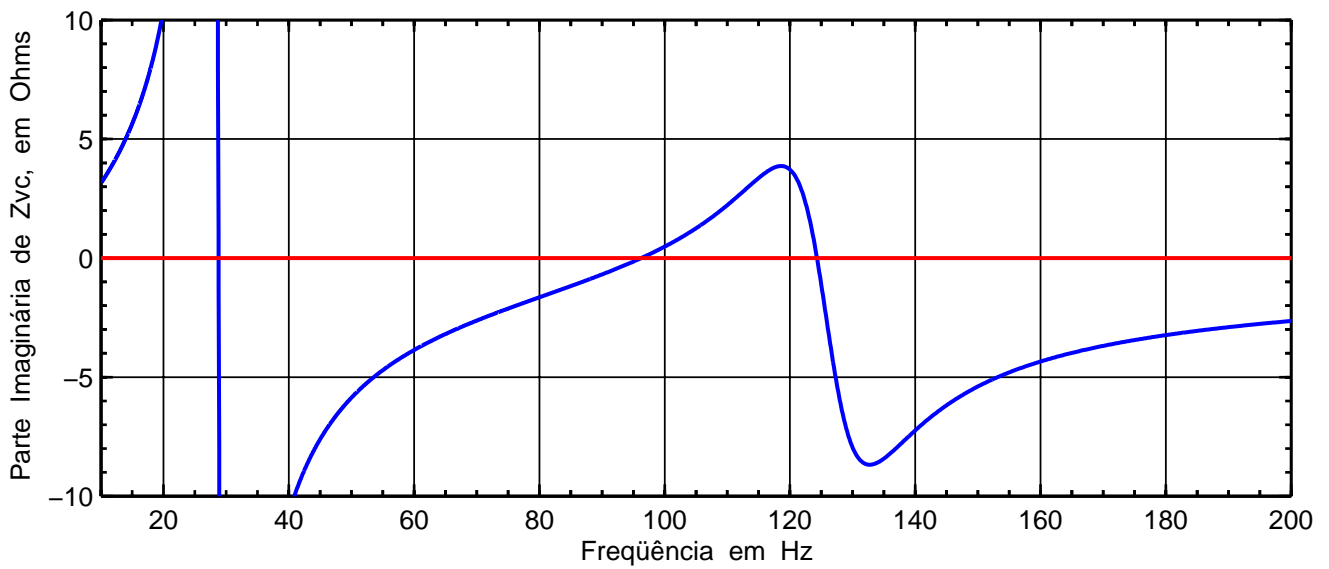


Fig. 35 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red \neq 0$, $Le = 0$ e $QL = 7$.

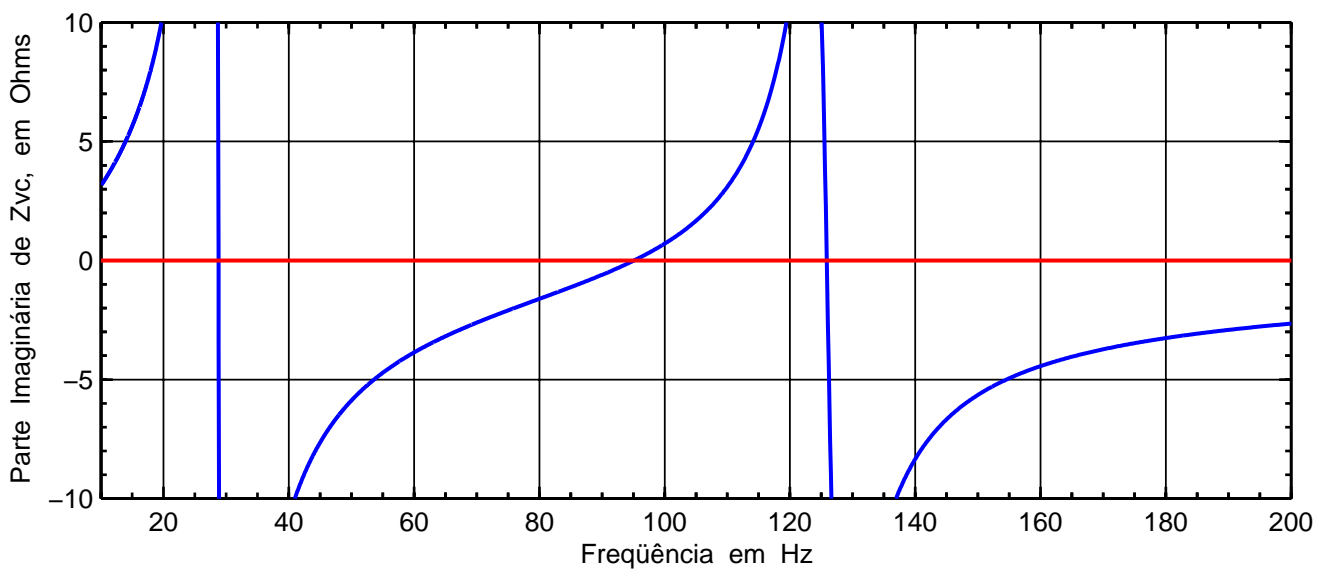


Fig. 36 – Indicadores de sintonia do 18SW1P em caixa BR, $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz. $Red \neq 0$, $Le = 0$ e $QL = 25$.

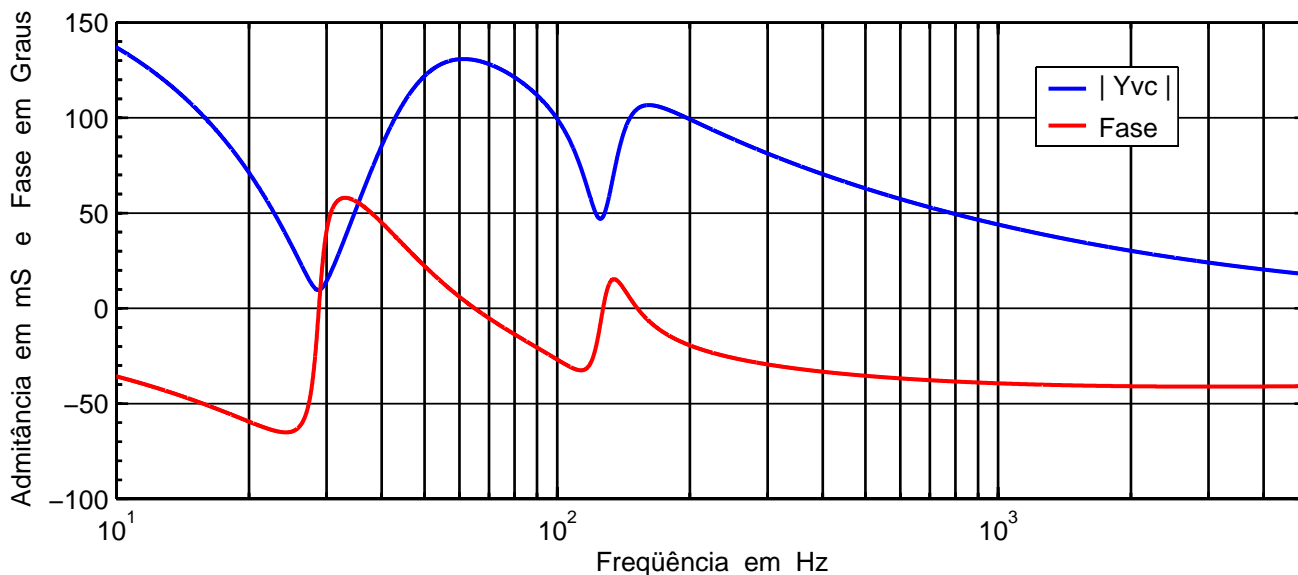


Fig. 37 – Admitância em mili Siemens, e fase em graus, do 18SW1P em caixa BR. $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz.

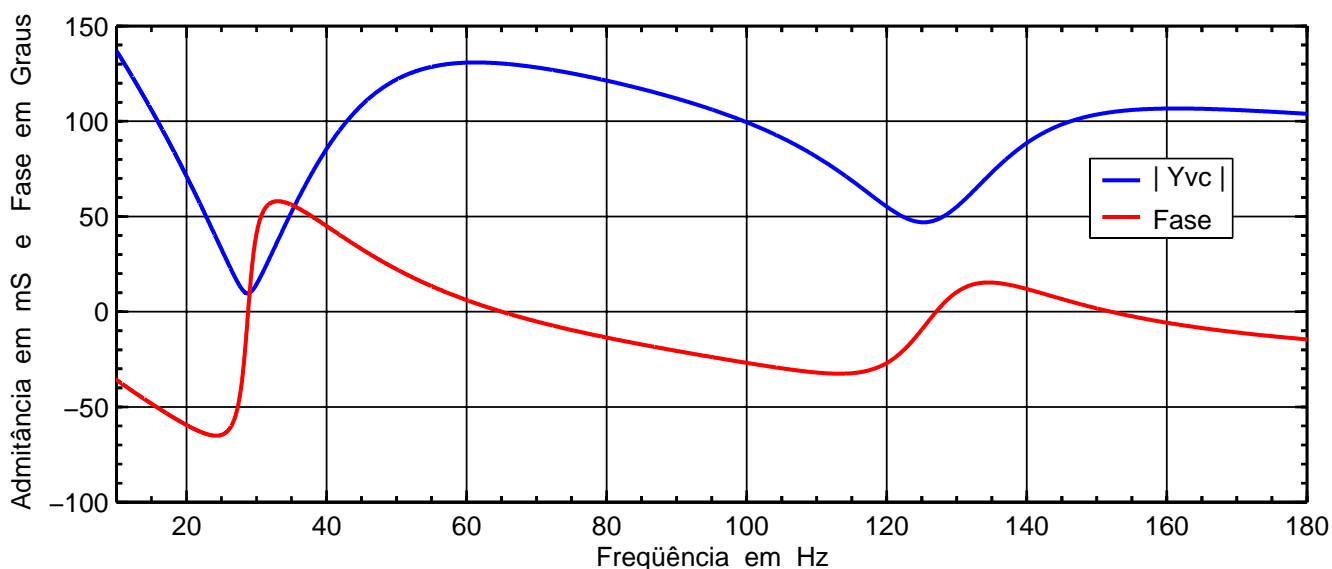


Fig. 38 – Admitância em mili Siemens, e fase em graus, do 18SW1P em caixa BR. $V_b = 50$ litros, $F_b = 95$ Hz.

A Fig. 34 representa a equação (0.22), referente ao 18SW1P instalado em uma caixa de 50 litros, sintonizada em 95 Hz, com as componentes Red e Le presentes no modelo e $Q_L = 7$.

A parte imaginária anula-se nos pontos de fase zero, que acontecem nos picos da impedância e nos pontos de mínimo, além de $f = 0$. Neste caso, o indicador aponta 65 Hz como sendo, aproximadamente, o valor de F_b .

Nas Figs. 35 e 36 a componente indutiva foi removida do modelo. Como podemos ver, a presença de Red, na Fig. 35, não produziu alteração significativa nos indicadores de sintonia que, em ambos, os casos apontaram para F_b , aproximadamente, igual a 95 Hz.

Uma possibilidade interessante, mostrada nas Figs. 37 e 38 consiste na utilização da curva de admitância, no lugar da curva de impedância, para a localização dos pontos de máximos e mínimos.

A vantagem está na maior precisão com que os pontos de mínimo, da curva da impedância, podem ser determinados na curva da admitância, onde se convertem em pontos de máximo, facilmente localizáveis.

Os Falantes em Caixa Band Pass de 6ª Ordem

Foi construída uma caixa Band Pass onde duas caixas, iguais à mostrada na Fig. 39, foram empilhadas, formando uma caixa dupla onde, em cada metade, temos: $V_{b1} = 100$ L, $F_{b1} = 40$ Hz, $V_{b2} = 50$ L e $F_{b2} = 107$ Hz. O valor original de projeto, para F_{b2} era igual a 95 Hz, mas, devido a uma alteração na área deste duto, aumentada durante a construção, o valor encontrado para F_{b2} ficou entre 105 e 110 Hz. O valor medido para F_{b1} foi igual a 42 Hz.

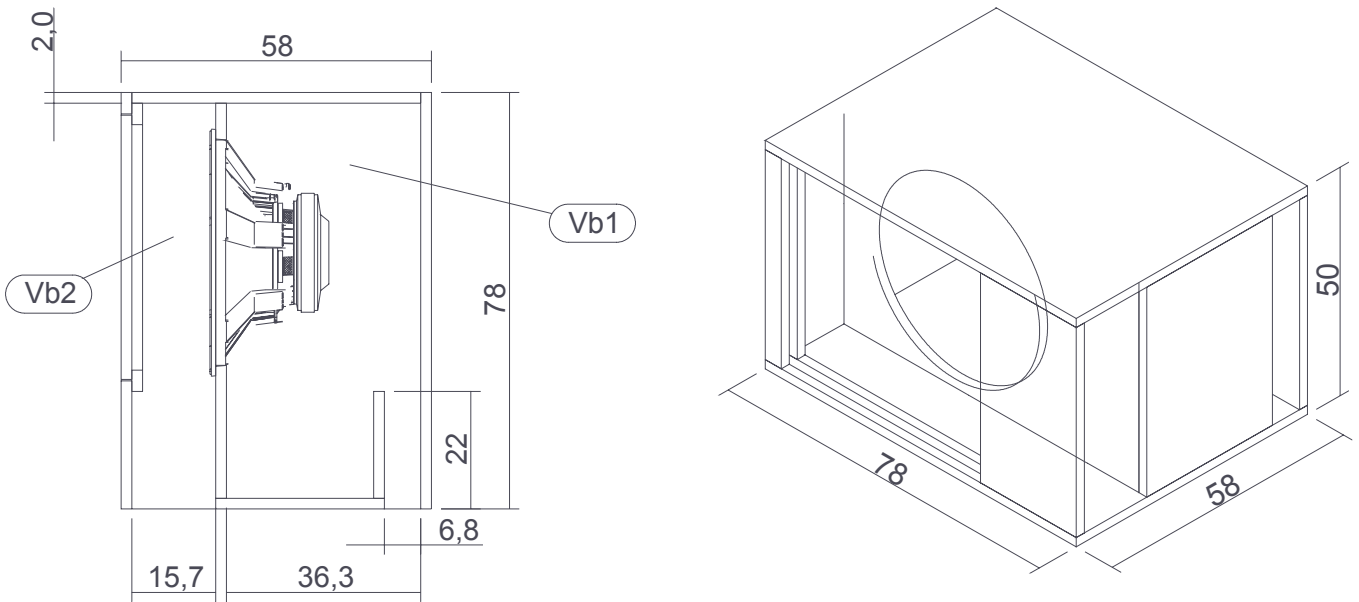


Fig. 39 – Caixa Band Pass de 6ª ordem, onde: $V_{b1} = 100$ L, $F_{b1} = 40$ Hz, $V_{b2} = 50$ L e $F_{b2} = 95$ Hz.

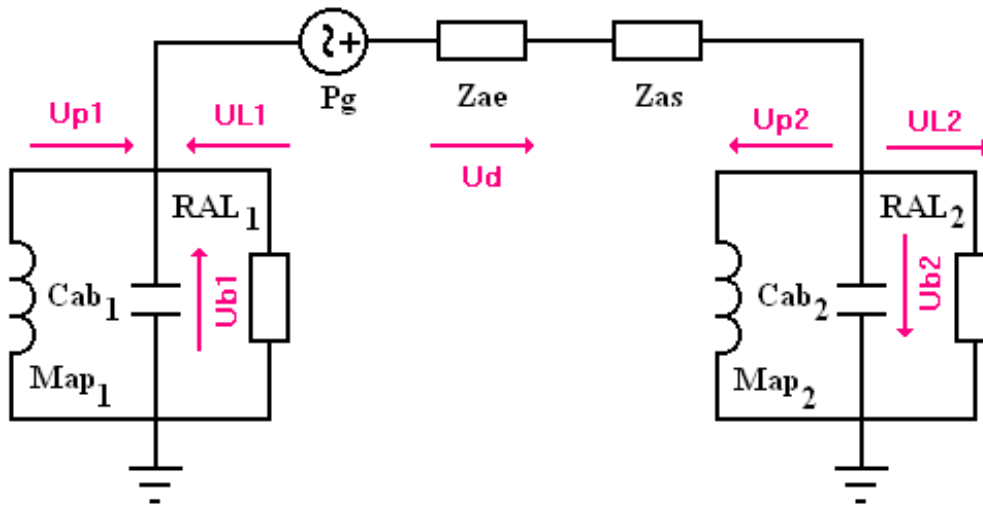


Fig. 40 – Circuito equivalente acústico da Caixa Band Pass de 6ª ordem,

As Câmaras V_{b1} e V_{b2}

Calculando a impedância equivalente para cada uma das câmaras, vem:

$$Z_{ab} = \frac{1}{\frac{1}{R_{AL}} + \frac{1}{s \cdot Map} + s \cdot Cab} = \frac{1}{\frac{s \cdot Map + R_{AL} + s^2 \cdot Map \cdot Cab \cdot R_{AL}}{s \cdot Map \cdot R_{AL}}} \quad (0.23)$$

$$Z_{ab} = \frac{s \cdot \text{Map} \cdot R_{AL}}{s \cdot \text{Map} + R_{AL} + s^2 \cdot \text{Map} \cdot \text{Cab} \cdot R_{AL}} = \frac{s \cdot \text{Map}}{s^2 \cdot \text{Map} \cdot \text{Cab} + s \cdot \frac{\text{Map}}{R_{AL}} + 1} \quad (0.24)$$

$$\text{Map} \cdot \text{Cab} = \frac{1}{\omega_b^2} \quad (0.25)$$

$$Z_{ab} = \frac{s \cdot \text{Map}}{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{\text{Map}}{R_{AL}} + 1} = \frac{s \cdot \text{Map}}{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{\text{Map}}{R_{AL}} + 1} \quad (0.26)$$

$$\frac{\omega_b \cdot \text{Map}}{R_{AL}} = \frac{1}{Q_L} \quad (0.27)$$

$$Z_{ab} = \frac{s \cdot \text{Map}}{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{1}{Q_L} + 1} \quad (0.28)$$

$$\text{Map} = \frac{\alpha}{\omega_b^2 \cdot Sd^2 \cdot Cms} \quad \text{onde} \quad \alpha = \frac{Vas}{Vb} = \frac{Cas}{Cab} \quad (0.29)$$

$$Z_{ab} = \frac{\alpha}{\omega_b^2 \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{1}{Q_L} + 1} = \frac{\alpha}{\omega_b \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_b}}{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{1}{Q_L} + 1} \quad (0.30)$$

$$Z_{ab_1} = \frac{\alpha_1}{\omega_{b1} \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_{b1}}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} \quad (0.31)$$

$$Z_{ab_2} = \frac{\alpha_2}{\omega_{b2} \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_{b2}}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1} \quad (0.32)$$

Lado Mecânico do Falante

$$Z_{ms} = R_{ms} + s \cdot M_{ms} + \frac{1}{s \cdot C_{ms}} = \frac{s \cdot R_{ms} \cdot C_{ms} + s^2 \cdot M_{ms} \cdot C_{ms} + 1}{s \cdot C_{ms}} \quad (0.33)$$

$$M_{ms} \cdot C_{ms} = \frac{1}{\omega_s^2} \quad (0.34)$$

$$Z_{ms} = \frac{s^2 \cdot M_{ms} \cdot C_{ms} + s \cdot R_{ms} \cdot C_{ms} + 1}{s \cdot C_{ms}} = \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \omega_s \cdot R_{ms} \cdot C_{ms} + 1}{s \cdot C_{ms}} \quad (0.35)$$

$$\omega_s \cdot R_{ms} \cdot C_{ms} = \frac{1}{Q_{ms}} \quad (0.36)$$

$$Z_{ms} = \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1}{s \cdot C_{ms}} \quad (0.37)$$

No lado elétrico do falante, encontramos:

$$Z_e = R_E + R_{ed} + s \cdot L_e = R_E + K_{rm} \cdot \omega^{E_{rm}} + s \cdot K_{xm} \cdot \omega^{(E_{xm}-1)} \quad (0.38)$$

Refletindo o lado elétrico para o mecânico, temos:

$$Z_{me} = \frac{(\beta L)^2}{R_g + Z_e} \quad (0.39)$$

Gerador de Força:

$$F_g = E_g \cdot \frac{\beta L}{R_g + Z_e} \quad (0.40)$$

Refletindo o lado mecânico para o acústico, vem:

$$Z_{as} = \frac{Z_{ms}}{S_d^2} \quad (0.41)$$

$$Z_{ae} = \frac{Z_{me}}{S_d^2} \quad (0.42)$$

$$P_g = E_g \cdot \frac{\frac{\beta L}{S_d}}{R_g + Z_e} \quad (0.43)$$

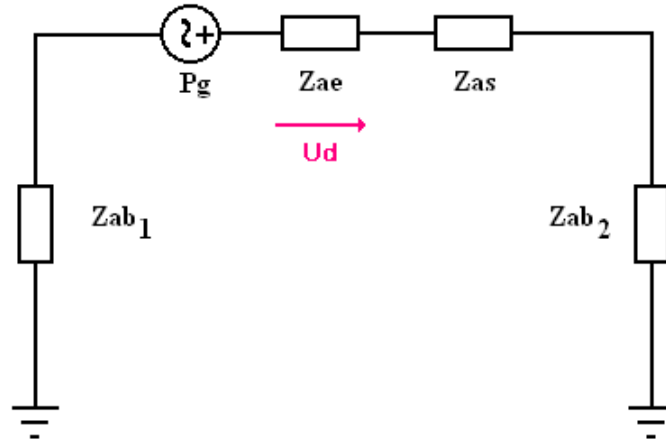


Fig. 41 – Circuito equivalente acústico, da Caixa Band Pass de 6ª ordem, modificado para o cálculo de Ud.

Velocidades Volumétricas

Utilizando o circuito equivalente da Fig. 41, podemos determinar a equação da velocidade volumétrica no cone do falante:

$$U_d = \frac{P_g}{Z_{ae} + Z_{as} + Z_{ab_1} + Z_{ab_2}} \quad (0.44)$$

$$U_d = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L \cdot S_d \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot s}{\frac{(\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \frac{\alpha_1 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \frac{\alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.45)$$

Dividindo Ud por s · Sd obteremos o deslocamento do cone do alto-falante, Xd, instalado em uma caixa BP de 6ª ordem:

$$X_d = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e}}{\frac{(\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \frac{\alpha_1 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \frac{\alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.46)$$

Substituindo s por $j\omega$, nas equações (0.45) e (0.46) obteremos (0.47) e (0.48) onde podemos ver que nas frequências de sintonia ($\omega = \omega_{b1}$ ou $\omega = \omega_{b2}$) as amplitudes de Ud e Xd passam por um mínimo, que tenderia para zero se Q_L tendesse para ∞ sendo, portanto, indicadores de sintonia.

$$\begin{aligned}
Ud_{(j\omega)} &= \frac{Eg \cdot \frac{\beta L \cdot Sd \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot j\omega}{\frac{(\beta L)^2 \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot j\omega + 1 - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Qms} + \frac{-\alpha_1 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b1}^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{b1}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}}} + \dots} \\
&\quad \dots + \frac{-\alpha_2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}}} \quad (0.47)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Xd_{(j\omega)} &= \frac{Eg \cdot \frac{\beta L \cdot Cms}{Rg + Ze}}{\frac{(\beta L)^2 \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot j\omega + 1 - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Qms} + \frac{-\alpha_1 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b1}^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{b1}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}}} + \dots} \\
&\quad \dots + \frac{-\alpha_2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}}} \quad (0.48)
\end{aligned}$$

$$U_{P1} = \frac{Zab_1}{s \cdot Map_1} \cdot Ud \quad (0.49)$$

$$U_{P2} = \frac{Zab_2}{s \cdot Map_2} \cdot Ud \quad (0.50)$$

$$\begin{aligned}
Map_1 \cdot Cab_1 &= \frac{1}{\omega_{b1}^2} \quad \therefore \quad Map_1 = \frac{1}{\omega_{b1}^2 \cdot Cab_1} = \frac{\alpha_1}{\omega_{b1}^2 \cdot Cas} = \frac{\alpha_1}{\omega_{b1}^2 \cdot Sd^2 \cdot Cms} \quad \text{onde } \alpha_1 = \frac{Vas}{Vb_1} = \frac{Cas}{Cab_1} \\
&\quad (0.51)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Map_2 \cdot Cab_2 &= \frac{1}{\omega_{b2}^2} \quad \therefore \quad Map_2 = \frac{1}{\omega_{b2}^2 \cdot Cab_2} = \frac{\alpha_2}{\omega_{b2}^2 \cdot Cas} = \frac{\alpha_2}{\omega_{b2}^2 \cdot Sd^2 \cdot Cms} \quad \text{onde } \alpha_2 = \frac{Vas}{Vb_2} = \frac{Cas}{Cab_2} \\
&\quad (0.52)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Zab_1 &= \frac{\alpha_1}{\omega_{b1} \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_{b1}}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} = \frac{s \cdot Map_1}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} \quad (0.53)
\end{aligned}$$

$$Z_{ab_2} = \frac{\alpha_2}{\omega_{b_2} \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{s}{\omega_{b_2}} = \frac{s \cdot \text{Map}_2}{\frac{s^2}{\omega_{b_2}^2} + \frac{s}{\omega_{b_2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1} \quad (0.54)$$

$$U_{P_1} = \frac{Z_{ab_1}}{s \cdot \text{Map}_1} \cdot Ud = \frac{1}{s \cdot \text{Map}_1} \cdot \frac{s \cdot \text{Map}_1}{\frac{s^2}{\omega_{b_1}^2} + \frac{s}{\omega_{b_1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} \cdot Ud = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_{b_1}^2} + \frac{s}{\omega_{b_1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} \cdot Ud \quad (0.55)$$

$$U_{P_2} = -\frac{Z_{ab_2}}{s \cdot \text{Map}_2} \cdot Ud = -\frac{1}{\frac{s^2}{\omega_{b_2}^2} + \frac{s}{\omega_{b_2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1} \cdot Ud \quad (0.56)$$

$$P_{P_1} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot U_{P_1} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_{b_1}^2} + \frac{s}{\omega_{b_1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} \cdot Ud \quad (0.57)$$

$$P_{P_2} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot U_{P_2} = -\frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_{b_2}^2} + \frac{s}{\omega_{b_2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1} \cdot Ud \quad (0.58)$$

$$P_p = P_{P_1} + P_{P_2} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot U_{P_1} - \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot U_{P_2} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot (U_{P_1} - U_{P_2}) \quad (0.59)$$

$$P_p = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{\frac{s^2}{\omega_{b_1}^2} + \frac{s}{\omega_{b_1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} - \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_{b_2}^2} + \frac{s}{\omega_{b_2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1} \right] \cdot s \cdot Ud \quad (0.60)$$

$$P_p = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \left[\frac{s^2 \cdot \left(\frac{1}{\omega_{b_2}^2} - \frac{1}{\omega_{b_1}^2} \right) + s \cdot \left(\frac{1}{\omega_{b_2} \cdot Q_{L2}} - \frac{1}{\omega_{b_1} \cdot Q_{L1}} \right)}{\left(\frac{s^2}{\omega_{b_1}^2} + \frac{s}{\omega_{b_1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1 \right) \cdot \left(\frac{s^2}{\omega_{b_2}^2} + \frac{s}{\omega_{b_2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1 \right)} \right] \cdot s \cdot Ud \quad (0.61)$$

A pressão acústica resultante, P_p , será a composição das contribuições dos dutos (pórticos) 1 e 2, conforme as equações (0.60) e (0.61) onde fica claro que as frequências de sintonia não podem ser iguais.

Considerando Q_L tendendo para ∞ em (0.62), e fazendo $\omega = \omega_{b_2}$, podemos constatar que a pressão acústica produzida pelo duto 1 tende para zero, devido ao polinômio em azul.

Repetindo este procedimento, mas fazendo $\omega = \omega_{b_1}$, constatamos que a pressão acústica no duto 1 não tende para zero.

Assim sendo, o indicador de sintonia do duto 2 deverá ser obtido medindo-se a pressão acústica no duto 1.

Para obtermos o indicador de sintonia do duto 1, deveremos medir a pressão acústica no duto 2.

$$P_{P1} = \frac{Eg \cdot \frac{\beta L \cdot Sd \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot \frac{\rho}{2\pi} \cdot s^2}{\left(\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1 \right) \cdot \left[\frac{(\beta L)^2 \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 \right] + \alpha_1 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \dots}$$

$$\dots + \alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}$$

(0.62)

$$P_{P2} = \frac{Eg \cdot \frac{\beta L \cdot Sd \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot \frac{\rho}{2\pi} \cdot s^2}{\left(\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1 \right) \cdot \left[\frac{(\beta L)^2 \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 \right] + \dots}$$

$$\dots + \alpha_1 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b1}^2} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2}$$

(0.63)

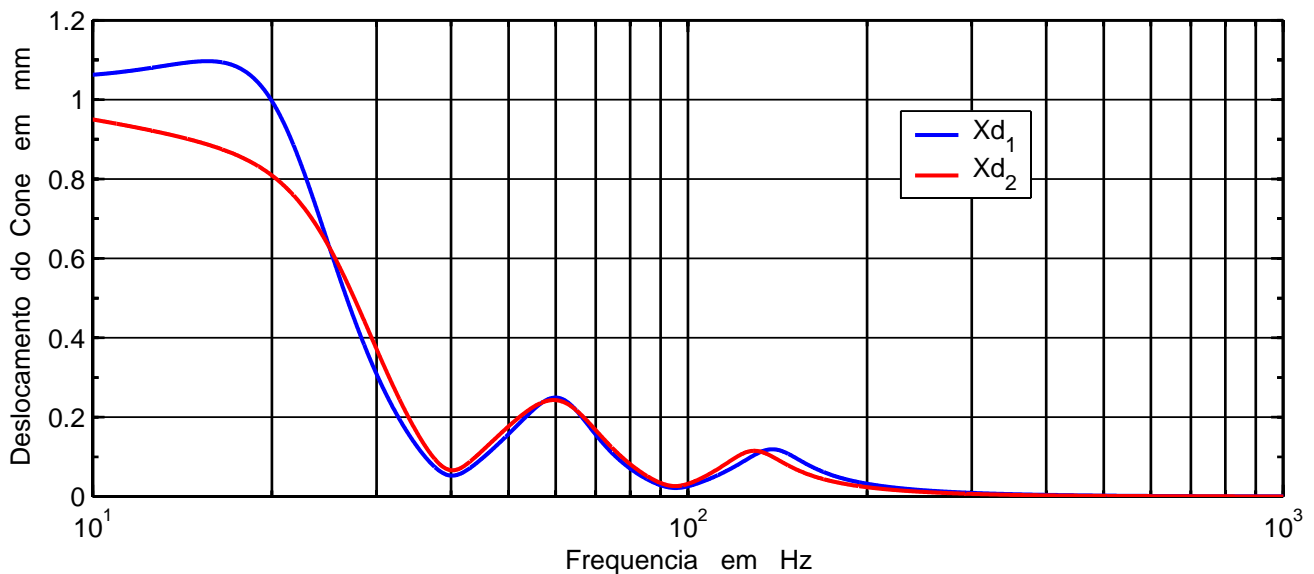


Fig. 42 – Deslocamento dos cones dos falantes 18SW1P e 18SW2P na caixa BP6, simulada.

Na Fig. 42 vemos que o deslocamento do cone é um indicador seguro da sintonia, embora muitas vezes não seja facilmente obtido, na prática, por exigir a presença de dispositivos como acelerômetros.

As velocidades volumétricas no cone e nos dutos, conforme as Figs. 43 e 45, são indicadores precisos das frequências de sintonia, o mesmo acontecendo com as velocidades lineares, no cone e nos dutos, conforme as Figs. 44 e 46.

As Figs. 47 e 48 mostram a pressão acústica resultante e as componentes de cada duto, para o 18SW1P, onde fica clara a conveniência dos indicadores acústicos de sintonia. O ponto de mínimo SPL no duto 2 aponta a frequência de sintonia do duto 1 enquanto que o mínimo no SPL do duto 1 indica a sintonia do duto 2. As Figs. 49 e 50 mostram isso para o 18SW2P.

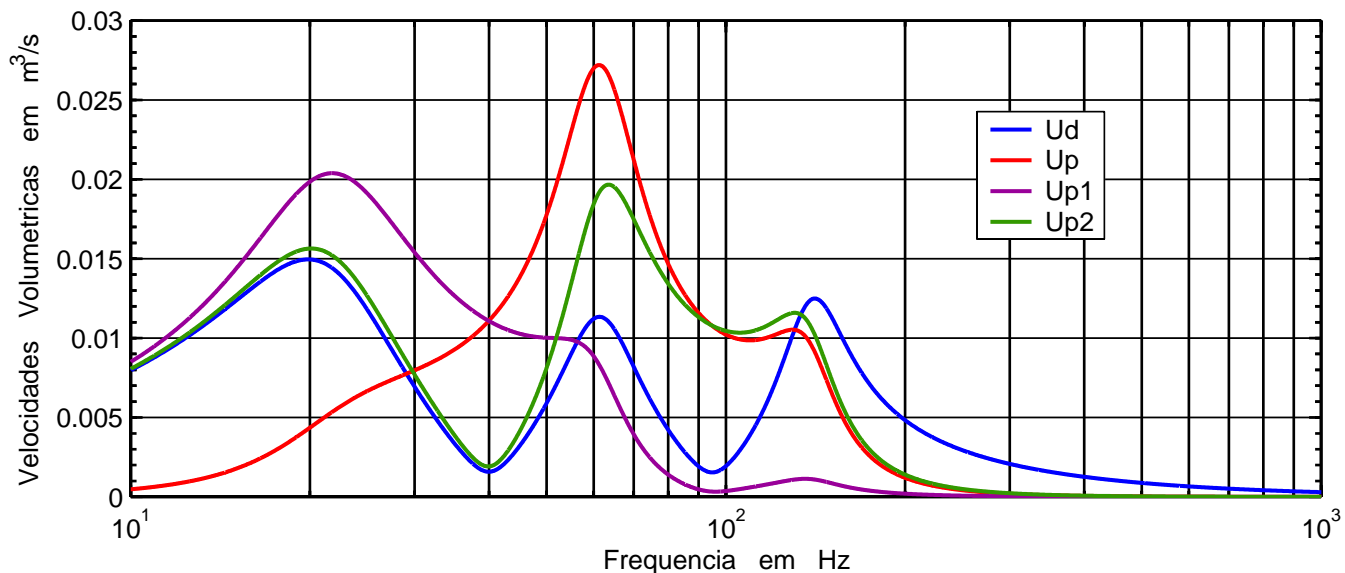


Fig. 43 – Velocidades volumétricas na caixa BP6, simulada com o falante 18SW1P.

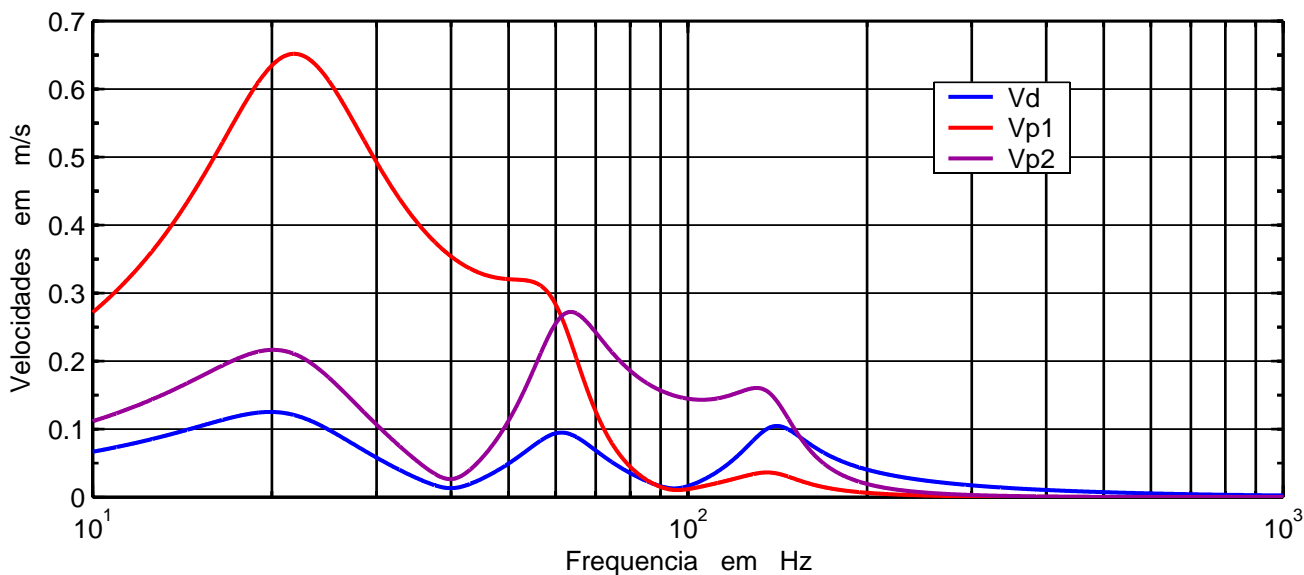


Fig. 44 – Velocidades lineares na caixa BP6, simulada com o falante 18SW1P.

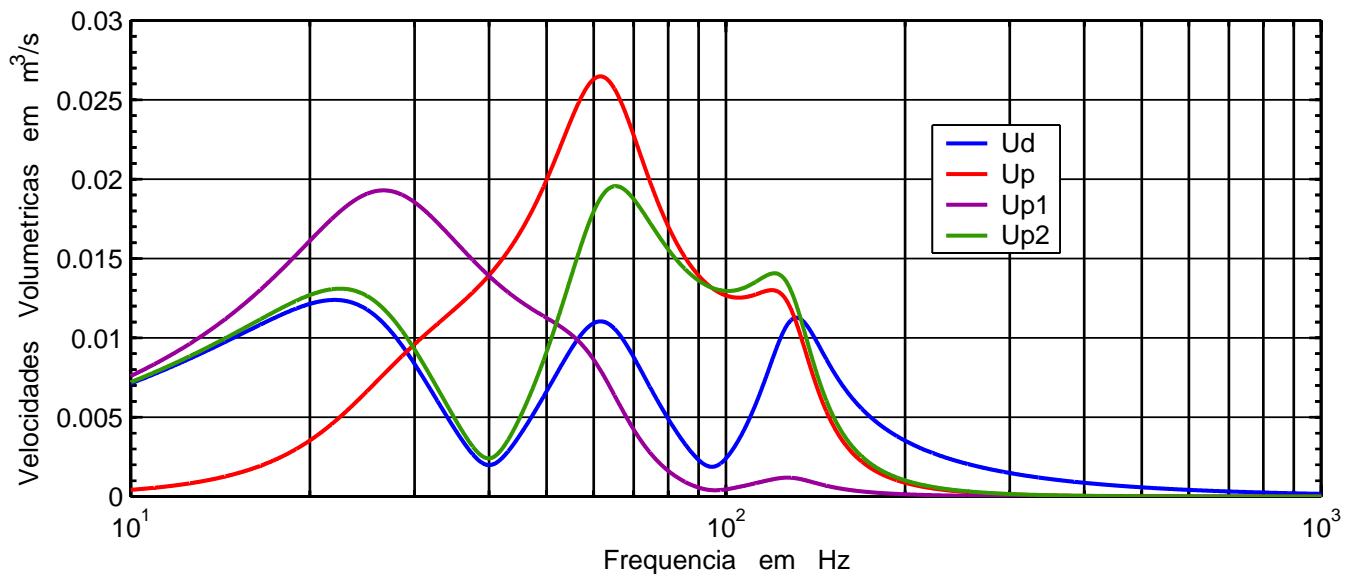
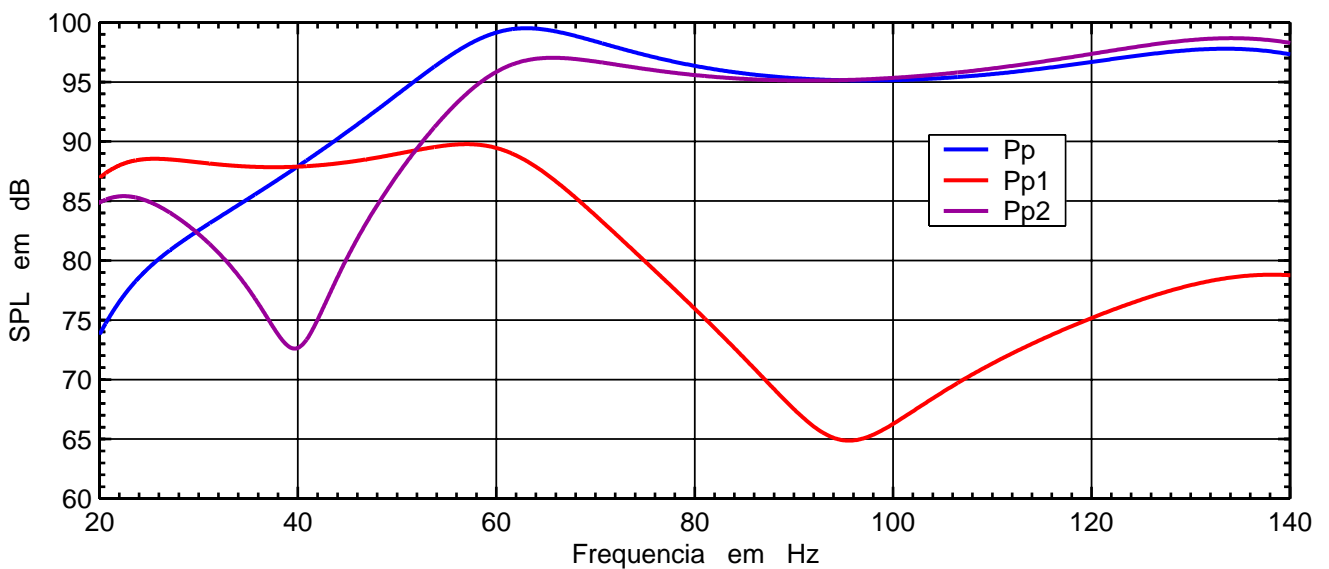
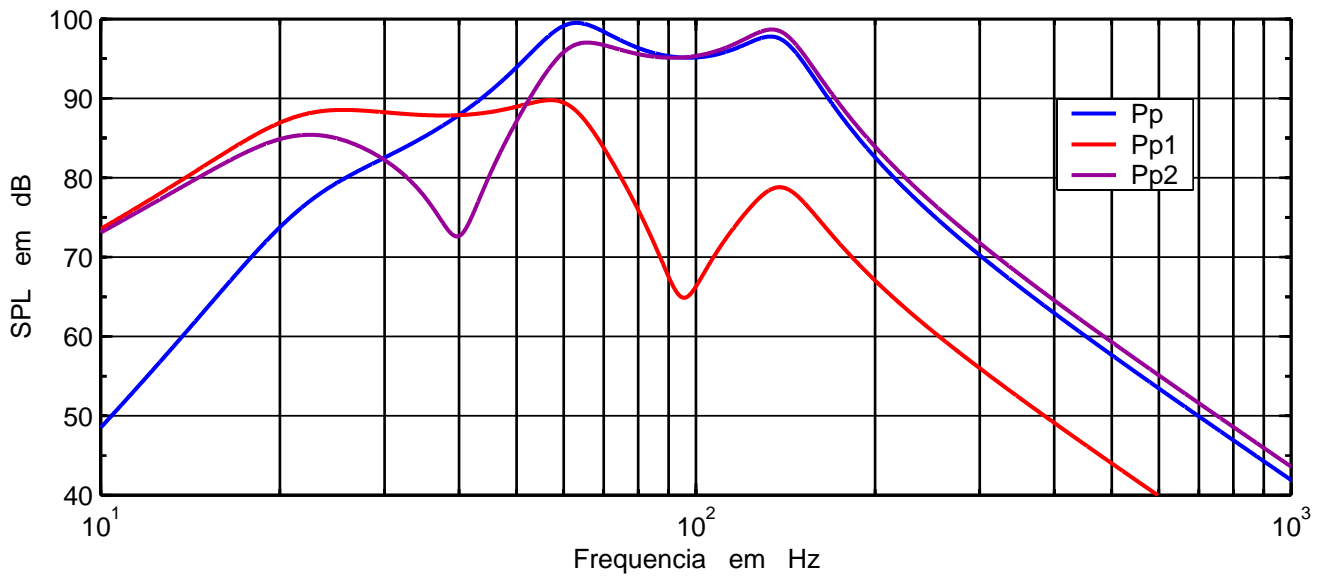
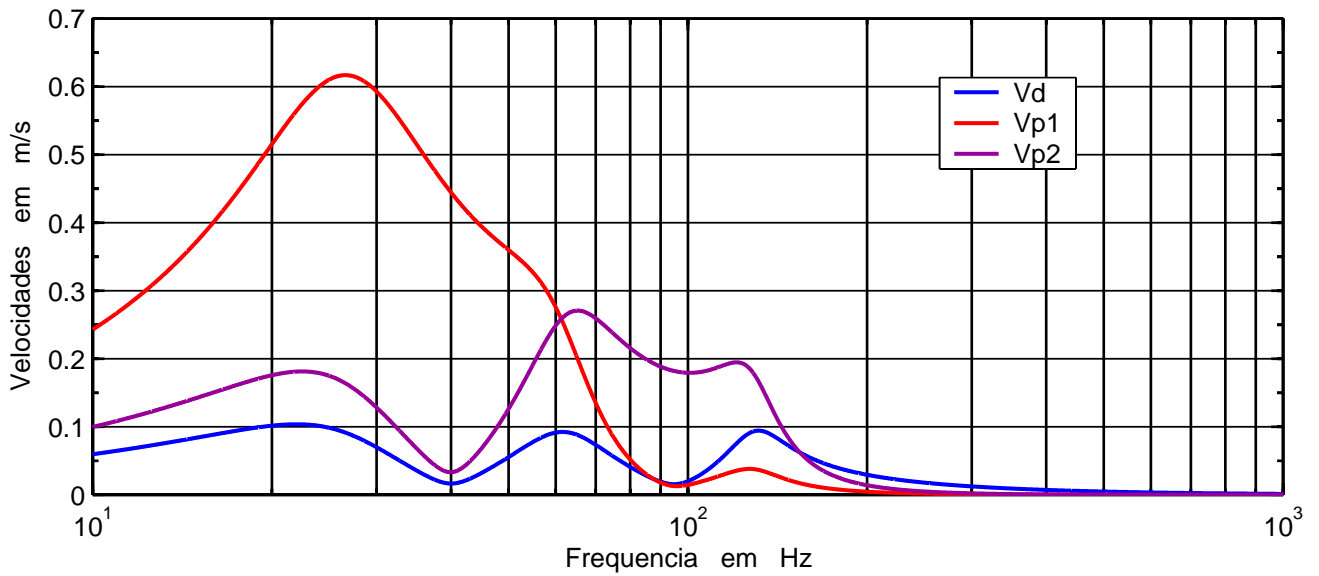


Fig. 45 – Velocidades volumétricas na caixa BP6, simulada com o falante 18SW2P.



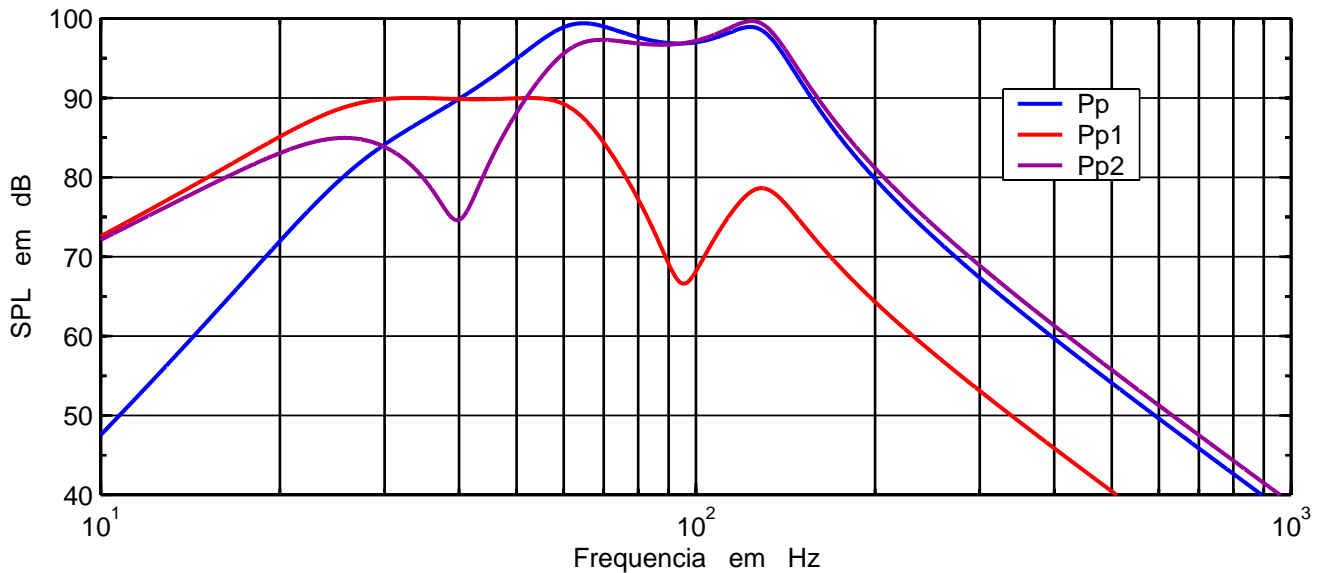


Fig. 49 – Pressões acústicas na caixa BP6, simulada com o falante 18SW2P.

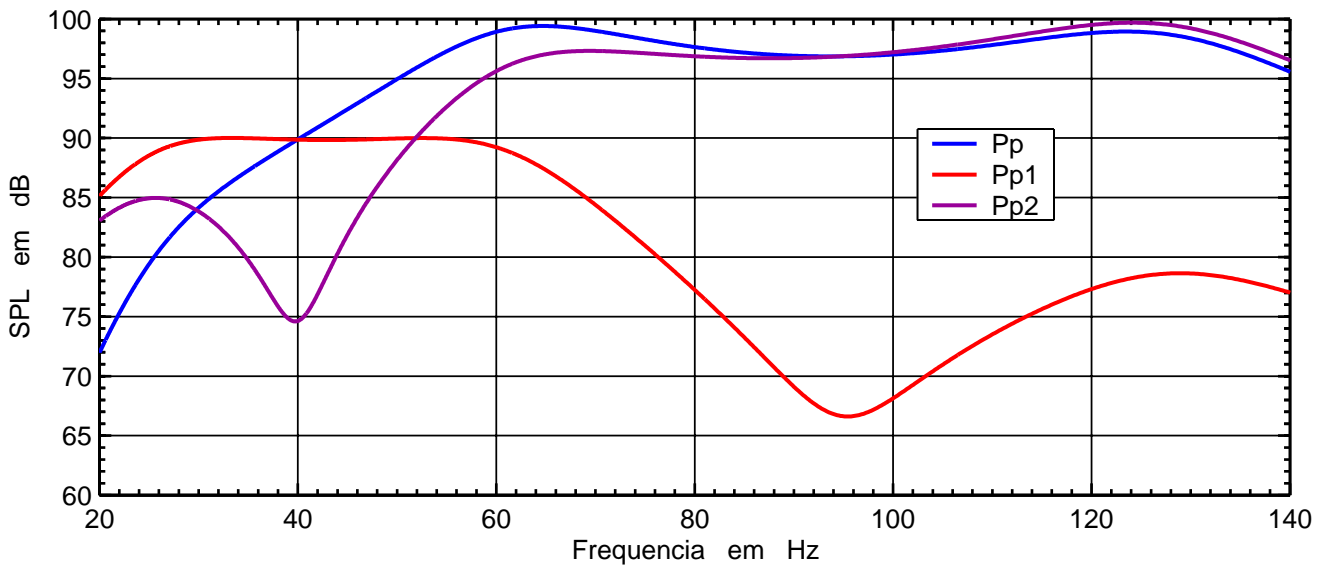


Fig. 50 – Pressões acústicas na caixa BP6, simulada com o falante 18SW2P.

Impedância Vista pela Bobina

Refletindo o circuito equivalente acústico, de uma caixa Band Pass de 6^a ordem, para o lado elétrico, podemos equacionar a impedância vista pelos terminais da bobina móvel.

Uma impedância acústica aparecerá refletida no lado mecânico segundo a relação (0.64). Além disso, a topologia do circuito será a dual do original, conforme as Figs. 51 e 52.

$$Z_E = \frac{(\beta L)^2}{Sd^2 \cdot Z_A} \quad (0.64)$$

$$Z_{es} = \frac{(\beta L)^2}{Sd^2 \cdot Z_{as}} = \frac{(\beta L)^2}{Z_{ms}} = (\beta L)^2 C_{ms} \cdot \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1} \quad (0.65)$$

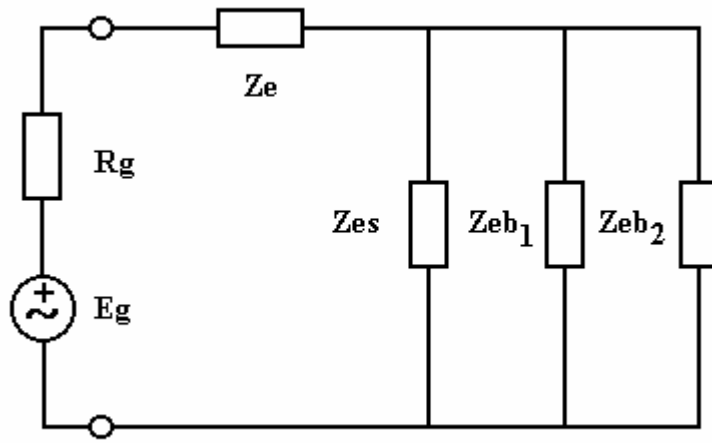


Fig. 51 – O circuito equivalente acústico da Fig. 40 visto pelos terminais da bobina móvel.

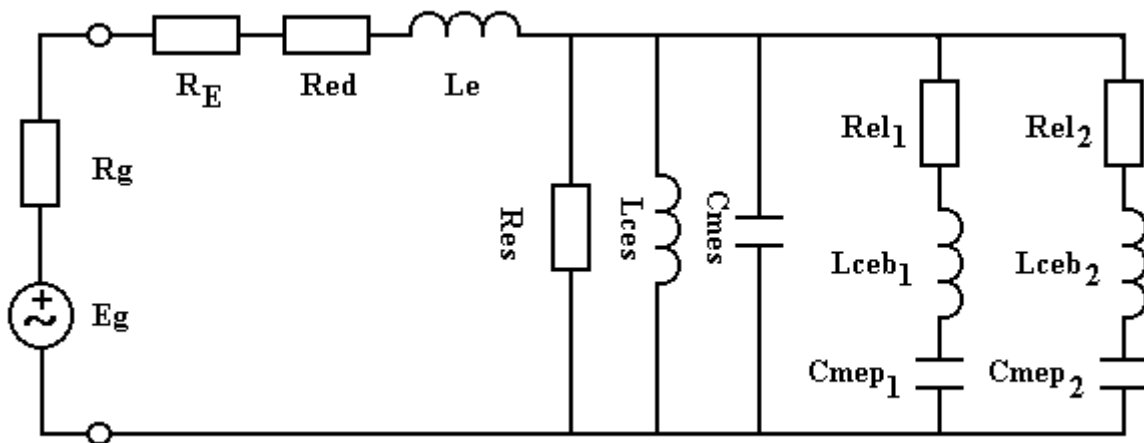


Fig. 52 – Circuito equivalente da caixa BP6, vista pelos terminais da bobina móvel.

$$Z_{eb} = \frac{(\beta L)^2}{S d^2 \cdot Z_{ab}} = \frac{(\beta L)^2}{S d^2} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{1}{Q_L} + 1}{s \cdot \text{Map}} \quad (0.66)$$

Substituindo Map pela expressão dada em (0.29), vem:

$$Z_{eb} = \frac{(\beta L)^2 \cdot \omega_b^2 \cdot C_{ms}}{\alpha} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_b^2} + \frac{s}{\omega_b} \cdot \frac{1}{Q_L} + 1}{s} \quad (0.67)$$

$$Z_{eb1} = \frac{(\beta L)^2 \cdot \omega_{b1} \cdot C_{ms}}{\alpha_1} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1}{\frac{s}{\omega_{b1}}} \quad (0.68)$$

$$Z_{eb_2} = \frac{(\beta L)^2 \cdot \omega_{b2} \cdot C_{ms} \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}{\alpha_2 \cdot \frac{s}{\omega_{b2}}} \quad (0.69)$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{es}} + \frac{1}{Z_{eb_1}} + \frac{1}{Z_{eb_2}}} \quad (0.70)$$

$$Z_{eq} = \frac{1}{\frac{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1}{s \cdot (\beta L)^2 \cdot C_{ms}} + \frac{\alpha_1}{(\beta L)^2 \cdot \omega_{b1} \cdot C_{ms}} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_{b1}}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \dots \dots + \frac{\alpha_2}{(\beta L)^2 \cdot \omega_{b2} \cdot C_{ms}} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_{b2}}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.71)$$

$$Z_{eq} = \frac{s \cdot (\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.72)$$

$$(\beta L)^2 \cdot C_{ms} = \frac{(\beta L)^2}{R_{ms}} \cdot R_{ms} \cdot C_{ms} = \frac{(\beta L)^2}{R_{ms}} \cdot \frac{\omega_s \cdot R_{ms} \cdot C_{ms}}{\omega_s} = R_{es} \cdot \frac{1}{\omega_s \cdot Q_{ms}} \quad (0.73)$$

$$(\beta L)^2 \cdot C_{ms} = \frac{R_E \cdot Q_{ms}}{Q_{es}} \cdot \frac{1}{\omega_s \cdot Q_{ms}} = \frac{R_E}{\omega_s \cdot Q_{es}} \quad (0.74)$$

$$Z_{eq} = R_E \cdot \frac{\frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{es}}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.75)$$

A impedância vista pelos terminais da bobina móvel, sem as componentes não lineares, será dada por ZVC, e corresponderá ao que seria obtido aplicando-se a teoria original de Thiele e Small.

$$ZVC = R_E + Z_{eq} \quad (0.76)$$

$$ZVC = R_E + R_E \cdot \frac{\frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{es}}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}}$$

(0.77)

$$ZVC = R_E \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \left(\frac{1}{Q_{ms}} + \frac{1}{Q_{es}} \right) + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}}$$

(0.78)

$$ZVC = R_E \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ts}} + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \alpha_1 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b1}^2} + \frac{s}{\omega_{b1}} \cdot \frac{1}{Q_{L1}} + 1} + \alpha_2 \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}}$$

(0.79)

$$Z_{ed} = R_{ed} + s \cdot L_e = K_{rm} \cdot \omega^{Emm} + s \cdot K_{xm} \cdot \omega^{Exm} \quad (0.80)$$

$$Z_{vc} = Z_{ed} + ZVC \quad (0.81)$$

Na Fig. 53 temos as curvas dos módulos da impedância, vistas pelos terminais da bobina móvel, para os falantes 18SW1P e 18SW2P, instalados na caixa band pass de sexta ordem, mostrada na Fig. 39. A impedância apresenta três picos e dois vales. Nesses pontos de máximos e mínimos a fase é aproximadamente igual à zero, conforme a Fig. 54. Os pontos de impedância mínima indicam as duas frequências de sintonia, uma de cada câmara. A indutância da bobina L_e e o fator de qualidade da câmara, Q_L , influem na indicação de fase nula, conforme veremos adiante.

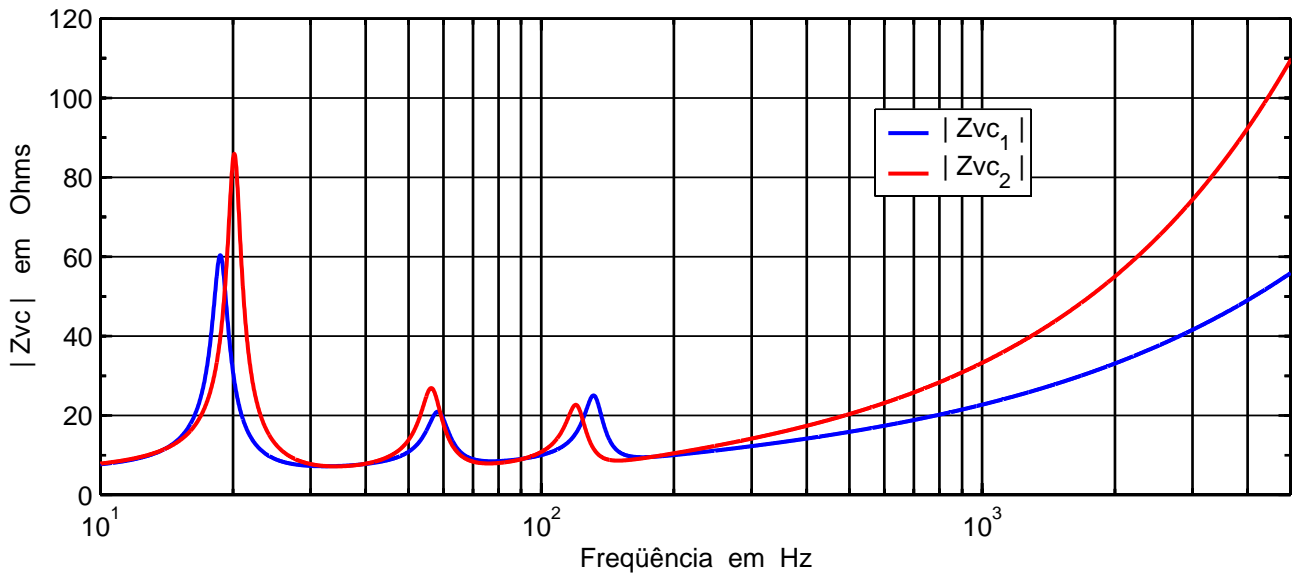


Fig. 53 – Módulo da impedância da bobina, na caixa da Fig. 39, com os falantes 18SW1P e 18SW2P.

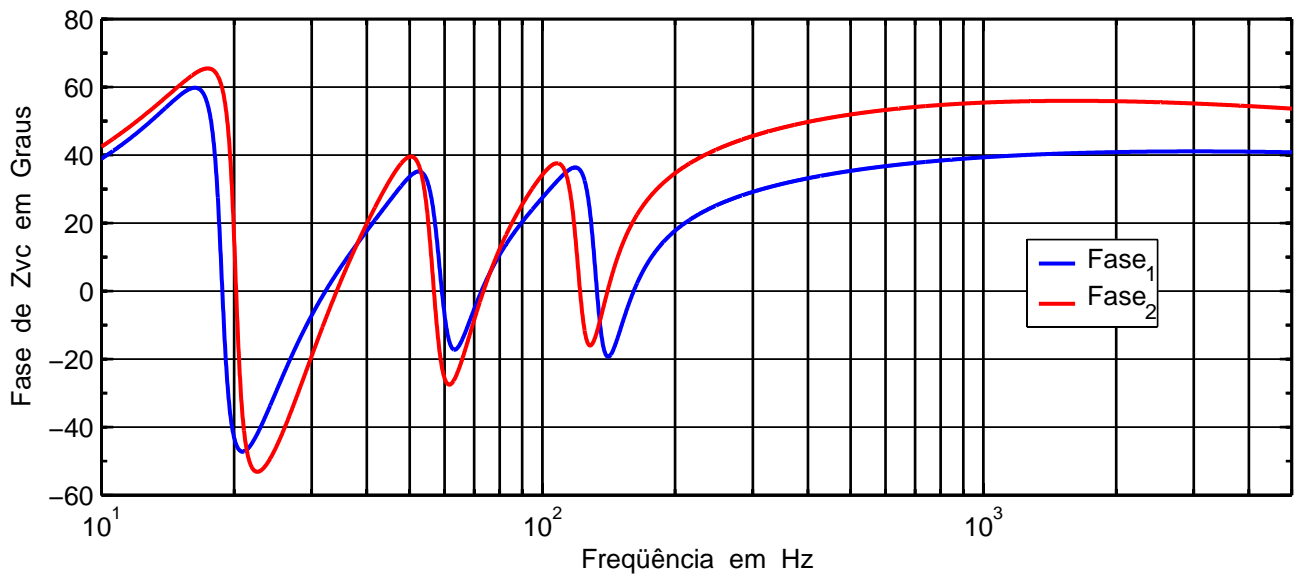


Fig. 54 – Fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com os falantes 18SW1P e 18SW2P.

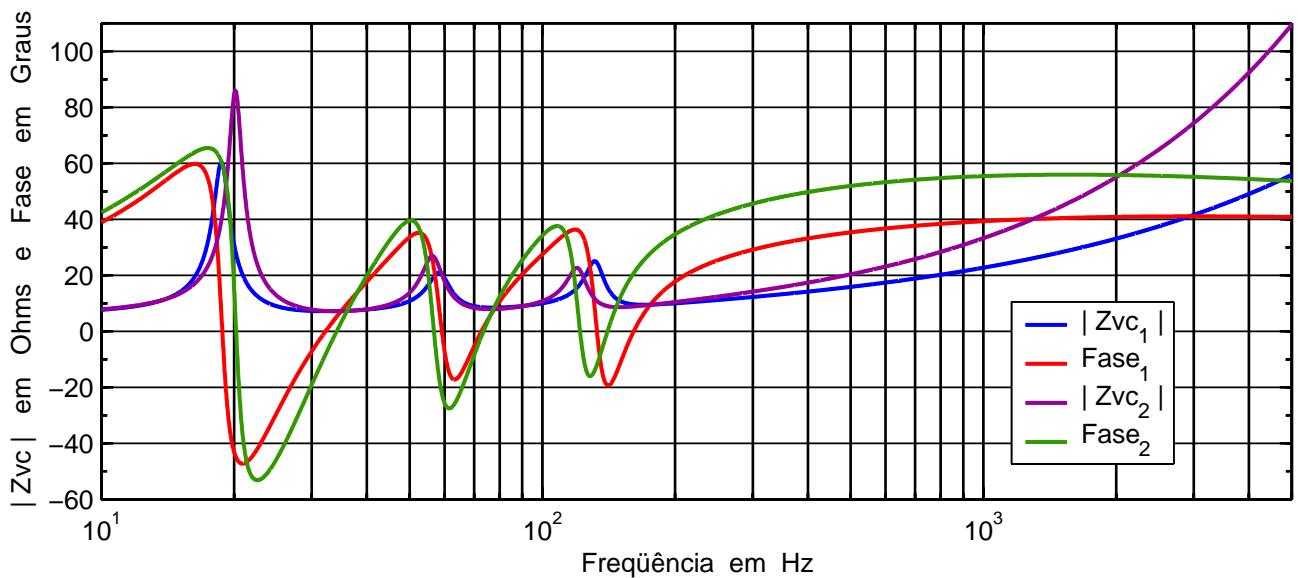


Fig. 55 – Módulo da impedância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com os falantes 18SW1P e 18SW2P.

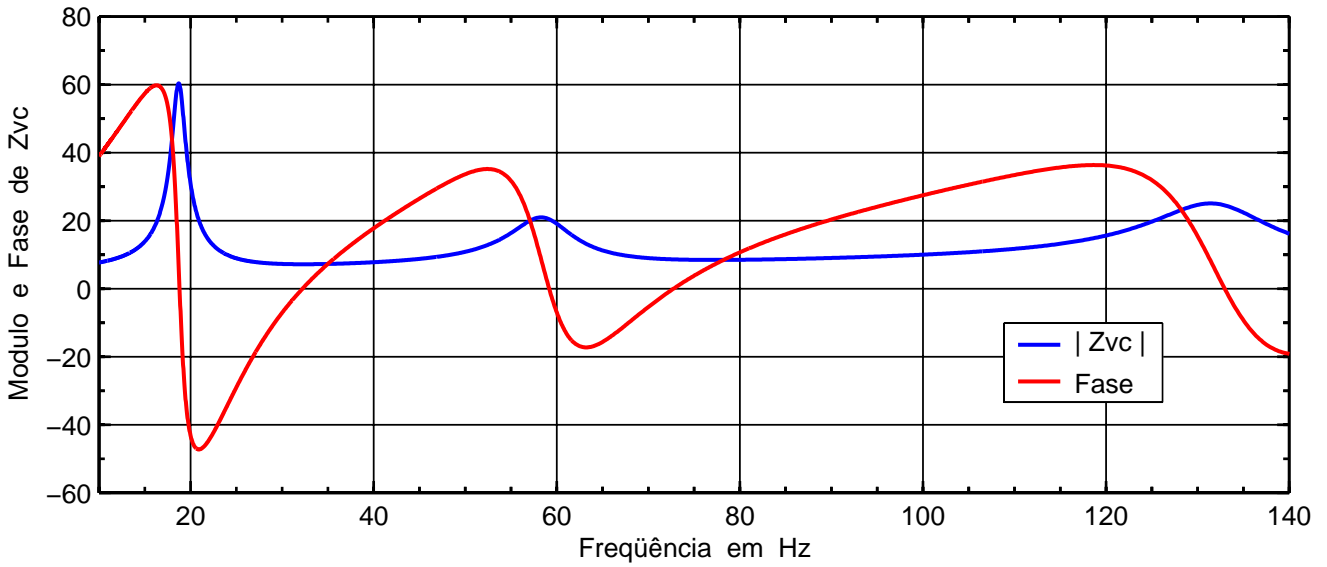


Fig. 56 – Módulo da impedância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW1P.

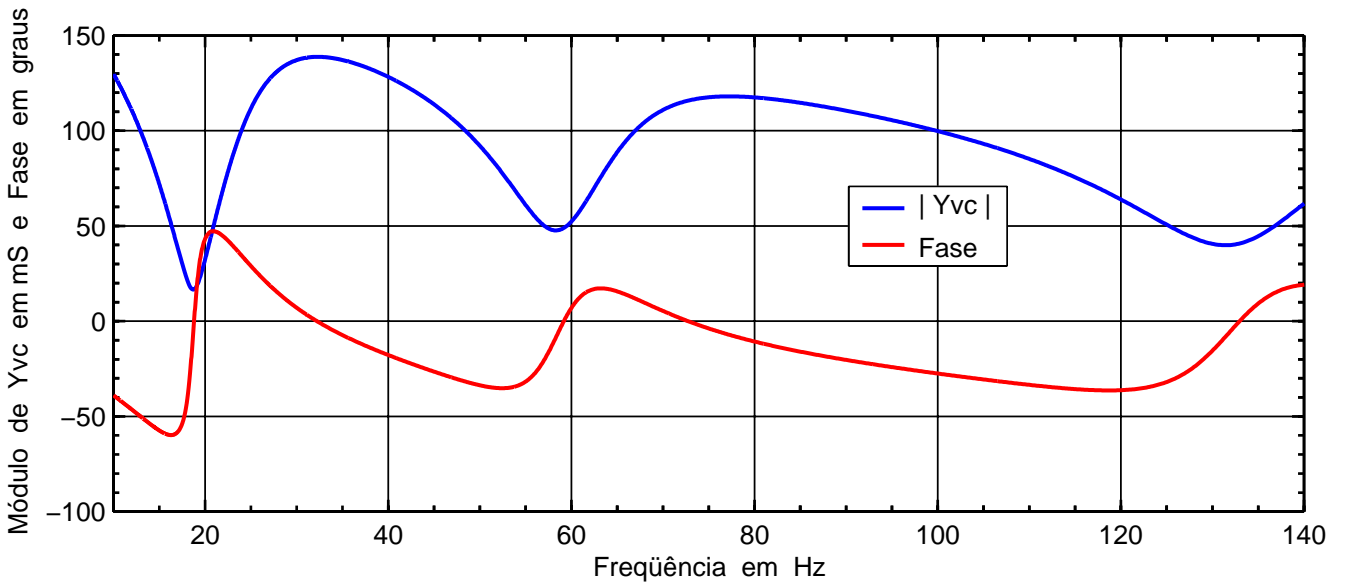


Fig. 57 – Módulo da admitância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW1P.

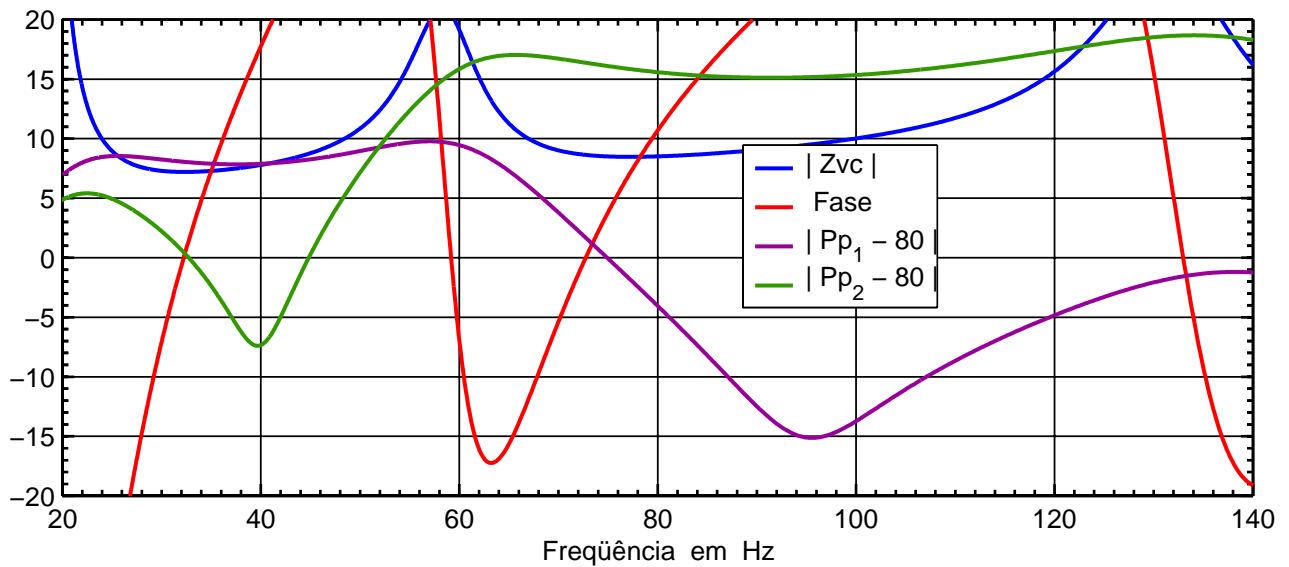


Fig. 58 – Indicadores de sintonia, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW1P.

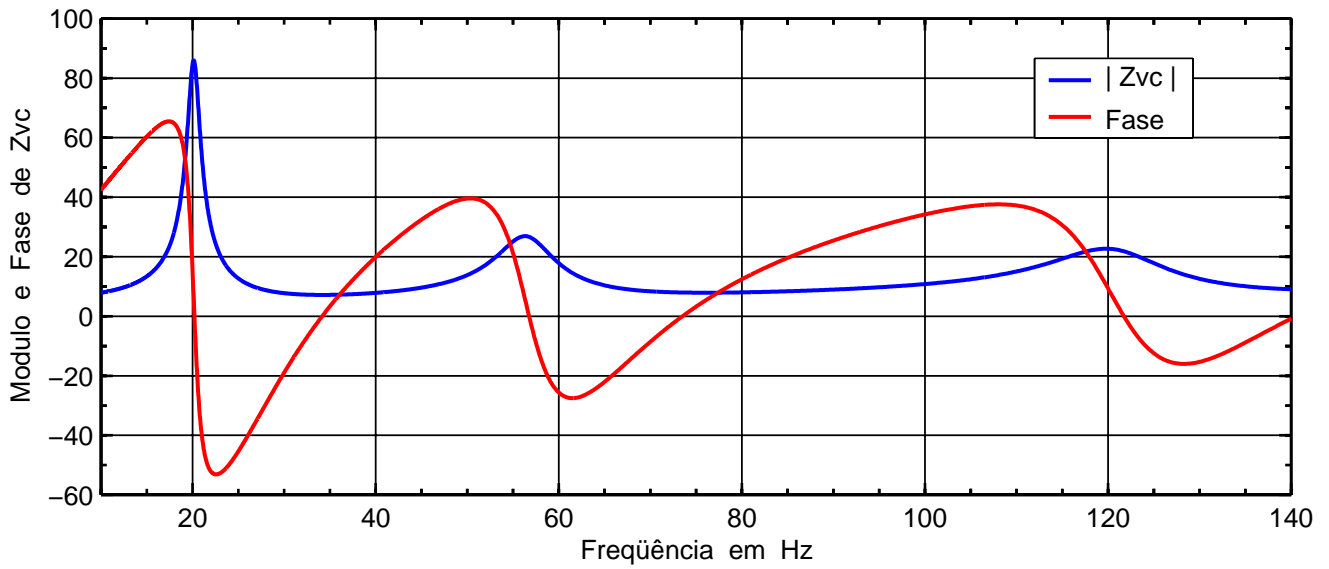


Fig. 59 – Módulo da impedância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P.

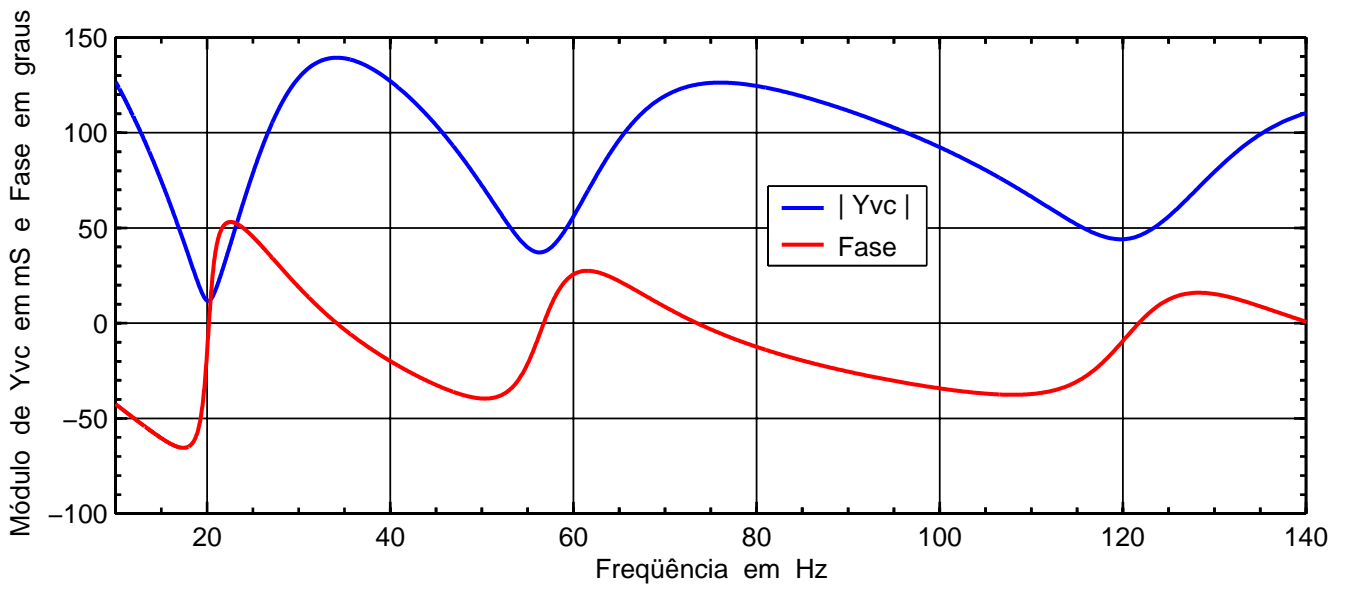


Fig. 60 – Módulo da admitância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P.

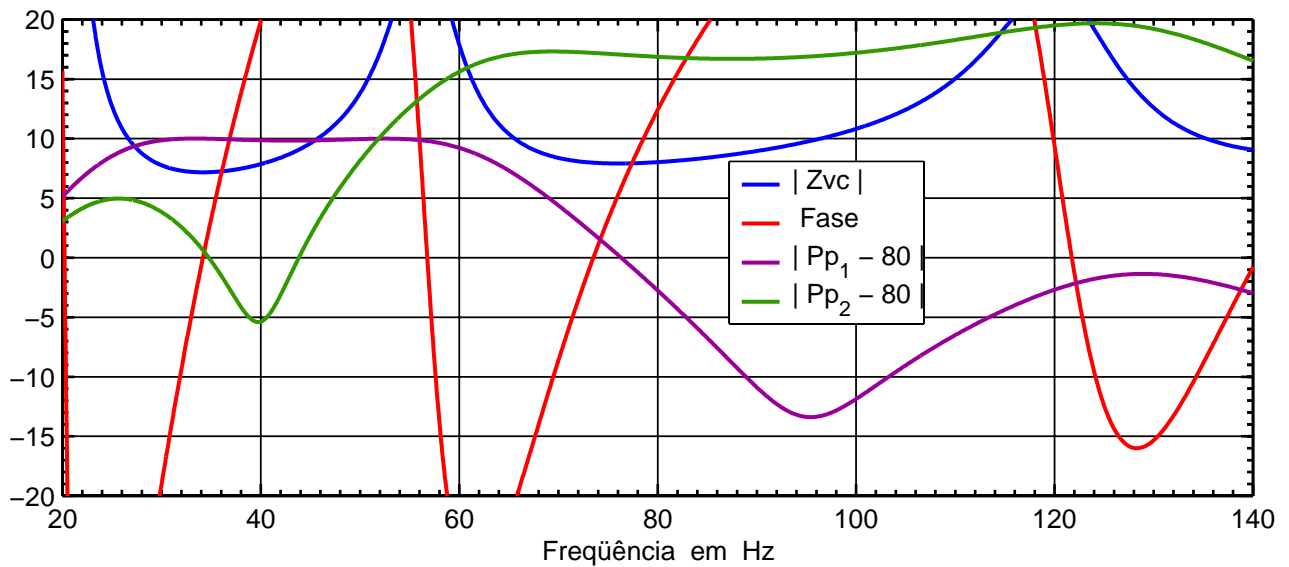


Fig. 61 – Indicadores de sintonia, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P.

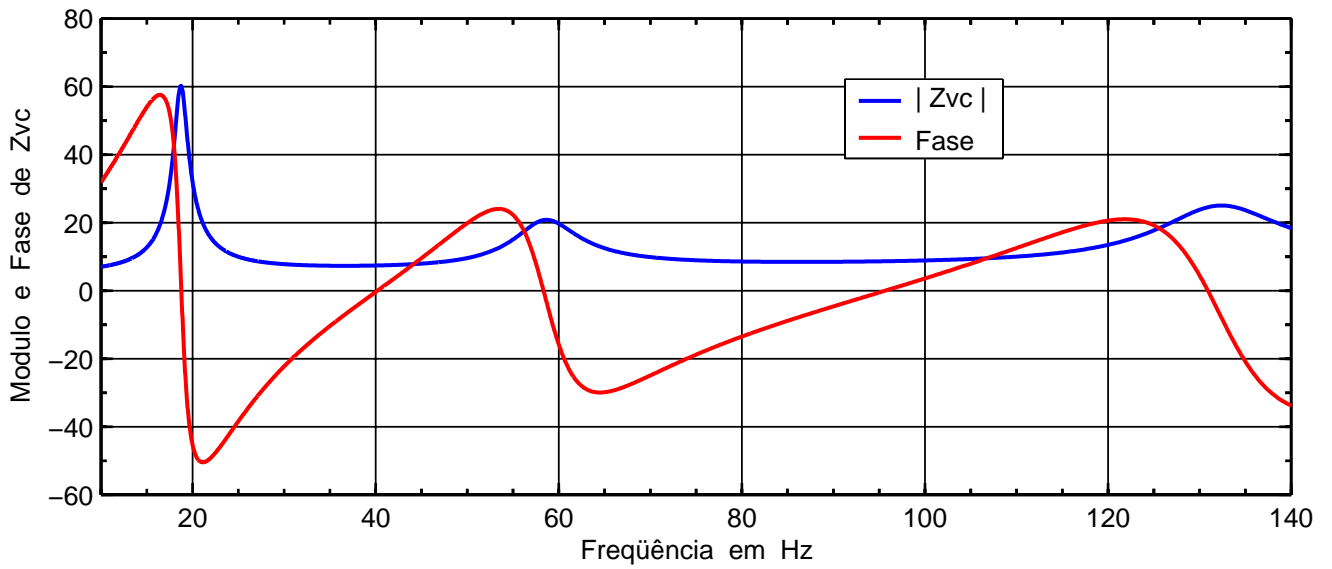


Fig. 62 – Módulo da impedância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW1P. $R_e \neq 0$, $L_e = 0$.

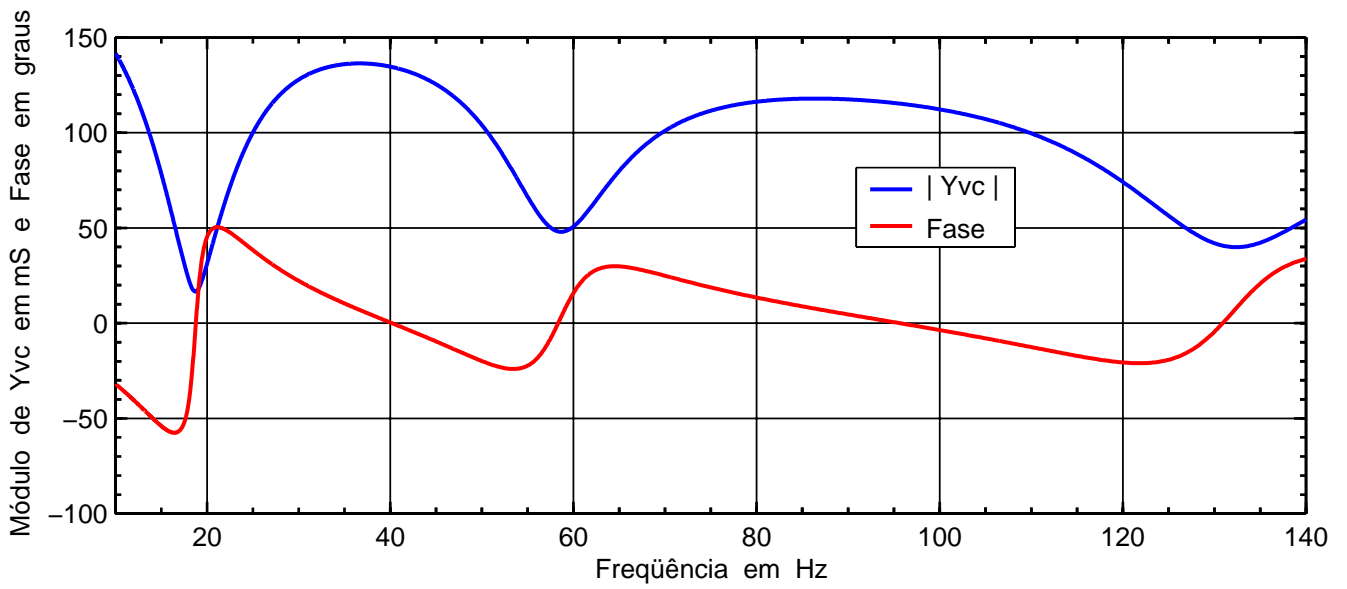


Fig. 63 – Módulo da admitância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW1P. $R_e \neq 0$, $L_e = 0$.

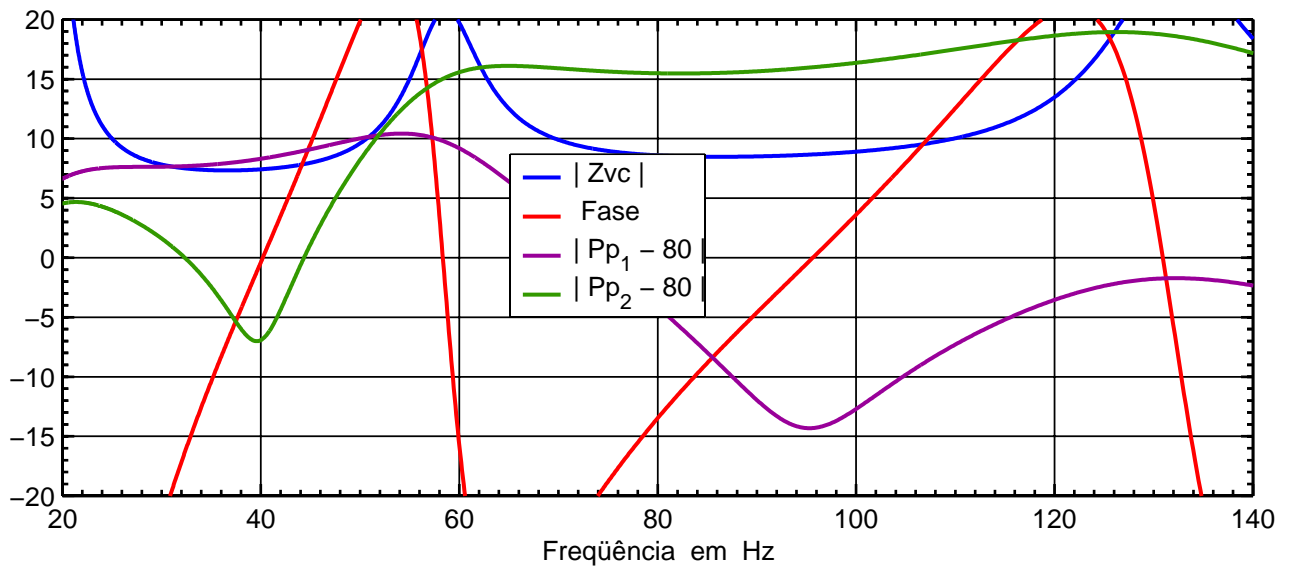


Fig. 64 – Indicadores de sintonia, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW1P. $R_e \neq 0$, $L_e = 0$.

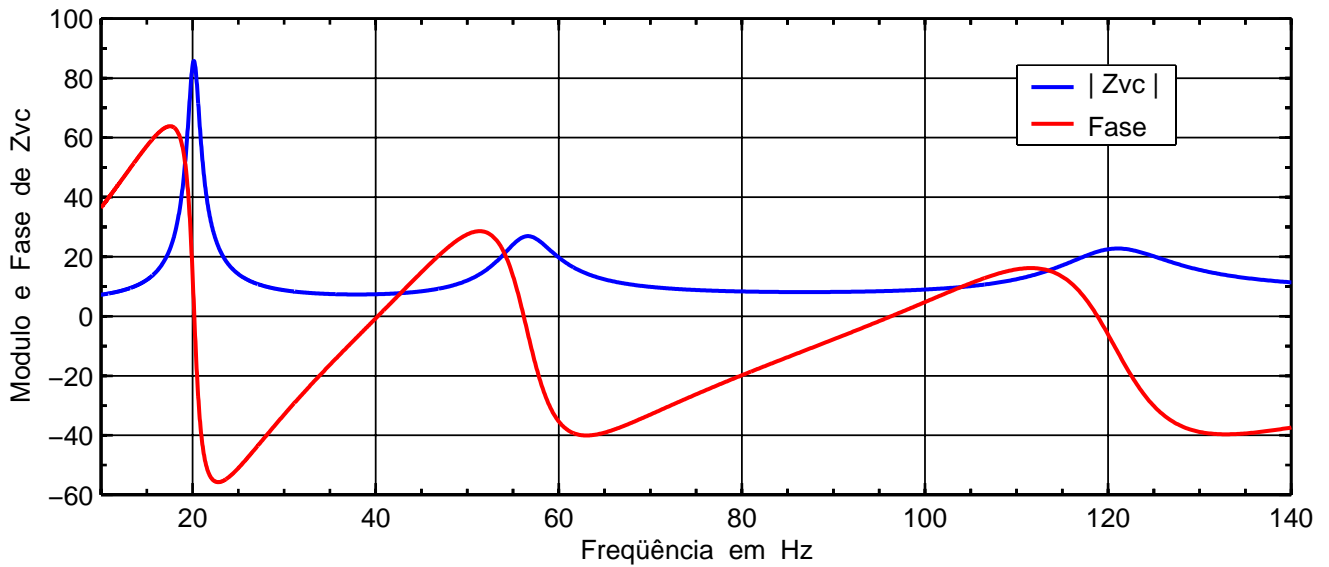


Fig. 65 – Módulo da impedância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P. $R_{ed} \neq 0$, $L_e = 0$.

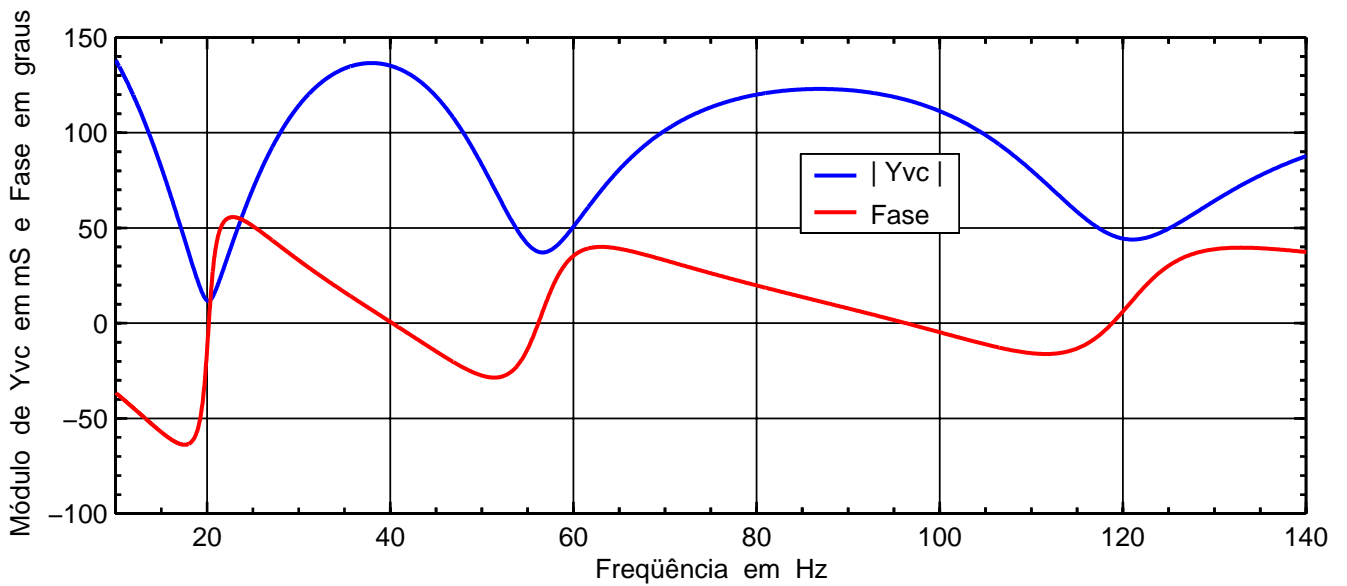


Fig. 66 – Módulo da admitância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P. $R_{ed} \neq 0$, $L_e = 0$.

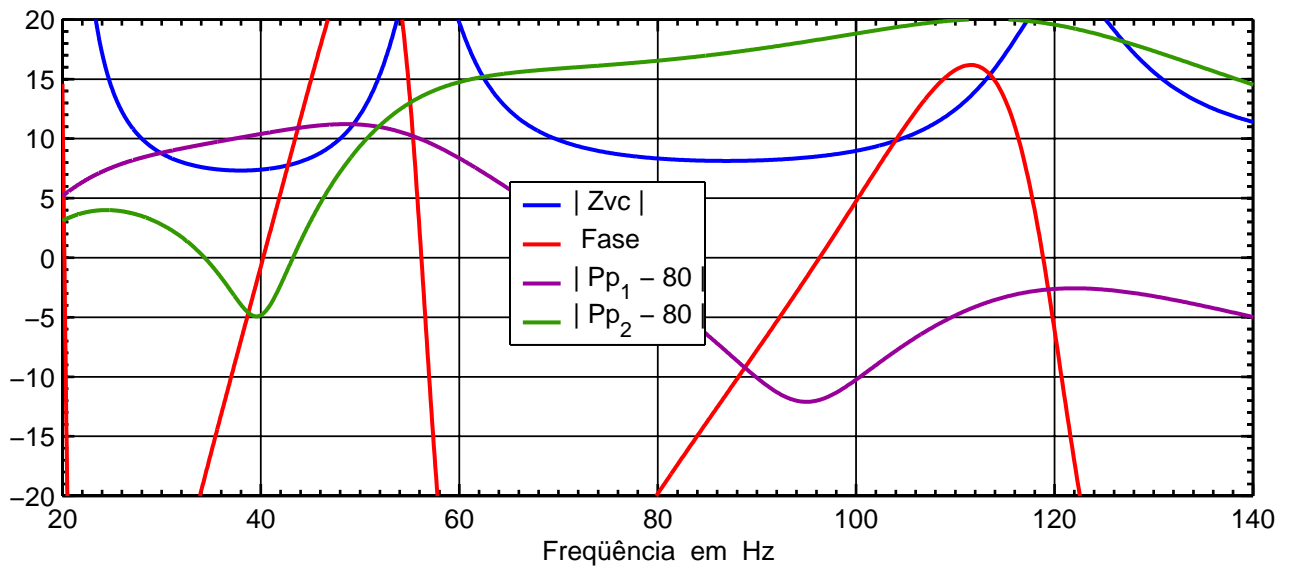


Fig. 67 – Indicadores de sintonia, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P. $R_{ed} \neq 0$, $L_e = 0$.

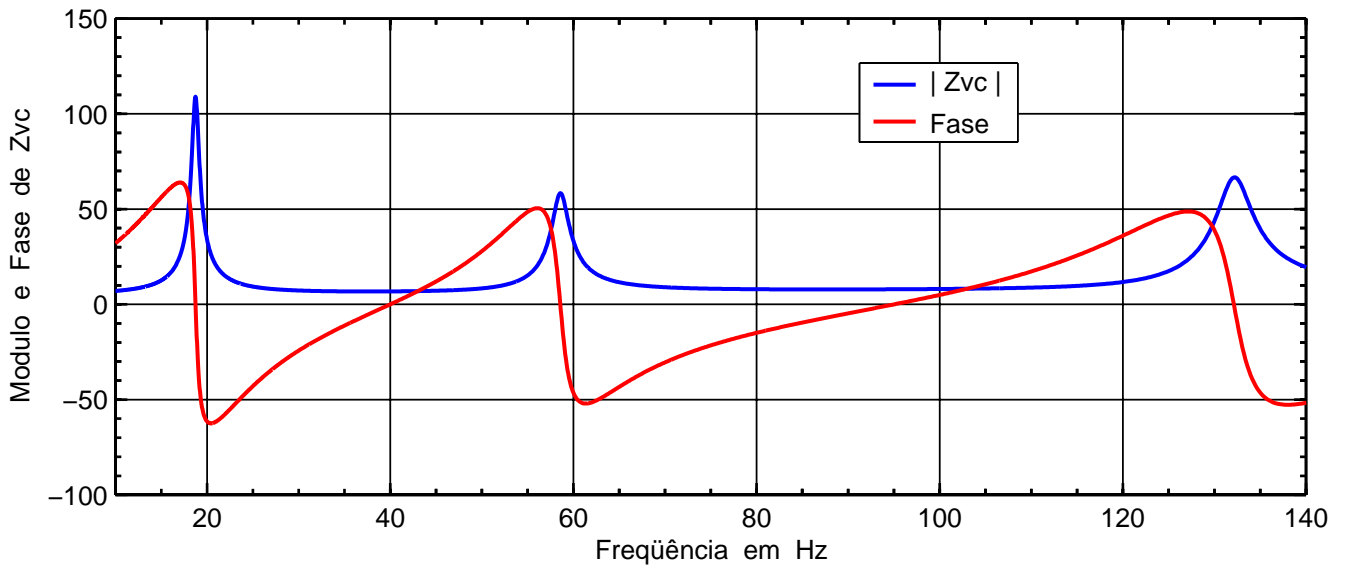


Fig. 68 – Módulo da impedância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P. $R_{ed} \neq 0$, $L_e = 0$ e $Q_L = 40$.

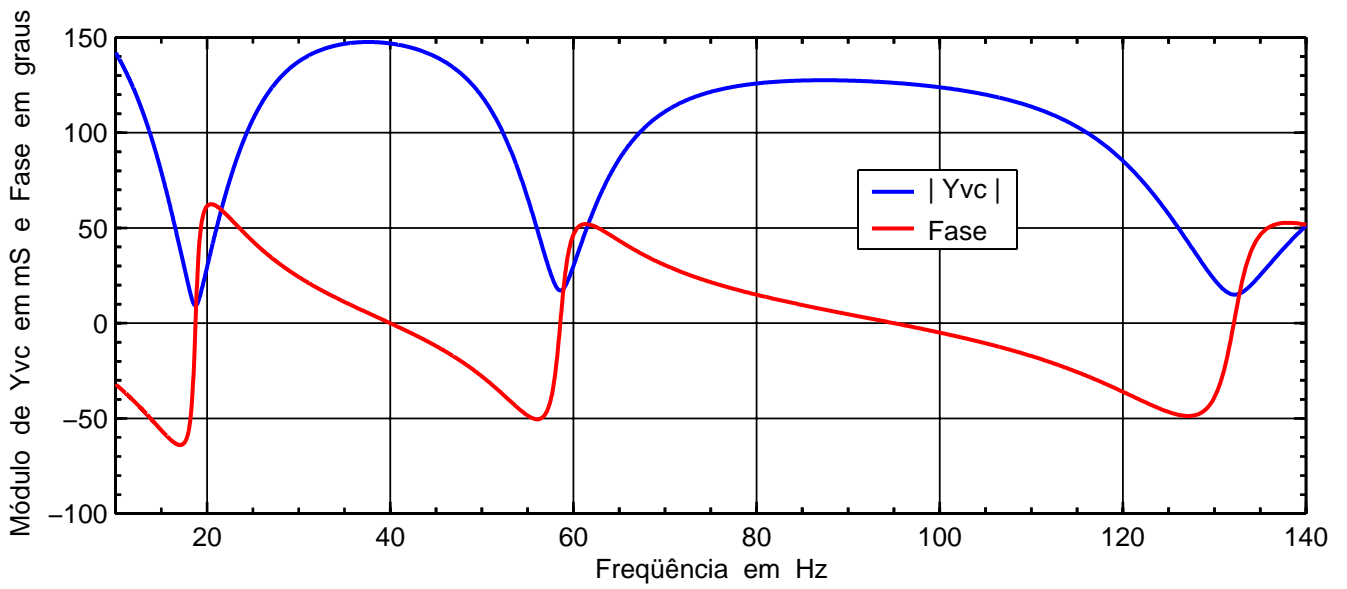


Fig. 69 – Módulo da admitância e fase da bobina, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P. $R_{ed} \neq 0$, $L_e = 0$ e $Q_L = 40$.

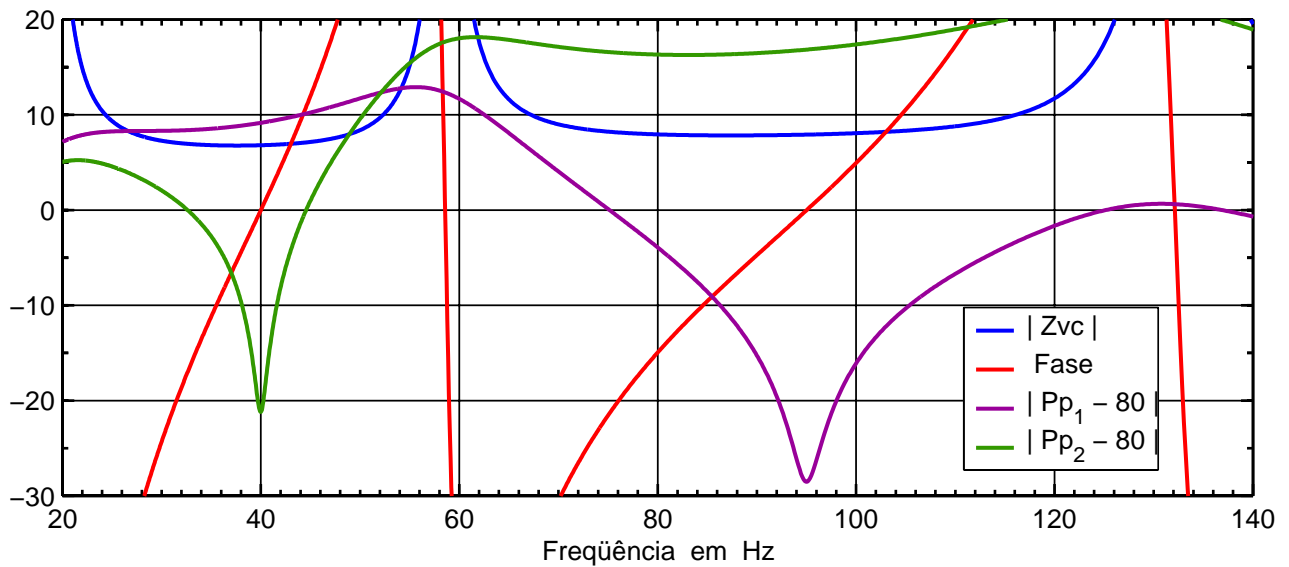


Fig. 70 – Indicadores de sintonia, na caixa da Fig. 39, com o falante 18SW2P. $R_{ed} \neq 0$, $L_e = 0$ e $Q_L = 40$.

Nas Figs. 56 e 57, referentes ao 18SW1P, vemos que na sintonia de 40 Hz os indicadores da bobina apontam para, aproximadamente, 35 Hz. Na outra câmara, sintonizada em 95 Hz, esta indicação foi em torno de 75 Hz, o que é uma discrepância muito significativa.

Já os indicadores acústicos, na Fig. 58, apontam perfeitamente para 40 Hz e 95 Hz.

As Figs. 59 a 61 repetem o que foi visto acima para o 18SW2P, sem nenhuma novidade.

Para comprovar a responsabilidade de L_e , nas discrepâncias dos indicadores elétricos, temos as Figs. 62 a 64, para o 18SW1P e as Figs. 65 a 67 para o 18SW2P, onde a influência da indutância da bobina foi eliminada, na simulação. Nos dois casos vemos que os pontos de máximos e mínimos coincidiram muito aproximadamente com os de fase nula e com os indicadores acústicos.

Nas Figs 68 a 70, além de $L_e = 0$, o fator de qualidade das perdas, em ambas as câmaras, foi feito igual 40, o que tornou a coincidência dos indicadores elétricos e acústicos, da sintonia, ainda mais precisa. Para um perfeito entendimento deste fato, podemos utilizar a equação (0.77), que representa a impedância vista pelos terminais da bobina móvel, em uma caixa band pass de sexta ordem, sem as componentes R_{ed} e L_e . Nesta equação podemos concluir que, se o fator de qualidade Q_L de uma das câmaras tender para infinito, na frequência de sintonia desta câmara a impedância Z_{VC} tenderá para R_E . Este raciocínio vale, também, para a outra câmara. Desse modo, fica evidente a influência das perdas na indicação da sintonia através da impedância da bobina.

De volta ao mundo real, onde as componentes não lineares da bobina existem de fato, vemos que a expressão de Z_{vc} (não confundir com Z_{VC}) incorpora R_{ed} e L_e . A presença da reatância indutiva altera os pontos de fase nula, sendo a responsável pelas maiores discrepâncias nos indicadores de sintonia.

Medidas Efetuadas

Foi construída uma caixa dupla, para uso profissional, baseada naquela mostrada na Fig. 39, ou seja, duas daquelas foram empilhadas e geminadas verticalmente, totalizando dois falantes por caixa, ligados em paralelo. Por esse motivo, as curvas de impedância vão indicar, nos pontos de mínimo, um valor próximo de 4 Ohms (8 em paralelo com 8). As curvas do SPL resultante, produzidos pela caixa, foram medidos no centro da mesma, com cada falante alimentado com 2,83 Volts.

No entanto, as curvas do SPL nos dutos, foram obtidas com o microfone colocado no centro do duto investigado, rente ao plano do painel da caixa, ou seja, no campo próximo. A proximidade tornou a captação dos sinais provenientes dos demais dutos desprezível e explica os elevados valores de SPL obtidos neste tipo de medição.

A sintonia pretendida para a câmara V_{b1} (100 litros) era $F_{b1} = 40$ Hz, tendo sido conseguido, na prática, 42 Hz; para a câmara V_{b2} (50 litros), pretendeu-se uma sintonia $F_{b2} = 95$ Hz. No entanto, devido a uma alteração no duto 2, na ocasião da construção, foi obtida uma sintonia entre 105 e 110 Hz. A alteração no duto já está incorporada no desenho da caixa.

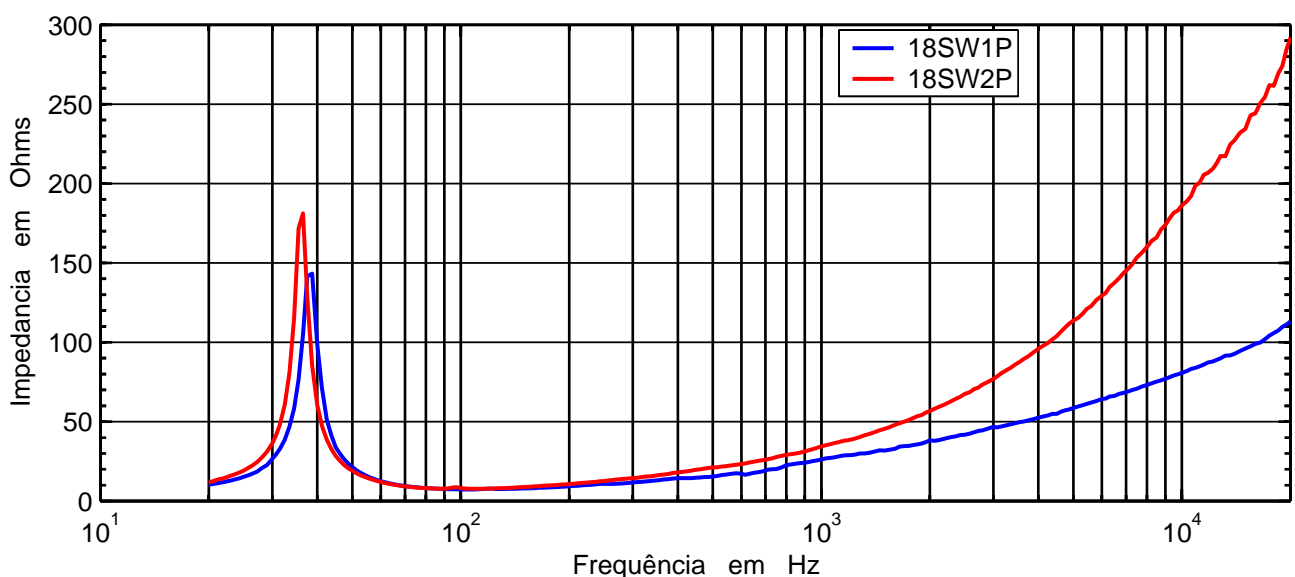


Fig. 71 – Impedâncias dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas ao ar livre.

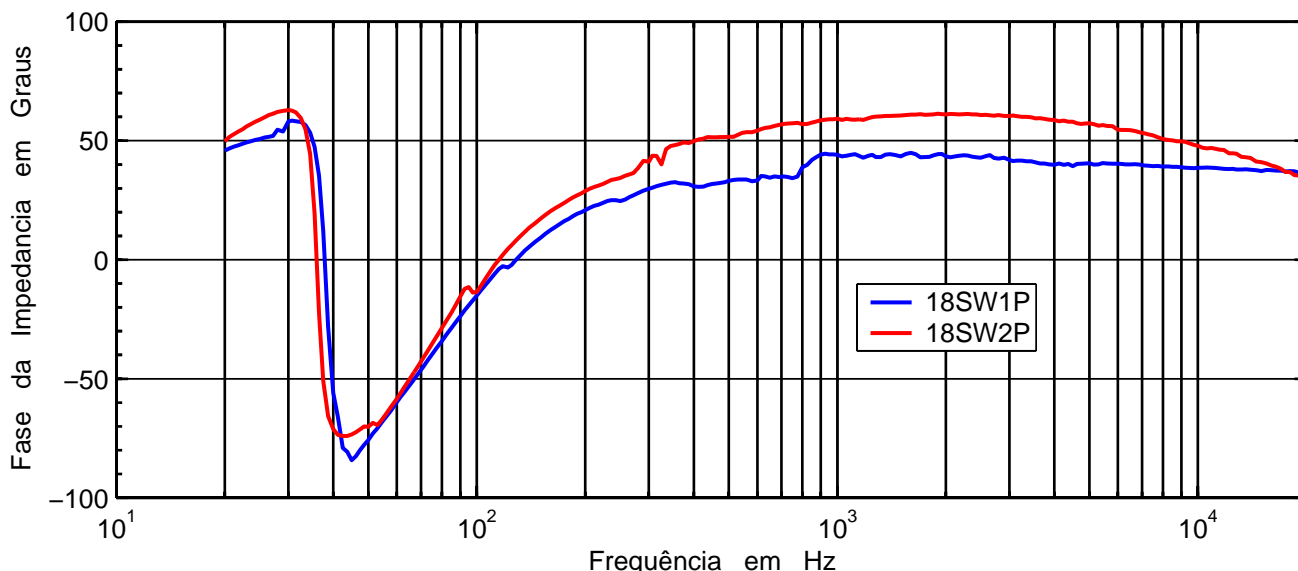


Fig. 72 – Fases dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas ao ar livre.

Nas Figs. 71 e 72 vemos, respectivamente, os módulos da impedância da bobina e a fase dos dois alto-falantes, medidos ao ar livre. Nessas medições foram também obtidos os parâmetros da Tabela 1.

Na Fig. 73 temos a curva do módulo da impedância, para os falantes 18SW1P e 18SW2P, montados na caixa da Fig. 39, onde podemos ver os três picos característicos da impedância. Os dois pontos de mínimo, entre os picos, indicam as frequências de sintonia das duas câmaras. Na Fig. 74 temos uma vista expandida, em escala linear, que permite a melhor observação desses indicadores de sintonia.

Na Fig. 75 temos o módulo das admitâncias, que permite uma visualização mais cômoda dos pontos de máximo (os mínimos, no caso da impedância).

A Fig. 76 mostra as fases da impedância dos dois falantes, instalados na caixa band pass.

Nas Figs. 77 e 78 temos, em escala linear, a representação do módulo da impedância e da fase da bobina, enfocando os pontos de interesse para a indicação da sintonia, respectivamente para o 18SW1P e para o 18SW2P. Podemos ver que os pontos de impedância mínima e fase nula aconteceram entre 40 e 45 Hz e, depois, entre 70 e 75, correspondendo, respectivamente, às sintonias das câmaras de 100 litros e 50 litros.

Na Fig. 79 temos a resposta completa da caixa (dois falantes, por vez, cada um recebendo 2,83 V), no eixo a 1 metro, medida em câmara anecoica.

Nas Figs. 80 e 81, respectivamente, para os falante 18SW1P e 18SW2P, temos as componentes no duto (e a resposta completa, resultante) onde vemos que a indicação acústica, na frequência mais baixa, praticamente coincidiu com a elétrica, em F_{b1} igual a 42 Hz, aproximadamente. Já na frequência de sintonia mais alta, a indicação acústica (SPL do duto 1) apontou para algo em torno de 105 a 110 Hz, enquanto que a elétrica ficou entre 70 e 75 Hz, conforme vimos acima.

Desse modo, a discrepância realmente significativa (e muito), ocorreu na frequência mais elevada de sintonia.

Conclusão

Os indicadores de sintonia, que se baseiam nas informações elétricas da curva da impedância, são significativamente afetados pela reatância da bobina móvel, que é função da indutância L_e e da frequência de sintonia F_b . Desse modo, caixas com frequências de sintonia elevadas, utilizando alto-falantes com grandes valores de indutância, ficam sujeitos a erros mais significativos.

Em caixas band pass de sexta ordem, na câmara sintonizada na frequência mais alta, os erros na indicação da sintonia, através da impedância elétrica, são inaceitáveis. Mesmo na outra câmara, ou em caixas bass reflex, esses erros podem ser significativos.

Por esta razão, recomendamos o uso dos indicadores acústicos de sintonia, aqui apresentados.

Para as caixas band pass de 4ª ordem não encontramos, ainda, indicadores acústicos mais acessíveis, além do deslocamento do cone e suas velocidades linear e volumétrica.

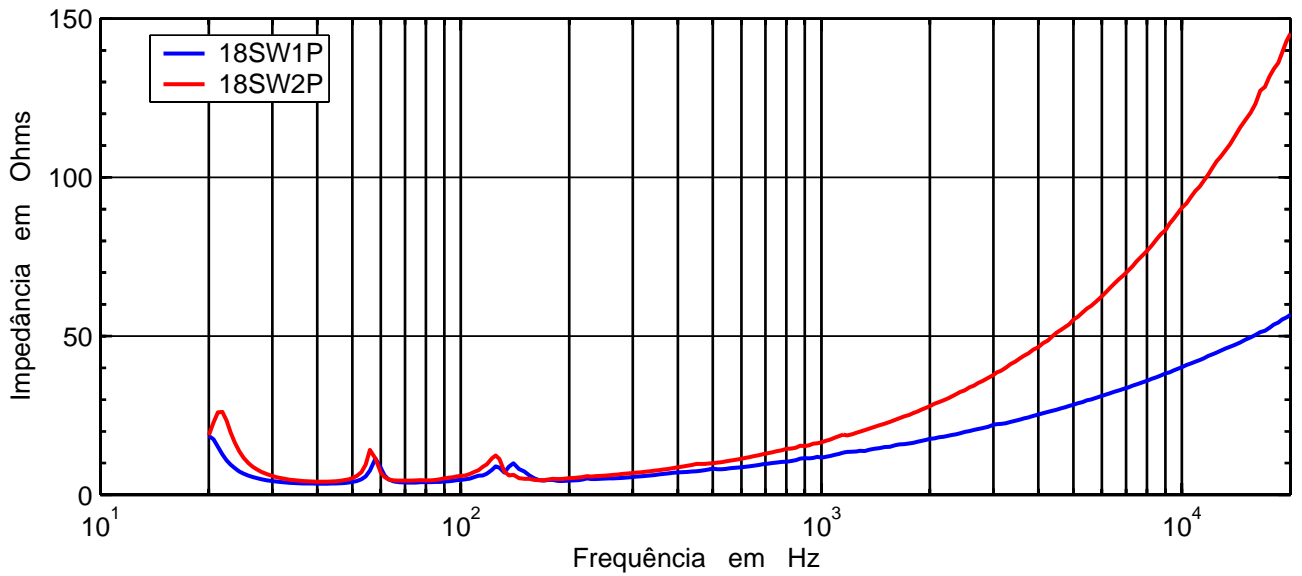


Fig. 73 – Impedância dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas na caixa band pass.

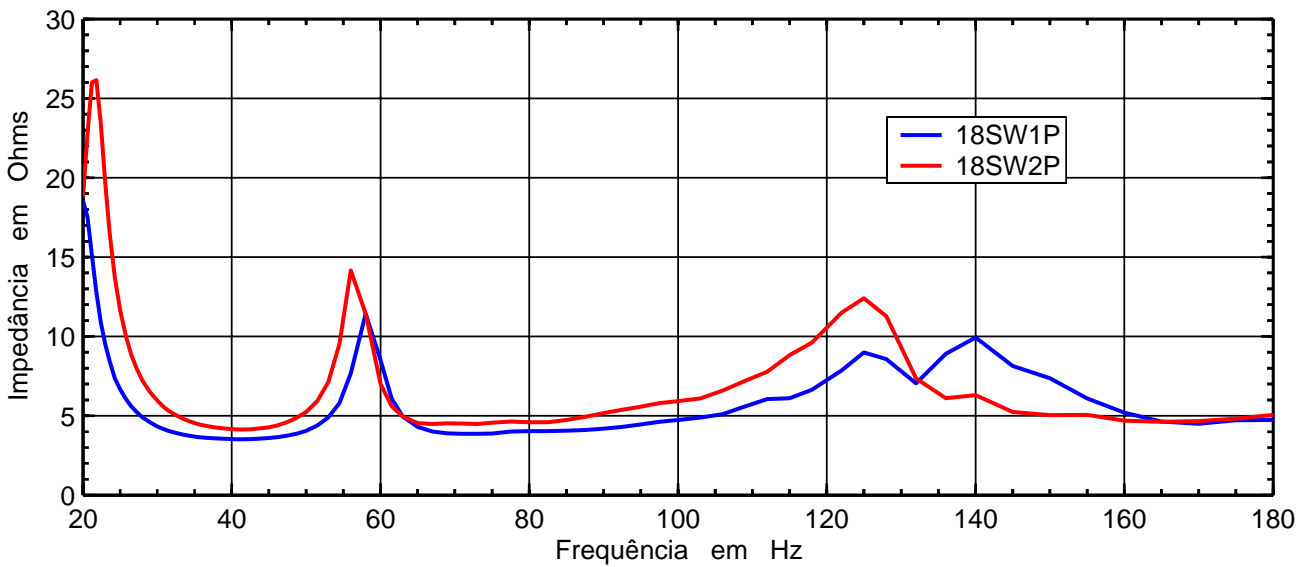


Fig. 74 – Impedância dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas na caixa band pass.

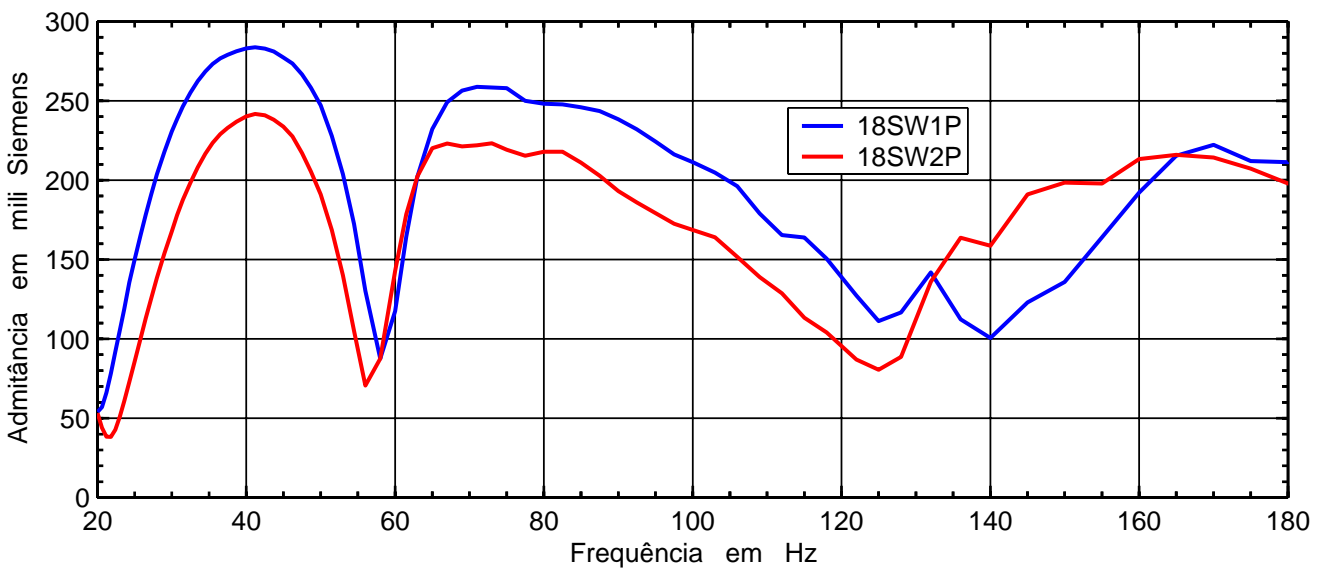


Fig. 75 – Admitância dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas na caixa band pass.

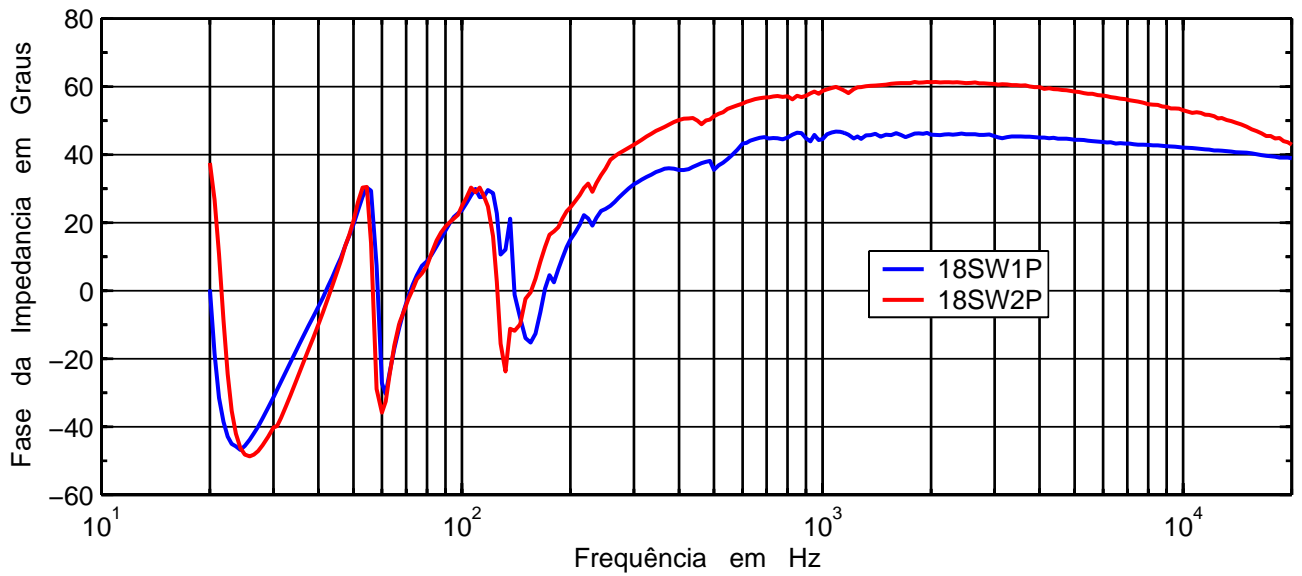


Fig. 76 – Fase dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas na caixa band pass.

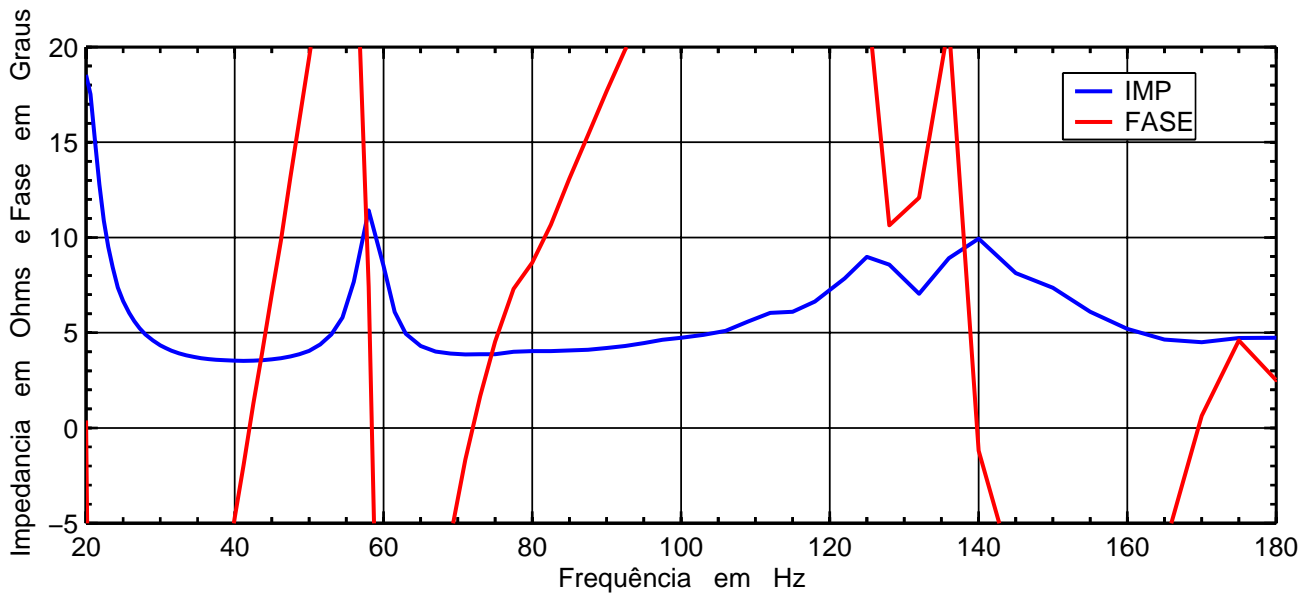


Fig. 77 – Impedância e fase do falantes 18SW1P, medidas na caixa band pass.

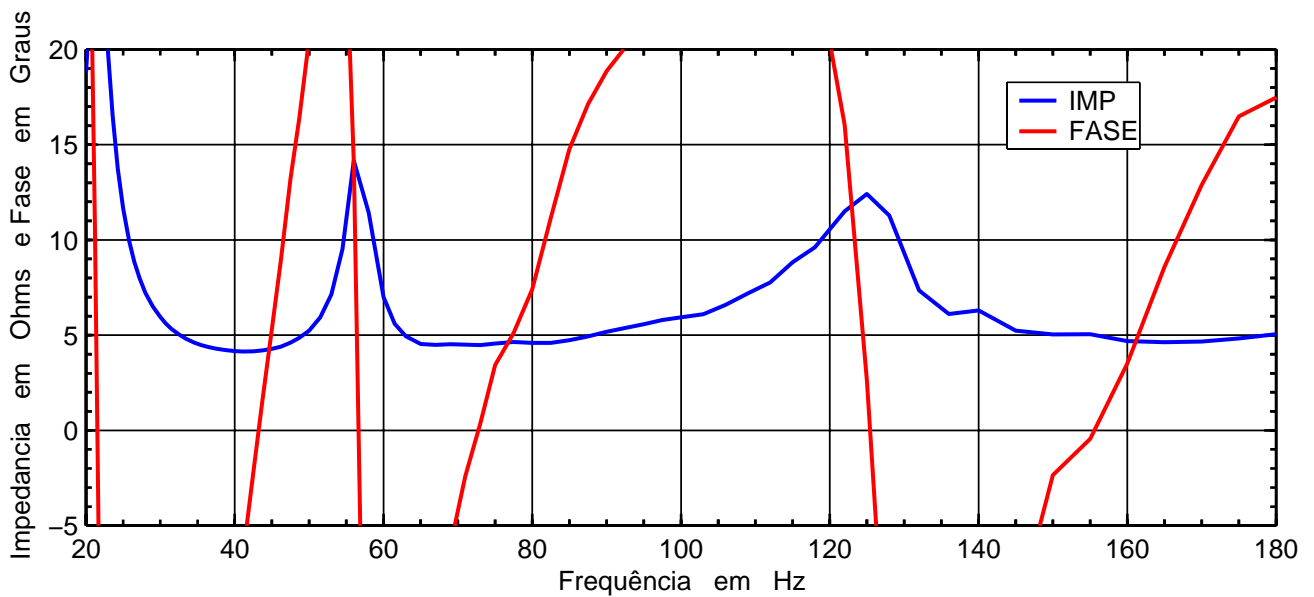


Fig. 78 – Impedância e fase do falantes 18SW2P, medidas na caixa band pass.

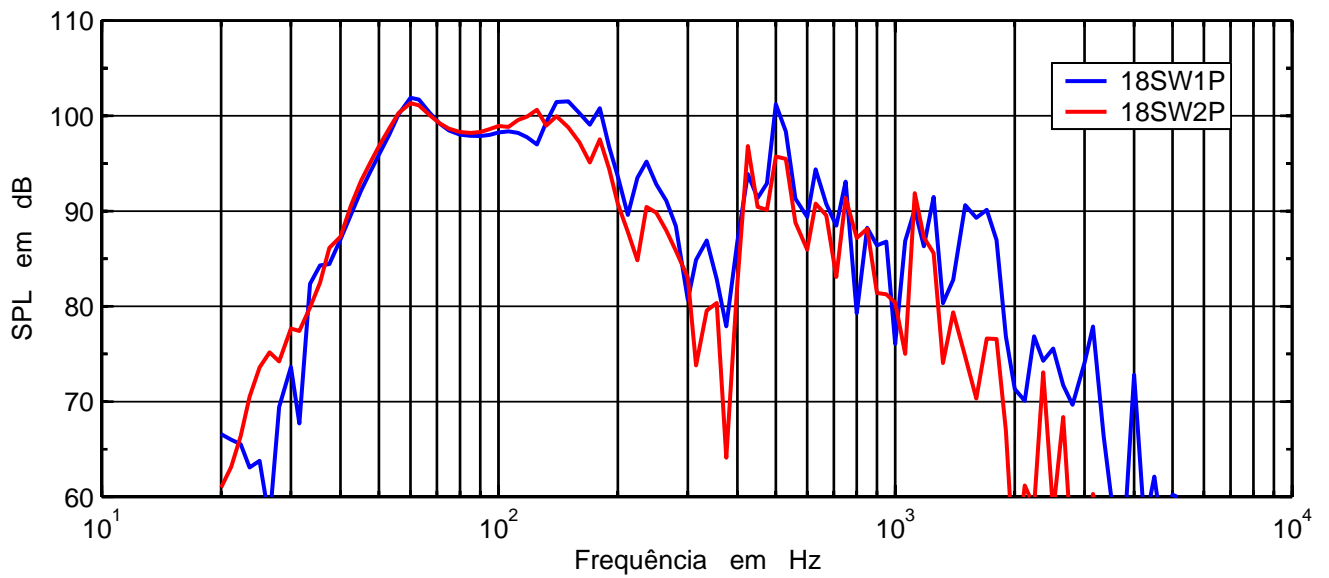


Fig. 79 – Respostas dos falantes 18SW1P e 18SW2P, medidas na caixa band pass.

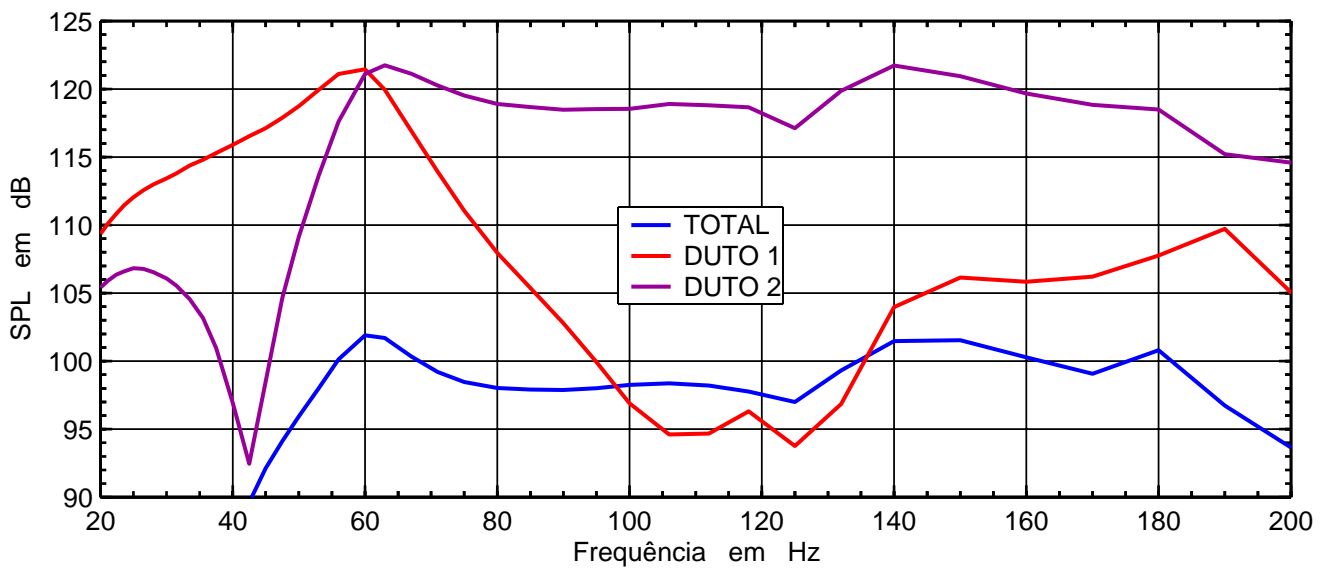


Fig. 80 – Resposta total e nos dutos da caixa band pass, com o falante 18SW1P.

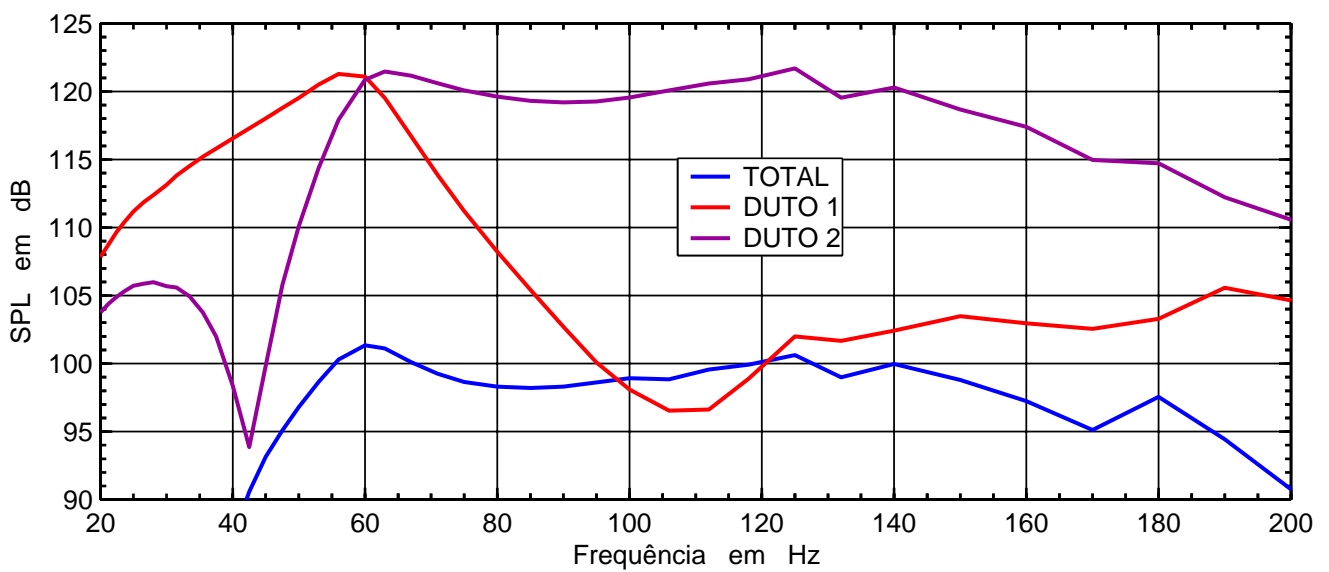


Fig. 81 – Resposta total e nos dutos da caixa band pass, com o falante 18SW2P.

Caixa Band Pass de 4ª Ordem

A caixa Band Pass de 4ª ordem caracteriza-se por possuir duto de sintonia em apenas uma das câmaras, conforme podemos ver na Fig. 82 e, por esse motivo, o procedimento utilizado nas caixas Band Pass de 6ª Ordem não produz indicador de sintonia, tornando-se inútil.

O circuito equivalente elétrico está representado na Fig. 83, onde foram desprezadas as perdas associadas à câmara selada.

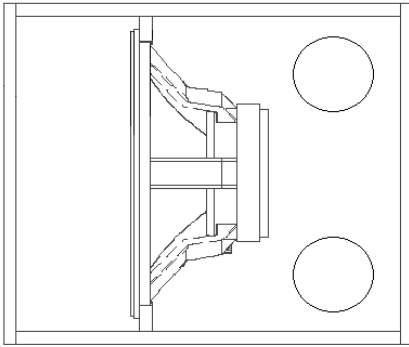


Fig. 82 – Caixa Band Pass de 4ª Ordem.

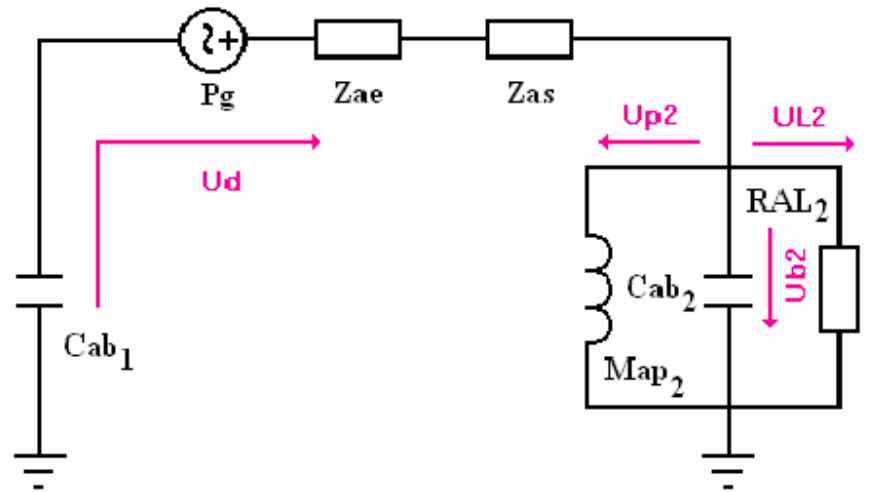


Fig. 83 – Circuito equivalente da caixa Band Pass de 4ª Ordem.

$$Z_{ab_1} = \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{1}{s} \quad (0.82)$$

$$Z_{ab_2} = \frac{\alpha_2}{\omega_{b2} \cdot Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_{b2}}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1} \quad (0.83)$$

$$U_d = \frac{P_g}{Z_{ae} + Z_{as} + Z_{ab_1} + Z_{ab_2}} \quad (0.84)$$

$$U_d = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L \cdot Sd \cdot Cms}{R_g + Z_e} \cdot s}{\frac{(\beta L)^2 \cdot Cms}{R_g + Z_e} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.85)$$

Dividindo U_d por $s \cdot Sd$ obteremos o deslocamento do cone do alto-falante, X_d , instalado em uma caixa BP de 4ª ordem:

$$X_d = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e}}{\frac{(\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot C_{ms}} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.86)$$

Substituindo s por $j\omega$, nas equações (0.85) e (0.86) obteremos (0.87) e (0.88) onde podemos ver que na frequência de sintonia ($\omega = \omega_{b2}$) as amplitudes de U_d e X_d passam por um mínimo, que tenderia para zero se Q_L tendesse para ∞ sendo, portanto, indicadores de sintonia.

$$U_{d(j\omega)} = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L \cdot S_d \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot j\omega}{j\omega \cdot \frac{(\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 - j \cdot \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot C_{ms}} \cdot \frac{1}{\omega} + \frac{-\alpha_2 \cdot j \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2}}{-\frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.87)$$

$$X_{d(j\omega)} = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L \cdot S_d \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot j\omega}{j\omega \cdot \frac{(\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 - j \cdot \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot C_{ms}} \cdot \frac{1}{\omega} + \frac{-\alpha_2 \cdot j \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2}}{-\frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.88)$$

Como U_d e X_d são quantidades mais difíceis de serem medidas, fomos em busca de outra alternativa, que foi encontrada na pressão acústica dentro da câmara fechada, dada pela equação (0.90).

Substituindo s por $j\omega$, na equação (0.91), vemos que teremos o mesmo indicador de sintonia, proporcionado por ($\omega = \omega_{b2}$). Para utilizarmos este método há a necessidade de fazer um furo na parede da câmara selada, por onde será introduzido o microfone, conforme vemos na Fig. 84, furo este que deve ser vedado com massa, para evitar vazamentos.

$$P_1 = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot U_d \quad (0.89)$$

$$P_1 = \frac{E_g \cdot \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{\beta L \cdot S_d \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot s^2}{\frac{(\beta L)^2 \cdot C_{ms}}{R_g + Z_e} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ms}} + 1 + \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot C_{ms}} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\alpha_2 \cdot \frac{s^2}{\omega_{b2}^2}}{\frac{s^2}{\omega_{b2}^2} + \frac{s}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{Q_{L2}} + 1}} \quad (0.90)$$

$$P_{1(j\omega)} = \frac{Eg \cdot \frac{\beta L \cdot Sd \cdot Cms}{Rg + Ze} \cdot j\omega}{j\omega \cdot \frac{(\beta L)^2 \cdot Cms}{Rg + Ze} - \frac{\omega^2}{\omega_s^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Qms} + 1 - j \cdot \frac{\alpha_1}{Sd^2 \cdot Cms} \cdot \frac{1}{\omega} + \frac{-\alpha_2 \cdot j \cdot \frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2}}{-\frac{\omega^2}{\omega_{b2}^2} + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{b2}} \cdot \frac{1}{QL2} + 1}}$$

(0.91)



Fig. 84 – Caixa Band Pass de 4ª ordem, dupla, durante a medição da pressão acústica, na câmara selada.

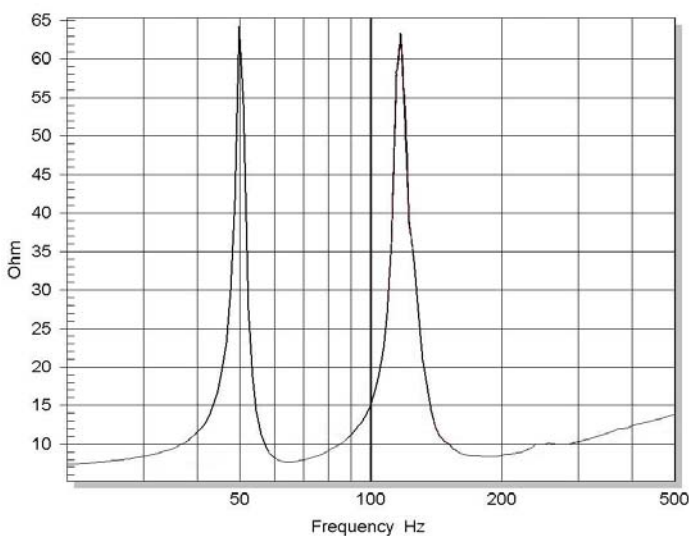


Fig 85 - Impedância da bobina do falante na caixa BP.

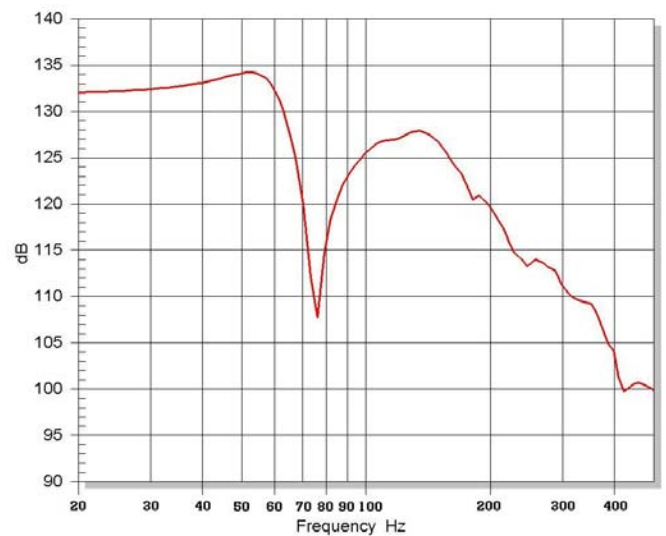


Fig 86 - SPL no interior da câmara selada.

Na Fig. 85, que mostra o módulo da impedância do falante instalado em uma das duas seções da caixa dupla (duas caixas geminadas no mesmo gabinete mas totalmente independentes), vemos que o ponto de mínimo indica a sintonia em torno de 62 Hz.

Já a curva do nível da pressão acústica, medida no interior da câmara selada, mostra a sintonia correta, através do ponto de mínimo, que ficou próximo de 78 Hz, o que corresponde a um erro relativo de - 20,5 %, que é bastante significativo.

Subtraindo as Componentes da Bobina

Outro, método que pode ser usado em qualquer caso (BR, BP4 e BP6), consiste em subtrair da curva da impedância vista pelos terminais da bobina móvel as componentes nativas da bobina.

Para isso, o alto-falante utilizado devem ser medido, sendo obtidos os valores dos parâmetros necessários, conforme o exemplo abaixo, que retrata uma situação real, de uma caixa BP4, semelhante àquela do exemplo anterior, mas não exatamente igual.

$$R_E = 6,16 \text{ Ohms} ; \quad K_{rm} = 0,0043 \text{ Ohms} ; \quad E_{rm} = 0,87 ; \quad K_{xm} = 0,034 \text{ Henrys} ; \quad E_{xm} = 0,7$$

Com o uso de um equipamento de medição (no caso o Klippel 2.0, adquirido pela Selenium em Setembro de 2004) mediu-se o módulo e a fase da curva da impedância vista pela bobina do falante, instalado na caixa, obtendo-se uma listagem em arquivo texto, que foi exportada para o MatLab.

No MatLab, calcula-se a impedância das componentes próprias da bobina, em função dos parâmetros medidos e, a partir dos valores contidos na listagem, converte-se a impedância da forma polar para cartesiana e dela se subtrai a impedância das componentes nativas da bobina, calculadas anteriormente.

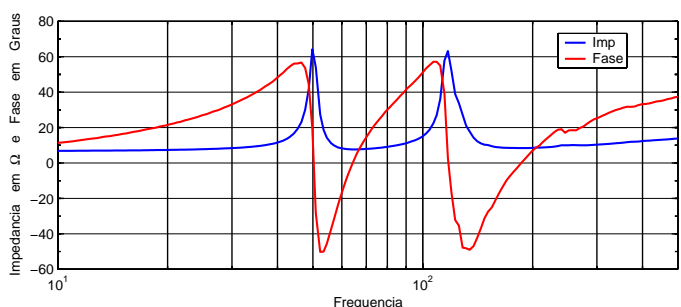


Fig 87 - Impedância e fase na bobina.

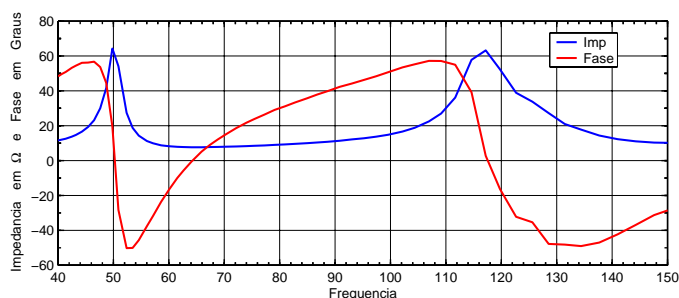


Fig 88 - Impedância e fase na bobina, escala linear.

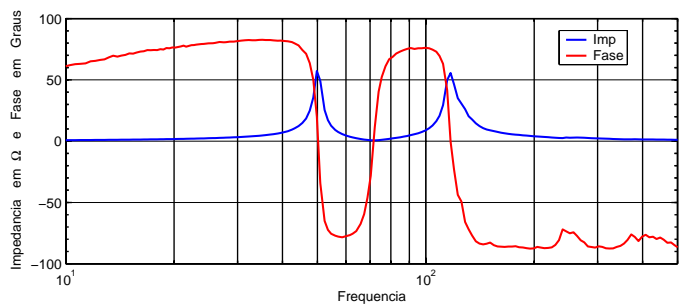


Fig 89 - Impedância e fase sem as componentes da bobina.

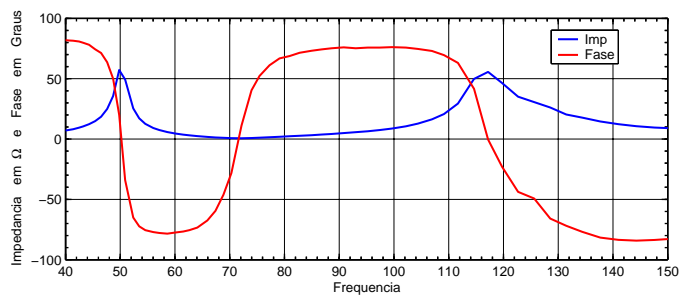


Fig 90 - O mesmo que na Fig. 89 mas em escala linear.

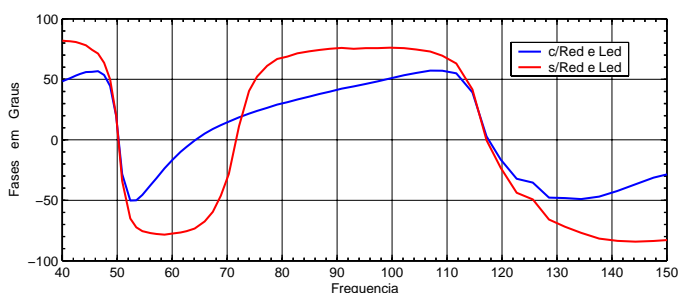


Fig 91 - Fases com e sem as componentes da bobina.

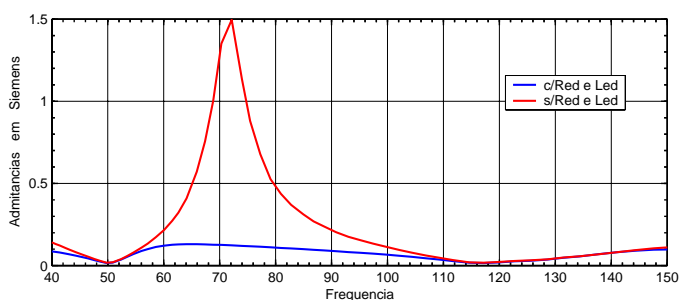


Fig 92 - Admitâncias com e sem as componentes da bobina.

Abaixo vemos fragmento da rotina elaborada no MatLab para executar o procedimento descrito, onde $FREQ$, IMP e $FASE$ representam os valores medidos da frequência, impedância e fase, respectivamente.

```
Red = Krm*(2*pi*FREQ).^Erm ; XLe = Kxm*(2*pi*FREQ).^Exm ;  
Ze = RE + Red + j*XLe ;  
FaseRad = pi*FASE/180 ;  
RZvc = IMP.*cos(FaseRad) ; IZvc = IMP.*sin(FaseRad) ; Zvc = RZvc + j*IZvc ;  
ZV = Zvc - Ze ;  
MZV = abs(ZV) ; FaseZV = 180*angle(ZV)/pi ;
```

As Figs. 87 a 92, geradas no MatLab, ilustram os resultados obtidos, onde podemos ver que os pontos de mínimo e os de fase nula, na curva da impedância, são nitidamente diferentes com e sem as componentes da bobina.

A sintonia correta será aquela indicada pela frequência correspondente à impedância mínima, e à fase nula, na curva da impedância sem as componentes nativas da bobina.

Conclusão

O método tradicional de aferição da sintonia de caixas Bass Reflex e Band Pass, utilizando os pontos de mínima impedância mostrou apresentar erros significativos, principalmente no caso de frequências de sintonia elevadas, devido à indutância da bobina, tendo o fator de qualidade Q_L , que representa as perdas por vazamento, também contribuído para isso.

A utilização de indicadores acústicos de sintonia resolve adequadamente o problema, havendo ainda a possibilidade da subtração das componentes existentes na bobina, da impedância total, conforme foi demonstrado.

Agradecimentos

O Autor agradece:

Ao Eng. Rosalfonso Bortoni, D.Sc, pelas valiosas sugestões e comentários construtivos feitos durante a elaboração do presente trabalho.

Ao Técnico de Produtos Cristian da Cruz, pelas medições efetuadas na câmara anecóica da Selenium.

À Eletrônica Selenium S. A. pelos recursos colocados à disposição do Autor, que a exime de quaisquer responsabilidades quanto às informações aqui veiculadas, de inteira responsabilidade do Autor.

Bibliografia

- 1 - An Empirical Model for Loudspeaker Motor Impedance
J. R. Wright
Journal of the Audio Engineering Society Vol. 38 N° 10, Outubro de 1990
- 2 - Loudspeakers in Vented Boxes, Partes I e II
Neville Thiele
Journal of the Audio Engineering Society Vol. 19 N° 5 e 6, de Jun/Jul 1971
- 3 - Direct Radiator Electrodynamic Loudspeaker Systems
Richard H. Small
Tese para o grau de Doutor em Filosofia, apresentada na
Universidade de Sidney, Austrália, em maio de 1972

4 - Direct Radiator Loudspeaker System Analysis

Richard H. Small

Journal of the Audio Engineering Society Vol. 20 N° 5, Junho de 1972

5 - Vented-Boxes Loudspeaker System Partes I, II, III e IV

Richard H. Small

Journal of the Audio Engineering Society Vol. 21 N° 5, 6, 7 e 8, de Jun, Jul/Ago, Set e Out 1973

6 - Loudspeakers' Electric Models for Study of the Efforts in Audio Power Amplifiers

Rosalfonso Bortoni e Homero Sette Silva

Apresentado na 115ª Convenção da Audio Engineering Society de 10 a 13 de Outubro de 2003, em N.Y.

■ ■ ■