Fundamentos de Eletroacústica
Lista de Exercícios

N.E. Souza Filho[1]

Engenharia Acústica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

Capítulo I

I.1 - Considere os elementos L, C_{E}, R_{E} e as *resistências recíprocas* C_{E}, L, $1/R_{\mathrm{E}}$. Escreva as relações de *reciprocidade de resistência.*

I.2 - Considere os elementos m, C_M, R_{M} e as *resistências recíprocas* C_{M}, m, $1/R_{\mathrm{M}}$. Escreva as relações de *reciprocidade de resistência.*

I.3 - Faça uma comparação entre as relações de *reciprocidade de resistência* elétricas e mecânicas e defina as quantidades correspondentes das analogias *força-tensão* e *força-corrente.*

I.4 - Considere os circuitos elétricos em série e em paralelo.
(a) Determine a equação diferencial para o circuito em série e para o circuito em paralelo.
(b) Mostre que a impedância de um circuito em série é

$$Z_{\mathrm{E}} = R_{\mathrm{E}} + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_{\mathrm{E}}}\right)$$

(c) Sendo a frequência de ressonância do circuito em série $\omega_0 = (1/LC_{\mathrm{E}})^{1/2}$, defina o *fator de ajuste*, o *fator de dissipação* e a *resistência característica.*
(d) Sendo a frequência de ressonância do circuito em paralelo $\omega_0' = (1/L'C_{\mathrm{E}}')^{1/2} = \omega_0$, defina o *fator de ajuste*, o *fator de dissipação* e a *resistência característica.*
(e) Determine a impedância de um circuito em série e de um circuito em paralelo, ambos em termos de *resistências características* (Z_0 e Z_0'). Mostre que a impedância em ambos os circuitos é dada por $Z_{\mathrm{E}} = 1/Z_{\mathrm{E}}'$ e dê as resistências recíprocas de circuitos elétricos.
(f) A partir das impedâncias dos circuitos em série, e em paralelo, mostre que quando $\Omega = \Delta$, o valor absoluto da impedância torna-se $\sqrt{2}$ vezes o valor da ressonância para o circuito em série e $1/\sqrt{2}$ vezes o valor da ressonância para o circuito em paralelo.

I.5 - Determine a potência para a curva de ressonância do circuito em série e em paralelo. Mostre que quando Δ é pequeno $\Delta = (2\Delta)$, em que (2Δ) é o fator de largura de banda a meia potência e ω_H é a frequência angular a meia potência.

I.6 - Considere os circuitos mecânicos em série e em paralelo
(a) Determine a equação diferencial para o circuito mecânico em série e em paralelo.
(b) Dê as resistências recíprocas de circuitos mecânicos e faça os diagramas do análogo elétrico de 1^o e de 2^o *tipo* para os circuitos mecânicos em série e em paralelo.

I.7 - Considere um *Tonpilz* e um *Tonraum.*
(a) Determine a massa equivalente de um *Tonpilz.*
(b) Represente a configuração de um oscilador mecanoacústico fundamental (*Tonpilze*), construa a configuração do oscilador mecânico a partir do seu análogo de primeiro tipo e determine sua equação diferencial.
(c) Construa a configuração do oscilador mecânico a partir do seu análogo elétrico de de 2^o *tipo*, represente a *resistência recíproca Tonpilze* determine a equação diferencial e apresente sua forma simétrica.
(d) Defina *Tonraum* e represente a configuração do análogo elétrico de 1^o e de 2^o *tipo* para *resistências recíprocas Tonpilz* e *Tonraum.*

I.8 - Em relação aos osciladores elétricos acoplados:
(a) Represente a configuração de dois circuitos acoplados indutivamente com ligação em série ao elemento de acoplamento.
(b) Represente a configuração de dois circuitos acoplados capacitivamente com ligação em série ao elemento de acoplamento.
(c) Faça o diagrama generalizado de dois circuitos com ligação em série ao elemento de acoplamento e determine a impedância de entrada dos dois circuitos acoplados (em termos de Z_{01}) e defina o fator de acoplamento κ para um circuito indutivo e para um circuito capacitivo.
(d) Considere ambos circuitos sem amortecimento ($\Delta_1 = \Delta_2 = 0$) e ajustados à mesma freqência ($\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$; ou $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$). Determine ($Z_{i1}/Z_{01}$) para o acoplamento indutivo e acoplamento capacitivo e suas respectivas frequências acopladas (ω_ν).

[1]E-mail: nilson.evilasio@eac.ufsm.br.

(e) Mostre que, na vizinhança de ressonância para o acoplamento indutivo e capacitivo, temos

$$\Re\mathfrak{e}\left(\frac{1}{Z_{i1}^*}\right) = \frac{1}{Z_{01}}\frac{\Delta_2(\Delta_1\Delta_2+\kappa^2-\Omega^2)+\Omega^2(\Delta_1+\Delta_2)}{(\Delta_1\Delta_2+\kappa^2-\Omega^2)^2+\Omega^2(\Delta_1+\Delta_2)^2}$$

Use esta equação para mostrar dois exemplos típicos de dois circuitos bem acoplados e dois fracamente acoplados.
(f) Obtenha a condição de dupla ressonância da potência de entrada. Use o resultado para fazer o gráfico da curva crítica para a dupla ressonância da potência de entrada de dois circuitos acoplados e igualmente ajustados.
(g) Sendo

$$\frac{\boldsymbol{e}_1}{\boldsymbol{i}_2} = \gamma\left[\frac{Z_{\mathrm{E1}}Z_{\mathrm{E2}}}{Z_{01}Z_{02}} - \frac{Z_{\mathrm{E12}}^2}{Z_{01}Z_{02}}\right]$$

para fatores de ajuste iguais para os circuitos de qualquer tipo de acoplamento. Defina $x = \Delta_1\Delta_2+\kappa^2-\Omega^2$ e $y = (\Delta_1+\Delta_2)\Omega$, e mostre que

$$y^2 = (\Delta_1+\Delta_2)^2(\Delta_1\Delta_2+\kappa^2-x)$$

Use esta equação para fazer o gráfico do *locus* da relação e_1/i_2 de dois circuitos acoplados com fatores iguais de ajuste próximo à ressonância.
(h) Faça o gráfico do *loci* das impedâncias de entrada divididas por Z_{01}, com $(\omega/\omega_0) = 1$, de dois circuitos acoplados com fatores de ajuste iguais, próximos à ressonância.
(i) Faça o gráfico do *locus* da função recíproca $(\boldsymbol{i}_2/\boldsymbol{e}_1)$ e seu valor absoluto em coordenadas cartesianas.
(j) Faça o gráfico da curva crítica para o pico duplo da potência dissipada no circuito secundário de dois circuitos acoplados com fatores de ajuste iguais.
(k) Considere uma transformação de resistência recíproca, obtenha Z_{01}'/Z_{i1}', κ'^2 e ω_ν para os acoplamentos capacitivo e indutivo e formule a regra geral para oscilações acopladas (descoberta por Hecht). Faça um resumo dos resultados numa tabela.
(l) Dê a expressão da impedância de entrada de mais que dois circuitos acoplados, para a impedância de entrada de n circuitos acoplados com ligação em série aos componentes de acoplamento. Como é possível realizar um cálculo numérico. Discuta.
I.9 - Em relação aos osciladores mecânicos acoplados:
(a) Faça os diagramas de dois *Tonpilze* acoplados e dos análogos elétricos de 1^o e de 2^o *tipo* e obtenha as equações diferenciais para dois *Tonpilze* acoplados a partir da analogia de 1^o *tipo*.
(b) Mostre que a impedância de entrada é

$$Z_{i1} = \frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{v}_1} = Z_{01}\ (\textit{multiplicado pelo termo})$$

$$\frac{(\Delta_1+j\Omega_1)(\Delta_2+j\Omega_2)-\kappa^2(\Delta_1-j\omega_{01}/\omega)(\Delta_2-j\omega_{02}/\omega)}{\Delta_2+j\Omega_2-\kappa^2(\Delta_2-j\omega_{02}/\omega)},$$

e que para *Tonpilze* não amortecido igualmente ajustado torna-se

$$Z_{i1} = Z_{01}j\frac{\Omega^2-\kappa^2\omega_0^2/\omega^2}{\Omega+\kappa^2\omega_0/\omega}.$$

(c) Mostre que as frequências ressonantes acopladas, em que o valor absoluto de Z_{i1} passa a ser zero, são determinadas por $\omega_\nu = \omega_0(1\pm\kappa)^{\frac{1}{2}}$. Discuta esse resultado.
(d) Obtenha um valor para o fator crítico de acoplamento, acima do qual $\boldsymbol{v}_2$ torna-se um pico duplo para uma força excitadora constante.
(e) Faça os diagramas de dois *Tonpilze* de resistências recíprocas acopladas e o de dois *Tonraume* acoplados.
(f) Faça os diagramas do análogo elétrico de 1^o e de 2^o *tipo* para dois *Touraume* acoplados (*resistência recípocra Tonpilze*) e de um oscilador acústico constituído por dois *Tonpilze* acoplados.

I.10 - Em relação aos osciladores mecânicos e analogias eletromecânicas:
(a) Determine as equações de linha de transmissão e a solução para o caso estacionário;
(b) Determine a impedância de entrada;
(c) Compare a equação do item anterior com a impedância de um circuito em série sem amortecimento e mostre que:

$$\frac{Z_{\mathrm{eq}}}{(Z_0)_{\mathrm{eq}}} = j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right).$$

(d) Faça o gráfico para os valores dados pelas equações dos itens **(b)** e **(c)** em função de ω/ω_0.
(e) Considere uma barra elástica e esquematize o análogo elétrico de 1^o tipo e o circuito mecânico equivalente que oscila perto da frequência de ressonância para os casos presa-livre e livre-livre.

Capítulo II

II.1 - Considere uma distribuição de cargas num condutor.
(a) Mostre que a a força que atua sobre o elemento de superfície dS com densidade de carga σ é:

$$d\mathbf{F} = \frac{1}{2}\sigma\mathbf{E}dS.$$

(b) Determine o *estresse eletrostático* das cargas superficiais.
(c) Determine a energia armazenada em um elemento de volume.

II.2 - Estresse Faraday-Maxwell.
(a) Determine a força dielétrica nas extremidades de um tubo de deslocamento elétrico.
(b) Determine o *estresse Faraday-Maxwell* nas extremidades de um tubo de campo elétrico.
(c) Determine o *estresse Faraday-Maxwell* nas paredes de um tubo de deslocamento elétrico.

(d) Determine o *estresse Faraday-Maxwell* nas paredes de um tubo de campo elétrico.
(e) A partir do estresse que atua na fronteira de dois dielétricos

$$T = T_1 - T_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\epsilon_0\kappa_{\mathrm{E1}}} - \frac{1}{\epsilon_0\kappa_{\mathrm{E2}}}\right) D^2,$$

obtenha a força por unidade de volume em termos de um κ_{E} que varia no espaço.

II.3 - A partir da energia de eletrostrição contida num cubo com base a

$$W = \frac{1}{2}EDa^3 = \frac{1}{2}\epsilon_0\kappa_{\mathrm{E}}E^2a^3,$$

(a) - Considere o campo de elétrico constante e mostre que o estresse mecânico é dado por

$$T = -\frac{1}{2}\epsilon_0\frac{\partial\kappa_{\mathrm{E}}}{\partial\rho}\rho E^2.$$

(b) Considere agora, o deslocamento elétrico constante. Reescreva a energia de eletrostrição contida no cubo e mostre que o estresse mecânico é o mesmo considerado com um campo elétrico constante, porém de sinal contrário.
II.4 - Considere o estresse piezoelétrico e escreva o sistema de equações dos estresses mecânicos normais e de cisalhamento em termos dos componentes do campo elétrico nas direções dos eixos cristalográficos.

II.5 - **(a)** Explique o que seria uma força *pseudo-magnetostática*, ou, o que é o efeito de forças *micro-eletrodinâmicas*.
(b) Defina magnetização e *remanescência*.

II.6 - Considere a tensão induzida num condutor de comprimento l que se move com velocidade v num campo magnético uniforme B. Determine a força exercida neste condutor quando é fornecido a ele uma energia elétrica $P = dW/dt$ transformada em energia mecânica de movimento por aplicação de uma tensão e'.

II.7 - Considere materiais magneticamente fracos, $B = \mu_0\kappa_{m\Delta}H$.
(a) Mostre que a energia armazenada num solenóide de comprimento l, com N voltas, é dada por

$$W = \frac{1}{2}\mu_0\kappa_{m\Delta}H^2lS = \frac{1}{2}BHlS = \frac{1}{2}\left(\frac{B^2}{\mu_0\kappa_{m\Delta}}\right)lS.$$

(b) A partir das seguintes quantidades correspondentes

$$\left.\begin{aligned} \mu_0 &\to \epsilon_0, \\ \kappa_{m\Delta} &\to \kappa_{\mathrm{E}}, \\ H &\to E, \\ B &\to D. \end{aligned}\right\}$$

determine o estresse eletromagnético na face dos dois pólos de seção transversal S e quando é introduzida uma barra de ferro entre os pólos.

II.8 - A partir da energia de magnetoestrição, determine o estresse magnetoestritivo num material cúbico com base a em que $\kappa_{m\Delta}$ depende da densidade ρ.

Capítulo III
III.1 - Conversão de Energia.
(a) Dê definição de um transdutor eletroacústico.
(b) Sendo a força mecânica de um transdutor eletroacústico dependente de uma variável elétrica ao quadrado, quais são as condições para que ocorra uma transdução (elétrica $\leftrightarrow$ mecânica) numa mesma frequência? O que é uma operação polarizada?

III.2 - Considere o estresse piezoelétrico num cristal, dado por

$$\left.\begin{aligned} T_{xx} &= e_{11}E_x + e_{21}E_y + e_{31}E_z, \\ T_{yy} &= e_{12}E_x + e_{22}E_y + e_{32}E_z, \\ T_{zz} &= e_{13}E_x + e_{23}E_y + e_{33}E_z, \\ T_{yz} &= e_{14}E_x + e_{24}E_y + e_{34}E_z, \\ T_{zx} &= e_{15}E_x + e_{25}E_y + e_{35}E_z, \\ T_{xy} &= e_{16}E_x + e_{26}E_y + e_{36}E_z. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

(a) Use, para um cristal de quartzo, os coeficientes

$$e_{ik} = \begin{pmatrix} 4,77\times10^4 & 0 & 0 \\ -4,77\times10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1,23\times10^4 & 0 & 0 \\ 0 & -1,23\times10^4 & 0 \\ 0 & -4,77\times10^4 & 0 \end{pmatrix}$$

e mostre que a lei de força e a lei de deslocamento, num transdutor piezoelétrico, são lineares e com fator de proporcionalidade $\gamma = S_r/lr$, em que S_x, S_y, S_z são as faces e l_x, l_y, l_z são as arestas do cristal de quartzo.
(b) Obtenha a lei de força a partir dos componentes de polarização de um trandutor piezoelétrico.
(c) Considere agora um sal de Rochelle, em que todos os coeficientes de e_{ik} são nulos, exceto para e_{14}, e_{25} e e_{36}. Parta da lei de força e determine a lei de deslocamento.

III.3 - A partir do estresse eletrostático de cargas superficiais, obtenha a lei de força e a lei de deslocamento para um transdutor dielétrico.

III.4 - A partir do estresse Faraday-Maxwell, na fronteira entre dois dielétricos, obtenha a lei de força e a lei de deslocamento para um transdutor $\nabla\kappa_E$ para os casos normal e tangencial. Em qual dos casos é possível fazer uma analogia com outro tipo de transdutor?

III.5 - A partir do estresse de eletrostrição, obtenha as leis de força e deslocamento para um transdutor eletrostritivo.

III.6 - Mostre que as leis de força e de deslocamento de um transdutor eletrodinâmico podem ser obtidas das leis do transdutor piezoelétrico ao trocar i por e. Explique porque isso é possível.

III.7 - Determine as leis de força e de deslocamento do transdutor dinamométrico em função da indutância L.

III.8 - A partir do estresse eletromagnético, obtenha as leis de força e de deslocamento para os casos normal e tangencial de um transdutor eletromagnético.

III.9 - A partir do estresse magnetoestritivo, obtenhas as leis de força e de deslocamento de um transdutor magnetoestritivo.

Capítulo IV

IV.1 - Determine as leis de força e de deslocamento e complete a tabela sistemática de transdutores eletroacústicos (tabela 1).

IV.2 - Determine a constante de proporcionalidade α para cada tipo de transdutor e classifique-os, de acordo com as leis de força e deslocamento em termos de α, para completar a tabela 2.

Capítulos V e VI

1 - Determine as equações diferenciais e as impedâncias de transdutores ideais e complete a tabela 3.

2 - Faça os diagramas de circuito elétrico equivalente de um projetor, de um receptor e o diagrama universal de um transdutor: Classe I; Classe II; Classe III e Classe IV.

Capítulo VII

VII.1 - Considere um elemento de volume num gradiente de campo de pressão e determine a primeira equação fundamental da propagação de som.

VII.2 - Considere agora os efeitos da elasticidade num elemento de volume num campo de pressão variável no tempo, determine a segunda equação fundamental da propagação de som e defina campo sonoro.

VII.3 - Obtenha as duas equações fundamentais para uma onda esférica e para uma onda plana.

VII.4 - Considere como solução da primeira equação fundamental de propagação de som

$$\begin{cases} \boldsymbol{p}(r) &= \alpha(r)e^{j(\omega t-kr)}, \\ \boldsymbol{u}(r) &= \beta(r)e^{j[(\omega t-kr-\phi(r))]}. \end{cases}$$

em que $k=(2\pi/\lambda)=(\omega/c)$. Determine as constantes $\alpha(r)$ e $\beta(r)$ e mostre que, se $c=(B/\rho)^{1/2}$, a nova solução satisfaz a segunda equação fundamental da propagação do som.

VII.5 - A partir da lei de Ohm para um plano de onda de som ou da impedância específica para ondas esféricas, obtenha uma expressão para a potência sonora por unidade de área que seja independente do raio da esfera.

VII.6 - Determine o campo sonoro de uma esfera pulsante pequena (comparada com λ) com um termo de fonte $\boldsymbol{q}$, defina resistência acústica, massa acústica e determine a potência acústica em termos da resistência acústica.

VII.7 - Determine o campo sonoro de um pistão de área ΔS, com dimensões pequenas comparadas ao λ, numa parede rígida (radiação em meio semi-infinito) e discuta o que acontece quando a parede rígida é removida.

VII.8 - Radiação de fontes acústicas elementares.

(a) A partir da equação de onda em coordenadas esféricas

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(pr)=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}(pr),$$

determine o campo sonoro para uma fonte simples de raio R num ponto A a uma distânca a do centro da fonte e defina velocidade de volume.

(b) Considere duas fontes simples, em fase, separadas por uma distância b. Determine magnitude da pressão sonora RMS $|p|$ num ponto A.

(c) Defina padrão de diretividade. Faça os gráficos para os padrões de diretividade de duas fontes simples em fase para: $b=\lambda/4$; $b=\lambda/2$; $b=\lambda$ e discuta o que acontece quando a distância b entre as duas fontes é muito menor e/ou muito maior que λ.

(d) Considere o arranjo linear de n fontes simples que vibram em fase, em que a distância entre as fontes das extremidades é $d=(n-1)b<<r$. Determine a pressão sonora num ponto A. Faça os gráficos da diretividade, com um arranjo de 4 fontes, para $d=\lambda/2$; $d=\lambda$; $d=2\lambda$ e discuta o que acontece quando $n\to\infty$ e $b\to 0$.

VII.9 - Radiação direcional.

Considere a pressão da radiação acústica de uma superfície plana S que oscila no plano xy num ponto distante A (*campo distante*):

$$\boldsymbol{p}(r)=\frac{j}{2\pi}\rho ck\int_S \boldsymbol{v}_s\frac{e^{-jkr}}{r}dS.$$

(a) Determine a pressão sonora no ponto A e defina a relação de desvio angular.

(b) Faça o gráfico da relação de desvio angular de um pistão circular de diâmetro D em uma parede rígida para $D/\lambda = 0,5$ e 3.
(c) A partir da potência sonora por unidade de área independente do raio da esfera

$$P = \frac{1}{2}\frac{|\boldsymbol{p}|^2}{\rho c},$$

determine a resistência acústica em função da taxa de irradiação.

VII.10 - A partir da força resultante total sobre uma membrana

$$\boldsymbol{F}_s = \frac{j}{2\pi}\rho ck \int_S \int_{S'} \frac{e^{-jkr}}{r} dSdS' \boldsymbol{v}_s,$$

(a) Determine uma expressão para a resistência acústica e para a massa acústica;
(b) Considere o pistão pequeno em relação ao λ e calcule $(R_M)_{rad}$ e m_{rad}.

VII.11 - Sendo a pressão sonora total gerada por um pistão, dada por

$$p(r,t) = j\rho c U_o \frac{k}{2\pi} \int_S \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} dS.$$

(a) Mostre que, para campo próximo, a resposta axial ao longo do eixo acústico (eixo de simetria z) da pressão sonora do pistão é dada por

$$p(r,0,t) = \rho c U_o e^{j\omega t}[e^{-jkr} - e^{-jk(r^2+\sigma^2)^{1/2}}].$$

(b) Esboce o gráfico do comportamento da magnitude da pressão acústica em função da distância ao longo do eixo acústico.
(c) Use

$$\int_0^{\pi} e^{jka\ sin(\theta)cos(\phi)}[sin(\phi)]^2 d\phi = \pi\frac{J_1(Z)}{Z},$$

para mostrar que num campo distante,

$$p(r,\theta,t) = j\frac{\rho c}{2}U_o ka e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(ka\ sin(\theta))}{ka\ sin(\theta)}\right].$$

em que J_1 é a função de Bessel de primeira espécie e o termo entre colchetes é o fator direcional $H(\theta)$.
(d) Faça o gráfico de $(R_M)_{rad}$ e de m_{rad} em função de kr.

Capítulo VIII
A eficiência de um transdutor como uma fonte sonora é dada por

$$\eta = \eta_{EM}\eta_{MA} = \frac{P_M}{P_E}\frac{P_A}{P_M} = \frac{P_A}{P_M},$$

em que η_{EM} é a eficência eletromecânica, η_{MA} é a eficiência mecanoacústica, P_A é a potência de saída de som, P_E é a potência elétrica de saída e P_M é a potência mecânica.

VIII.1 - Perdas mecânicas e eficiência mecanoacústica. Considere a impedância mecânica de um pistão

$$\boldsymbol{Z}_M = R_M + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_M}\right),$$

num recipiente de paredes rígidas, conforme ilustra a figura 92.
(a) Determine a massa acústica quando o sistema oscila no ar e depois no vácuo;
(b) Determine a eficiência mecanoacústica, η_{MA}, em termos do fator de dissipação e depois em termos da resistência acústica.
(c) Determine a massa m_{rad} em termos do fator de dissipação Δ.
(d) Dê as regras para a determinação da eficiência eletromecânica para cada classe de transdutor (de acordo com as leis de força da tabela 2).
VIII.2 - Perdas elétricas e eficiência eletromecânica.
(a) Faça o gráfico de P_E em função da frequência ω do transdutor e determine η_{EM} em termos da perda de potência elétrica P_Δ.
(b) Considere

$$H = \frac{(\eta_{EM})_0}{1-(\eta_{EM})_0}\Delta = \frac{P_{M0}}{P_{\Delta 0}}\Delta,$$

e

$$P_{M0} = \frac{F^2}{R_M} = \frac{F^2}{\Delta(Z_M)_0},$$

e mostre que

$$P_\Delta = \frac{1}{2}|\mathbf{i}_s|^2 R_{\Delta i} + \frac{1}{2}|\mathbf{e}_s|^2/R_{\Delta e}.$$

(c) Sendo

$$H \equiv \Delta\frac{(\eta_{EM})_0}{1-(\eta_{EM})_0},$$

mostre que

$$H = \frac{\alpha^2}{Z_0}R_{\Delta e0} = \frac{\alpha^2 R_{\Delta e0}}{R_{E2}}\Delta.$$

(d) Determine a constante de Hahnemann-Hecht para cada classe de transdutor (tabela 4).
(e) Defina o fator de dissipação acústica, o fator de perda por dissipação, considere o fator H constante e determine a eficiência total na ressonância η_0.
(f) Faça o gráfico de η_0 em função de $\Delta_{rad}/\Delta_{vac}$.

VIII.3 - Discuta a medição da eficiência.

Capítulo IX
IX.1 - Área de captura de um receptor.
(a) Qual o significado de $(R_M)_{RA}$ e m_{RAD} para um receptor?

(b) Mostre que

$$(P_A)_{max} = \frac{|F_r|^2}{8(R_M)_{RAD}}.$$

(c) Defina *área de captura.*
(d) Determine S_c de um receptor constituído por um pistão de um defletor rígido.
(e) Determine S_c de um receptor constituído por um pistão de um defletor rígido com o diâmetro do pistão pequeno em relação ao comprimento de onda.
(f) Determine S_c de um receptor constituído por um pistão de um defletor rígido com o diâmetro do pistão grande em relação ao comprimento de onda.
(g) Determine S_c (equação geral) em termos da diretividade R^θ.

IX.3 - Fator de casamento e eficiência do receptor.
(a) Defina *fator de casamento.*
(b) Defina *eficiência acústica-elétrica.*
(c) Mostre que a eficiência de um projetor é dada por:

$$\eta = \frac{P_\mathrm{L}}{P_\mathrm{A}} = \left[\frac{R_{\mathrm{M}tr}}{R_{\mathrm{M}tr} + (R_\mathrm{M})_{vac}}\right]\left[\frac{R_\mathrm{L}}{R_\mathrm{L} + R_{\Delta i}}\right]$$

com

$$R_{\mathrm{M}tr} = \frac{\alpha^2(R_\mathrm{L} + R_{\Delta i})}{(R_\mathrm{L} + R_{\Delta i})^2 + (\omega L_0 - 1/\omega C_\mathrm{E})^2},$$

IX.4 - Defina *disponibilidade de sensibilidade do receptor* e determine Γ para cada classe de receptor (tabela 5).

Capítulo X

X.1 - Considere fontes de som banda larga. Para os sistemas de massa controlada

$$j\omega m\boldsymbol{v}_s \sim \boldsymbol{F}_s,$$

enquanto que para os sistemas de rigidez controlada

$$-\frac{j}{\omega C_M}\boldsymbol{v}_s \sim \boldsymbol{F}_s,$$

ou

$$\omega\boldsymbol{v}_s \sim \boldsymbol{F}_s\omega^2.$$

Perto da ressonância, finalmente,

$$\omega\boldsymbol{v}_s \sim \boldsymbol{F}_s\frac{\omega}{R_\mathrm{M}}.$$

Aplique as leis de força e obtenha as condições para pressão sonora constante e organize os resultados em uma tabela.

X.2 - Considere receptores de som banda larga. A amplitude de deslocamento $|\xi|$ para sistemas de massa controlada é

$$|\xi| = \frac{|\boldsymbol{F}|}{m\omega^2} = \frac{\omega_0}{\omega}\frac{pS}{Z_{\mathrm{M}0}},$$

e para sistemas de rigidez controlada

$$|\xi| = C_\mathrm{M}|\boldsymbol{F}| = \frac{1}{Z_{\mathrm{M}0}\omega}pS,$$

perto de ressonância

$$|\xi| = \frac{|\boldsymbol{F}|}{\omega R_\mathrm{M}} = \frac{1}{\omega\Delta Z_{\mathrm{M}0}}pS.$$

Combine estas leis com as leis de deslocamento, na qual a pressão de som p é mantida constante, e organize os resultados em uma tabela.

Capítulo XI

XI.1 - Determine a constante de acoplamento κ de um circuito RLC adicionado
(a) Em série a um transdutor Classe I;
(b) Em paralelo a um transdutor Classe II;
(c) Em paralelo a um transdutor Classe III;
(d) Em série a um transdutor Classe IV.

XI.2 - Por quê podemos falar apenas formalmente sobre dois circuitos acoplados capacitivamente ligados em paralelo ao elemento de acoplamento? Ou então, dois circuitos acoplados indutivamente ligados em série ao elemento de acoplamento?

XI.3 - Use a impedância de entrada de dois circuitos acoplados

$$Z_{i1} = \frac{\boldsymbol{e}_1}{\boldsymbol{i}_1} = Z_{\mathrm{E}1} - \frac{Z_{\mathrm{E}12}^2}{Z_{\mathrm{E}2}}.$$

para determinar a relação de frequências acopladas num transdutor **Classe III** e **Classe IV**.

XI.4 Faça um esquema para as quatro classes de transdutores, caracterizados pelas frequências ressonantes com acoplamento extremamente rígido.

XI.5 - Faça o gráfico das frequências ressonantes acopladas em função de κ_{20}.

Capítulo XII

XII.1 - Descreva o microfone de contato como um receptor ativo.

Agradecimentos

Agradeço ao diretor de Centro de Tecnologia da UFSM, Dr. Luciano Schuck. Ao chefe do Departamento de Estruturas e Construção Civil, Dr. Vaghetti. À Cordenadora do curso de Engenharia Acústica, Dra. Dinara. E aos alunos do diretório acadêmico da EAC.