

Modelagem e Simulação Multifísica

Ricardo Adriano

rluiz@ufmg.br

7 de abril de 2025

- 1 Aula 06 - Modelagem de um alto-falante
- 2 Aula 07 - Trabalho Computacional 02

Sumário

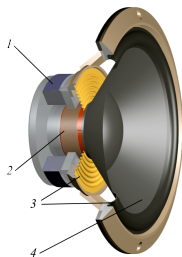
1 Aula 06 - Modelagem de um alto-falante

- O problema do alto-falante
- Representação por elementos concentrados
- Representação por espaço de estados
- Resposta acústica do sistema

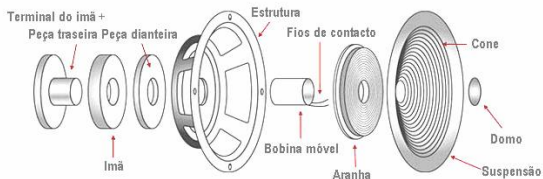
2 Aula 07 - Trabalho Computacional 02

- O modelo linear para o alto-falante
- O modelo não linear

O problema do alto-falante



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loudspeaker-bass.png>



<http://www.novacon.com.br/audioafca.htm>

Físicas envolvidas

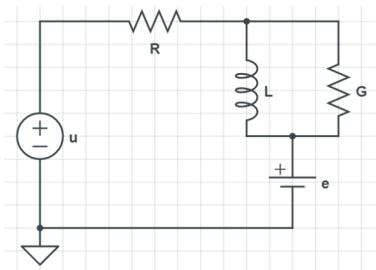
- O problema elastodinâmico do cone.
- O problema eletromagnético.
- A força de Laplace.
- A propagação da onda sonora.

Representação por elementos concentrados (ODE)

O modelo circuitual equivalente

Mesmo modelo do levitador magnético

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Bl \frac{dx(t)}{dt}$$

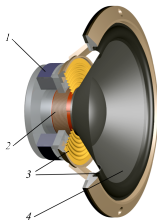


Representação por elementos concentrados (ODE)

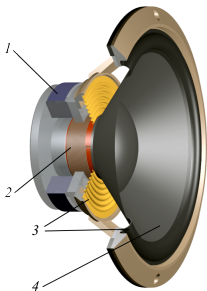
O modelo mecânico

$$f = m\ddot{x}$$

$$f = f_m + f_r + f_a$$



Equações governantes



$$\dot{i} = \frac{u}{L(x)} - \frac{R}{L(x)}i - \frac{Bl(i, x)}{L(x)}\dot{x}$$
$$\ddot{x} = \frac{Bl(i, x)}{m}i - \frac{k}{m}x - \frac{b}{m}\dot{x}$$

Representação por espaço de estados

Notação matricial:

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{Bl}{L} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{Bl}{m} & -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \cdot z + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

ou alternativamente a equação de estados pode ser escrita como:

$$\dot{z} = Az + Bu$$

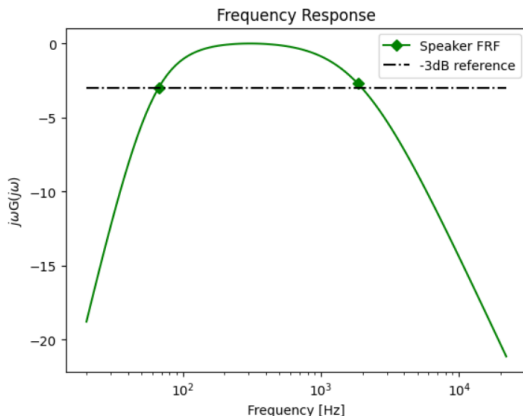
A variável de saída pode ser o deslocamento ou a velocidade do cone. Se a velocidade do cone for escolhida, a equação de saída é dada por:

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} z = Cz$$

Resposta acústica do sistema

Função de Resposta em Frequência (FRF)

Estimada a partir da aceleração do cone. $FRF \approx j\omega G(j\omega)$



Resposta acústica do sistema

$$\begin{aligned}j\omega Z &= AZ + BU \\ Y &= CZ\end{aligned}$$

onde Z , Y e U são funções de $(j\omega)$

Resolvendo a equação de estados para Z temos:

$$Z = (j\omega I - A)^{-1}BU$$

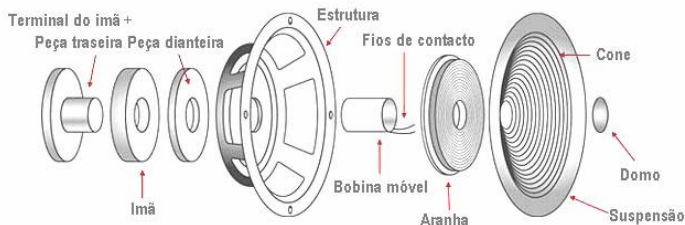
Função de transferência do sistema é obtida facilmente,

$$G(j\omega) = Y(j\omega)/U(j\omega) = C(j\omega I - A)^{-1}B$$

Sumário

- 1 Aula 06 - Modelagem de um alto-falante
 - O problema do alto-falante
 - Representação por elementos concentrados
 - Representação por espaço de estados
 - Resposta acústica do sistema
- 2 Aula 07 - Trabalho Computacional 02
 - O modelo linear para o alto-falante
 - O modelo não linear

Trabalho Computacional 02



Nesse trabalho iremos explorar:

- O modelo linear para o alto-falante
- A inclusão de não linearidades para BI.
- Análise temporal e espectral da saída do sistema.

Trabalho Computacional 02

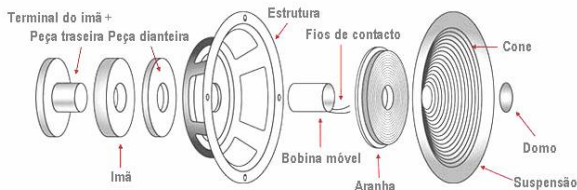
Parâmetros do modelo linear

Parâmetro	Valor
m	14.35e-3 (kg)
b	0.786 (kg/s)
k	1852 (N/m)
Bl	4.95 (N/A)
L	266e-6 (H)
R	3.3 Ω

Condição inicial

Assuma condições iniciais nulas.

Trabalho Computacional 02



Equações governantes

$$\dot{i} = -\frac{R}{L}i - \frac{Bl}{L}v + \frac{u}{L} \quad (1)$$

$$\dot{x} = v \quad (2)$$

$$\dot{v} = \frac{Bl}{m}i - \frac{k}{m}x - \frac{b}{m}v \quad (3)$$

Trabalho Computacional 02

Atividade 01 - Explorando o modelo linear

Grave um arquivo de áudio (TC02-in.wav) de no máximo 10 segundos. Utilize o gravador de áudio de sua preferência. O tamanho do arquivo irá depender do número de bits por amostra e a taxa de amostragem. Como referência um arquivo com resolução de 8 bits e 9.600 ksps possui qualidade similar à de um rádio FM. Considere que o alto-falante será conectado ao plugue $p2$ do seu computador ($V_{in} < 2.0V$). Para esse arquivo faça:

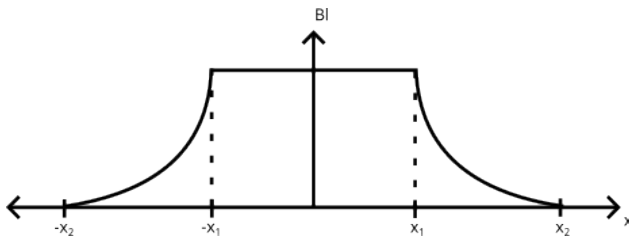
- Apresente $V_{in}(t)$ e $V_{in}(j\omega)$.
- Simule a resposta do alto-falante e apresente os gráficos para i , x , \ddot{x} .
- Apresente $\ddot{x}(t)$ e $\ddot{x}(j\omega)$. Compare com V_{in} .
- Salve $\ddot{x}(t)$ no arquivo TC02-out1.wav.
- Analise os resultados

Trabalho Computacional 02

Atividade 02 - Criando um modelo não linear para o alto-falante

Neste trabalho usaremos o mesmo modelo do alto-falante apresentado na aula anterior. Entretanto, iremos assumir que o fator de força Bl diminua à medida que o alto-falante se afasta da sua posição de repouso $x = 0$. Para $|x| \leq x_1$ o fator de força é constante e igual ao modelo linear. Para $|x| \geq x_2$ os valores são nulos. No intervalo $x_1 \leq |x| \leq x_2$ o parâmetro assume um decaimento polinomial.

Defina x_1 e x_2 como 75% e 150% da excursão máxima da posição do cone no modelo linear. Utilize um modelo polinomial de ordem 2.



Trabalho Computacional 02

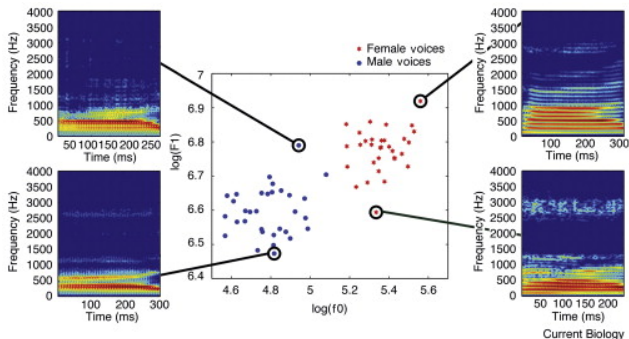
Atividade 03 - Implemente e avalie o modelo não linear para o alto-falante

Modifique a função $f(t, x)$ para incorporar o modelo não linear para o fator de força. Repita os passos da atividade 1.

Atividade 4 - resposta a um sinal senoidal

Gere um sinal senoidal com as características apresentadas a seguir. Com esse sinal, compare as saídas dos modelos linear e não linear. Comente os resultados em termos da resposta transitória e permanente do sistema.

Trabalho Computacional 02



Human voice perception

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.12.033>

- O sinal deve estar dentro da faixa de frequência da voz humana.
- O sinal deve conter no mínimo 20 períodos.
- Amplitude de $2V$ ($4V_{pp}$).

Trabalho Computacional 02

Entrega do trabalho

Apresente os resultados na forma de um relatório técnico, anexando os programas utilizados para simular os problemas. Importante:

- O relatório deve ser entregue em formato PDF.
- Os programas desenvolvidos devem ser entregues em um anexo .zip.
- Outros formatos de arquivos não serão avaliados!
- Apenas um membro do grupo deve submeter o relatório para avaliação.