

PMR3306 – Sistemas Dinâmicos II para Mecatrônica



“Everyone wants the project
to be good, fast and cheap...
pick two!”
- *Unknown*

DIAGRAMA DE BODE PARTE I

Larissa Driemeier



NOSSO CALENDÁRIO

#	Data	Conteúdo	Teste
I -12	4/10	Transformada de Fourier	
II -13	10/10	Transformada de Fourier	
III -14	11/10	Transformada de Fourier	
IV -15	17/10	Transformada de Fourier	
V -16	18/10	Diagrama de Bode	
VI -17,18	19/10	Diagrama de Bode	
VII - 19	24/10		TESTE – TODO CONTEÚDO

LAPLACE VS FOURIER

Transformada de Laplace (1785)

A transformada de Laplace transforma um sinal em um plano complexo s .

$$X(s) = \int_{-0}^{+\infty} x(t)e^{-st} dt$$

Função da variável complexa $s = \sigma + j\omega$

Função do tempo (frequentemente mudando em $t = 0$)

Usada em controle, estabilidade

Transformada de Fourier (1822)

A transformada de Fourier transforma o mesmo sinal no plano $j\omega$ e é um caso especial da transformada de Laplace onde a parte real é 0.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Função da frequência ω

Função do tempo, geralmente periódica ou de duração infinita

Usada para análise em frequência

LAPLACE VS FOURIER

Transformada de Laplace (1785)

$$X(s) = \int_{-0}^{+\infty} x(t)e^{-st} dt$$

A transformada de Laplace de $x(t)$ é a transformada de Fourier de $x(t)e^{-\sigma t}$

Função da variável complexa $s = \sigma + j\omega$

Função do tempo (frequentemente mudando em $t = 0$)

Usada em controle, estabilidade

Transformada de Fourier (1822)

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Função da frequência ω

Função do tempo, geralmente periódica ou de duração infinita

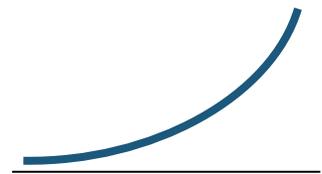
Usada para análise em frequência

$$e^{-\sigma t} e^{-j\omega t} \text{ vs } e^{-j\omega t}$$



No domínio de Laplace, $s = r + j\omega$ onde σ é a parte real e a parte imaginária representa a componente oscilatória. A transformada de Laplace é muito usada na análise de sinais transitórios, ou seja, para analisar não apenas o componente oscilatório (senoidal), mas também o componente de amplitude decrescente de um sinal complexo ou resposta de um sistema complexo a um impulso. **Importante quando um sistema acaba de receber alguma perturbação externa e está a caminho de atingir um estado estacionário em algum momento futuro.**

A amplitude do sinal decai (ou aumenta) exponencialmente e atinge um valor estacionário. Nesse momento, torna necessário analisar apenas a componente oscilatória ou sinusoidal. **Conseqüentemente, a transformada de Fourier é usada na análise de sinais em estado estacionário.**



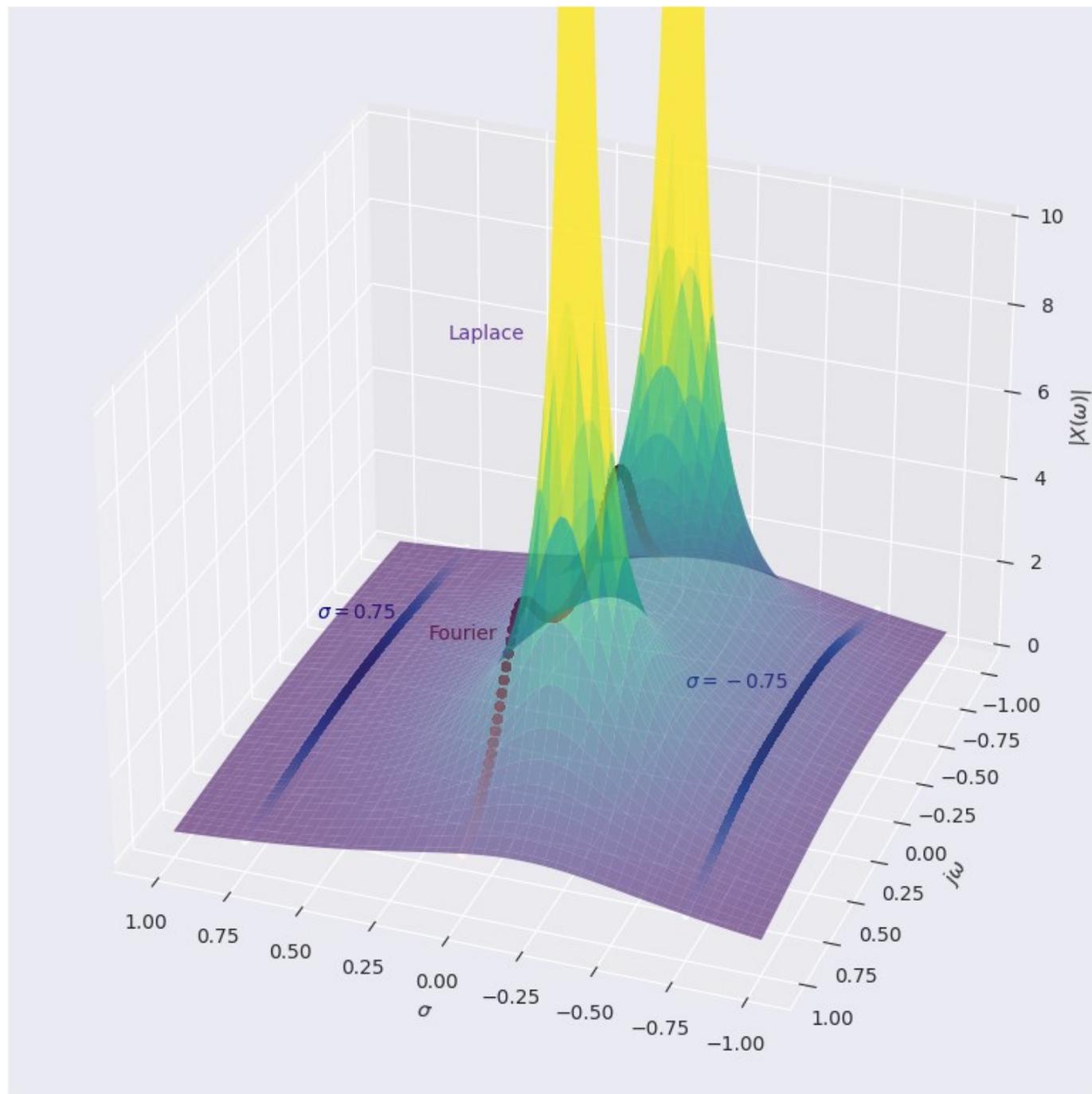
$$\sigma = 0.75$$



$$\sigma = 0.$$



$$\sigma = -0.75$$





RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

O termo *resposta em frequência* significa a resposta em regime permanente de um sistema a uma entrada senoidal.

[Ogata]

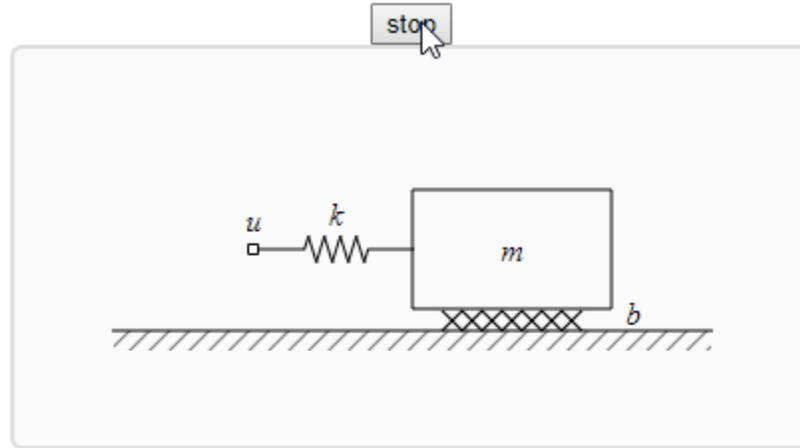
RESULTADOS DE UM TESTE DE UM VEÍCULO EM UMA ESTRADA DE PERFIL SENOIDAL, COM VELOCIDADE CRESCENTE

Até 40 Km/h as oscilações do condutor acompanham as da via, ié, quando a via sobe, o condutor sobe a mesma amplitude e vice versa;

Aos, aproximadamente, 70 Km/h a amplitude das oscilações do condutor é muito maior do que a amplitude do perfil da via;

A $80 - 85 \text{ Km/h}$ a amplitude das oscilações é semelhante à observada a 70 Km/h ; no entanto, a diferença de fase é da ordem dos 180° , i.e., quando a via sobe, o condutor desce no assento, quando a estrada desce o condutor bate com a cabeça no capô;

A 150 Km/h as oscilações são quase imperceptíveis ao condutor, e a condução se torna bastante agradável !



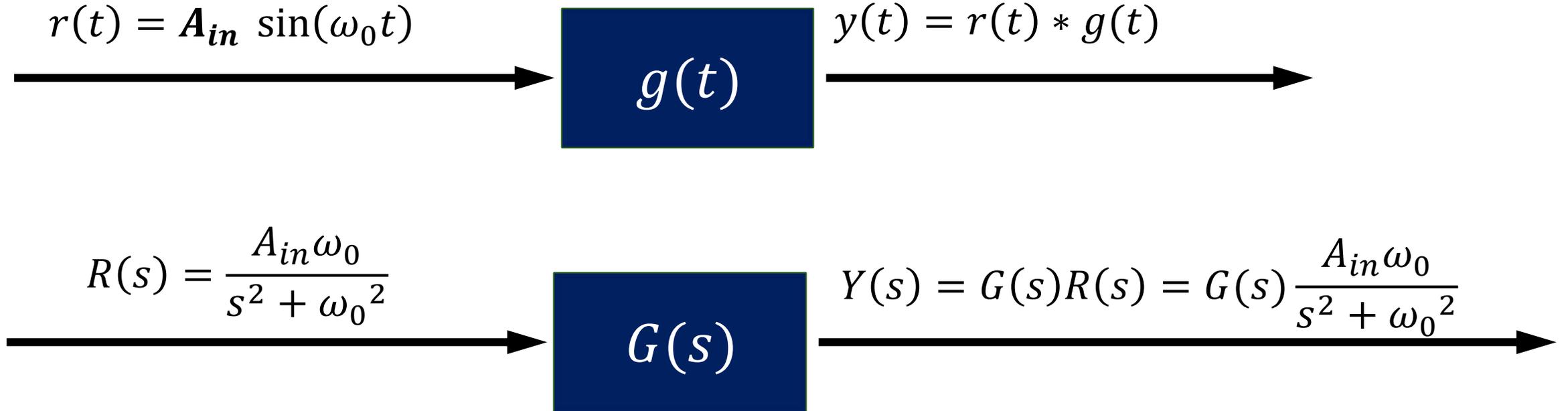
Animation by Ames Bielenberg

<http://lpsa.swarthmore.edu/Bode/BodeWhat.html##section1.5>

ONDA SENOIDAL

Para Sistema **LIT**, se a entrada é uma onda senoidal a uma frequência particular, então a saída será ...





$$G(s) = \frac{(s + z_1)(s + z_2) \dots}{(s + p_1)(s + p_2) \dots}$$

$$R(s) = \frac{A_{in}\omega_0}{s^2 + \omega_0^2}$$

$$Y(s) = R(s)G(s) = \frac{c_1}{s + j\omega_0} + \frac{c_2}{s - j\omega_0} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{s + p_i}$$

$$y(t) = \underbrace{c_1 e^{-j\omega_0 t} + c_2 e^{j\omega_0 t}}_{\text{Resposta forçada}} + \underbrace{K_1 e^{-p_1 t} + K_2 e^{-p_2 t} + \dots}_{\text{Resposta natural}}$$

Resposta forçada

Resposta natural

$\lim_{t \rightarrow \infty} = 0$ (sistema estável: $p_i > 0$)



$$Y(s) = R(s)G(s) = \frac{c_1}{s + j\omega_0} + \frac{c_2}{s - j\omega_0} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{s + p_i}$$

$$Y(s) = \frac{A_{in}\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} G(s) = \frac{c_1(s - j\omega_0) + c_2(s + j\omega_0) + (s - j\omega_0)(s + j\omega_0) \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{s + p_i}}{(s - j\omega_0)(s + j\omega_0)}$$

$$c_1 = \left. \frac{A_{in}\omega_0}{s - j\omega_0} G(s) \right|_{s=-j\omega_0} = \frac{A_{in}}{2} jG(-j\omega_0)$$

$$c_2 = \left. \frac{A_{in}\omega_0}{s + j\omega_0} G(s) \right|_{s=j\omega_0} = -\frac{A_{in}}{2} jG(j\omega_0)$$

$$y(t) = \frac{A_{in}}{2} jG(-j\omega_0)e^{-j\omega_0 t} - \frac{A_{in}}{2} jG(j\omega_0)e^{j\omega_0 t} + \dots$$

Resposta forçada $y_p(t)$

Uma parte que vai para 0 em regime estacionário ...



Resposta natural $y_h(t)$

$$y_p(t) = \frac{A_{in}}{2} jG(-j\omega_0)e^{-j\omega_0 t} - \frac{A_{in}}{2} jG(j\omega_0)e^{j\omega_0 t}$$

$G(j\omega_0)$ é um número complexo, e pode ser, portanto, escrito como:

$$G(-j\omega_0) = |G(j\omega_0)|e^{-j\phi}$$

$$G(j\omega_0) = |G(j\omega_0)|e^{j\phi}$$

$\sin(j\omega_0 t + \phi)$

$$y_p(t) = A_{in}|G(j\omega_0)| \frac{e^{(j\omega_0 t + \phi)} - e^{-(j\omega_0 t + \phi)}}{2j}$$

$$y(t) = \frac{A_{in}}{2} jG(-j\omega_0)e^{-j\omega_0 t} - \frac{A_{in}}{2} jG(j\omega_0)e^{j\omega_0 t} + \dots$$

Resposta forçada $y_p(t)$

Uma parte que vai para 0 em regime estacionário ...



Resposta natural $y_h(t)$

$$y_p(t) = \frac{A_{in}}{2} jG(-j\omega_0)e^{-j\omega_0 t} - \frac{A_{in}}{2} jG(j\omega_0)e^{j\omega_0 t}$$

$G(j\omega_0)$ é um número complexo, e pode ser, portanto, escrito como:

$$G(-j\omega_0) = |G(j\omega_0)|e^{-j\phi}$$

$$G(j\omega_0) = |G(j\omega_0)|e^{j\phi}$$

Relação de amplitude

$$M_p(j\omega_0) = \frac{A_{out}}{A_{in}}$$

Ângulo de fase

$$y_p(t) = A_{in} |G(j\omega_0)| \sin(\omega_0 t + \phi)$$

$$X(\omega) = A(\omega) + jB(\omega)$$

$$A(\omega) = \text{Re}[X(\omega)]$$

$$B(\omega) = \text{Im}[X(\omega)]$$

$$X(\omega) = A(\omega) + jB(\omega) = |X(\omega)| \angle \phi = X(\omega) e^{j\phi}$$

$$|X(\omega)| = \sqrt{[A(\omega)]^2 + [B(\omega)]^2}$$

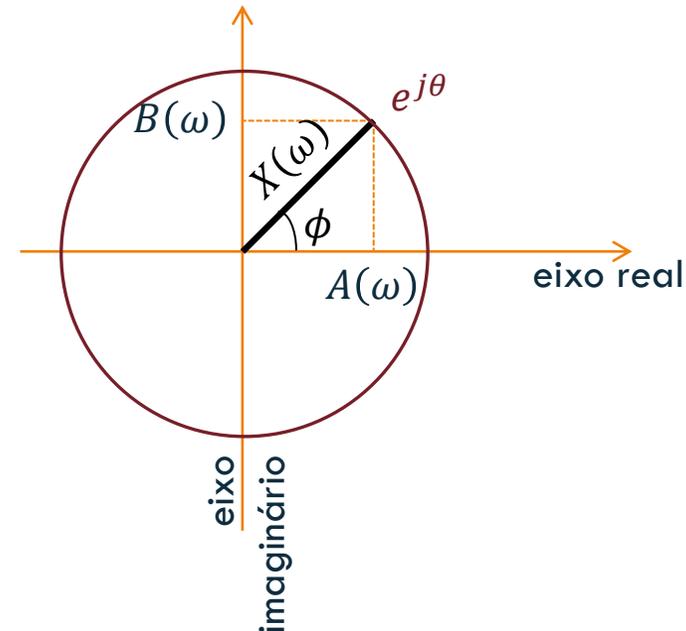
em graus

em radianos

$$\phi = \text{atan} \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$$

Função ímpar

Função par



Produto e Divisão

$$\frac{A \angle \theta}{C \angle \phi} = \frac{A}{C} \angle (\theta - \phi)$$

$$A \angle \theta \cdot C \angle \phi = A \cdot C \angle (\theta + \phi)$$

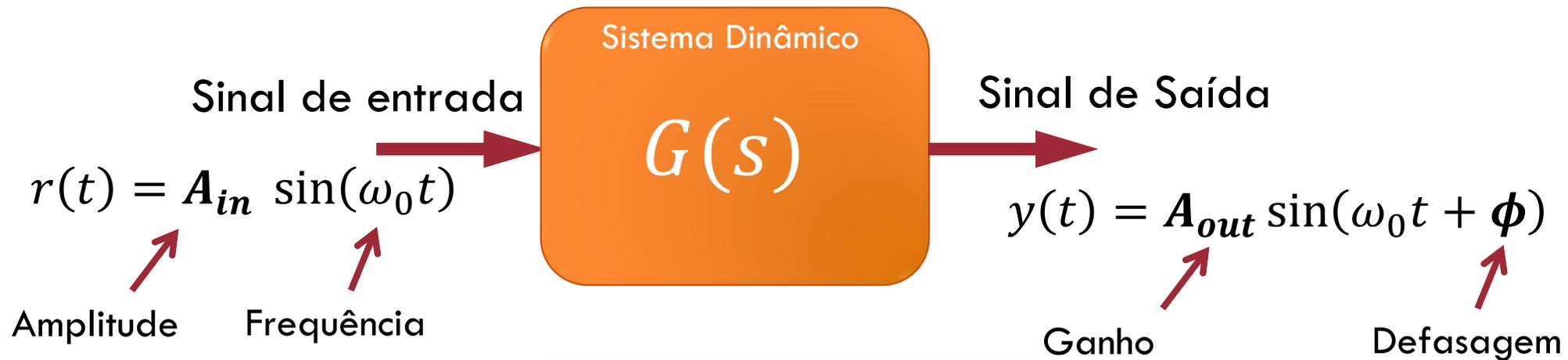
Potenciação e radiciação:

$$(A \angle \theta)^a = A^a \angle (\theta \cdot a)$$

$$\sqrt[a]{A \angle \theta} = \sqrt[a]{A} \angle (\theta \div a)$$

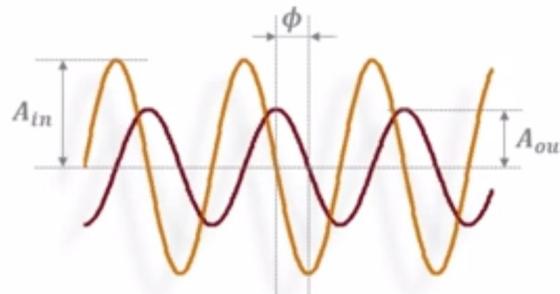
ONDA SENOIDAL

Para Sistema **LIT**, se a entrada é uma onda senoidal a uma frequência particular, então a saída será também uma onda sinusoidal na mesma frequência, mas com diferente fase $\phi = \arg G(j\omega_0)$ e amplitude $A_{out} = A_{in}|G(j\omega_0)|$.



Função Resposta em Frequência

$$G(j\omega) = G(s) \Big|_{s=j\omega}$$



RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM

Função de transferência,

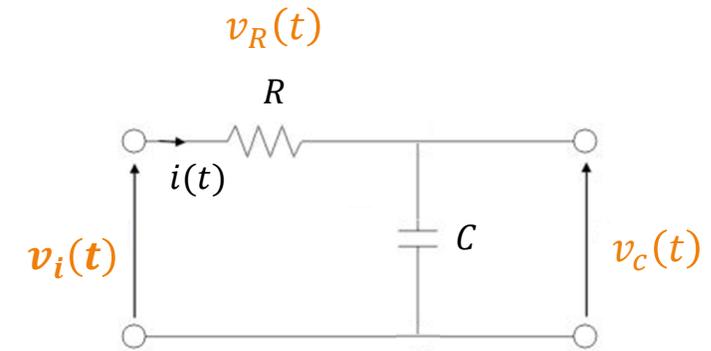
$$G(j\omega) = \frac{V_c(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

$$v_i(t) = RC \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t)$$

↓ Laplace

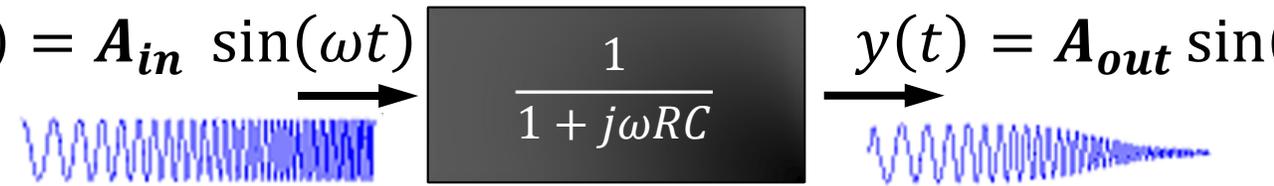
$$V_i(s) = RCsV_c(s) + V_c(s)$$

$$\longrightarrow V_i(s) = (RCs + 1)V_c(s)$$



$$v_i(t) = v_R(t) + v_c(t)$$

RESPOSTA VS ESTÍMULO SENOIDAL

$$r(t) = A_{in} \sin(\omega t) \xrightarrow{\frac{1}{1 + j\omega RC}} y(t) = A_{out} \sin(\omega t + \phi)$$


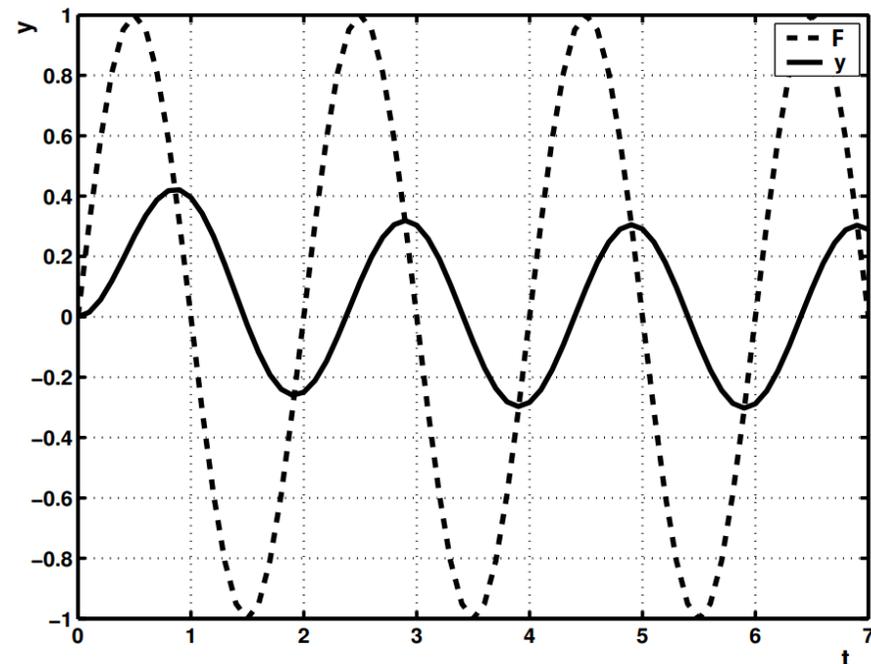
a resposta é também uma onda senoidal com frequência ω igual à onda senoidal do sinal de entrada

Razão de amplitude, $M_P(\omega)$

$$M_P(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

Ângulo de fase,

$$\phi(\omega) = -\tan^{-1} \omega\tau$$

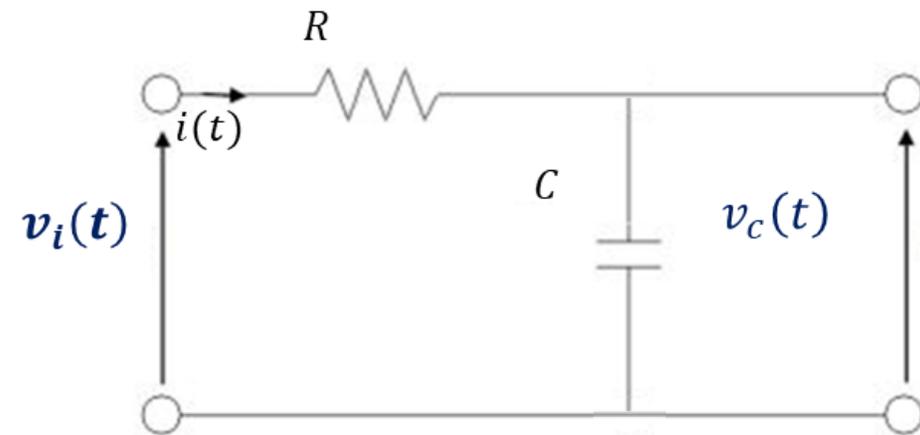


EXEMPLOS

Analisar a relação entre entrada e saída do SLIT de primeira ordem definido anteriormente para as seguintes funções:

- $v_i(t) = 3 \sin 30t$
- $v_i(t) = 3 \sin(30t + 40^\circ)$
- $v_i(t) = 3 \sin(10t + 40^\circ)$
- $v_i(t) = 3 \cos(10t)$
- $v_i(t) = \sin(70t)$
- $v_i(t) = \sin(90t)$

Considere $R = 100\Omega$ e $C = 1mF$



$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + 0.1j\omega}$$



$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + 0.1j\omega}$$

$$r(t) = A_{in} \sin(\omega t)$$



$$v_i(t) = 3 \sin 30t$$

$$y(t) = A_{out} \sin(\omega t + \phi)$$



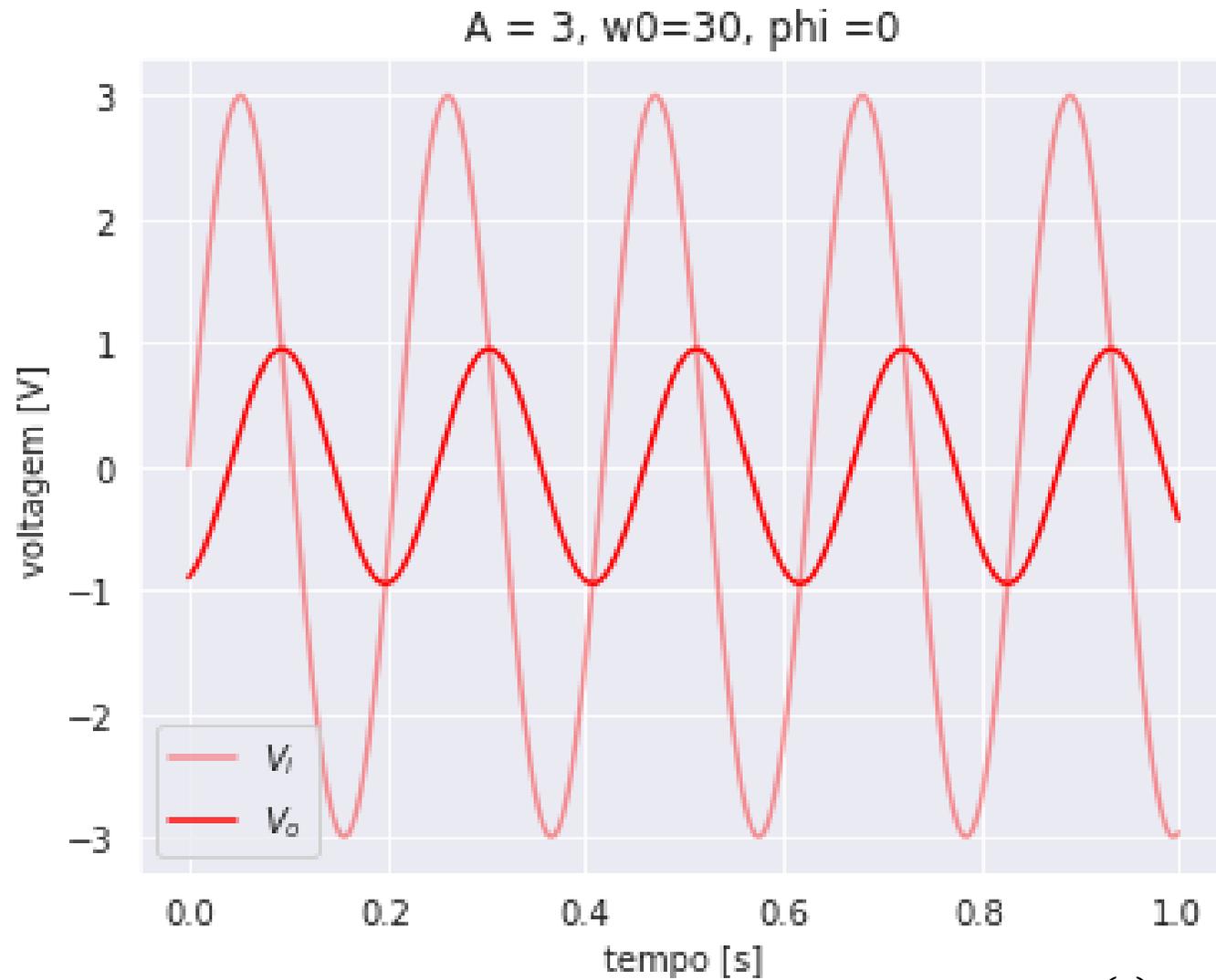
$$v_c = 0.95 \sin(30t - 71.6^\circ)$$

Razão de amplitude, $M_p(\omega)$

$$A_{out}(\omega) = \frac{A_{in}}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} = \frac{3}{\sqrt{1 + (30 \times 0.1)^2}} = 0.948$$

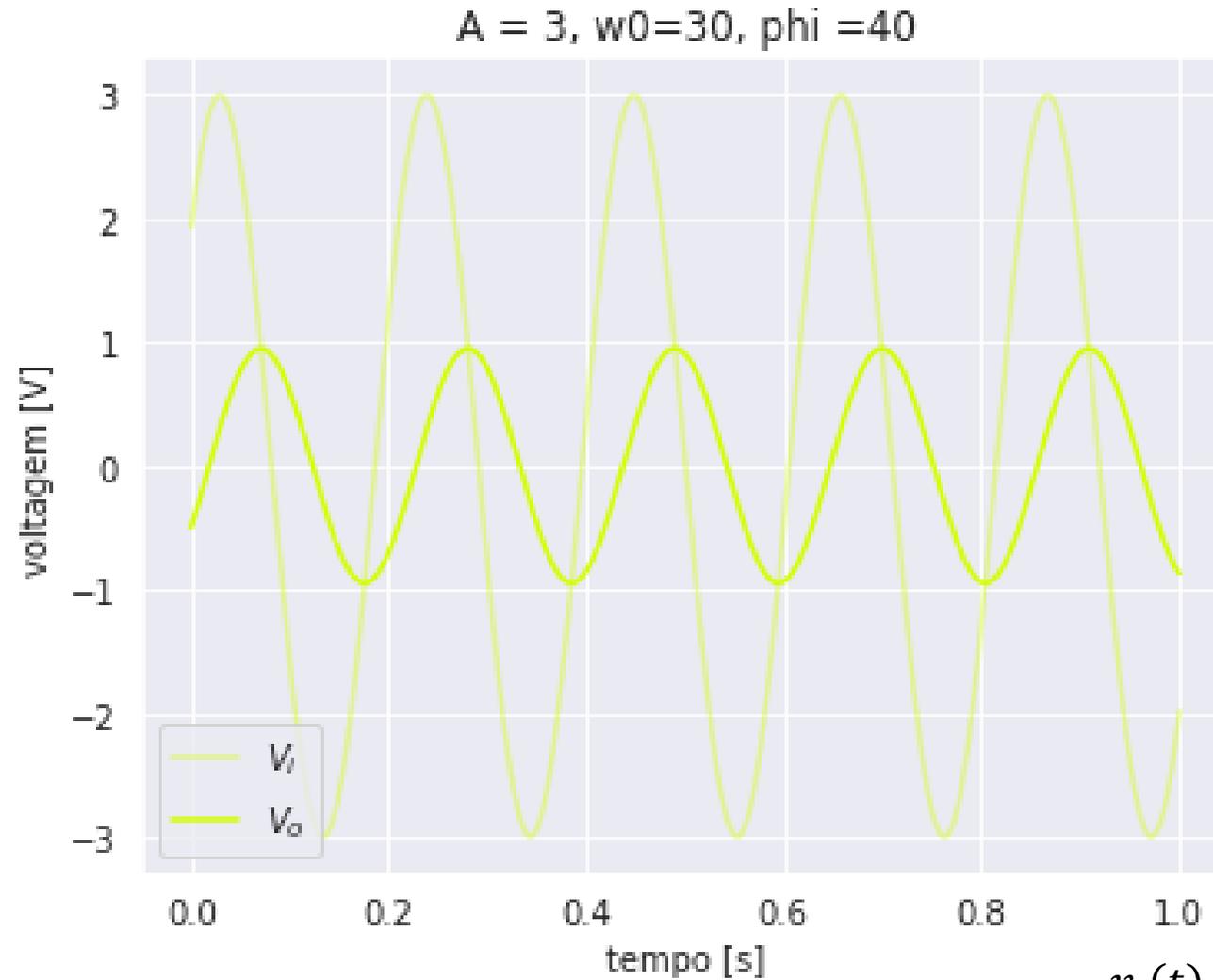
Ângulo de fase,

$$\phi(\omega) = -\tan^{-1} \omega\tau = -\tan^{-1}(30 \times 0.1) \times \frac{180}{\pi} = -71.565^\circ$$



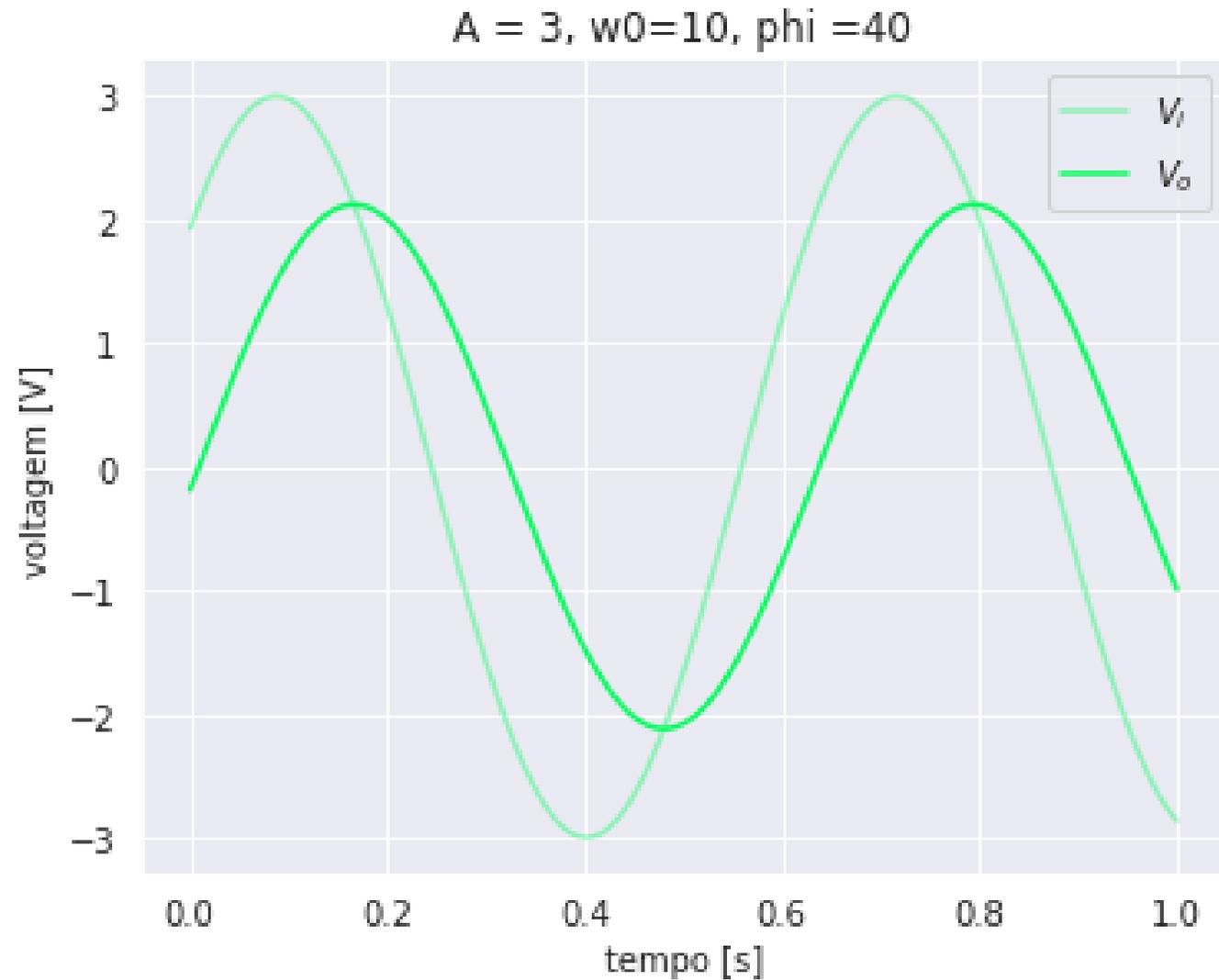
$$v_i(t) = 3 \sin 30t$$

$$v_c = 0.95 \sin(30t - 71,6^\circ)$$



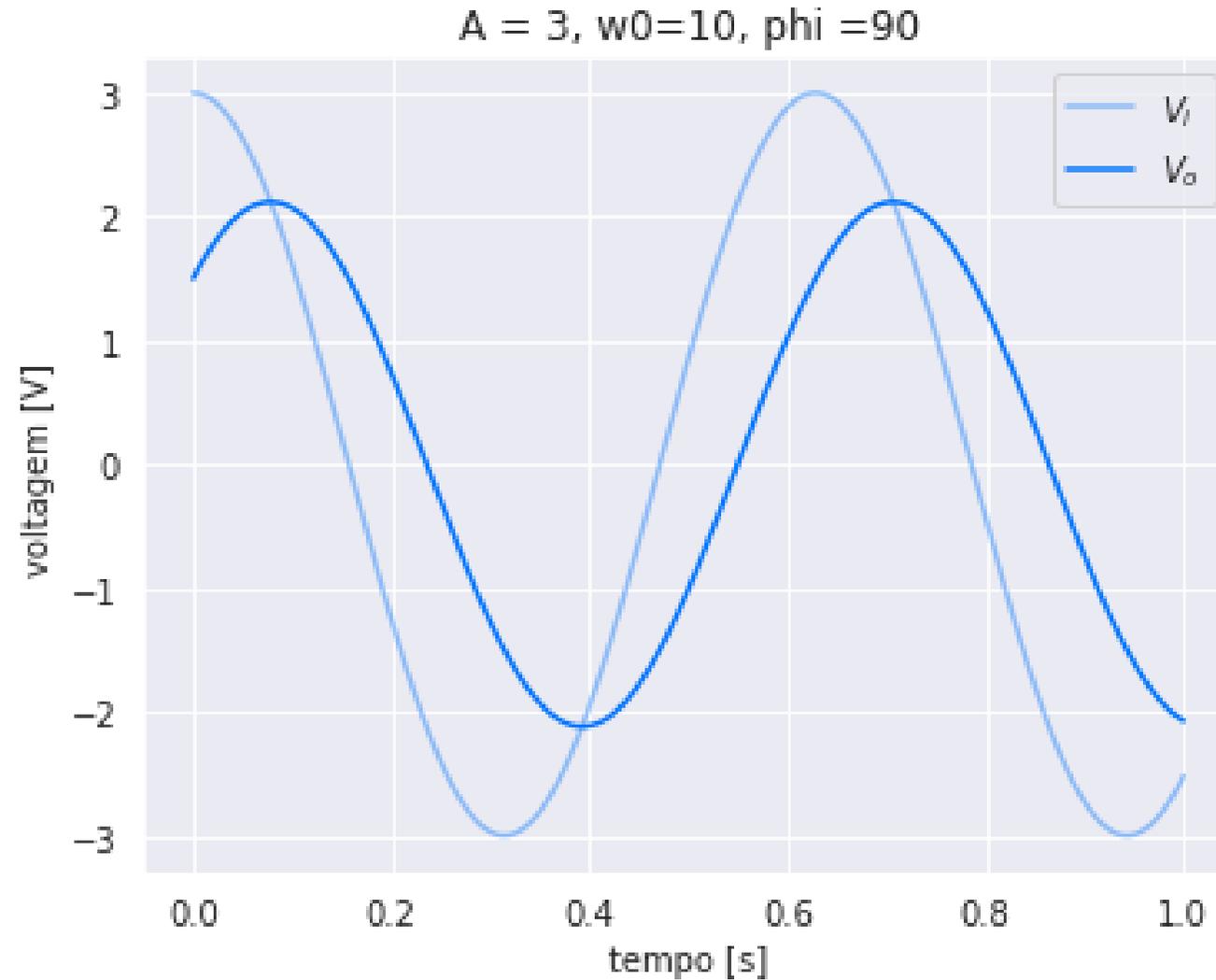
$$v_i(t) = 3 \sin(30t + 40^\circ)$$

$$v_c = 0.95 \sin(30t - 31,6^\circ)$$



$$v_i(t) = 3 \sin(10t + 40^\circ)$$

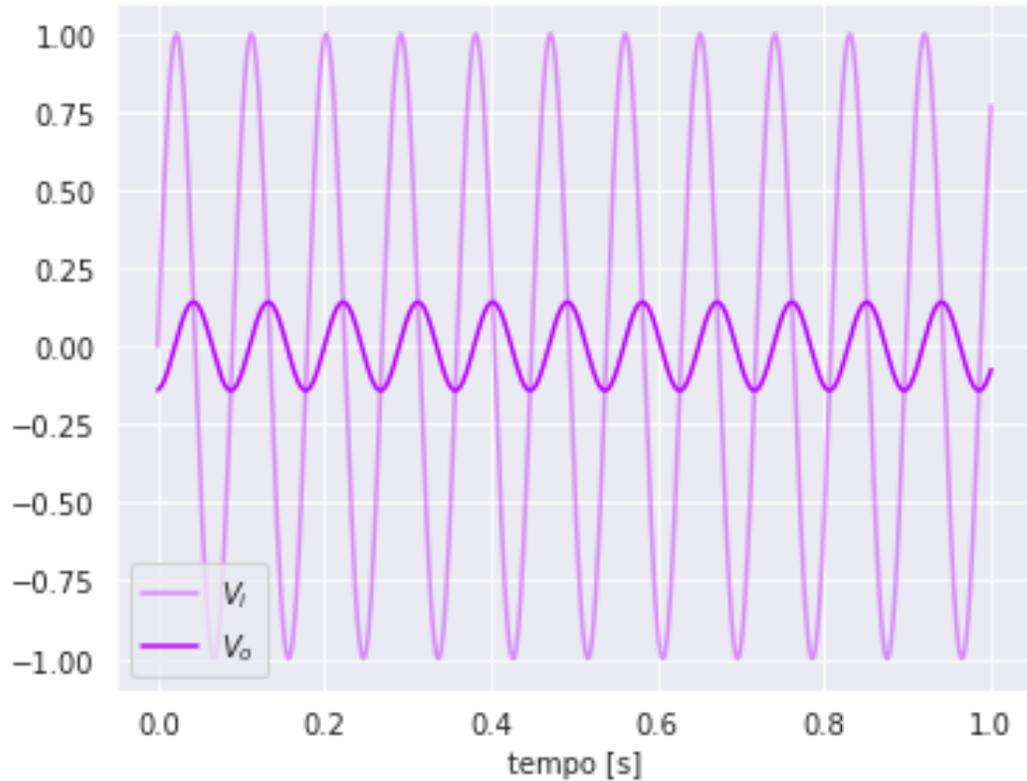
$$v_c = 2.12 \sin(10t - 5^\circ)$$



$$v_i(t) = 3 \cos(10t)$$

$$v_c = 2.12 \sin(10t - 45^\circ)$$

$A = 1, \omega_0 = 70, \phi = 0$

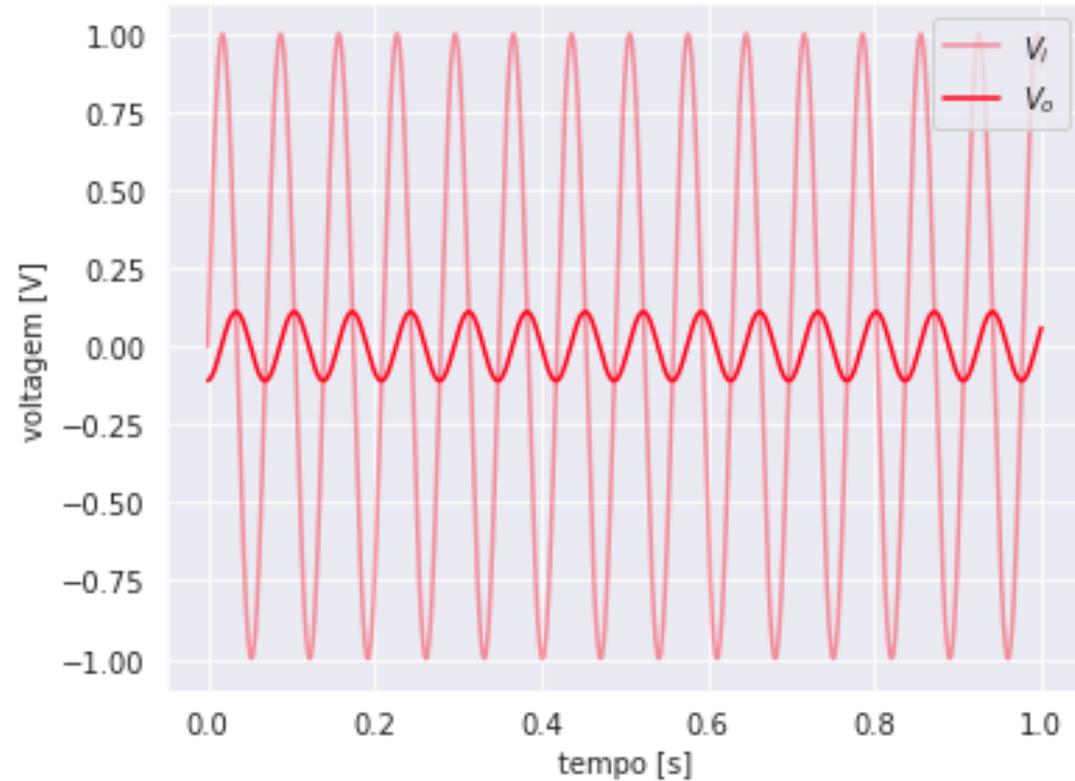


$$v_i(t) = \sin(70t)$$

$$v_c = 0.1414 \sin(70t - 81,9^\circ)$$

Ano 2023

$A = 1, \omega_0 = 90, \phi = 0$

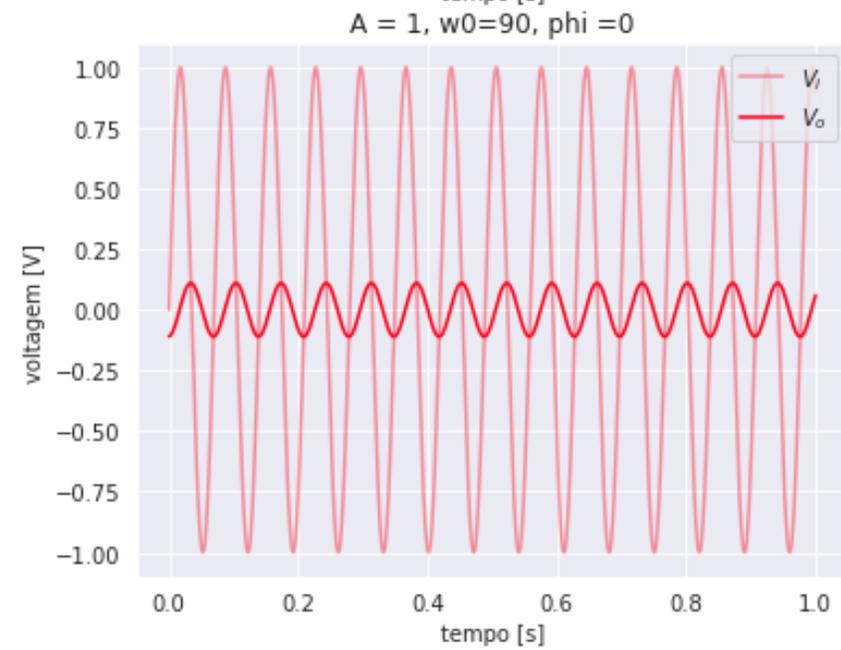
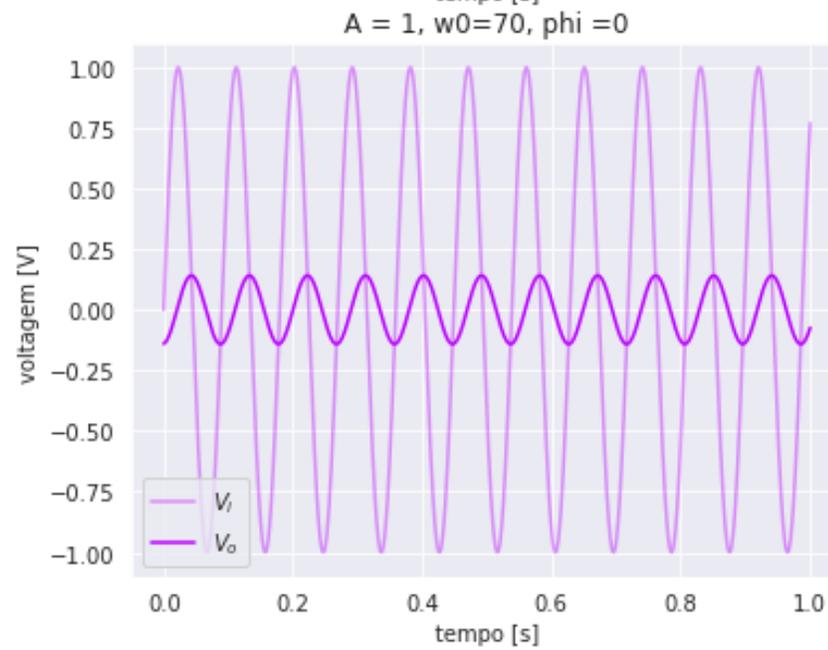
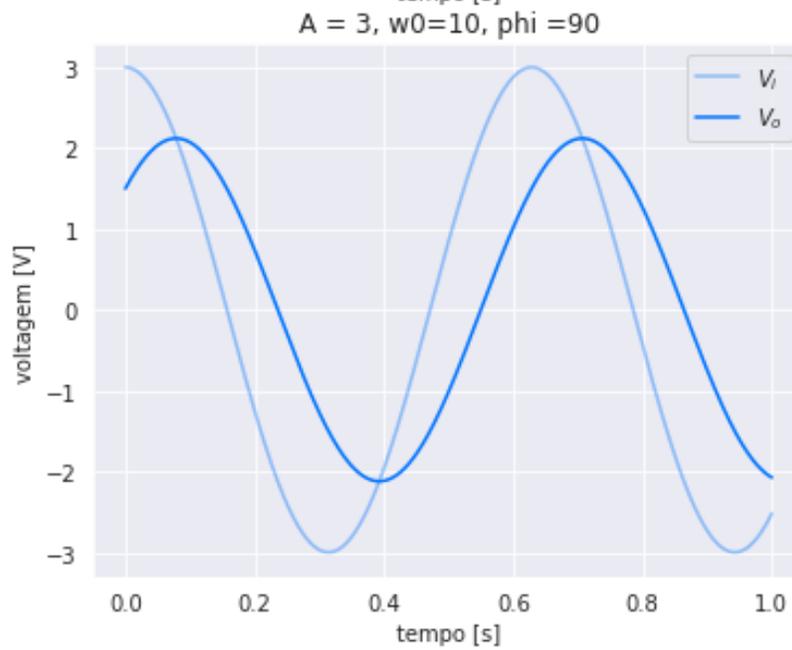
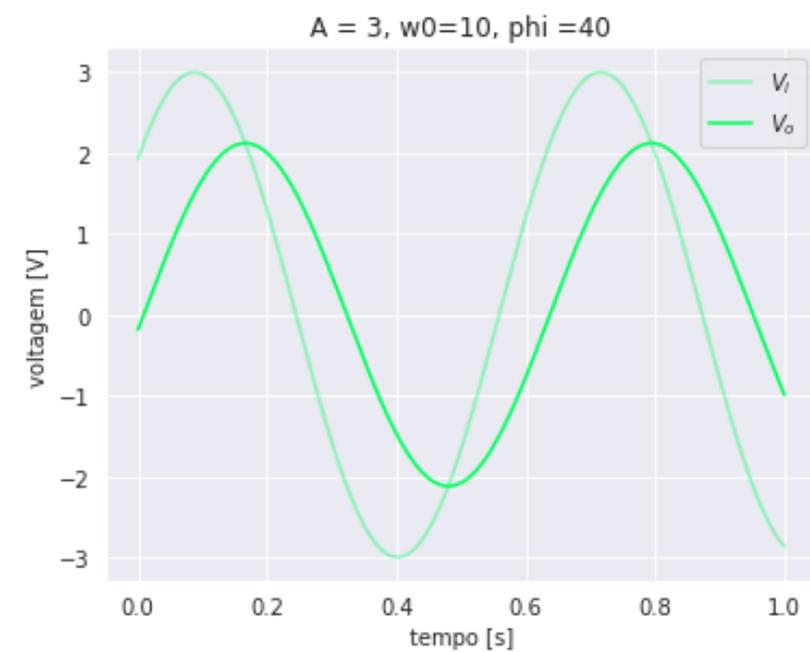
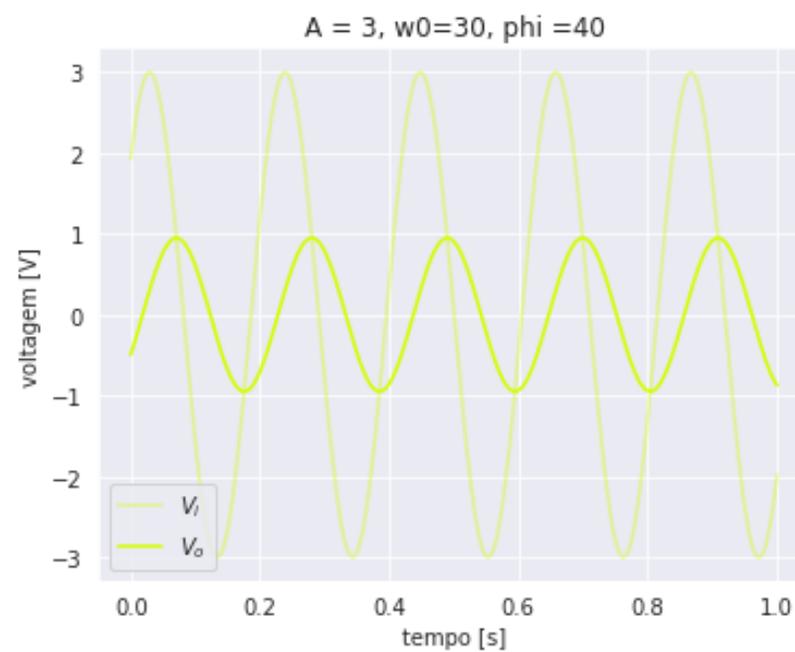
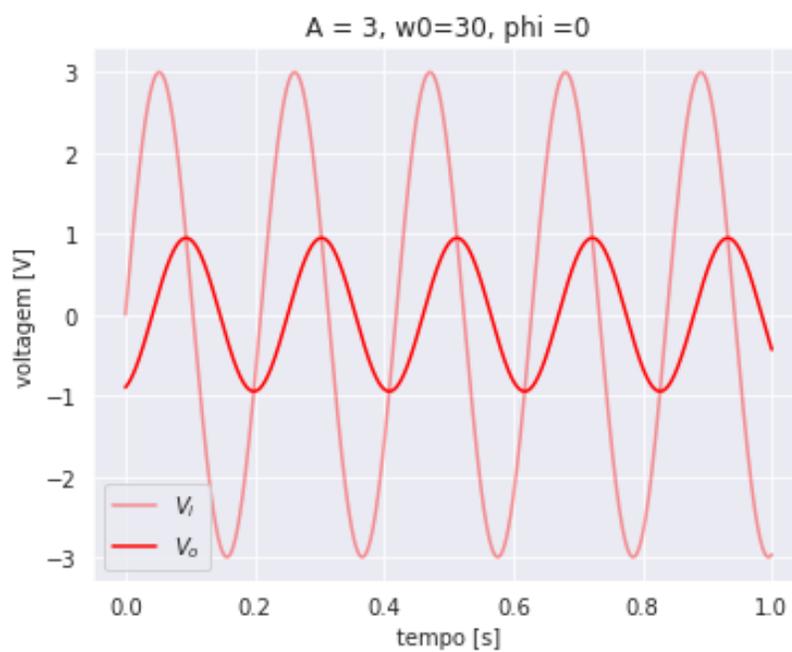


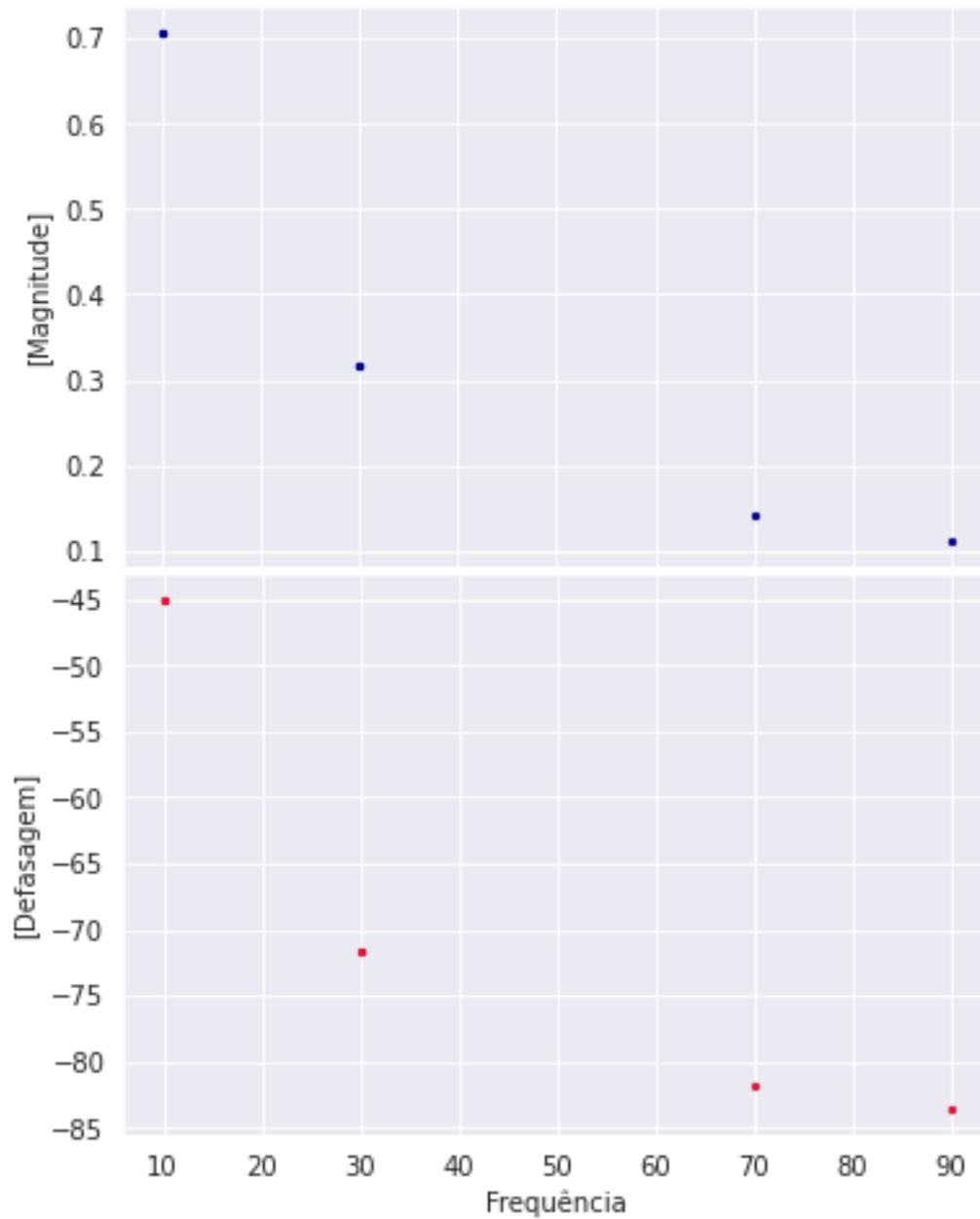
$$v_i(t) = \sin(90t)$$

$$v_c = 0.1104 \sin(90t - 83,6^\circ)$$

Sistemas Dinâmicos I para Mecatrônica

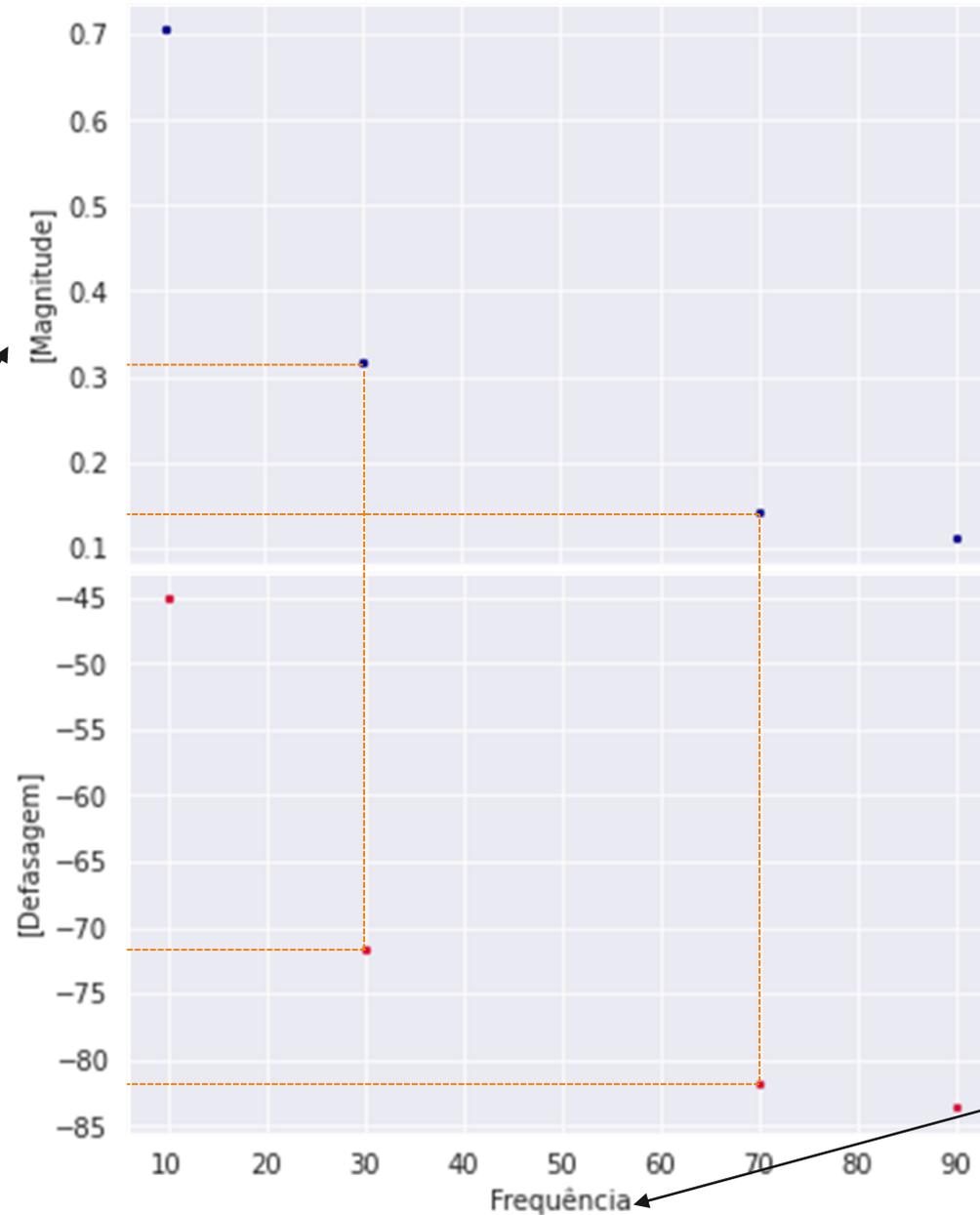
26



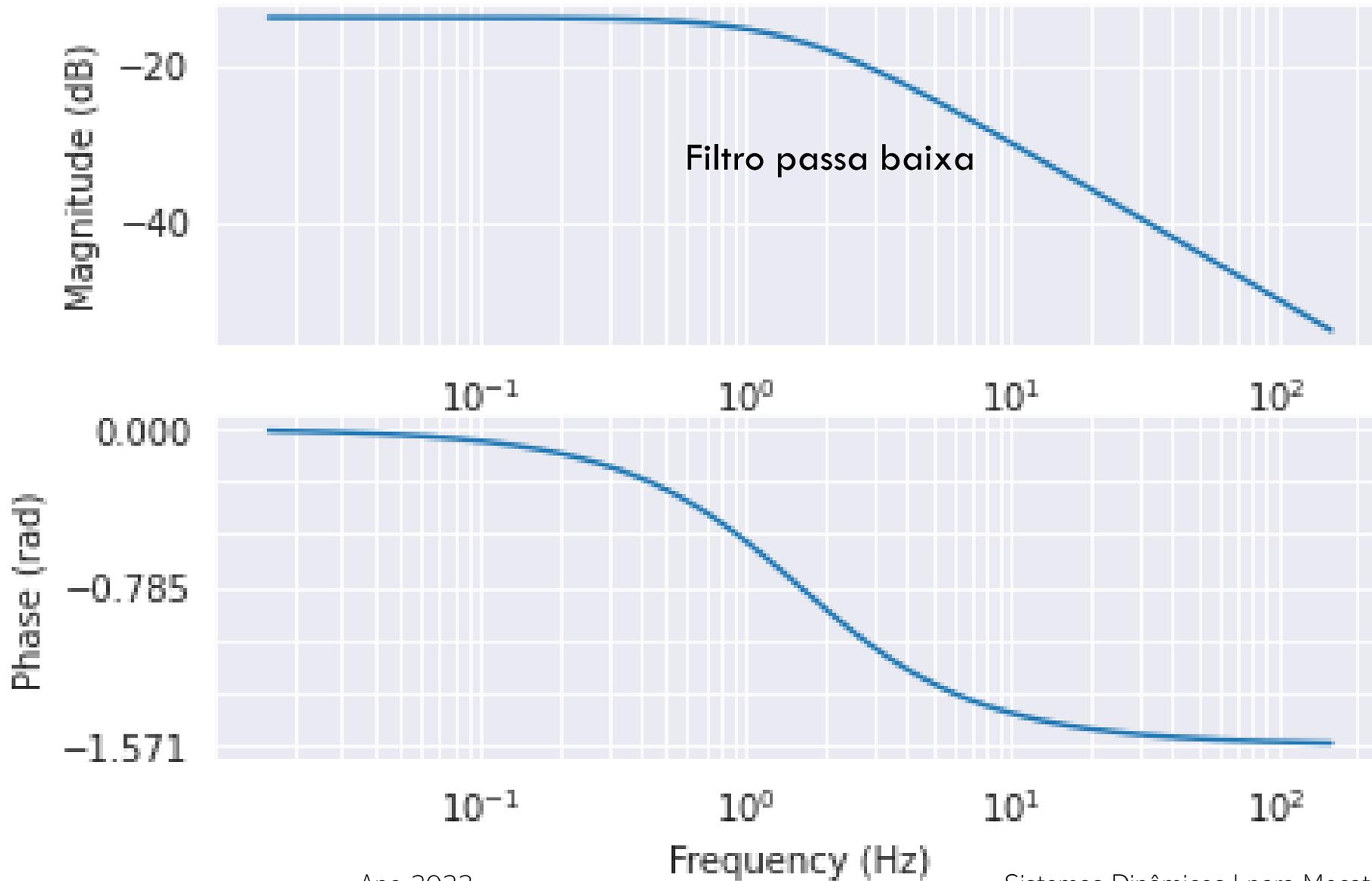


BODE

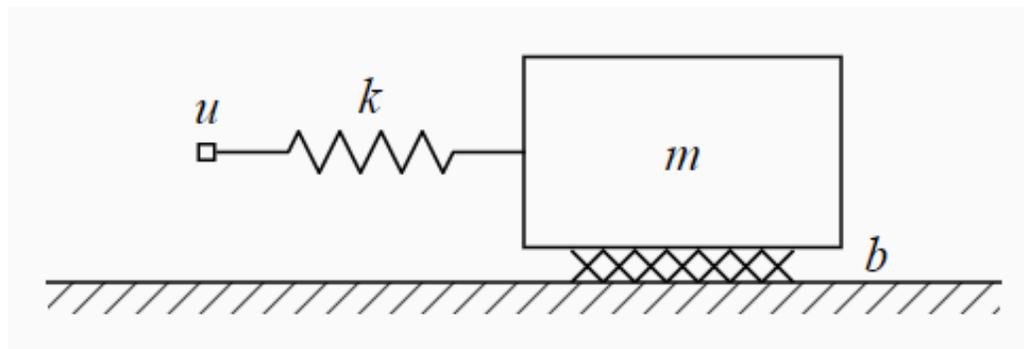
Em dB, mas
aprenderem
os mais
tarde



Em escala logaritmica, mas
aprenderemos mais tarde



E UM SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM?



$$m = 1 \text{ kg}$$

$$b = 0.5 \text{ Ns/m}$$

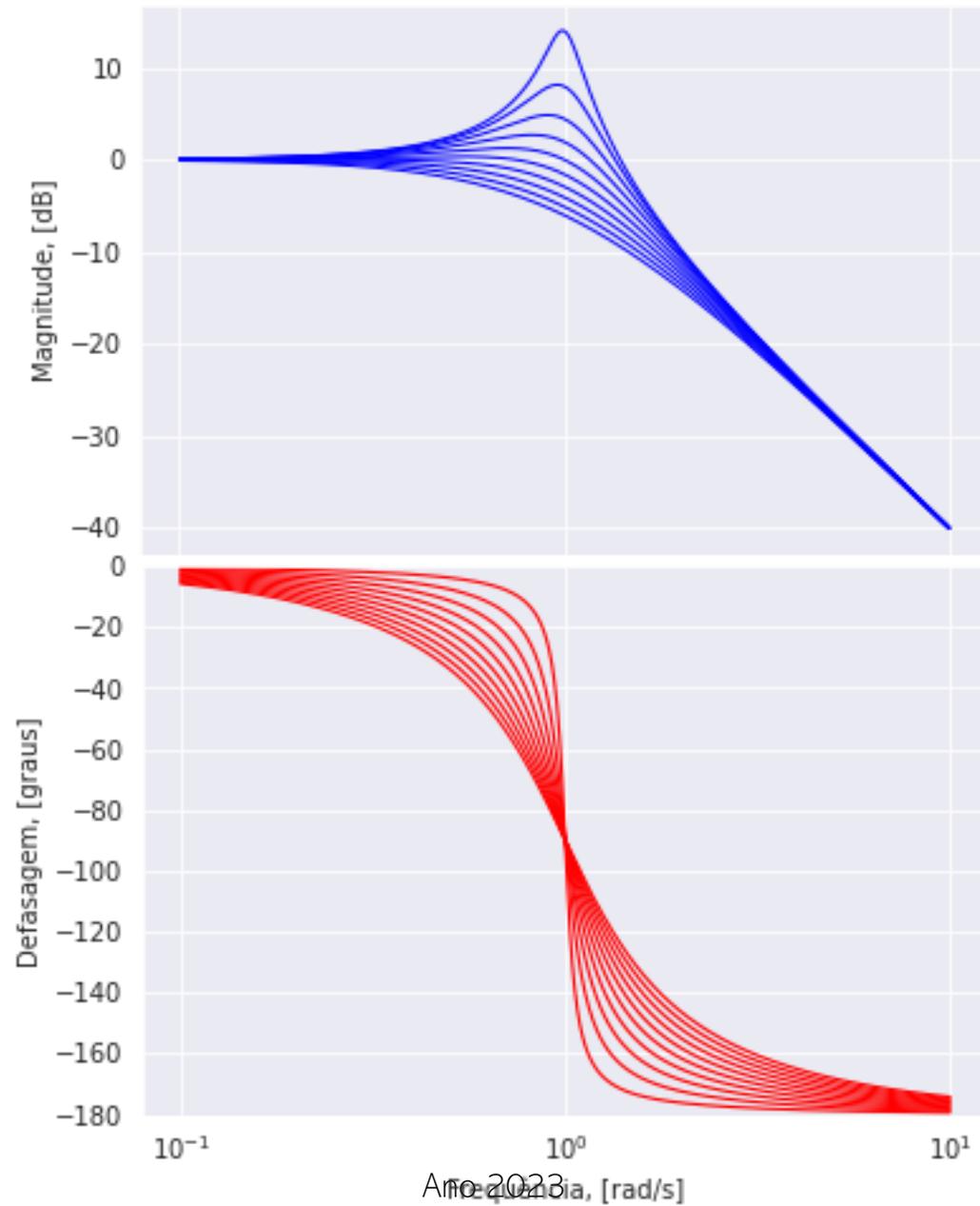
$$k = 1.6 \text{ N/m}$$

$$\frac{k}{m} = \omega_n^2 = \frac{1.6}{1} = 1.6$$

$$\frac{b}{m} = 2\zeta\omega_n = \frac{0.5}{1} = 0.5$$

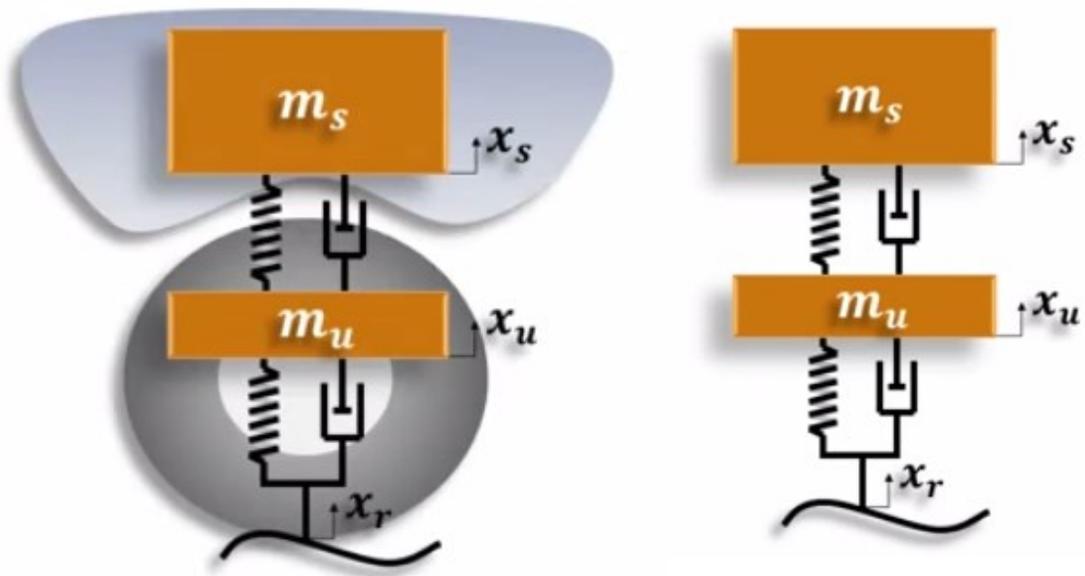
$$\frac{1}{k} = K = \frac{1}{1.6} = 0.625$$

$$\frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{s^2 + s + 1.6}$$



`mag, phase, omega = control.bode(G1)`

COMPORTAMENTO TÍPICO DA SUSPENSÃO DE CARRO



frequência de
ressonância da
suspensão

frequência de
ressonância do
pneu

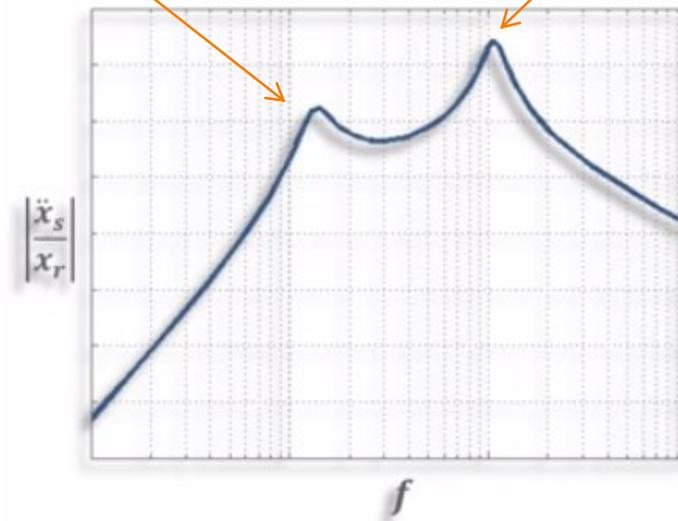




DIAGRAMA DE BODE

O que o diagrama representa????

BODE PLOTS

Os diagramas de **Bode** (de módulo e fase) são uma forma de caracterizar sinais no domínio da frequência.

Diagrama de Bode de **Módulo**

$|G(j\omega)|$ em dB $\times \omega$ (com escala logaritmica)

Diagrama de Bode de **Fase**

$\angle G(j\omega)$ em graus $\times \omega$ (com escala logaritmica)

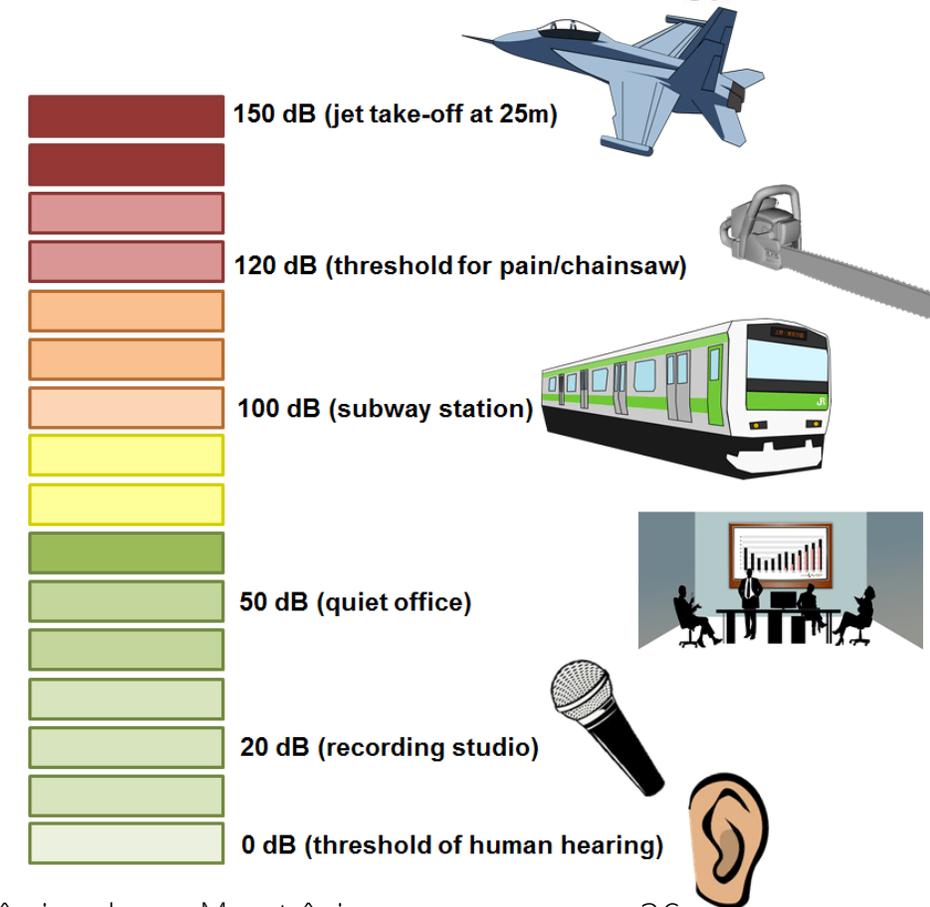


Eng. Americano Hendrik Wade Bode
(1905-1982)

MAS, AFINAL, O QUE É DECIBEL?

Unidade usada em engenharia para expressar a razão entre dois valores com as mesmas dimensões: indica a proporção de uma quantidade física em relação a um nível de referência especificado ou implícito.

Como as quantidades na proporção sempre têm as mesmas dimensões, as dimensões se cancelam; o decibel em si não tem dimensão.



MAS, AFINAL, O QUE É DECIBEL?

A história do decibel é encontrada nas comunicações - particularmente, os cabos que transportavam chamadas telefônicas. Os engenheiros perceberam que as primeiras ligações perdiam a força do sinal com a distância: os sinais ficavam mais fracos quanto mais longe eles tinham que viajar. Para consertar a situação, os engenheiros primeiro precisavam de um método para quantificar essa perda.

Miles of Standard Cable (MSC)

1 MSC correspondia à perda de potência ao longo de 1 milha de cabo *telefônico padrão* ($\approx 1,6\text{km}$), a uma frequência de 5000 rad/s . Essa era a menor atenuação média detectável para o ouvido humano.





PADRONIZAÇÃO

Transmission Unit (TU)

Em 1924, o *Bell Telephone Lab* recebeu uma resposta favorável à uma nova definição de unidade entre membros do *Comitê Consultivo Internacional de Telefonia de Longa Distância na Europa* e substituíram o MSC pela Unidade de Transmissão (TU).

This new unit is defined by the statement that two amounts of power differ by *one transmission unit* when they are in the ratio of $10^{1/10}$ (aprox. 1.25893), and **any two amounts of power differ by N transmission units when they are in the ratio of $10^{N/10}$** . In accordance with this, the number of transmission units corresponding to the ratio of any two powers is ten times the common logarithm of that ratio. [*Originally reported in the Bell System Tech. Journal, January, 1929*]

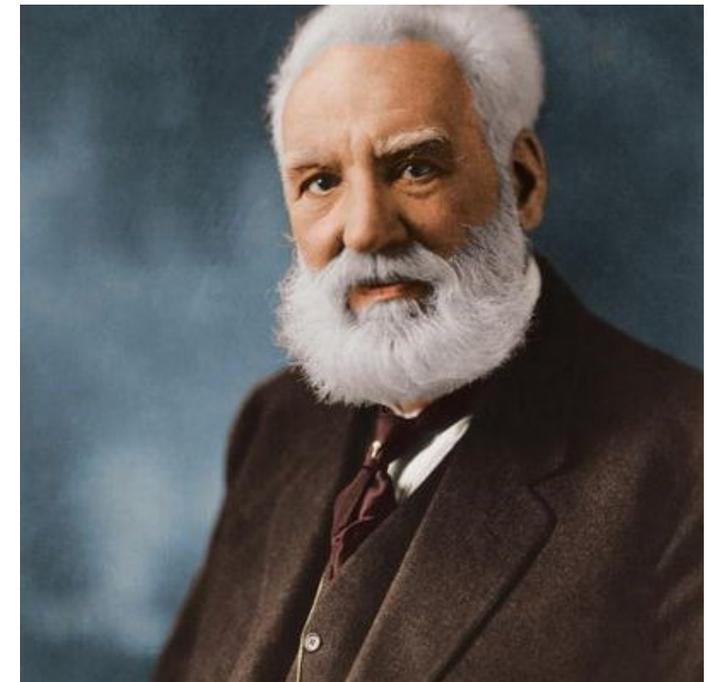
HOMENAGEM...

Decibel (dB)

Em 1928, em homenagem ao pioneiro de telecomunicações Alexander Graham Bell, o *Bell Telephone Lab* renomeou a TU para Bel e, finalmente, por questões de unidade, deciBel. Em termos de potência P , ou voltagem V , respectivamente,

$$\text{Ganho (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_0}{P_i} \right)$$

$$\text{Ganho (dB)} = 20 \log \left(\frac{V_0}{V_i} \right)$$



DECIBEL SEMPRE DESCREVE UMA PROPORÇÃO

$$20 \log_{10} 1 = 0 \text{ dB}$$

$$20 \log_{10} \sqrt{2} = 10 \log_{10} 2 \cong 3 \text{ dB}$$

$$20 \log_{10} 2 \cong 6 \text{ dB}$$

6 dB para cada fator de 2 (**oitava**)

$$20 \log_{10} 4 \cong 12 \text{ dB}$$

$$20 \log_{10} \frac{1}{\sqrt{2}} \cong -3 \text{ dB} \text{ (half power = } 10 \log_{10} \frac{1}{2} \text{)}$$

Um número maior que uma unidade apresenta um valor positivo em dB, enquanto um número menor que a unidade apresenta valor negativo.

$$20 \log_{10} 10 = 20 \text{ dB}$$

20 dB para cada fator de 10 (**década**)

$$20 \log_{10} 100 = 40 \text{ dB}$$

DIAGRAMA DE BODE

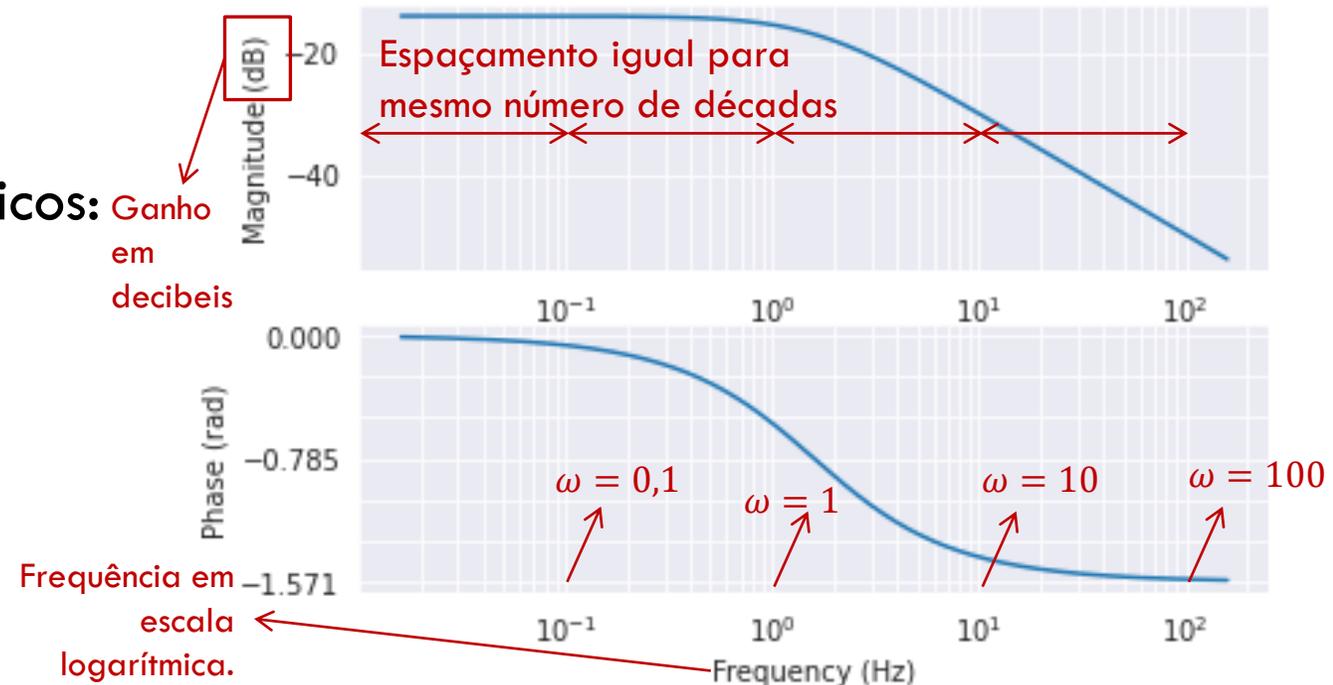
Um gráfico de ω em escala logarítmica é usada para frequência para garantir que cada década (0,1-1, 1-10,10-100, etc.) receba o mesmo espaço no gráfico.

O diagrama de Bode compreende 2 gráficos:

$$\log_{10}\omega \text{ versus } 20 \log_{10}|G(j\omega)|$$

$$\log_{10}\omega \text{ versus } \arg G(j\omega)$$

Os PLOTS de ganho e fase são alinhados um em cima do outro.





FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Para gerar o diagrama de Bode temos que verificar a resposta do sistema à onda senoidal, e como fazemos isso???

Através da análise da função de transferência!

Portanto, a pergunta é,

Quais as características importantes da função de transferência, responsáveis pela mudança de amplitude e de fase da onda senoidal de entrada?



LEMBRE-SE: POLOS E ZEROS DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

$$G(s) = \frac{q(s)}{p(s)}$$

Equação Característica:

O polinômio $p(s)$ é chamado de *polinômio característico* de $G(s)$, ou o *polinômio característico* do sistema. A equação

$$p(s) = 0$$

é chamada de a “*equação característica*” do sistema.

Pólos da função de transferência:

As raízes do *polinômio característico* são chamadas de *pólos* do sistema. Ou seja, os pólos são as soluções da *equação característica*.

Zeros da função de transferência:

As raízes do numerador de $G(s)$ são chamadas de *zeros* do sistema. Ou seja, os zeros são as soluções da equação $q(s) = 0$.

FATORES BÁSICOS PARA CONSTRUÇÃO DE UM DIAGRAMA DE BODE

em S

O ganho de Bode, K

Os fatores integrativos (polos na origem) $\left(\frac{1}{s}\right)^n$

Os fatores derivativos (zeros na origem) s^n

Fatores de primeira ordem tipo *polos reais* $\left(\frac{1}{\tau s + 1}\right)^n$

Fatores de primeira ordem tipo *zeros reais* $(\tau s + 1)^n$

Fatores de segunda ordem ou quadráticos tipo *polos complexos* $\left(\frac{1}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + \frac{s^2}{\omega_n^2}}\right)^n$

Fatores de segunda ordem ou quadráticos tipo *zeros complexos* $\left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + \frac{s^2}{\omega_n^2}\right)^n$

EXEMPLO

Escreva a função de transferência abaixo inteiramente em termos de fatores básicos,

$$G(s) = \frac{2(s + 30)}{s(s + 2)(s^2 + 2s + 2)}$$

FATORES BÁSICOS PARA CONSTRUÇÃO DE UM DIAGRAMA DE BODE

em $j\omega$

O ganho de Bode, K

Os fatores integrativos (polos na origem) $\left(\frac{1}{j\omega}\right)^n$

Os fatores derivativos (zeros na origem) $(j\omega)^n$

Fatores de primeira ordem tipo *polos reais* $\left(\frac{1}{j\omega\tau+1}\right)^n$

Fatores de primeira ordem tipo *zeros reais* $(\tau s + 1)^n$

Fatores de segunda ordem ou quadráticos tipo *polos complexos* $\left(\frac{1}{1+2\zeta\frac{j\omega}{\omega_n}+\frac{(j\omega)^2}{\omega_n^2}}\right)^n$

Fatores de segunda ordem ou quadráticos tipo *zeros complexos* $\left(1 + 2\zeta\frac{j\omega}{\omega_n} + \frac{(j\omega)^2}{\omega_n^2}\right)^n$

FATORES BÁSICOS

$$G(s) = \frac{K(\tau_2 s + 1) \left(1 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n_2}} s + \frac{s^2}{\omega_{n_2}^2} \right)}{s(\tau_1 s + 1) \left(1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n_1}} s + \frac{s^2}{\omega_{n_1}^2} \right)}$$



Função de transferência

$$G(j\omega) = \frac{K(\tau_2 j\omega + 1) \left(1 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n_2}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_2}^2} \right)}{(j\omega)(\tau_1 j\omega + 1) \left(1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n_1}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_1}^2} \right)}$$



Função resposta em frequência

AMPLITUDE E FASE

$$|G(j\omega)| = \frac{|K| |\tau_2 j\omega + 1| \left| 1 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n_2}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_2}^2} \right|}{|j\omega| |\tau_1 j\omega + 1| \left| 1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n_1}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_1}^2} \right|}$$

$$|G(j\omega)|_{dB} = 20 \log |G(j\omega)|$$

$$|G(j\omega)|_{dB} = |K|_{dB} + |\tau_2 j\omega + 1|_{dB} + \left| 1 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n_2}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_2}^2} \right|_{dB} - |j\omega|_{dB} - |\tau_1 j\omega + 1|_{dB} - \left| 1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n_1}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_1}^2} \right|_{dB}$$

$$\angle G(j\omega) = \angle K + \angle(\tau_2 j\omega + 1) + \angle \left(1 + \frac{2\zeta_2}{\omega_{n_2}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_2}^2} \right) - \angle j\omega - \angle(\tau_1 j\omega + 1) - \angle \left(1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n_1}} j\omega + \frac{(j\omega)^2}{\omega_{n_1}^2} \right)$$



IDEIA...

Uma vez familiarizados com os fatores básicos apresentados, é possível utilizá-los na construção dos diagramas de Bode das demais funções de transferência.

Portanto, nas próximas aulas vamos mostrar os diagramas de Bode (**módulo e fase**) para cada um dos fatores básicos vistos.



Vantagens em trabalhar com resposta em frequência usando diagramas de Bode

1. O projeto de compensadores dinâmicos pode ser completamente baseado em diagramas de Bode.
2. Diagramas de Bode podem ser determinados experimentalmente.
3. Diagramas de Bode de sistemas em série são simplesmente somados, o que é bastante conveniente.
4. O uso da escala log permite que uma faixa de frequência muito mais larga seja apresentada em um único diagrama, o que não seria possível usando a escala linear.

É importante que o engenheiro de controle de sistemas entenda as técnicas de traçado do diagrama de Bode por muitos motivos: este conhecimento permite ao engenheiro não apenas lidar com problemas simples, mas também executar uma verificação nos resultados computacionais para os casos mais complicados. Muitas vezes, aproximações podem ser usadas para esboçar rapidamente a resposta em frequência e deduzir a estabilidade, bem como para determinar a forma das compensações dinâmicas necessárias. Finalmente, uma compreensão do método de traçado é útil na interpretação de resposta em frequência de dados que foram gerados experimentalmente.

Sistemas de Controle para Engenharia - 6ed
G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini



A flor que desabrocha
na adversidade é a mais rara
e mais bela de todas.
Mulan.



FIM

Próxima aula: construção do
diagrama de Bode para
fatores característicos de
sistemas de primeira ordem