ELT221 - Circuitos Elétricos II

Prof. Tarcísio Pizziolo

Aula 6

6) Diagrama de Bode

Hendrik Wade Bode
(USA: 1905***** – 1982†)

Consiste em dois Gráficos com escalas ***semi-log***: 1- |**H(jw)** (em dB) *versus* **w**.
2 - ∟**H(jw)** (em Graus) *versus* **w**.

Decibel (A unidade Bel é em homenagem a *Alexander Graham Bell*)

O **dB** é uma unidade logarítmica muito usada em telecomunicações por pelo menos dois motivos:

1) O ouvido humano tem resposta logarítmica (sensação auditiva *versus* potência acústica).
2) Em telecomunicações são utilizados números extremamente grandes ou pequenos.

O uso de logaritmos torna estes números grandes ou pequenos fáceis de manipular e transforma produtos em somas e divisões em subtrações. O **dB** é um número relativo e permite representar relações entre duas grandezas de mesmo tipo, como relações de potências, tensões, correntes ou qualquer outra relação adimensional. Portanto, permite definir ganhos e atenuações, relação sinal/ruído, dinâmica, etc...

Assumindo como referência que o **menor** som que alguém pode ouvir é **1**, em escala exponencial com base 10 podemos chamar esse som de $\mathbf{10^0 = 1}$. Assumindo também como referência que o **maior** som que alguém pode ouvir é **1.000.000.000.000** em escala exponencial com base 10 podemos chamar esse som de $\mathbf{10^{12}}$**.**

Em termos de **potência de 10** teremos uma escala entre 0 e 12 (que correspondem ao número de zeros da potência desses sons). Logo:

$10^0 = 1$ (**o menor som audível - limiar de audibilidade**)
$10^1 = 10$
$10^2 = 100$
$10^3 = 1.000$
$10^4 = 10.000$
$10^5 = 100.000$
$10^6 = 1.000.000$
$10^7 = 10.000.000$
$10^8 = 100.000.000$
$10^9 = 1.000.000.000$
$10^{10} = 10.000.000.000$
$10^{11} = 100.000.000.000$
$10^{12} = 1.000.000.000.000$ (**o maior som que podemos ouvir - limiar da dor**)

A partir desta escala Bode criou o **Bel** (homenagem a **Alexander Graham Bell**, inventor do telefone). Assim, o **menor som que podemos ouvir é "0 Bel", e o maior som que podemos ouvir é "12 Béis"**. Quanto mais próximo de "**0 Bel**", menos potência sonora (no sentido de volume) tem o som, e quanto mais perto de "**12 Béis**", mais "perto estamos de ficarmos com o ouvido doendo".
- Mas se o menor som que alguém pode ouvir é "**zero Béis**", e zero não representa nada, como pode-se estar ouvindo alguma coisa? Outro problema é que de um valor de Bels para outro, a percepção humana dos sons é bem diferente. Por exemplo, se 6 Béis representa uma conversação normal entre duas pessoas, 7 Bels já representa o barulho típico dentro de uma fábrica, com várias máquinas ligadas. Apesar de serem números "próximos" um do outro, as potências sonoras representadas são muito diferentes (na verdade, são 10 vezes maiores - é uma potência de base 10). Passou-se então a utilizar-se casas decimais nos Béis, ou seja, 6,1; 6,3; 6,7,... Daí surgiu o "**deciBel**" (**dB**). Assim, a escala passou a ser de **0 a 120 deciBéis**. Escrever 65 dB é a mesma coisa que escrever 6,5 Béis, 120 dB é o mesmo que 12 Bels, e zero dB é também zero Bel. O menor som que podemos ouvir então ficou em **1 dB** (**1 dB equivale a 0,1 Béis**).

<u>Cálculo do Decibel (dB)</u>

Seja um ruído de potência **P_o Bel**. Consideremos a referência para o menor ruído que podemos ouvir de **P_i Bel**. A diferença entre estes valores pode ser escrita como sendo:

$$\mathbf{Q(Bel) = (P_o - P_i) = \log_{10} P_o - \log_{10} P_i = \log_{10}\left(\frac{P_o}{P_i}\right) Bel}$$

A escala para o **deciBel** é **10 vezes** a escala do **Bel**, então:

$$\mathbf{Q(deciBel) = 10.\log_{10}\left(\frac{P_o}{P_i}\right) dB}$$

Como a potência $\mathbf{P = \frac{V^2}{R}}$ é proporcional ao quadrado da tensão e dividida pela resistência do circuito, aplicando as propriedades dos logaritmos:

$$\mathbf{Q(dB) = 10.\log_{10}\left(\frac{\frac{(V_o)^2}{R_o}}{\frac{(V_i)^2}{R_i}}\right) dB}$$

Considerando na mesma resistência (**$R_o = R_i$**):

$$\mathbf{Q(dB) = 20.\log_{10}\left(\frac{V_o}{V_i}\right) dB}$$

<u>Exemplo:</u> Um amplificador de sonorização produz um volume de 90 dB com uma potência de 40 w. Se dobrarmos a potência do amplificador qual será o novo volume de dB?

$$Q\ (dB) = 10.\log_{10}\ (80\ w/40\ w) = 10.\log_{10}(2) = 10.(0{,}3) = 3\ dB$$

Então, se com 40 w produz-se 90 dB, com 80 w serão produzidos 93 dB.

Obs: - Ao dobrar a potência tem-se um incremento de 3 dB no nível de volume. Se a potência for reduzida à metade, o volume de som será diminuído de -3 dB.

Aplicação de dB em Função de Transferência

Como a Função de Transferência **H(s) = H(jw)** relaciona tensões e correntes de saída do circuito com tensões e correntes de entrada do mesmo, aplica-se o dB como sendo:

$$\mathbf{Q\ (dB) = 20.log_{10}\ |H(jw)|}$$

Exemplo: Para |H(jw)| = 0,8; qual o valor deste módulo em dB?

$$|H(jw)|_{dB} = 20.\log_{10}(|H(jw)|) = 20.\log_{10}(0{,}8) = -1{,}94\ dB$$

Exemplo: Para um circuito com $|H(jw)|_{dB}$ = 9,64 dB, qual o valor de |H(jw)|?

$$|H(jw)|_{dB} = 20.\log_{10}(|H(jw)|) \Rightarrow |\mathbf{H(jw)}| = 10^{\left(\frac{|\mathbf{H(jw)}|_{\mathbf{dB}}}{20}\right)} = 3$$

Construção do Diagrama de Bode

Em Gráficos logarítmicos as relações de freqüência são expressas em termos de ***oitavas*** ou ***décadas***.
- Uma ***oitava*** = intervalo de frequência desde w_1 até $2w_1$.
- Uma ***década*** = intervalo de frequência desde w_1 até $10w_1$.

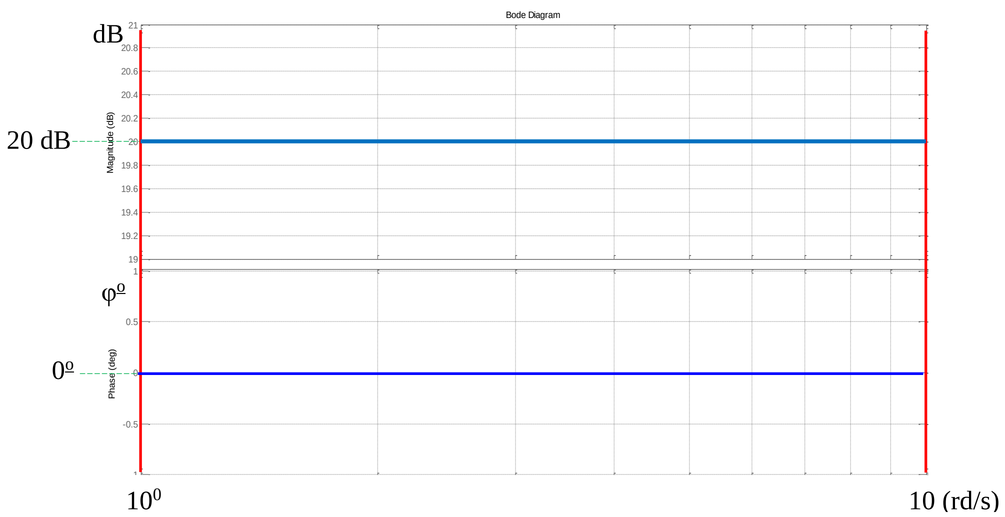
Para os Gráficos logarítmicos do Diagrama de Bode as relações de freqüência são expressas em termos de ***décadas***!

Fatores Básicos de H(jw):

1) Ganho K (K > 0)

- O Gráfico de ***log-módulo*** de **K** é uma reta horizontal $20.\log_{10}|K|$ em dB.
- O Gráfico do ângulo de fase **φ(w)** de **K** é 0º.
- A variação do ganho **K** desloca a curva ***log-módulo*** para baixo ou para cima não afetando o ângulo de fase **φ(w)**.

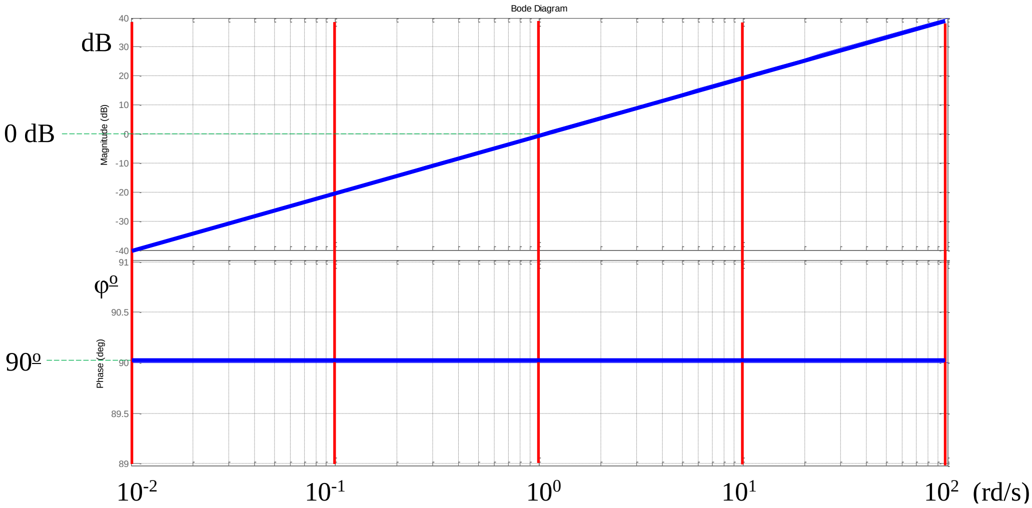
Gráfico: H(jw) = K = 10



2) Fator Integral e Derivativo $(jw)^{\pm 1}$

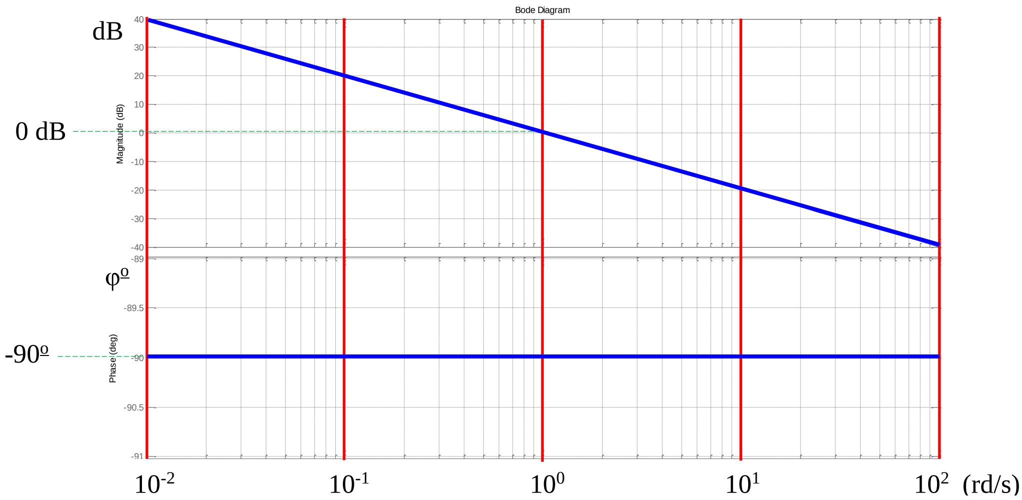
- O Gráfico de ***log-módulo*** de **(jw)** em dB é $20.\log_{10}|(jw)^1| = 20.\log_{10}(w)$ dB.
- O Gráfico do ângulo de fase **φ(w)** de **(jw)** é 90º.

Gráfico de (jw):



- O Gráfico de ***log-módulo*** de $\mathbf{(jw)^{-1}}$ em dB é $20.\log_{10}|(jw)^{-1}| = -20.\log_{10}(w)$ dB.
- O Gráfico do ângulo de fase **φ(w)** de $\mathbf{(jw)^{-1}}$ é -90º.

Gráfico de $(jw)^{-1}$:



Se a Função de Transferência possui o fator $\mathbf{(jw)^{\pm n}}$, o ***log-módulo*** será:
a) $20.\log_{10}|(jw)^{-n}| = -n.20.\log_{10}(w) = -20.n.\log_{10}(w)$ dB
b) $20.\log_{10}|(jw)^{+n}| = n.20.\log_{10}(jw) = 20.n.\log_{10}(w)$ dB

Conclusões:
- As inclinações das curvas dos ***log-módulo*** para os fatores $\mathbf{(jw)^{-n}}$ e $\mathbf{(jw)^{n}}$ serão -20n dB/década e 20n dB/década respectivamente.
- Os ângulos de fase para os fatores $\mathbf{(jw)^{-n}}$ e $\mathbf{(jw)^{n}}$ serão –(90n)º e (90n)º respectivamente em toda a faixa de freqüência.

3) Fator de Primeira Ordem $(1 + jwT)^{\pm 1}$

- O Gráfico de ***log-módulo*** de **(1+jwT)** em dB varia para baixos e altos valores de w.

Para **(1 + jwT)** temos: $20.\log_{10}|(1+jwT)| = 20.\log_{10}(\sqrt{(1+w^2T^2})$ (dB)

Assíntotas:

- Para baixas freqüências (w →0):

$$f(w \rightarrow 0) = 20.\log_{10}(\sqrt{(1+w^2T^2}) = 20.\log_{10}(1) \cong 0\,(dB)$$

- Para altas freqüências (w → ∞):

$$f(w \rightarrow \infty) = 20.\log_{10}(\sqrt{(1+w^2T^2}) = 20.\log_{10}(wT)\,(dB)$$

No cruzamento das assíntotas teremos:

$$20.\log_{10}(wT) = 0 \Rightarrow \log_{10}(wT) = 0 \Rightarrow wT = 10^0 \Rightarrow wT = 1 \Rightarrow w = \frac{1}{T}(rd/s)$$

Esta freqüência $w = \frac{1}{T}(rd/s)$ é denominada ***Frequência de Canto*** e é denotada por:

$$w_n = \frac{1}{T}(rd/s)$$

A ***Frequência de Canto*** $\mathbf{w_n}$ divide a curva de resposta em freqüência em duas regiões, a **região de baixa freqüência** (w → 0) e a **região de alta freqüência** (w → ∞).

Então para $w = \frac{1}{T}$ => ***log-módulo*** = 0 dB e para $w = \frac{10}{T}$ => ***log-módulo*** = 20 dB. Assim, o valor de $20.\log_{10}(wT)$ (dB) **cresce** 20 dB/década de freqüência w.

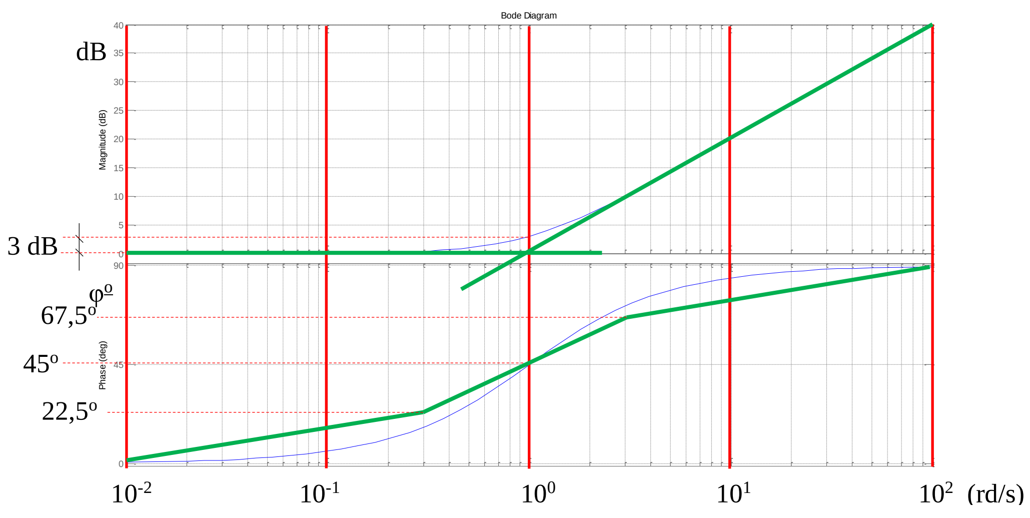
- O Gráfico do ângulo de fase **φ(w)** de **(1 + jwT)** é dado por: $\varphi(w) = tg^{-1}(wT)$

Para w → 0 => φ = 0º

Para $w = \frac{1}{T}$ => φ = 45º

Para w → ∞ => φ = 90º

Gráfico de (1 + jwT) com T = 1:



- O Gráfico de ***log-módulo*** de $\mathbf{(1+jwT)^{-1}}$ em dB varia para baixos e altos valores de w.

Para $\mathbf{(1 + jwT)^{-1}}$ temos: $-20.\log_{10}|(1+jwT)| = -20.\log_{10}(\sqrt{(1+w^2T^2)}$ (dB)

<u>Assíntotas:</u>

- Para baixas freqüências ($w \to 0$):

$$f(w \to 0) = -20.\log_{10}(\sqrt{(1+w^2T^2)} = -20.\log_{10}(1) \cong 0 \text{ (dB)}$$

- Para altas freqüências ($w \to \infty$):

$$f(w \to \infty) = -20.\log_{10}(\sqrt{(1+w^2T^2)} = -20.\log_{10}(wT) \text{ (dB)}$$

No cruzamento das assíntotas de baixa e de alta freqüência teremos:

$$-20.\log_{10}(wT) = 0 \Rightarrow \log_{10}(wT) = 0 \Rightarrow wT = 10^0 \Rightarrow wT = 1 \Rightarrow w = \frac{1}{T}(rd/s)$$

Esta freqüência $w = \frac{1}{T}(rd/s)$ é denominada ***Frequência de Canto*** e é denotada por:

$$w_n = \frac{1}{T}(rd/s)$$

A ***Frequência de Canto*** $\mathbf{w_n}$ divide a curva de resposta em freqüência em duas regiões, a **região de baixa freqüência** ($w \to 0$) e a **região de alta freqüência** ($w \to \infty$).

Então para $w = \frac{1}{T}$ => ***log-módulo*** = 0 dB e para $w = \frac{10}{T}$ => ***log-módulo*** = -20 dB.
Assim, o valor de $-20.\log_{10}(wT)$ (dB) **decresce** -20 dB/década de freqüência w.

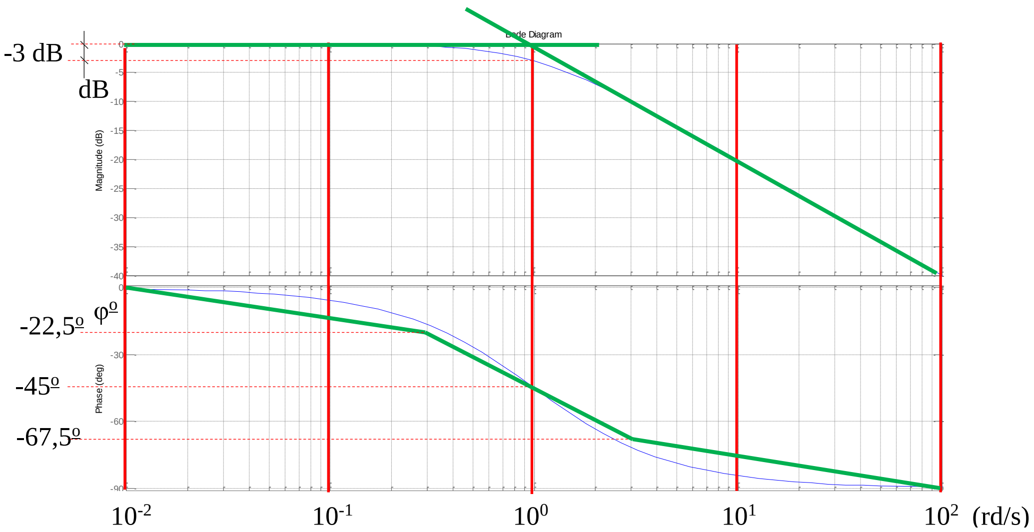
- O Gráfico do ângulo de fase **φ(w)** de $\mathbf{(1 + jwT)^{-1}}$ é dado por: $\varphi(w) = -tg^{-1}(wT)$

Para $w \to 0$ => $\varphi = 0º$

Para $w = \frac{1}{T}$ => $\varphi = -45º$

Para $w \to \infty$ => $\varphi = -90º$

Gráfico de $(1 + jwT)^{-1}$ com T = 1:



4) Fatores Quadráticos $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{\pm 1}$

- O Gráfico de ***log-módulo*** de $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{\pm 1}$ em dB varia para baixos e altos valores de w.

Geralmente encontra-se: $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}$

- Se $\xi > 1$ => pólos reais distintos => dois fatores de 1ª ordem => idem a $(1 + jwT)^{-1}$!

- Se $0 < \xi < 1$ => pólos complexos conjugados => ***log-módulo*** e $\boldsymbol{\varphi(w)}$ dependem de $\boldsymbol{\xi}$ e de $\mathbf{w_n}$.

Então: $20.\mathbf{log}_{10}\left|\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}\right| = -20.\mathbf{log}_{10}\left[\sqrt{\left(1-\frac{w^2}{w_n^2}\right)^2+\left(2\xi\frac{w}{w_n}\right)^2}\right]$

Assíntotas:

- Para baixas freqüências ($w \rightarrow 0$):

$$f(w \rightarrow 0) = -20.\mathbf{log}_{10}\left[\sqrt{\left(1-\frac{w^2}{w_n^2}\right)^2+\left(2\xi\frac{w}{w_n}\right)^2}\right] = -20.\mathbf{log}_{10}(1) \cong 0 \text{ dB}$$

- Para altas freqüências ($w \rightarrow \infty$):

$$f(w \rightarrow \infty) = =$$

$$-20.\mathbf{log}_{10}\left[\sqrt{\left(1-\frac{w^2}{w_n^2}\right)^2+\left(2\xi\frac{w}{w_n}\right)^2}\right] = -20.\mathbf{log}_{10}\left[\frac{w}{w_n}\right]^2 = -40.\mathbf{log}_{10}\left[\frac{w}{w_n}\right] \text{dB}$$

No cruzamento das assíntotas teremos:

$$-40.\mathbf{log}_{10}\left(\frac{w}{w_n}\right) = 0 \Rightarrow w = w_n \ (\text{rd/s}).$$

Esta freqüência $w = w_n\ (\text{rd/s})$ é denominada ***Frequência de Canto*** do Fator Quadrático.

Observando o Fator $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}$, pode-se supor uma situação de ressonância quando **w = wₙ**, assim: $\left[1+2\xi.(j1)+(-1).(1)^2\right]^{-1} = (j2\xi)^{-1}$

Conclusão: no valor **$w = w_n$** a resposta sofrerá um pico de ressonância dependendo do valor de ξ, ou seja, quanto maior a amplitude de ξ menor será o pico de ressonância e quanto menor a amplitude de ξ mior será o pico de ressonância.

A ***Frequência de Canto*** $\mathbf{w_n}$ divide a curva de resposta em freqüência em duas regiões, a **região de baixa freqüência** ($w \rightarrow 0$) e a **região de alta freqüência** ($w \rightarrow \infty$).

Então para $\mathbf{w = w_n}$ => ***log-módulo*** = 0 dB e para $\mathbf{w = 10.w_n}$ => ***log-módulo*** = -40 dB.

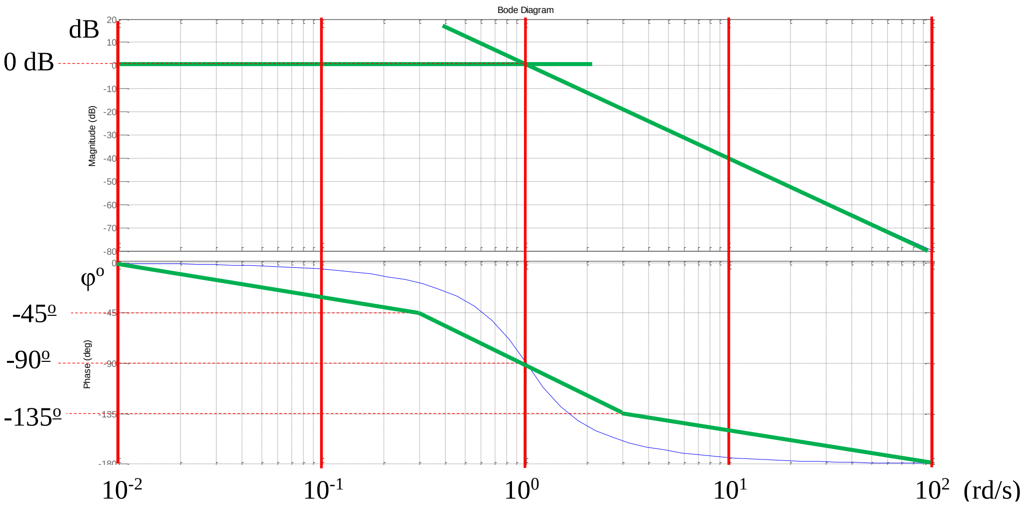
Assim, o valor de $-40.\mathbf{log}_{10}\left(\frac{w}{w_n}\right)(\text{dB})$ **decresce** -40 dB/década de freqüência w.

- O Gráfico do ângulo de fase **φ(w)** de $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}$ é dado por:

$$\varphi(w) = -tg^{-1}\left[\frac{2\xi.\left(\frac{w}{w_n}\right)}{1-\left(\frac{w}{w_n}\right)^2}\right].$$

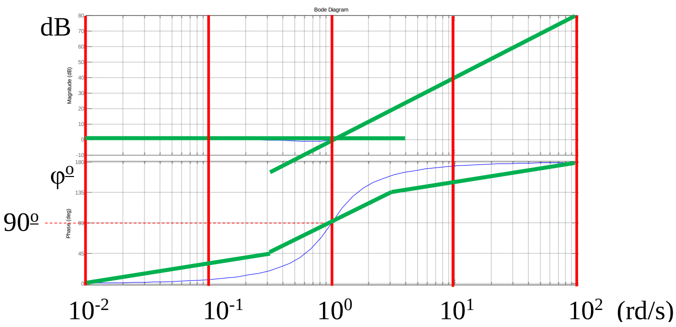
Para w ⟶ 0 => φ = 0º
Para w = w_n => φ = -90º
Para w ⟶ ∞ => φ = -180º

Gráfico para **ξ = 0,5** e **w_n =1 rd/s** de $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}$:



Analogamente à análise feita para o fator de 1ª ordem, para o fator $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]$ obtém-se as curvas ***log-módulo*** e ***φ(w)*** invertendo-se os sinais do ***log-módulo*** e do ângulo de fase ***φ(w)*** de $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}$.

Gráfico para **ξ = 0,5** e **w_n =1 rd/s** de $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]$:



Frequência de Ressonância (**w_r**)

O módulo de $\left|G(jw)\right| = \dfrac{1}{\sqrt{\left(1-\dfrac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \left(2\xi\dfrac{w}{w_n}\right)^2}}$ possui um valor de pico na freqüência de ressonância.

O pico de ressonância ocorrerá quando: $g(w) = \left(1-\dfrac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \left(2\xi\dfrac{w}{w_n}\right)^2$ for mínimo!

Então: $\dfrac{dg(w)}{dw} = 0 \Rightarrow w = w_n\sqrt{(1-2\xi^2}$

Como: $\dfrac{dg^2(w)}{dw^2} => 0 \Rightarrow w_r = w_n\sqrt{(1-2\xi^2}$, para $\mathbf{0 \le \xi \le 0{,}707}$.

- Se ξ **> 0,707 não existe w_r.**

Valor do Pico de Ressonância (**M_r**)

Substituindo-se **w_r** em **|G(jw)|** temos que o valor do Pico de Ressonância. Assim:

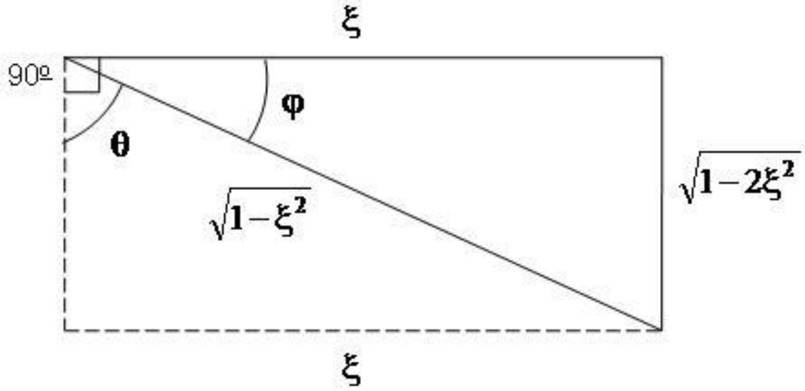
$$M_r = \left|G(jw)\right|_{máx} = \left|G(jw_r\right| = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$$

- Para ξ **> 0,707** => **M_r = 1**.
- Para ξ **→ 0** => **M_r** → ∞.

O ângulo de fase ***φ(w)*** onde ocorre o pico de ressonância pode ser obtido substituindo o valor de $w_r = w_n\sqrt{(1-2\xi^2}$ em $\varphi(w) = -tg^{-1}\left[\dfrac{2\xi.\left(\dfrac{w}{w_n}\right)}{1-\left(\dfrac{w}{w_n}\right)^2}\right]$ resultando:

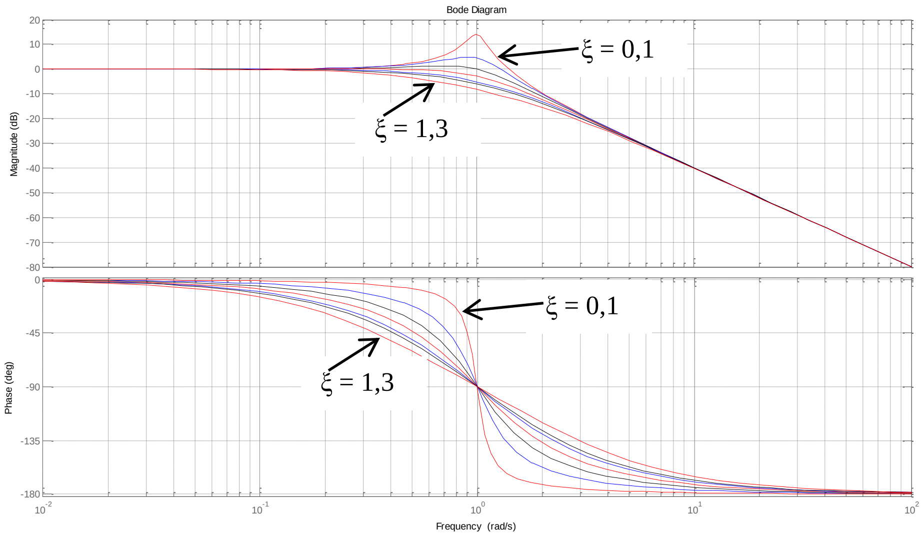
$$\varphi(w_r) = -tg^{-1}\left[\frac{\sqrt{1-2\xi^2}}{\xi}\right] = -90^o + sen\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)$$

Geometricamente:



Exemplo de Picos de Ressonância

Gráficos de $\left[1+2\xi\left(\frac{jw}{w_n}\right)+\left(\frac{jw}{w_n}\right)^2\right]^{-1}$ para $\mathbf{w_n = 1}$ **rd/s** e $\boldsymbol{\xi}$ variando de **0,1** até **1.3** em intervalos de 0,3.



Importante:

Utilizando o **Diagrama de Bode,** a partir da Função de Transferência **H(s)** de um circuito e dada sua entrada, pode-se obter a sua saída em **estado permanente** (**s = jw**) para qualquer valor de frequência **w**.

Por exemplo, se $\mathbf{H(s=jw)=\frac{V_o(jw)}{V_i(jw)}}$ é a Função de Transferência **H(jw)** de um circuito e dado que a sua entrada seja $\mathbf{v_i(t) = V_m.cos(w_i t + \theta)}$, sendo $\mathbf{w_i}$ a frequência da fonte, a saída $\mathbf{v_o(t)}$ é obtida de:

$$\mathbf{V_o(jw_i) = H(jw_i).V(jw_i)}$$

Onde: $\mathbf{H(jw_i) = |H(jw_i)|\angle H(jw_i)}$ e $\mathbf{V_i(jw_i) = |V_i(jw_i)|\angle V_i(jw_i)}$.

No entanto, esta saída (ou resposta) do circuito é determinada apenas para a frequência $\mathbf{w_i}$ da fonte de entrada necessitando de novos cálculos de $\mathbf{H(jw) = |H(jw)|\angle H(jw)}$ e de $\mathbf{V_0(jw) = |V_i(jw)|\angle V_i(jw)}$ para qualquer outra ferquência da fonte.

Como o **Diagrama de Bode** nos fornece $\mathbf{|H(jw)|}$ **e** $\mathbf{\angle H(jw)}$ para quaisquer valores de **w** variando de **0** a ∞, pode-se então determinar a saída (ou resposta) do circuito, dada a entrada $\mathbf{v_i(t)}$ para qualquer valor de freqüência **w** desejada sem a necessidade de novos cálculos apenas utilizando os valores dados no **Diagrama de Bode**.

Exercício de Aplicação - Construção do Diagrama de Bode

Para esboçar o **Diagrama de Bode** para uma **Função de Transferência** tal como

$$H(s) = \frac{K.\prod_{n=1}^{k}.(s+z_n)}{\prod_{r=1}^{j}.(s+p_r)}$$; onde**: k = nº de zeros** e **j = nº de polos**.

deve-se fazer:
1) Reescrever a **Função de Transferência** como produto de **Fatores Básicos**.
2) Identificar a **Frequência de Canto** w_n da cada Fator Básico.
3) Esboçar as **assíntotas** do *log-módulo* com as inclinações apropriadas entre Frequência de Canto.
4) A curva **φ(w)** é esboçada adicionando-se as curvas dos ângulos de fase dos Fatores Básicos.
5) A curva exata do Diagrama de Bode pode ser obtida efetuando-se as correção necessárias (inserindo erros).

Exemplo: Esboçar o Diagrama de Bode para a Função de Transferência dada a seguir:

$$H(s) = \frac{100.(s+10)}{s.(s+1).(s^2+s+100)}$$

Primeiramente devemos fatorar a **H(jw)** em **Fatores Básicos**:

$$H(jw) = \frac{100.(jw+10)}{(jw).(jw+1).100.[(j\frac{w}{10})^2+(j\frac{w}{100})+1)]} = \frac{100.10.(1+j\frac{w}{10})}{(jw).(1+jw).100.[1+(2\xi\, j\frac{w}{10})+(j\frac{w}{10})^2]} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow H)jw) = \frac{10.(1+j\frac{w}{10})}{(jw).(1+jw).[1+(2\xi\, j\frac{w}{10})+(j\frac{w}{10})^2]}; \quad \text{onde}: 2\xi\, j(\frac{w}{w_c}) = j(\frac{w}{100}); w_c = 10\, rd/s \Rightarrow \xi = \frac{1}{20}$$

Os **Fatores Básicos** serão:

1 – Fator Ganho: **K = 10**.

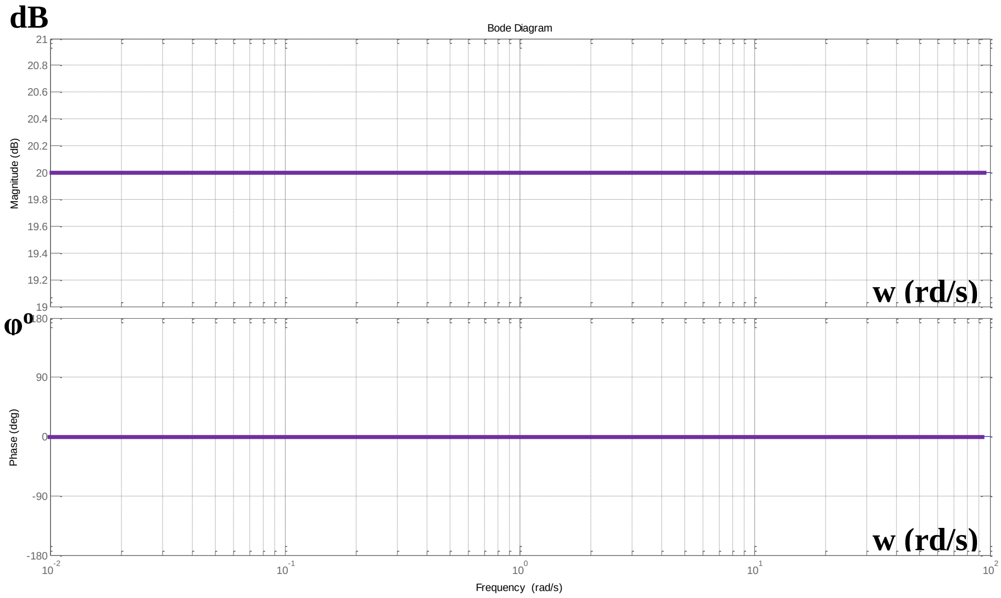
2 – Fator Integral: $(jw)^{-1}$ com $w_n = 1$ **rd/s**.

3 – Fatores de Primeira Ordem: **(1 + jw/10)** com $w_n = 10$ **rd/s** e $(1 + jw)^{-1}$ com $w_n = 1$ **rd/s**.

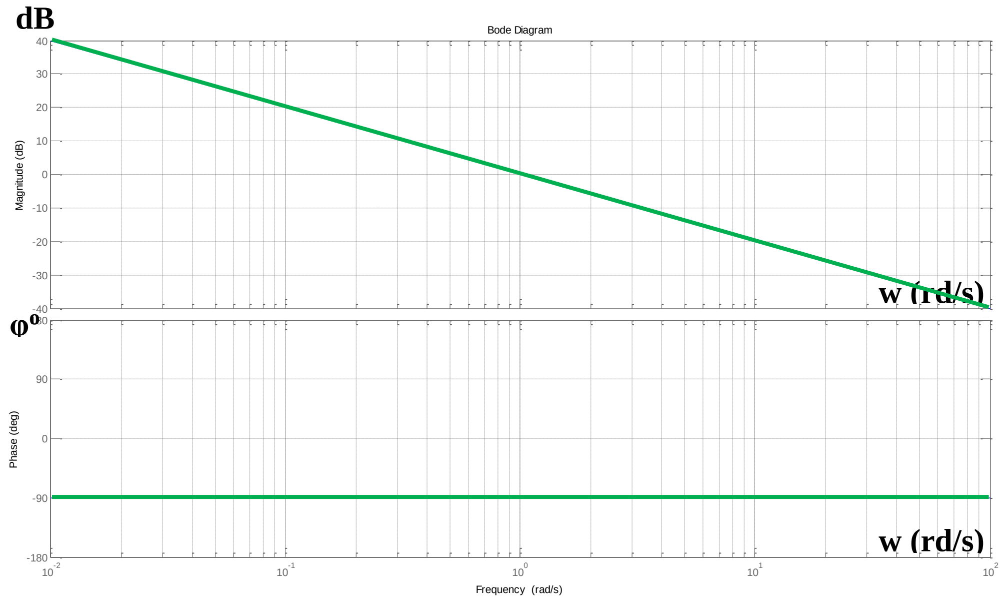
4 – Fator Quadrático: $[\,1+2\xi(jw/w_n) + (jw/w_n)^2\,]^{-1}$ com $w_n = 10$ **rad/s**.

Deve-se esboçar os gráficos para cada Fator Básico e em seguida efetuar a soma destes gráficos originando o gráfico final de H(jw).

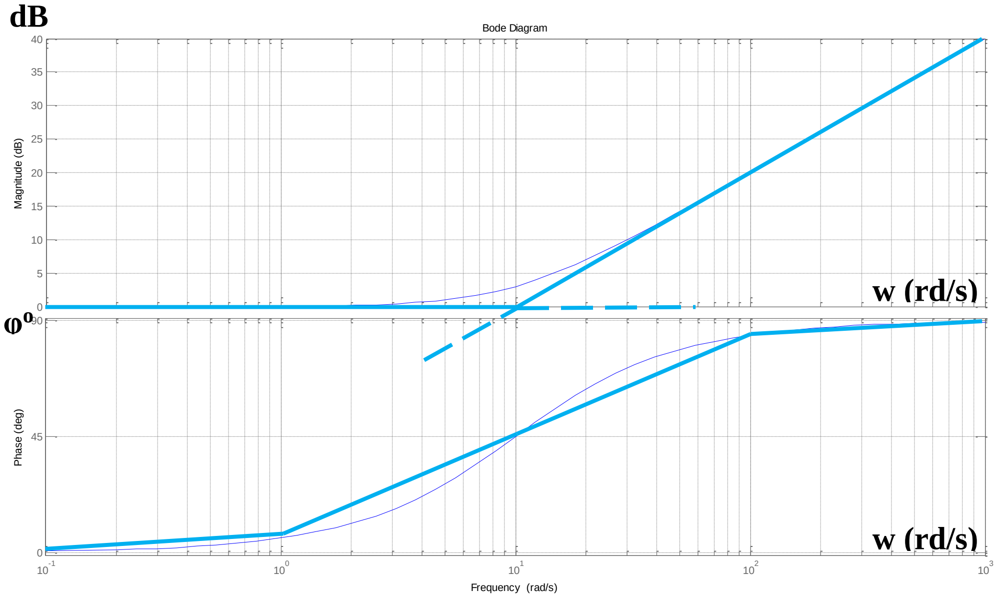
1 – Fator Ganho: **K = 10**.



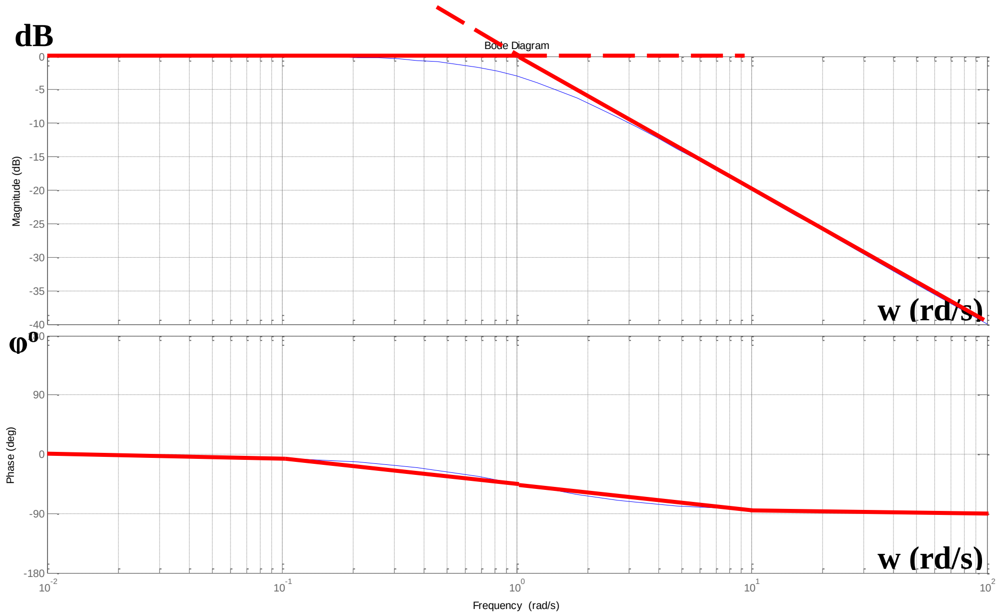
2 – Fator Integral**:** $(jw)^{-1}$ com $w_n = 1$ **rd/s**.



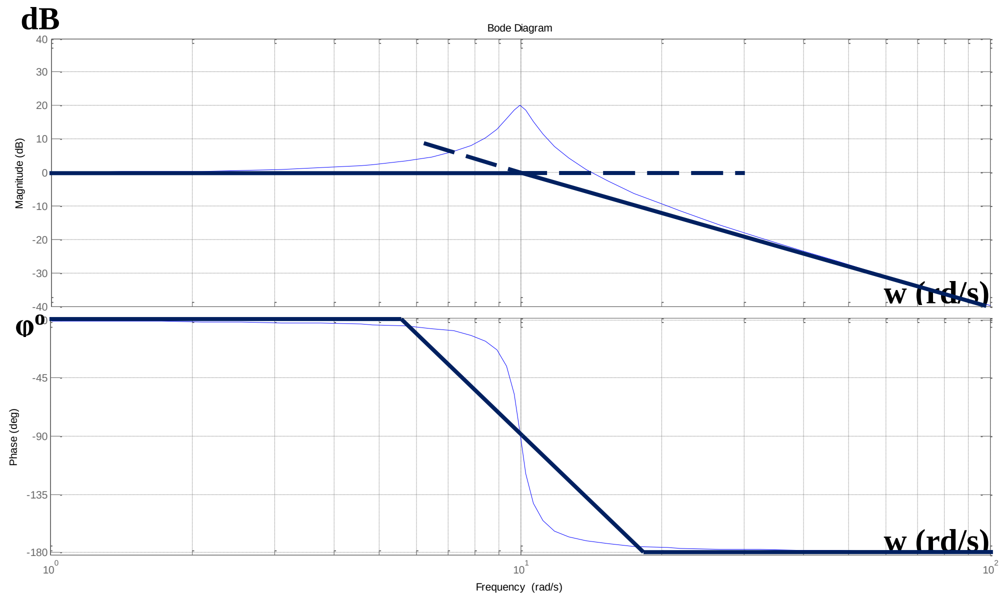
3 – Fatores de Primeira Ordem: **(1 + jw/10)** com $\mathbf{w_n = 10}$ **rd/s**.



4 – Fator de Primeira Ordem: $\mathbf{(1 + jw)^{-1}}$ com $\mathbf{w_n = 1}$ **rd/s**.



5 – Fator Quadrático: $\mathbf{[\,1 + 2\xi(jw/10) + (jw/10)^2\,]^{-1}}$ com $\mathbf{w_n = 10\ rad/s}$.



O **Diagrama de Bode** para $$H(s) = \frac{100.(s+10)}{s.(s+1).(s^2+s+100)}$$ é construído **somando-se** as declinações de cada **Fator Básico** entre as **Frequência de Canto**. Assim: