ELT221 - Circuitos Elétricos II

Prof. Tarcísio Pizziolo

Aula 2

2) Função de Transferência (Função de Rede)

Função de Transferência é definida como a relação entre o ***FASOR*** *resposta* (saída) e o ***FASOR*** de *excitação* (entrada) do circuito considerando uma única entrada e uma única saída e que as condições iniciais do circuito sejam iguais a zero.
Outra definição para Função de Transferência é dada utilizando-se a *Transformada de Laplace* ***£{.}***, sendo a relação entre a ***£{saída}*** pela ***£{entrada}*** considerando uma única entrada e uma única saída e que as condições iniciais do circuito também sejam iguais a zero.

Seja a **EDOL** que descreve a relação entrada e saída de um circuito com entrada **x(t)** (tensão ou corrente) e saída **y(t)** (tensão ou corrente).

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{(n-1)} \frac{d^{(n-1)} y}{dt^{(n-1)}} + \ldots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{(m-1)} \frac{d^{(m-1)} x}{dt^{(m-1)}} + \ldots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

Pela definição de **Função de Transferência** e utilizando **Fasores** temos que:

$$\begin{cases} \text{Para } v(t) \Rightarrow \dot{V} = \mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{(\sigma + j\omega)t}] = \mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}] \\ \text{Para } \dfrac{dv(t)}{dt} \Rightarrow \dfrac{d\dot{V}}{dt} = \dfrac{d}{dt}\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\} = s\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\} = s\dot{V} \\ \text{Para } \dfrac{d^2 v(t)}{dt^2} \Rightarrow \dfrac{d^2 \dot{V}}{dt^2} = \dfrac{d}{dt}\left\{\dfrac{d}{dt}\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\}\right\} = s^2 \dot{V} \\ . \\ . \\ . \\ \text{Para } \dfrac{d^n v(t)}{dt^n} \Rightarrow \dfrac{d^n \dot{V}}{dt^n} = \dfrac{d}{dt}^n \left\{\dfrac{d}{dt}\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\}\right\} = s^n \dot{V} \end{cases}$$

Daí:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{(n-1)} \frac{d^{(n-1)} y}{dt^{(n-1)}} + \ldots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{(m-1)} \frac{d^{(m-1)} x}{dt^{(m-1)}} + \ldots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a_n s^n \dot{Y} + a_{(n-1)} s^{(n-1)} \dot{Y} + \ldots + a_1 s \dot{Y} + a_0 \dot{Y} = b_m s^m \dot{X} + b_{(m-1)} s^{(m-1)} \dot{X} + \ldots + b_1 s \dot{X} + b_0 \dot{X} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \ldots + a_1 s + a_0)\dot{Y} = (b_m s^m + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \ldots + b_1 s + b_0)\dot{X} \Rightarrow$$

Fasor Saída → $\dot{Y}(s)$

Fasor Entrada → $\dot{X}(s)$

$$\Rightarrow \frac{\dot{Y}(s)}{\dot{X}(s)} = \frac{(b_m s^m + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \ldots + b_1 s + b_0)}{(a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \ldots + a_1 s + a_0)} \Rightarrow \boxed{F(s) = \frac{(b_m s^m + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \ldots + b_1 s + b_0)}{(a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \ldots + a_1 s + a_0)}}$$

O polinômio do denominador é denominado "**Polinômio Característico**" dado que seus coeficientes advêm dos parâmetros **R**, **L** e **C** que descrevem do circuito.

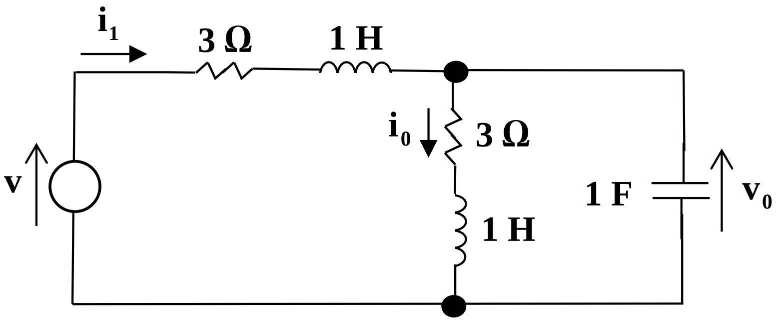
Importante: Transformando o circuito do domínio do tempo t para o domínio da frequência s aplicando Fasores, permite-nos determinar a Função de Tansferência F(s), a qual descreve a relação entrada e saída do circuito, através dos métodos de resolução de circuito elétricos lineares.

Exemplo: Considerando **v** como a entrada do circuito, determine a **Função de Transferência F(s)** se a resposta do circuito for:

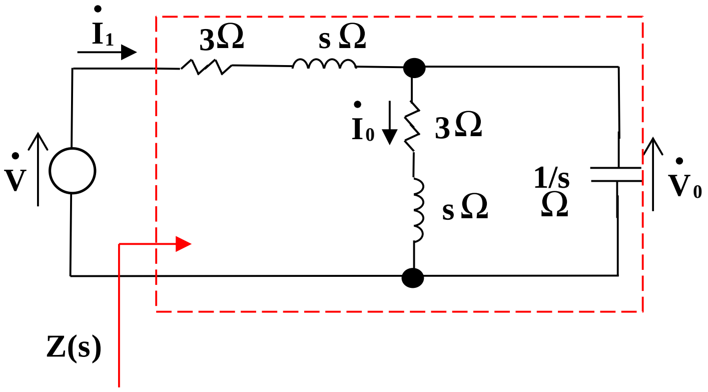
a) $\mathbf{i_1}$

b) $\mathbf{i_0}$

c) $\mathbf{v_0}$



Circuito no domínio da frequência **s**:



$$\text{a) } F(s)=\frac{I_1(s)}{V(s)};\quad I_1(s)=\frac{V(s)}{Z(s)};\quad Z(s)=(3+s)+\frac{(3+s)\times\left(\frac{1}{s}\right)}{\left(3+s+\frac{1}{s}\right)}=(3+s)+\frac{(3+s)}{(3s+s^2+1)}\Rightarrow$$

$$\Rightarrow Z(s)=\frac{(9s+3s^2+3++3s^2+s^2+s+3+s)}{(3s+s^2+1)}\quad\Rightarrow Z(s)=\frac{(s^3+6s^2+11s+6)}{(s^2+3s+1)}\quad;$$

$$F(s)=\frac{\frac{V(s)}{Z(s)}}{V(s)}=\frac{1}{Z(s)}\Rightarrow F(s)=\frac{(s^2+3s+1)}{(s^3+6s^2+11s+6)}\Rightarrow\boxed{F(s)=\frac{(s^2+3s+1)}{(s+1)(s+2)(s+3)}}$$

$$\text{b) }\quad F(s)=\frac{I_0(s)}{V(s)}\quad;\quad I_0(s)=\frac{\frac{1}{s}}{\left(3+s+\frac{1}{s}\right)}\times I_1(s)=\frac{1}{(s^2+3s+1)}\times\frac{V(s)}{Z(s)}\quad\Rightarrow$$

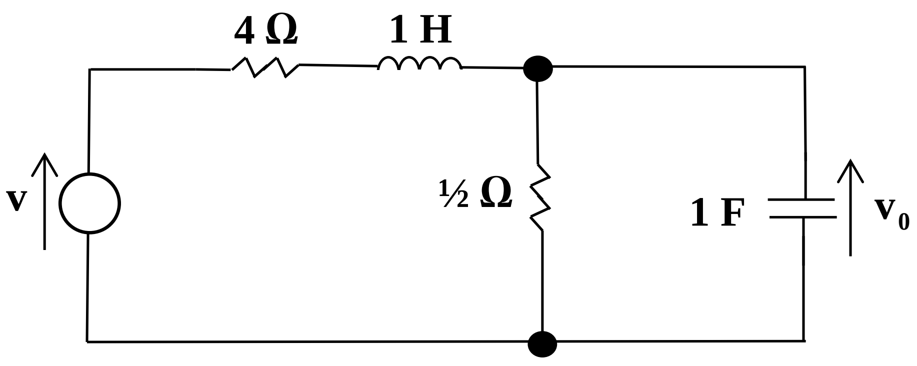
$$\Rightarrow I_0(s)=\frac{1}{(s^2+3s+1)}\times\frac{V(s)(s^2+3s+1)}{(s^3+6s^2+11s+6)}\quad\Rightarrow\quad F(s)=\frac{I_0(s)}{V(s)}\quad\Rightarrow\quad\boxed{F(s)=\frac{1}{(s+1)(s+2)(s+3)}}$$

$$\text{c) }\quad F(s)=\frac{V_0(s)}{V(s)}\quad;\quad V_0(s)=(3+s)I_0(s)=\frac{(s+3)V(s)}{(s^3+6s^2+11s+6)}\quad\Rightarrow\quad\frac{V_0(s)}{V(s)}=\frac{(s+3)}{(s+1)(s+2)(s+3)}\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\boxed{F(s)=\frac{(s+3)}{(s+1)(s+2)(s+3)}}$$

<u>**Importante:**</u> Todas as Funções de Transferência associadas a um circuito possuem o mesmo polinômio característico (denominador de F(s)).

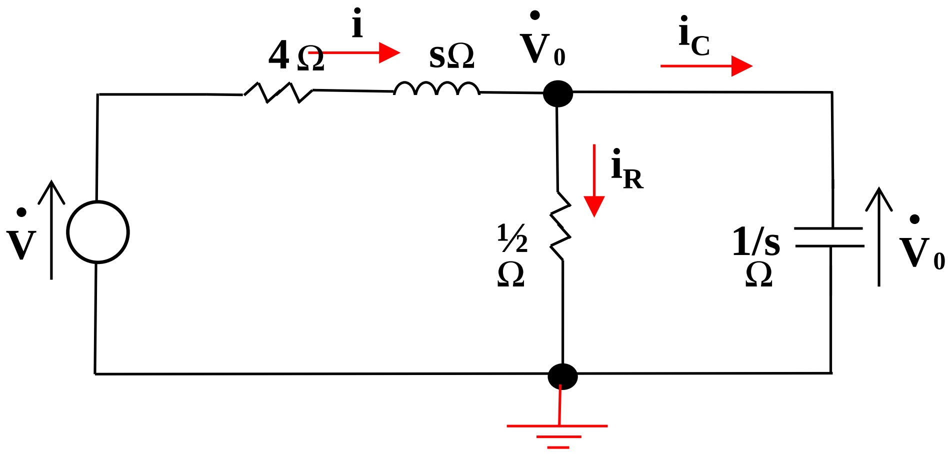
Exemplo: Seja o circuito dado a seguir com **v(t) = 3 + 10cos(t) + 3cos(3t + 30º) (V)**:



a) Determine sua Função de Transferência $\mathbf{F(s)} = \dfrac{\dot{V}_0(s)}{\dot{V}(s)}$.

b) Determine a tensão **v0** de saída em estado permanente.

Circuito no domínio da frequência **s**.



Como a fonte **v(t)** possui três frequências diferentes (**s = 0**, **s = j1** e **s = j3**), deve-se aplicar o **Teorema da Superposição** considerando cada frequência para uma fonte independente. Então:

$$\dot{V} = \dot{V}_1\Big|_{s=0} + \dot{V}_2\Big|_{s=1} \dot{V}_3\Big|_{s=3} \Rightarrow \dot{V} = 3\angle 0^o\Big|_{s=0} + 10\angle 0^o\Big|_{s=j1} + 3\angle 30^o\Big|_{s=j3}$$

a) Aplicando a LKC:

$$i = i_R + i_C \Rightarrow \frac{(\dot{V} - \dot{V}_0)}{(4+s)} = \frac{\dot{V}_0}{\frac{1}{2}} + \frac{\dot{V}_0}{\frac{1}{s}} \Rightarrow \frac{\dot{V}}{(4+s)} - \frac{\dot{V}_0}{(4+s)} = 2\dot{V}_0 + s\dot{V}_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{V}}{(s+4)} = 2\dot{V}_0 + s\dot{V}_0 + \frac{\dot{V}_0}{(s+4)} \Rightarrow \left[\frac{1 + 2(s+4) + s(s+4)}{(s+4)}\right]\dot{V}_0 = \frac{\dot{V}}{(s+4)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (s^2 + 6s + 9)\dot{V}_o = \dot{V} \Rightarrow \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}} = \frac{1}{(s^2 + 6s + 9)} \Rightarrow \boxed{F(s) = \frac{1}{(s^2 + 6s + 9)}}$$

b) A saída **v0(t)** no estado permanente pode ser calculada aplicando a **Função de Transferência** do circuito para cada entrada com sua respectiva frequência somando-as em seguida.

$$\frac{\dot{V}_0}{\dot{V}} = \frac{1}{(s^2+6s+9)} \Rightarrow \dot{V}_0 = \frac{\dot{V}}{(s^2+6s+9)} \Rightarrow \dot{V}_0 = \underbrace{\left.\frac{1}{(s^2+6s+9)}\right|_{s=0}\dot{V}_1}_{\text{Saída contínua}} + \underbrace{\left.\frac{1}{(s^2+6s+9)}\right|_{s=j1}\dot{V}_2}_{\text{Saída senoidal com s=1}} +$$

$$+\underbrace{\left.\frac{1}{(s^2+6s+9)}\right|_{s=j3}\dot{V}_3}_{\text{Saída senoidal com s=3}} \Rightarrow \dot{V}_0 = \left.\frac{1}{(s^2+6s+9)}\right|_{s=0}(3\angle 0^o) + \left.\frac{1}{(s^2+6s+9)}\right|_{s=j1}(10\angle 0^o) +$$

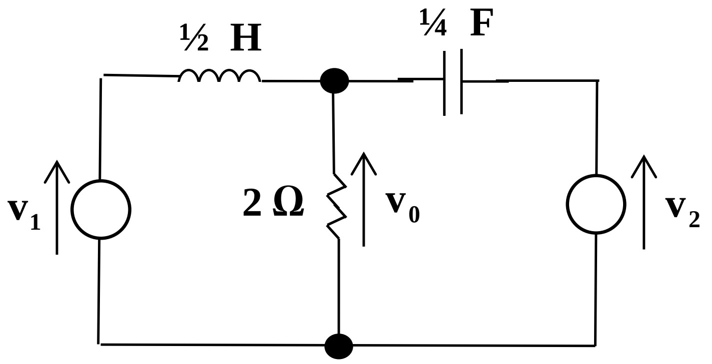
$$+\left.\frac{1}{(s^2+6s+9)}\right|_{s=j3}(3\angle 30^o) \Rightarrow \dot{V}_0 = \frac{1}{3} + \left.\frac{1}{((j1)^2+6(j1)+9)}\right|_{s=j1}(10\angle 0^o) +$$

$$+\left.\frac{1}{((j3)^2+6(j3)+9)}\right|_{s=j3}(3\angle 30^o) \Rightarrow \dot{V}_0 = \frac{1}{3} + \frac{(10\angle 0^o)}{(8+j6)} + \frac{(3\angle 30^o)}{j18} \Rightarrow \dot{V}_0 = \frac{1}{3} + 1\angle -36{,}9^o + \frac{1}{6}\angle -60^o$$

A reposta completa no domínio do tempo será:

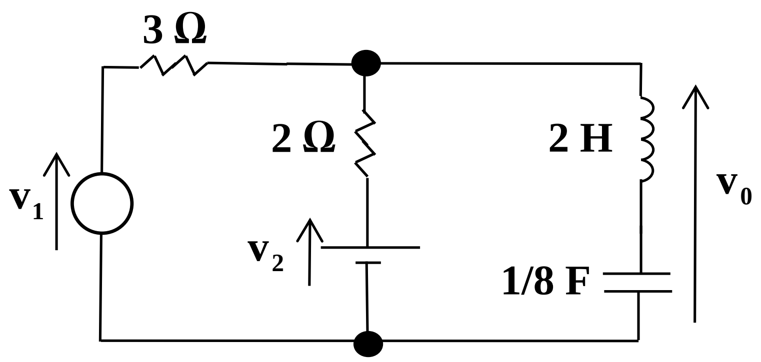
$$\boxed{v_0(t) = \frac{1}{3} + \cos(t - 36{,}9^o) + \frac{1}{6}\cos(3t - 60^o) \quad (V)}$$

Exercício: Seja o circuito dado a seguir com **v1(t) = [2 + 2cos(2t)] V** e **v2(t) = 3sen(2t) V**



Determine a tensão **vo** de saída em estado permanente.

Exercício: Seja o circuito dado a seguir com **v1(t) = [2cos(2t) + sen(4t)] V** e **v2(t) = 10 V**



Determine a tensão **vo** de saída em estado permanente.

2.1) Pólos e Zeros

Uma Função de Transferência **F(s)** é o quociente de dois polinômios em **s**. Supondo que esses dois polinômios sejam **A(s)** e **B(s)** expressos na forma fatorada a seguir:

$$\mathbf{F(s)=\frac{A(s)}{B(s)}=\frac{(b_m s^m+...+b_1 s+b_0)}{(a_n s^n+...+a_1 s+a_0)}=K\frac{(s-z_1)(s-z_2)...(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)...(s-p_n)}}$$

Onde $\mathbf{K=\frac{b_m}{a_n}}$

Ao serem igualados a zero, o numerador de **F(s)** fornece raízes $\mathbf{z_m}$ e o denominador fornece raízes $\mathbf{p_n}$. Às $\mathbf{z_m}$ raízes do numerador denomina-se "**Zeros**" e às $\mathbf{p_n}$ raízes do denominador denomina-se "**Pólos**".
Ao igualar-se o "**Polinômio Característico**" de **F(s) a zero** tem-se a "**Equação Característica**", a qual fornecerá os **Pólos** $\mathbf{p_n}$.

Importante:

$\mathbf{z_1, z_2,.., z_m}$ são valores para os quais **F(s)** torna-se zero.

$\mathbf{p_1, p_2,.., p_n}$ são valores para os quais $\mathbf{F(s)\rightarrow\infty}$.

Os **Pólos** e **Zeros** podem ser representados em um plano complexo denominado "**Plano da Frequência Complexa**". Como **s = (σ + jw)**, os eixos real e imaginário podem ser chamados de **eixo-σ** e **eixo-jw**, respectivamente. **Pólos** são indicados com **cruzes** e **Zeros** por **círculos**.
O número de **Zeros** têm que ser igual ao número de **Pólos** em uma Função de Transferência **F(s)**. Caso haja diferença entre o número finito de **Zeros** e de **Pólos**, considera-se que a quantidade de **Pólos** ou **Zeros** faltante está no infinito.

Exemplo: Um dado circuito possui a seguinte Função de Transferência **F(s)**:

$$\mathbf{F(s)=\left[\frac{6(s+1)(s^2+2s+2)}{s(s+2)(s^2+4s+13)}\right]\Rightarrow F(s)=\left[\frac{6(s+1)(s+1+j1)(s+1-j1)}{s(s+2)(s+2+j3)(s+2-j3)}\right]}$$

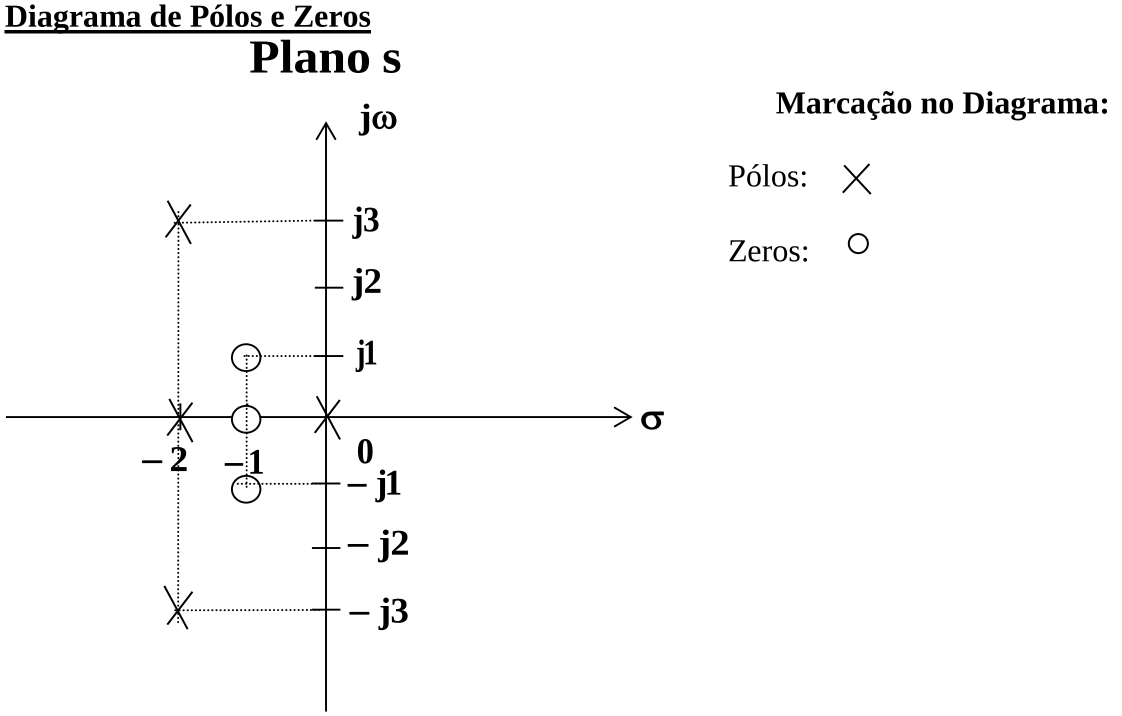
Esboçar o **Diagrama de Pólos e Zeros** para **F(s)**.

A F(s) possui 3 Zeros e 4 Pólos finitos. Então, um dos Zeros está localizado no infinito.

Pólos: $p_1 = 0$; $p_2 = -2$; $p_3 = (-2 - j3)$ e $p_4 = (-2 + j3)$

Zeros: $z_1 = -1$; $z_2 = (-1 - j1)$ e $z_3 = (-1 + j1)$ e z_4 no infinito!

Diagrama de Pólos e Zeros



Exemplo: Se a equação diferencial a seguir representa a solução de um circuito, determine **F(s)** e esboce o Diagrama de Pólos e Zeros.

$$\frac{d^2v_0}{dt^2} + 4\frac{dv_0}{dt} + 13v_0 = 2\frac{dv_i}{dt} + 4v_i$$

Aplicando Fasores:

$$\text{Para } v(t) \Rightarrow \dot{V} = \mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{(\sigma+j\omega)t}] = \mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]$$

$$\text{Para } \frac{dv(t)}{dt} \Rightarrow \frac{d\dot{V}}{dt} = \frac{d}{dt}\left\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\right\} = s\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\} = s\dot{V}$$

$$\text{Para } \frac{d^2v(t)}{dt^2} \Rightarrow \frac{d^2\dot{V}}{dt^2} = \frac{d}{dt}\left\{\frac{d}{dt}\left\{\mathrm{Real}\,[V_m e^{j\varphi} e^{st}]\right\}\right\} = s^2\dot{V}$$

Daí:

$$\left(s^2 + 4s + 13\right)V_0(s) = \left(2s + 4\right)V_i(s) \Rightarrow \frac{V_0(s)}{V_i(s)} = \frac{\left(2s+4\right)}{\left(s^2 + 4s + 13\right)} \quad \Rightarrow F(s) = \frac{\left(2s+4\right)}{\left(s^2 + 4s + 13\right)}$$

A F(s) possui 2 Pólos e 1 Zero finitos.

Pólos:

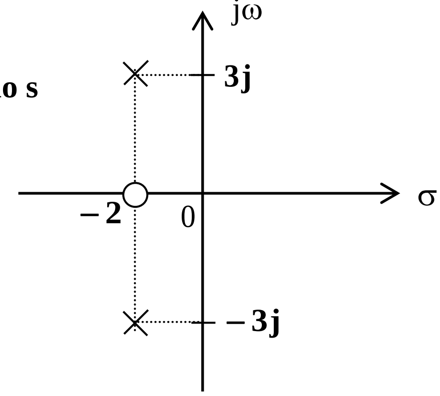
Raízes:

$$s = \frac{-4 \pm \sqrt{16-52}}{2} \qquad \begin{cases} p_1 = (-2 + j3) \\ p_2 = (-2 - j3) \end{cases}$$

$$\textbf{Zeros:} \quad 2s + 4 = 0 \Rightarrow z_1 = s_1 = -2 \text{ e } z_2 = s_2 \to \infty$$

Diagrama de Pólos e Zeros

Plano s



<u>**Exercício:**</u> Construir o Plano da Frequência Complexa considerando que um dado circuito apresente a seguinte Função de Transferência F(s),

$$F(s) = \frac{(s+3)(s^2+s+1)}{s(s+1)(s^2+2s+4)}$$

2.2) A Resposta Completa de Circuitos utilizando F(s)

A resposta completa de um circuito é a soma da resposta natural com a resposta forçada.

$$y(t) = y_n(t) + y_f(t)$$

Seja a **EDOL** que descreve a relação entrada e saída de um circuito com entrada **x(t)** (tensão ou corrente) e saída **y(t)** (tensão ou corrente).

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{(n-1)} \frac{d^{(n-1)} y}{dt^{(n-1)}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{(m-1)} \frac{d^{(m-1)} x}{dt^{(m-1)}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

Pela **Função de Transferência** tem-se que:

$$F(s) = \frac{(b_m s^m + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \dots + b_1 s + b_0)}{(a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \dots + a_1 s + a_0)}$$

Por inspeção tem-se que os coeficientes do polinômio do denominador são os coeficientes do lado esquerdo da EDOL acima. Ou seja, os **Pólos** de **F(s)** serão determinados a partir da **Equação Característica** da EDOL dada.

Resposta Natural: $y_n(t)$

A resposta natural é advinda de uma **EDOLH**, ou seja, na **EDOL** que descreve a relação entrada e saída do circuito faz-se a entrada igual a zero. Então:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{(n-1)} \frac{d^{(n-1)} y}{dt^{(n-1)}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = 0$$

Na resolução desta **EDOLH** obtém-se $a_n\lambda^n + a_{(n-1)}\lambda^{(n-1)} + \dots + a_1\lambda + a_0 = 0$ que representa a **Equação Característica** da EDOL.

Ao determinar as raízes desta **Equação Característica** obtém-se os **Pólos** da **F(s)** do circuito, os quais são as **Frequências Naturais** do circuito.

Assim, a resposta natural $y_n(t)$ poderá ser obtida por:

$$y_n(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots\dots\dots + A_n e^{p_n t}$$

- ***Se houver Freqüência Natural com duplicidade, ou igual à frequência da fonte, deve-se eliminar a dependência linear.***

Resposta Forçada: $y_f(t)$

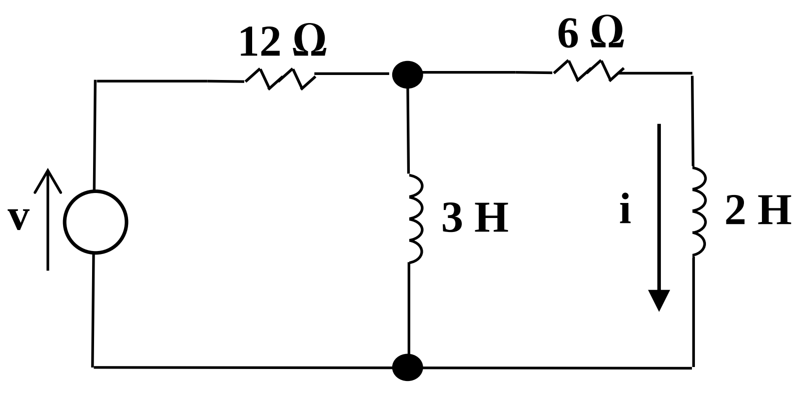
É determinada pela **Resposta Fasorial**, ou **Resposta em Estado Permanente**.

Resposta Completa:

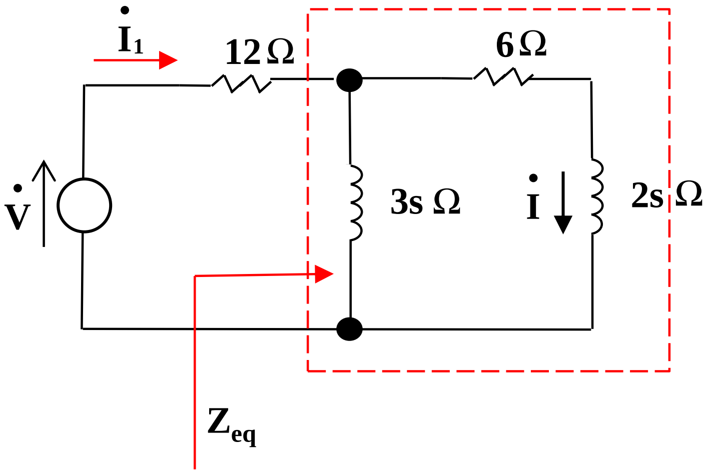
$$y(t) = y_n(t) + y_f(t) \Rightarrow y(t) = \underbrace{A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots\dots\dots + A_n e^{p_n t}}_{y_n(t)} + \underbrace{y_{Fasorial}(t)}_{y_f(t)}$$

Exemplo: Dado que **v(t) = 2e^{-2t}cos(t) V**, calcular a **resposta completa** para **i(t)**.

$$\dot{V}(s) = 2\angle 0^o \quad e \quad s = (-2 + j1)$$



Circuito no domínio da frequência:



$$\dot{I}(s) = \frac{3s}{(3s+2s+6)} \times \dot{I}_1 = \frac{3s}{(5s+6)} \times \underbrace{\frac{\dot{V}(s)}{\{12+Z_{eq}\}}}_{\dot{I}_1} \Rightarrow \dot{I}(s) = \frac{3s}{(5s+6)} \times \frac{\dot{V}(s)}{\left\{12+\frac{[3s(2s+6)]}{(3s+2s+6)}\right\}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{I}(s) = \frac{\dot{I}(s)}{\dot{V}(s)} = \frac{s}{2(s+1)(s+12)} \Rightarrow \textbf{pólos}: s_1 = -1 \text{ e } s_2 = -12 \Rightarrow i_n(t) = \left(A_1e^{-t} + A_2e^{-12t}\right) \text{ (A)}$$

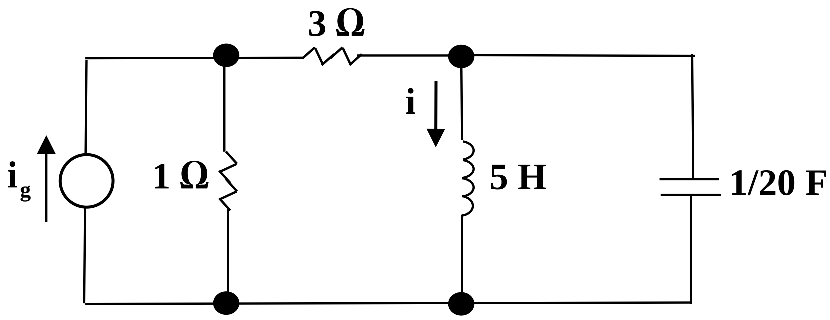
$$\text{Como } s = (-2+j1) \Rightarrow \dot{I}(s) = \frac{s\dot{V}(s)}{2(s+1)(s+12)} \Rightarrow \dot{I}(s) = \left.\frac{s(2\angle 0^\circ)}{2(s+1)(s+12)}\right|_{s=(-2+j1)} = \dot{I}(s) = 0{,}16\angle 12{,}7^\circ$$

Então a Resposta Forçada será: $i_f(t) = 0{,}16.e^{-2t}\cos(t+12{,}7^\circ)$ **(A)**

A Resposta Completa é dada por: $i(t) = A_1e^{-t} + A_2e^{-12t} + 0{,}16e^{-2t}\cos(t+12{,}7^\circ)$ **(A)**

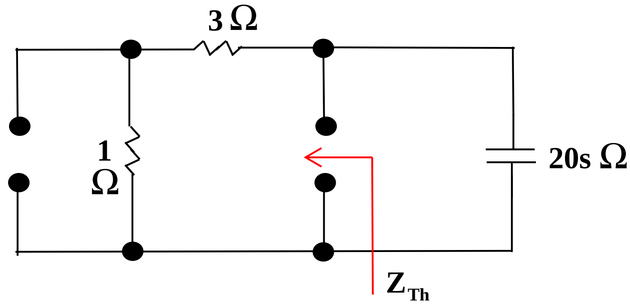
Exemplo (Resolver por Norton): Calcular a **Resposta Completa i(t)** para **t > 0**. Dados: **i(0) = 0** e $\frac{di(0)}{dt} = 8\ (A/s)$.

$i_g(t) = 10\cos(2t)$ (A)



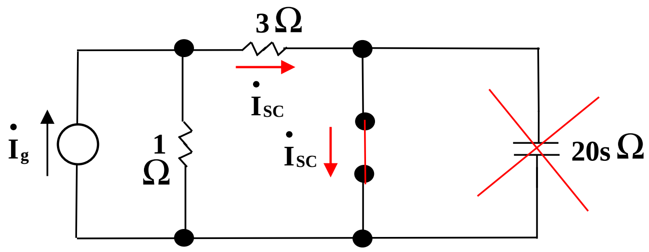
Aplica-se o Teorema de Norton.

Cálculo da Z_{Th}:



$$Z_{Th} = \frac{4\left(\frac{20}{s}\right)}{\left(4+\frac{20}{s}\right)} \Rightarrow Z_{Th} = \frac{80}{(4s+20)} \Rightarrow Z_{th} = \frac{20}{(s+5)}$$

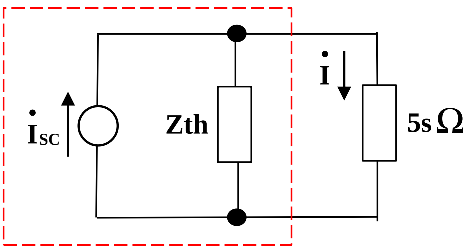
Cálculo da **I**SC:



$$\dot{I}_g = 10\angle 0^o\,(A);\; s = (0 + j2)$$

$$\dot{I}_{SC} = \frac{1}{(1+3)}\dot{I}_g \Rightarrow \dot{I}_{SC} = \frac{1}{4}I_g \Rightarrow \dot{I}_{SC} = \frac{1}{4}(10\angle 0^o) \Rightarrow \dot{I}_{SC} = \frac{5}{2}(A)$$

Circuito de Norton:



$$\dot{I} = [\frac{Z_{Th}}{(Z_{Th} + 5s)}]\dot{I}_{SC} \Rightarrow \dot{I} = [\frac{\frac{20}{(s+5)}}{(\frac{20}{(s+5)} + 5s)}](\frac{5}{2}) \Rightarrow$$

$$\dot{I} = [\frac{\frac{20}{(s+5)}}{\frac{(5s^2 + 25s + 20)}{(s+5)}}](\frac{5}{2}) \Rightarrow \dot{I} = \frac{10}{(s^2 + 5s + 4)}$$

$$\textbf{Pólos:}\; p_1 = -1 \text{ e } p_2 = -4 \Rightarrow i_n(t) = A_1e^{-t} + A_2e^{-4t}\;(A);$$

$$I = \left.\frac{10}{(s^2 + 5s + 4)}\right|_{s=(0+j2)} \Rightarrow I = 1\angle 90^o\,(A) \Rightarrow i_f(t) = \cos(2t - 90^o)\,(A)$$

$$\textbf{Daí:}\quad i(t) = A_1e^{-t} + A_2e^{-4t} + sen(2t)\quad \therefore \begin{cases} A_1 = 2 \\ A_2 = -2 \end{cases} \Rightarrow \boxed{i(t) = 2e^{-t} - 2e^{-4t} + sen(2t)\,(A)}$$

Exercício: Dado o circuito a seguir **i(t) = 15e^{-5t}cos(10t) (A)**. Calcular a **Resposta Completa v(t)** para **t > 0.** Dados: **v(0) = 0** e $\frac{dv(0)}{dt} = 0$.