

Segundo Relatório de Lab de Circuitos II

Henrique da Silva
hpsilva@proton.me

16 de fevereiro de 2023

Sumário

1	Introdução	
2	Análise preliminar	
2.1	O Circuito	
2.2	WxMaxima	
2.3	LTSpice	
2.3.1	Análise em $40Hz$	
2.3.2	Análise em $100Hz$	
2.3.3	Análise em $200Hz$	
2.3.4	Análise em $400Hz$	
2.3.5	Análise em $480Hz$	
2.3.6	Análise em $550Hz$	
2.3.7	Análise em $1100Hz$	
2.3.8	Análise em $2200Hz$	
2.3.9	Análise em $5500Hz$	
2.3.10	Análise em $11000Hz$	
2.3.11	Tabela de resultados	
3	Medicoes em laboratorio	
3.1	Tabela de componentes	
3.2	Médicos no osciloscópio	
3.2.1	Análise em $100Hz$	
3.2.2	Análise em $200Hz$	
3.2.3	Análise em $400Hz$	
3.2.4	Análise em $480Hz$	
3.2.5	Análise em $550Hz$	
3.2.6	Análise em $1100Hz$	
3.2.7	Análise em $2200Hz$	
3.2.8	Análise em $5500Hz$	
3.2.9	Análise em $11000Hz$	
3.2.10	Tabela de resultados	
3.3	Comparação com valores teóricos	
3.4	Gráficos	
3.4.1	Escala log-log da magnitude de $H(j\omega)$ e f	
3.4.2	Escala semilog da fase de $H(j\omega)$ e f	

4 Conclusões

1 Introdução

Neste relatório, vamos discutir a função transferência na resposta em regime permanente senoidal de um circuito.

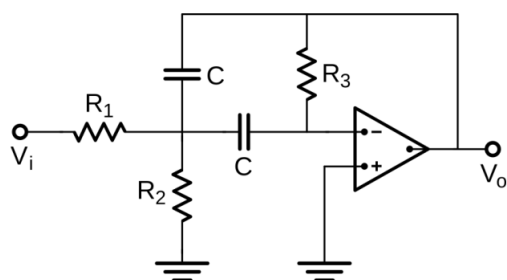
Todos arquivos utilizados para criar este relatório, é o relatorio em si estão em: https://github.com/Shapis/ufpe_ee/tree/main/5thsemester/ElectromagneticMeasurements/Relatorios

2 Análise preliminar

Utilizarei o WxMaxima e LTSpice para fazer a análise teórica do circuito antes de montá-lo fisicamente.

Após terminar as análises compararei os resultados obtidos entre os dois para ver se os resultados são coerentes.

2.1 O Circuito



2.2 WxMaxima

Primeiro fiz manualmente a análise nodal do circuito que vamos construir, e passei ele para o domínio da frequência.

$$\begin{aligned} \text{eq1: } 0 &= ((V_a - V_i)/R_1) + V_a/R_2 + (V_a / (1/(s \cdot C))) + ((V_a - V_0) / (1/(s \cdot C))) \\ \text{eq2: } 0 &= -V_a / (1/(s \cdot C)) - V_0 / R_3 ; \end{aligned}$$

$$0 = C (V_a - V_0) s + C V_a s + \frac{V_a - V_i}{R_1} + \frac{V_a}{R_2}$$

$$0 = -C V_a s - \frac{V_0}{R_3}$$

Após isso resolvi para V_a e V_0

$$\text{results: linsolve}([eq1, eq2], [V_a, V_0]) ;$$

$$V_a = \frac{R_2 V_i}{C^2 R_1 R_2 R_3 s^2 + 2 C R_1 R_2 s + R_2 + R_1}$$

$$V_0 = - \frac{C R_2 R_3 V_i s}{C^2 R_1 R_2 R_3 s^2 + 2 C R_1 R_2 s + R_2 + R_1}$$

Daqui criamos nossa função transferência H .

$$H: \text{at}(V_0/V_i, \text{results});$$

$$- \frac{C R_2 R_3 s}{C^2 R_1 R_2 R_3 s^2 + 2 C R_1 R_2 s + R_2 + R_1}$$

Após isso fiz a substituição $S = iw$ para poder calcular a magnitude e seu ângulo de fase.

$$\begin{aligned} \text{cabs}(Hw); \\ \text{carg}(Hw); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{|C| |R_2| |R_3| |w|}{\sqrt{(-C^2 R_1 R_2 R_3 w^2 + R_2 + R_1)^2 + 4 C^2 R_1^2 R_2^2 w^2}} \\ & - \text{atan2}\left(\frac{2 C R_1 R_2 w}{\sqrt{(-C^2 R_1 R_2 R_3 w^2 + R_2 + R_1)^2 + 4 C^2 R_1^2 R_2^2 w^2}}, \frac{-C^2 R_1 R_2 R_3 w^2 + R_2 + R_1}{\sqrt{(-C^2 R_1 R_2 R_3 w^2 + R_2 + R_1)^2 + 4 C^2 R_1^2 R_2^2 w^2}}\right) + \text{atan2}(0, w) + \text{atan2}(0, R_3) + \text{atan2}(0, R_2) + \\ & \text{atan2}(0, C) - \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Agora com a função Hw em mãos podemos substituir os valores dos resistores e do capacitor pelos que utilizaremos.

$$Hw: \text{at}(Hw, [C = 10^{-7}, R_1=470, R_2=470, R_3=47000]);$$

$$- \frac{2209 \% i w}{1000 \left(- \frac{103823 w^2}{1000000000} + \frac{2209 \% i w}{50000} + 940 \right)}$$

Como nosso objetivo é analisar a magnitude e o ângulo de fase da função transferência, podemos extrair disto a parte real e imaginária da equação acima.

$$\begin{aligned} \text{mod: float(cabs}(Hw)); \\ \text{arg: float(carg}(Hw)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2.209 |w|}{\sqrt{(940.0 - 1.03823 \cdot 10^{-4} w^2)^2 + 0.0019518724 w^2}} \\ & - 1.0 \text{atan2}\left(\frac{0.04418 w}{\sqrt{(940.0 - 1.03823 \cdot 10^{-4} w^2)^2 + 0.0019518724 w^2}}, \frac{940.0 - 1.03823 \cdot 10^{-4} w^2}{\sqrt{(940.0 - 1.03823 \cdot 10^{-4} w^2)^2 + 0.0019518724 w^2}}\right) + \text{atan2}(0.0, w) - 1.570796326794897 \end{aligned}$$

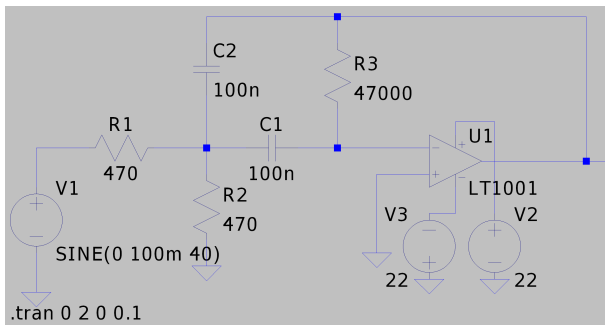
E Finalmente com estas funções em mãos, substitui a frequência com as frequências perdidas.

$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 40));$	0.5947268235758381
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 40));$	-1.582691143757437
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 100));$	1.543131753306023
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 100));$	-1.601663863417098
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 200));$	3.567859702321201
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 200));$	-1.642214216696675
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 400));$	18.19564498373385
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 400));$	-1.943261736655792
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 480));$	49.97330118029696
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 480));$	-3.174273654878822
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 550));$	22.68537225346826
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 550));$	-4.241467736328001
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 1100));$	3.787439578929809
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 1100));$	-4.636567561550356
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 2200));$	1.614934630493625
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 2200));$	-4.680084669441065
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 5500));$	0.6203421045354849
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 5500));$	-4.699981819974953
$\text{float(at(mod, } w = 2 \cdot \pi \cdot 11000));$	0.308421927263176
$\text{float(at(arg, } w = 2 \cdot \pi \cdot 11000));$	-4.706220502720951

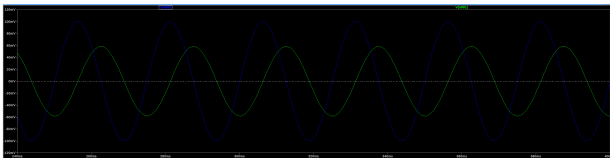
Com isto temos em mãos as magnitudes e ângulos de fase da função transferência para um gama de frequências.

2.3 LTSpice

No LTSpice montaremos o circuito e mediremos novamente o ângulo de fase e sua magnitude.

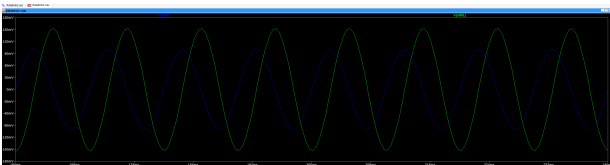


2.3.1 Analise em 40Hz



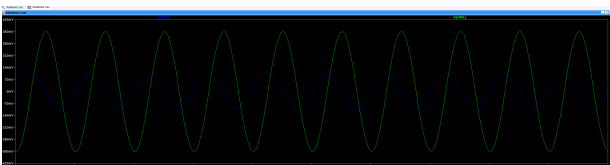
$$\begin{aligned} V_f &= 117.10115mV \\ V_i &= 199.76772mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 0.586186547 \\ \text{Fase} &= -1.68605608 \end{aligned}$$

2.3.2 Analise em 100Hz



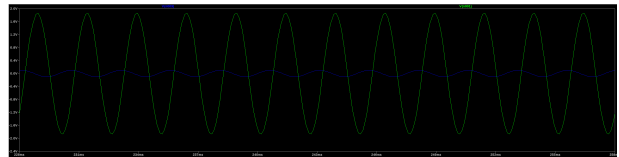
$$\begin{aligned} V_f &= 303.64554mV \\ V_i &= 199.34196mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 1.52323946 \\ \text{Fase} &= -1.60226153 \end{aligned}$$

2.3.3 Analise em 200Hz



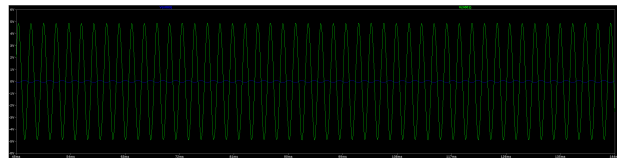
$$\begin{aligned} V_f &= 704.6312mV \\ V_i &= 199.46039mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 3.53268737 \\ \text{Fase} &= -1.67119113 \end{aligned}$$

2.3.4 Analise em 400Hz



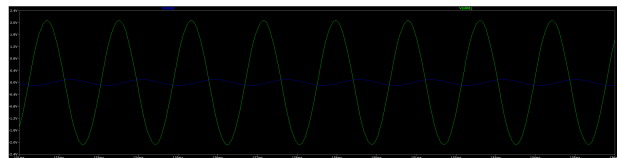
$$\begin{aligned} V_f &= 3.7148299V \\ V_i &= 199.72118mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 18.6104333 \\ \text{Fase} &= -2.06820459 \end{aligned}$$

2.3.5 Analise em 480Hz



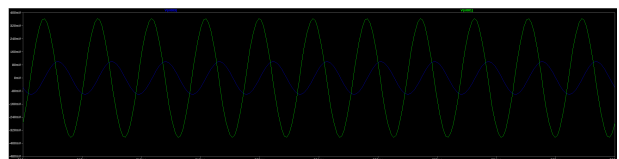
$$\begin{aligned} V_f &= 9.7253442V \\ V_i &= 199.42436mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 48.7670824 \\ \text{Fase} &= -3.13491022 \end{aligned}$$

2.3.6 Analise em 550Hz



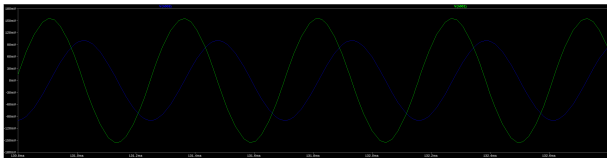
$$\begin{aligned} V_f &= 4.1496957V \\ V_i &= 199.35122mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 20.8160035 \\ \text{Fase} &= -2.01155708 \end{aligned}$$

2.3.7 Analise em 1100Hz



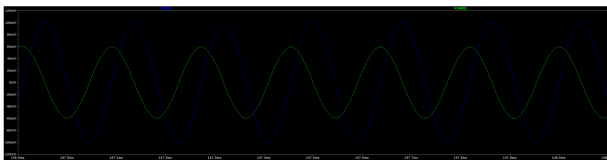
$$\begin{aligned} V_f &= 724.81506mV \\ V_i &= 199.55853mV \\ \text{Magnitude}(H) &= 3.6320926 \\ \text{Fase} &= -1.65494612 \end{aligned}$$

2.3.8 Analise em 2200Hz



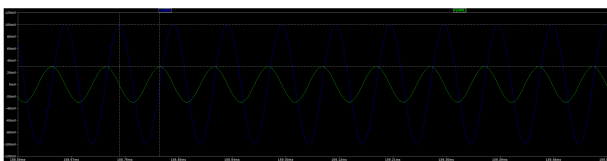
$$\begin{aligned} V_f &= 310.31854mV \\ V_i &= 199.32175mV \\ Magnitude(H) &= 1.55687244 \\ Fase &= -4.68032157 \end{aligned}$$

2.3.9 Analise em 5500Hz



$$\begin{aligned} V_f &= 118.93005mV \\ V_i &= 199.79451mV \\ Magnitude(H) &= 0.595261852 \\ Fase &= 1.60939706 \end{aligned}$$

2.3.10 Analise em 11000Hz



$$\begin{aligned} V_f &= 59.198177mV \\ V_i &= 199.57788mV \\ Magnitude(H) &= 0.296616925 \\ Fase &= -4.65829159 \end{aligned}$$

2.3.11 Tabela de resultados

Freq (Hz)	— H (jw) —	Fase (H)
40	0.586186547	-1.68605608
100	1.52323946	-1.60226153
200	3.53268737	-1.67119113
400	18.6104333	-2.06820459
480	48.7670824	-3.1349102
550	20.8160035	-2.01155708
1100	3.6320926	-1.65494612
2200	1.55687244	-4.68032157
5500	0.595261852	1.60939706
11000	0.296616925	-4.65829159

3 Medicoes em laboratorio

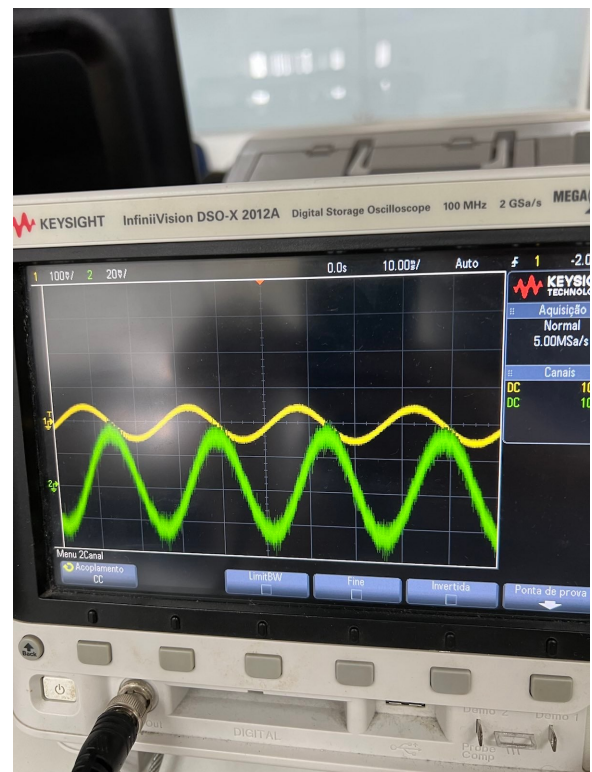
Vamos inicialmente fazer as medições dos componentes a serem usados.

3.1 Tabela de componentes

$$\begin{aligned} C_1 &= 104.89nF \\ C_2 &= 101.28nF \\ R_1 &= 465.1\omegaega \\ R_2 &= 473.7\omegaega \\ R_3 &= 46.25\omegaega \end{aligned}$$

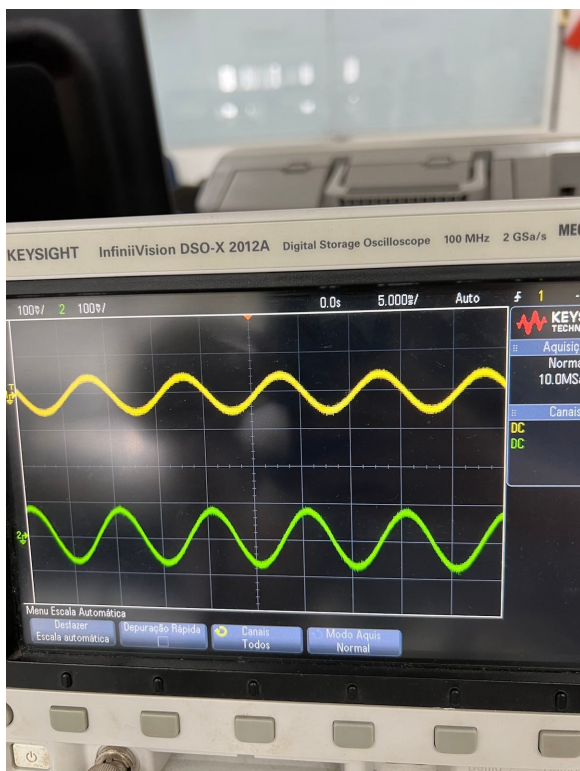
3.2 Médicos no osciloscópio

Analise em 40Hz



$$\begin{aligned} V_f &= 0.565V \\ V_i &= 0.092V \\ Magnitude(H) &= 0.473 \\ Fase &= -1.5833627 \end{aligned}$$

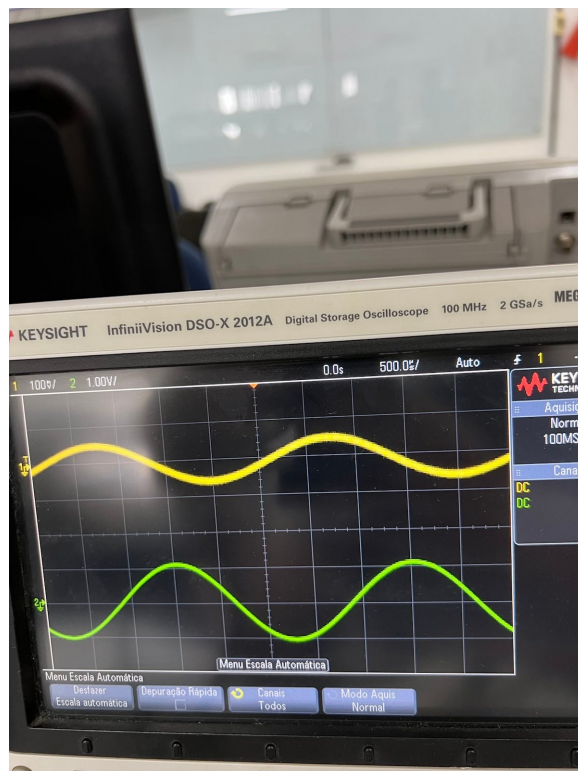
3.2.1 Análise em 100Hz



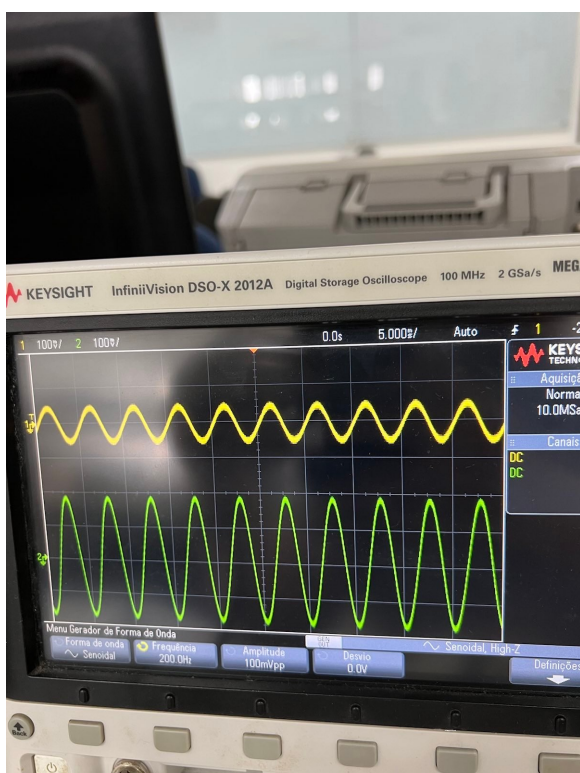
$$\begin{aligned} V_f &= 3.5425V \\ V_i &= 0.097V \\ \text{Magnitude}(H) &= 3.4455 \\ \text{Fase} &= -1.55822996 \end{aligned}$$

3.2.3 Análise em 400Hz

$$\begin{aligned} V_f &= 1.52V \\ V_i &= 0.09425V \\ \text{Magnitude}(H) &= 1.42575 \\ \text{Fase} &= -1.57079633 \end{aligned}$$

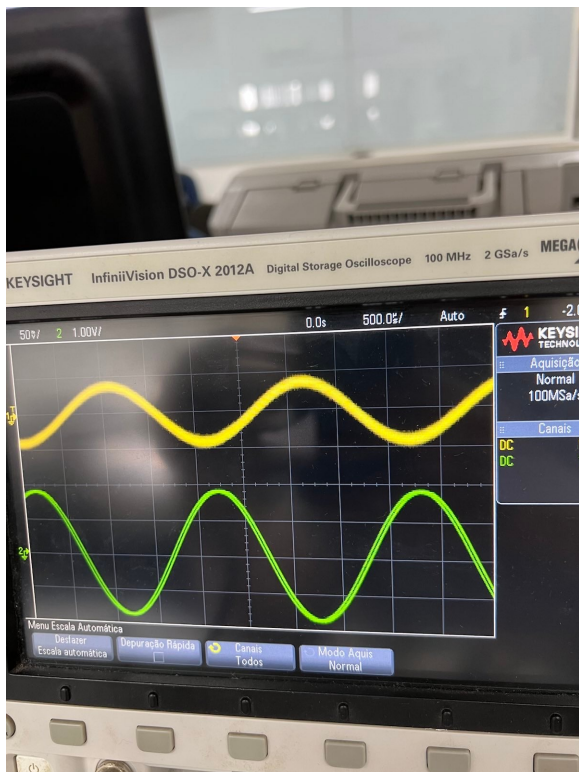


3.2.2 Análise em 200Hz



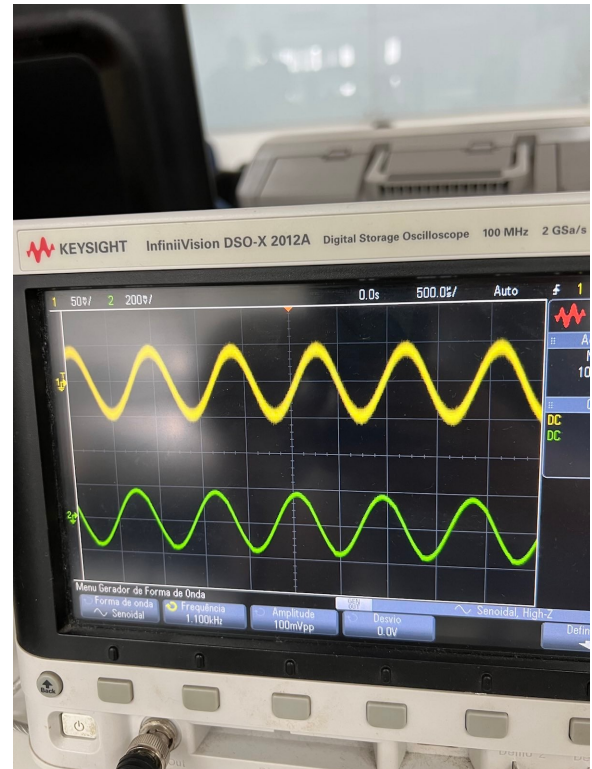
$$\begin{aligned} V_f &= 21.5V \\ V_i &= 0.106V \\ \text{Magnitude}(H) &= 21.394 \\ \text{Fase} &= -1.98548656 \end{aligned}$$

3.2.4 Analise em 480Hz



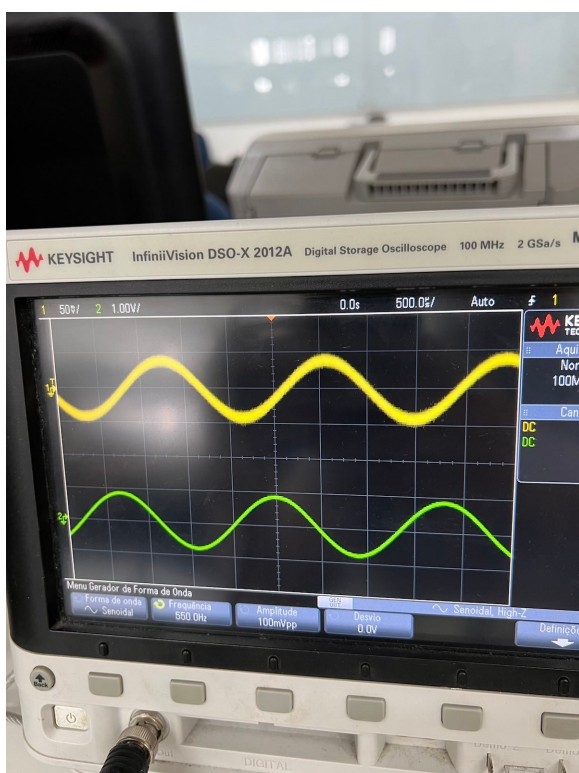
$$\begin{aligned} V_f &= 16.8V \\ V_i &= 0.082V \\ Magnitude(H) &= 16.71800 \\ Fase &= 2.07345115 \end{aligned}$$

3.2.6 Analise em 1100Hz



$$\begin{aligned} V_f &= 36.75V \\ V_i &= 0.1V \\ Magnitude(H) &= 36.65 \\ Fase &= -3.40799971 \end{aligned}$$

3.2.5 Analise em 550Hz



$$\begin{aligned} V_f &= 3.3175V \\ V_i &= 0.088V \\ Magnitude(H) &= 3.2295 \\ Fase &= 1.58964588 \end{aligned}$$

3.2.7 Analise em 2200Hz

Eu achei que tinha tirado fotos das frequências 2200Hz e 11000Hz mas não consegui achá-las na confecção do relatório.

$$\begin{aligned} V_f &= 1.4675V \\ V_i &= 0.8925V \\ Magnitude(H) &= 0.575 \\ Fase &= 1.65876092 \end{aligned}$$

3.2.8 Analise em 5500Hz

$V_f =$	0.7V
$V_i =$	0.09V
$Magnitude(H) =$	0.61
$Fase =$	0.552920307

3.2.9 Analise em 11000Hz

$V_f =$	0.09V
$V_i =$	199.57788mV
$Magnitude(H) =$	0.04325V
$Fase =$	1.24407069

3.2.10 Tabela de resultados

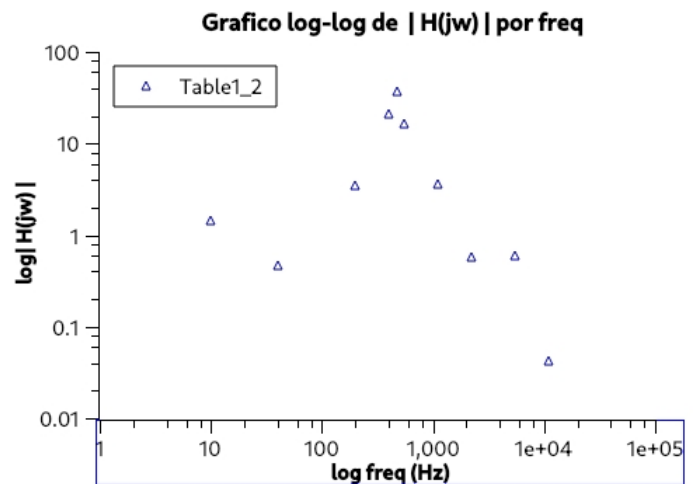
Freq (Hz)	H (jw)	Fase (H)
40	0.473	-1.5833627
100	1.42575	-1.57079633
200	3.4455	-1.55822996
400	21.394	-1.98548656
480	36.65	-3.40799971
550	16.71800	2.07345115
1100	3.6320926	1.58964588
2200	0.575	1.65876092
5500	0.61	0.552920307
11000	0.04325	1.24407069

3.3 Comparação com valores teóricos

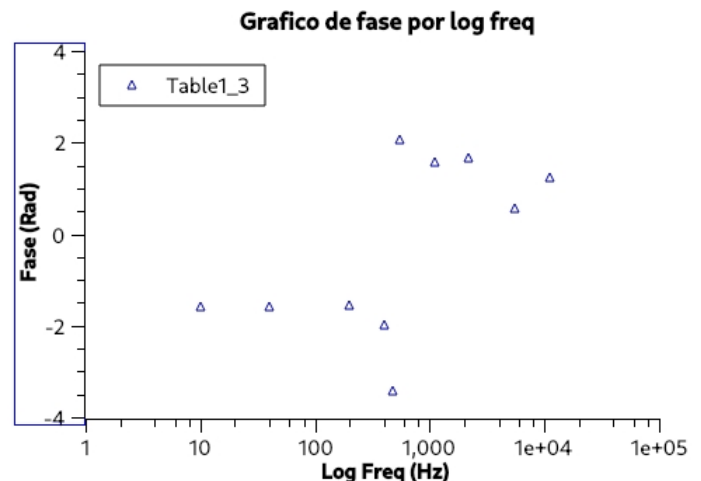
Podemos ver que os valores de magnitude ficaram coerentes com ambas análises teóricas, e os de fases para frequências baixas também, mas tive problemas para entender o sentido do sinal da fase a medida que a frequência subia.

3.4 Gráficos

3.4.1 Escala log-log da magnitude de H(jw) e f



3.4.2 Escala semilog da fase de H(jw) e f



4 Conclusões

Conseguimos com sucesso fazer a análise numérica por dois meios, utilizando o LTSpice e WxMaxima, e comparamos os resultados.

Nos resultados práticos, a magnitude da função transferência foi coerente com os resultados esperados, porém a fase em frequências baixas se manteve coerente, porém em frequências altas ela se tornou inconsistente.

Creio que por erros das minhas medidas, eu não fui consistente em usar o mesmo cursor na mesma onda de entrada ou saída.

A frequência de saída começou adiantada em relação a frequência de entrada, e à medida que aumentamos a frequência ela se atrasa até que é ultrapassada pela entrada.

Creio que isso faria com que a fase se inverta.

Mas em suma creio que tivemos sucesso em nos familiarizar com as ferramentas de análise de circuitos elétricos numéricos.