

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia



ENG10001  
Circuitos Elétricos I-C

---

## Trabalho Bônus 1

### Associação de Quadripolos

---

Pedro Lubaszewski Lima (00341810)

Turma A

8 de dezembro de 2024

# Sumário

1.1	Circuitos Sorteados . . . . .	2
2.1	Circuito Equivalente de Thevénin da Entrada . . . . .	4
3.1	Análise da Associação de Quadripolos . . . . .	7
3.1.1	Representação dos Circuitos . . . . .	7
3.1.2	Parâmetros do Quadripolo Q2 . . . . .	7
3.1.3	Parâmetros do Quadripolo Q1 . . . . .	11
3.1.4	União dos Quadripolos . . . . .	13
4.1	Circuito Equivalente de Norton da Saída . . . . .	14
5.1	Ganho de Tensão da Saída $V_2/V_1$ . . . . .	16

## 1.1 Circuitos Sorteados

Primeiramente, com o meu número de matrícula **0 0 3 4 1 8 1 0**, observa-se os seguintes dígitos sorteadores:

- $N_1 = 3$ ;
- $N_2 = 4$ ;
- $N_3 = 1$ ;
- $N_4 = 8$ ;
- $N_5 = 1$ ;
- $N_6 = 0$ .

A partir deles, sabe-se que os circuito a serem analisados são os seguintes:

- Circuito de Entrada:

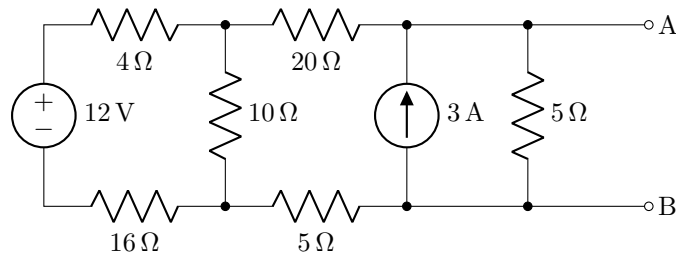


Figura 1: Circuito de Entrada 2

- Primeira Topologia de Quadripolo:

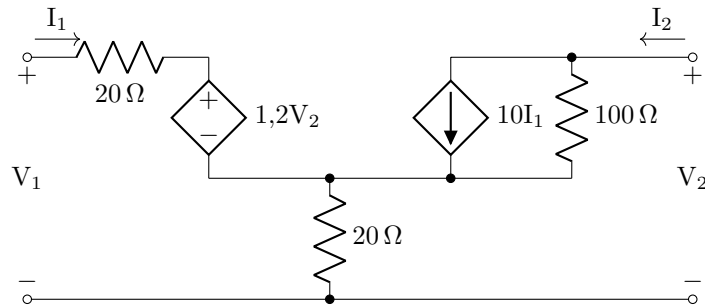


Figura 2: Topologia de Quadripolo 2 (Q1)

- Segunda Topologia de Quadripolo:

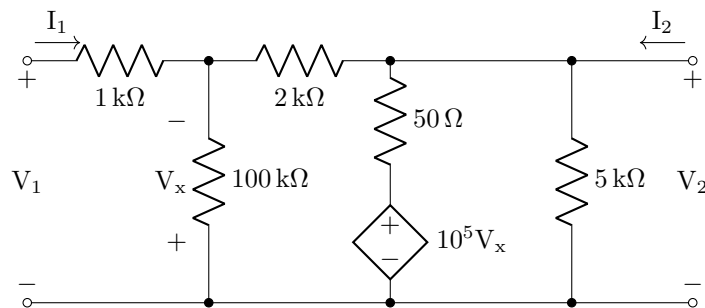


Figura 3: Topologia de Quadripolo 3 (Q2)

- Associação dos Quadripolos:

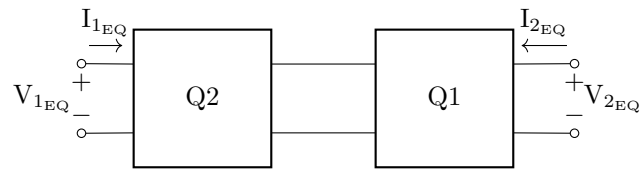


Figura 4: Associação dos Quadripolos Q1 e Q2

- Circuito de Saída:

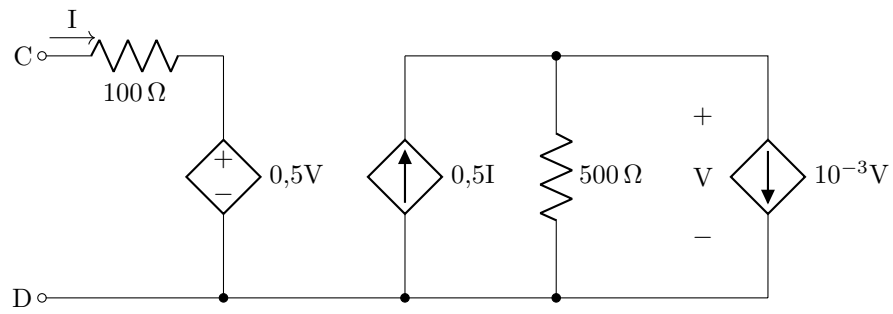
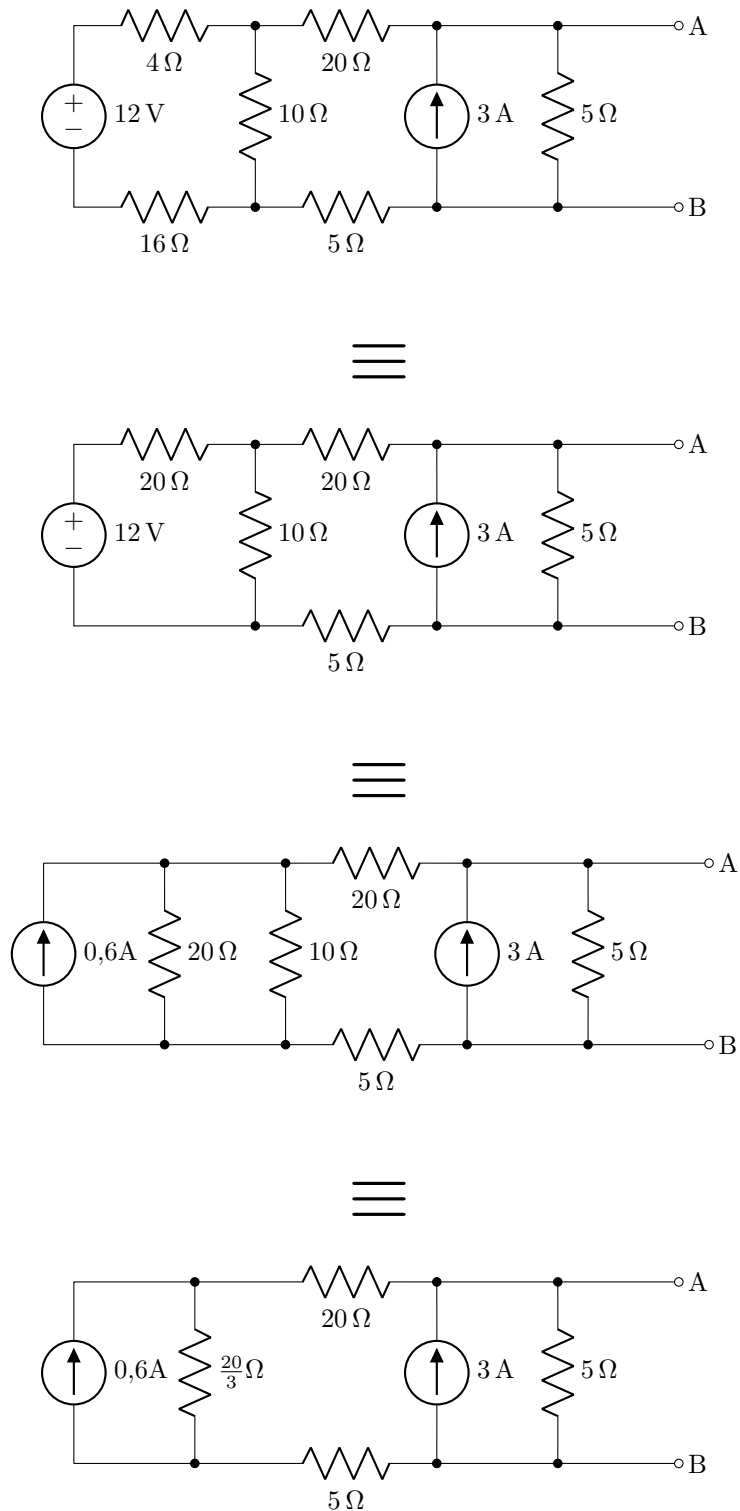
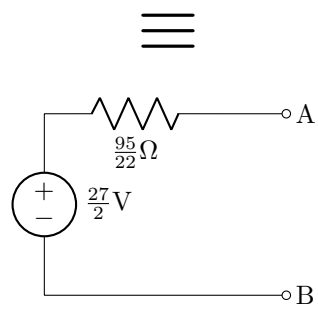
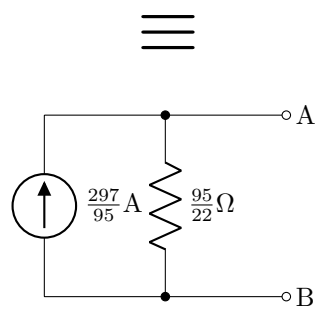
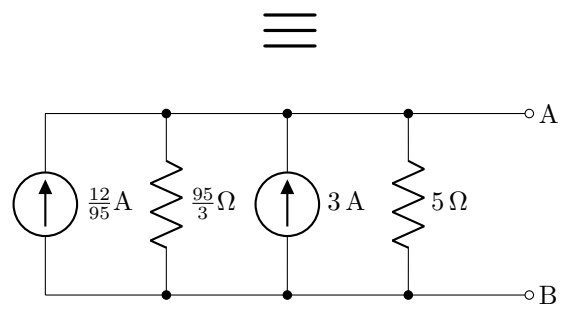
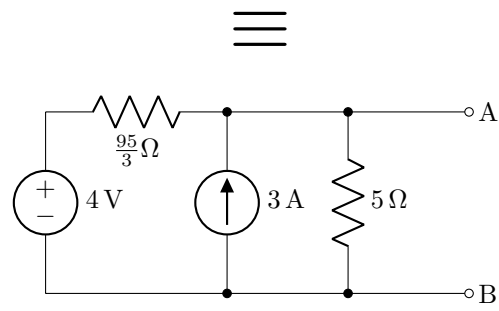
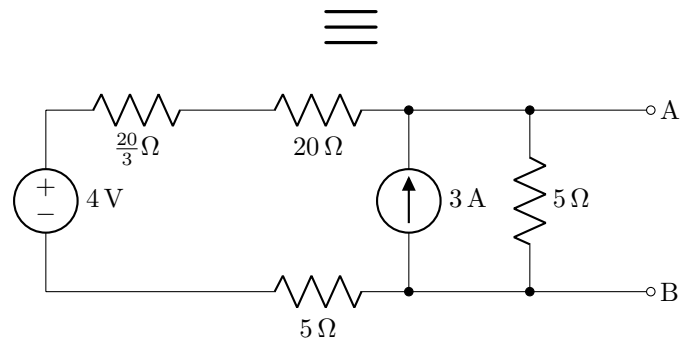


Figura 5: Circuito de Saída 1

## 2.1 Circuito Equivalente de Thevénin da Entrada

Partindo do circuito de entrada sorteado (figura 1), pode-se adotar a estratégia de transformação de fontes repetidas vezes até chegar-se no circuito equivalente de Thevénin:





Assim, com a sequência ilustrada acima, chegou-se ao circuito equivalente de Thevénin da entrada com  $V_{TH} = \frac{27}{2}\text{V} = 13,5\text{V}$  e  $R_{TH} = \frac{95}{22}\Omega = 4,318\Omega$ .

\*

### 3.1 Análise da Associação de Quadripolos

#### 3.1.1 Representação dos Circuitos

Dada a associação de quadripolos sorteada, é mais prudente representar ambos os quadripolos com os parâmetros  $a$ , visto que o quadripolo equivalente apresenta parâmetros da seguinte forma:

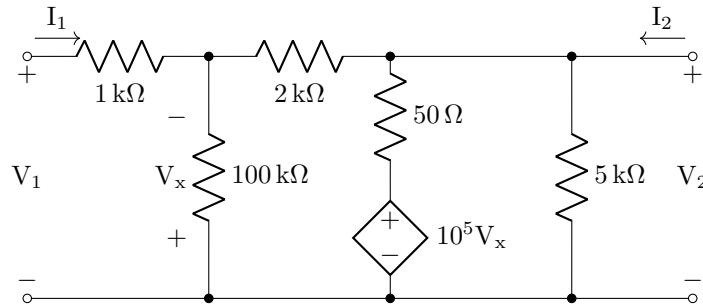
$$\begin{aligned} a_{11} &= a'_{11}a''_{11} + a'_{12}a''_{21} & a_{12} &= a'_{11}a''_{12} + a'_{12}a''_{22} \\ a_{21} &= a'_{21}a''_{11} + a'_{22}a''_{21} & a_{22} &= a'_{21}a''_{12} + a'_{22}a''_{22} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde o primeiro quadripolo (Q2) da figura 4 tem os parâmetros  $a'$  e o segundo quadripolo (Q1) tem os parâmetros  $a''$ . Além disso, os parâmetros  $a$  representam as variáveis dos quadripolos da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} V_1 &= a_{11}V_2 - a_{12}I_2 \\ I_1 &= a_{21}V_2 - a_{22}I_2 \end{aligned} \quad (2)$$

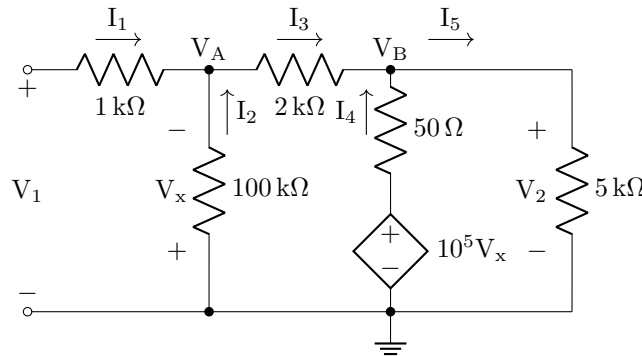
#### 3.1.2 Parâmetros do Quadripolo Q2

Com o segundo quadripolo sorteado (Q2), calcular-se-á os seus parâmetros  $a'$  para realizar a sua associação com o primeiro quadripolo (Q1):



#### Parâmetros $a'_{11}$ e $a'_{21}$

Através da equação 2, para calcular os parâmetros  $a'_{11}$  e  $a'_{21}$ , basta zerar a corrente de saída  $I_2$  e determinar os valores de  $V_1$  e  $I_1$  em função da variável restante  $V_2$ . Calcular-se-á essas variáveis através da análise nodal:



Nesse caso, com esses nós e essas correntes, sabe-se que:

$$V_x = -V_A$$

$$V_2 = V_B$$

Equações observáveis de cara no circuito. Além disso, para modelar as correntes em função de  $V_A$  e  $V_B$ :

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_1 - V_A}{1\text{k}\Omega} \\ I_2 &= \frac{V_x}{100\text{k}\Omega} = -\frac{V_A}{100\text{k}\Omega} \end{aligned}$$



$$I_3 = \frac{V_A - V_B}{2k\Omega}$$

$$I_4 = \frac{10^5 \cdot V_x - V_B}{50\Omega} = -\frac{10^5 \cdot V_A + V_B}{50\Omega}$$

$$I_5 = \frac{V_B}{5k\Omega}$$

Com essas correntes, pode-se utilizar a Lei dos Nós para cada nó:

- Nó com  $V_A$ :

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$\Rightarrow \frac{V_1 - V_A}{1k\Omega} - \frac{V_A}{100k\Omega} = \frac{V_A - V_B}{2k\Omega}$$

$$\Rightarrow \frac{100V_1 - 100V_A - V_A}{100k\Omega} = \frac{50V_A - 50V_B}{100k\Omega}$$

$$\Rightarrow 100V_1 - 101V_A = 50V_A - 50V_B$$

$$\Rightarrow 151V_A - 50V_B = 100V_1 \quad (I)$$

- Nó com  $V_B$ :

$$I_3 + I_4 = I_5$$

$$\Rightarrow \frac{V_A - V_B}{2k\Omega} - \frac{10^5 \cdot V_A + V_B}{50\Omega} = \frac{V_B}{5k\Omega}$$

$$\Rightarrow \frac{5V_A - 5V_B}{10k\Omega} - \frac{2 \cdot 10^7 \cdot V_A + 200V_B}{10k\Omega} = \frac{2V_B}{10k\Omega}$$

$$\Rightarrow 5V_A - 5V_B - 2 \cdot 10^7 \cdot V_A - 200V_B = 2V_B$$

$$\Rightarrow V_A = -\frac{207}{19999995}V_B \quad (II)$$

Substituindo a equação II na equação I:

$$151 \cdot \left( -\frac{207}{19999995}V_B \right) - 50V_B = 100V_1$$

$$\Rightarrow -\frac{31257}{19999995}V_B - 50V_B = 100V_1$$

$$\Rightarrow -\frac{31257}{19999995}V_B - \frac{999999750}{19999995}V_B = \frac{1999999500}{19999995}V_1$$

$$\Rightarrow -1000031007V_B = 1999999500V_1$$

$$\Rightarrow V_B = -\frac{1999999500}{1000031007}V_1 \quad (III)$$

Utilizando o valor obtido na equação III em II:

$$V_A = -\frac{207}{19999995} \cdot \left( -\frac{1999999500}{1000031007}V_1 \right)$$

$$\Rightarrow V_A = \frac{20700}{1000031007}V_1 \quad (IV)$$

Com essas equações acima, pode-se obter as variáveis de saída (e consequentemente os parâmetros) da seguinte forma:

$$V_B = V_2$$

$$\Rightarrow -\frac{1999999500}{1000031007}V_1 = V_2$$

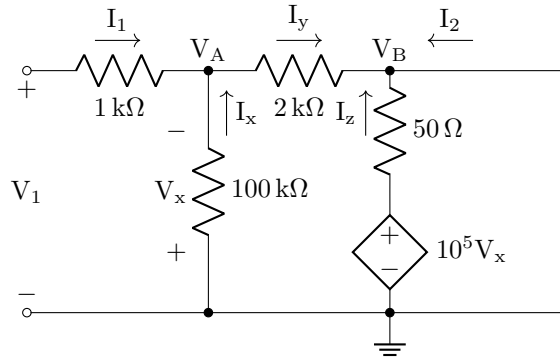
$$\Rightarrow V_1 = -\frac{1000031007}{1999999500}V_2$$

$$\Rightarrow a'_{11} = -\frac{1000031007}{1999999500} \approx -0,5$$

$$\begin{aligned}
I_1 &= \frac{V_1 - V_A}{1\text{k}\Omega} \\
\Rightarrow I_1 &= \frac{V_1 - \frac{20700}{1000031007}V_1}{1\text{k}\Omega} \\
\Rightarrow I_1 &= \frac{1000031007V_1 - 20700V_1}{1000031007000\Omega} \\
\Rightarrow I_1 &= \frac{1000010307V_1}{1000031007000\Omega} \\
\Rightarrow I_1 &= \frac{1000010307}{1000031007000\Omega} \left( -\frac{1000031007}{199999500}V_2 \right) \\
\Rightarrow I_1 &= -\frac{1,000041314 \cdot 10^{18}}{2,000061514 \cdot 10^{21}\Omega}V_2 \\
\Rightarrow I_1 &= -\frac{1000041314}{2000061514000\Omega}V_2 \\
\Rightarrow a'_{21} &= -\frac{1000041314}{2000061514000}\text{S} \approx -0,0005\text{S} = -0,5\text{mS}
\end{aligned}$$

**Parâmetros  $a'_{12}$  e  $a'_{22}$**

Agora, zerando a tensão  $V_2$ , calcular-se-á os parâmetros  $a'_{12}$  e  $a'_{22}$  a partir de mais uma análise nodal. Isto é, encontrando  $V_1$  e  $I_1$  em função de  $I_2$ :



Com essa configuração, observa-se que:

$$V_B = V_2 = 0\text{V}$$

Por conta disso, a tensão sobre o resistor de  $50\Omega$  deve ter tensão de mesma magnitude e sentido contrário ao da fonte dependente abaixo dele. Com isso:

$$I_z = \frac{10^5 \cdot V_x}{50\Omega}$$

E o resto pode-se analisar normalmente:

$$\begin{aligned}
I_y &= \frac{V_A}{2\text{k}\Omega} \\
I_x &= \frac{V_x}{100\text{k}\Omega} = -\frac{V_A}{100\text{k}\Omega} \\
I_1 &= \frac{V_1 - V_A}{1\text{k}\Omega}
\end{aligned}$$

- Nó com  $V_A$ :

$$\begin{aligned}
I_1 + I_x &= I_y \\
\Rightarrow \frac{V_1 - V_A}{1\text{k}\Omega} - \frac{V_A}{100\text{k}\Omega} &= \frac{V_A}{2\text{k}\Omega} \\
\Rightarrow \frac{100V_1 - 100V_A - V_A}{100\text{k}\Omega} &= \frac{50V_A}{100\text{k}\Omega}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow 100V_1 - 101V_A = 50V_A \\
&\Rightarrow 151V_A = 100V_1 \\
&\Rightarrow V_1 = \frac{151}{100}V_A
\end{aligned} \tag{I}$$

• Nó com  $V_B$ :

$$\begin{aligned}
&I_y + I_z + I_2 = 0 \\
&\Rightarrow \frac{V_A}{2k\Omega} + \frac{10^5 \cdot V_x}{50\Omega} + I_2 = 0 \\
&\Rightarrow \frac{V_A}{2k\Omega} - \frac{10^5 \cdot V_A}{50\Omega} + I_2 = 0 \\
&\Rightarrow \frac{V_A}{2k\Omega} - \frac{4 \cdot 10^6 \cdot V_A}{2k\Omega} + \frac{2k\Omega \cdot I_2}{2k\Omega} = 0 \\
&\Rightarrow 3999999V_A = 2000\Omega \cdot I_2 \\
&\Rightarrow V_A = \frac{2000}{3999999}\Omega \cdot I_2
\end{aligned} \tag{II}$$

Utilizando a equação II em I:

$$\begin{aligned}
V_1 &= \frac{151}{100} \cdot \left( \frac{2000}{3999999}\Omega \cdot I_2 \right) \\
&\Rightarrow V_1 = \frac{3020}{3999999}\Omega \cdot I_2
\end{aligned}$$

Cuidando com o sinal inerente da equação 2:

$$a'_{12} = -\frac{3020}{3999999}\Omega$$

Para finalizar:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \frac{V_1 - V_A}{1k\Omega} \\
&\Rightarrow I_1 = \frac{\frac{151}{100}V_A - V_A}{1k\Omega} \\
&\Rightarrow I_1 = \frac{151V_A - 100V_A}{100k\Omega} \\
&\Rightarrow I_1 = \frac{51V_A}{100k\Omega} \\
&\Rightarrow I_1 = \frac{51 \left( \frac{2000}{3999999}\Omega \cdot I_2 \right)}{100k\Omega} \\
&\Rightarrow I_1 = \frac{102}{399999900}I_2
\end{aligned}$$

Relembrando do sinal da equação 2:

$$a'_{22} = -\frac{102}{399999900}$$

**Unindo os parâmetros  $a'$  do quadripolo Q2**

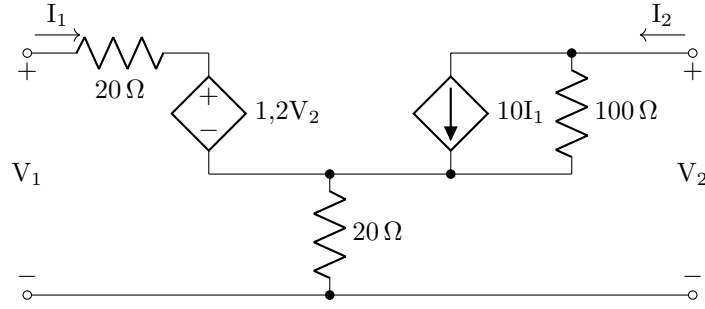
Concluindo, abaixo estão os parâmetros calculados para esse quadripolo:

$$\begin{aligned}
a'_{11} &= -\frac{1000031007}{1999999500} & a'_{12} &= -\frac{3020}{3999999}\Omega \\
a'_{21} &= -\frac{1000041314}{2000061514000}S & a'_{22} &= -\frac{102}{399999900}
\end{aligned} \tag{3}$$

\*

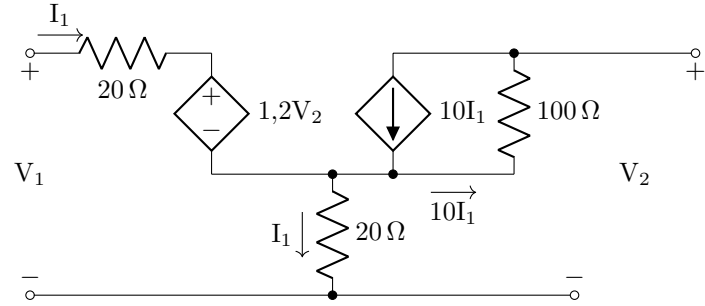
### 3.1.3 Parâmetros do Quadripolo Q1

Após calcular os parâmetros  $a'$  do quadripolo Q2 mostrados na equação 3, calcular-se-á os parâmetros  $a''$  do quadripolo Q1:



**Parâmetros  $a''_{11}$  e  $a''_{21}$**

Através da equação 2, zera-se-á o valor de  $I_2$  para calcular os dois primeiros parâmetros  $a''$ , colocando  $V_1$  e  $I_1$  em função da variável de entrada  $V_2$ :



Pelo desenho acima, é perceptível que, pela malha direita:

$$-V_2 - 10 \cdot I_1 \cdot 100\Omega + I_1 \cdot 20\Omega = 0$$

$$\Rightarrow -1000\Omega \cdot I_1 + 20\Omega \cdot I_1 = V_2$$

$$\Rightarrow -980\Omega \cdot I_1 = V_2$$

$$\Rightarrow I_1 = -\frac{1}{980}\text{S} \cdot V_2$$

$$\Rightarrow a''_{21} = -\frac{1}{980}\text{S} \approx -0,001\text{S} = -1\text{mS}$$

Fazendo a malha do lado esquerdo:

$$-V_1 + I_1 \cdot 20\Omega + 1,2 \cdot V_2 + I_1 \cdot 20\Omega = 0$$

$$\Rightarrow V_1 = 40\Omega \cdot I_1 + 1,2 \cdot V_2$$

$$\Rightarrow V_1 = 40\Omega \cdot \left(-\frac{1}{980\Omega} V_2\right) + 1,2 \cdot V_2$$

$$\Rightarrow V_1 = -\frac{2}{49} V_2 + 1,2 \cdot V_2$$

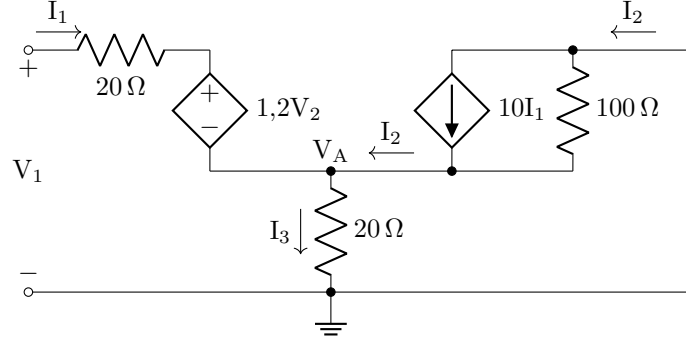
$$\Rightarrow V_1 = -\frac{10}{245} V_2 + \frac{294}{245} V_2$$

$$\Rightarrow V_1 = \frac{284}{245} V_2$$

$$\Rightarrow a''_{11} = \frac{284}{245} \approx 1,159$$

### Parâmetros $a''_{12}$ e $a''_{22}$

Através da equação 2, zerar-se-á o valor de  $V_2$  para calcular os dois últimos parâmetros  $a''$ , colocando  $V_1$  e  $I_1$  em função da variável de entrada  $I_2$ :



Pela figura acima, é perceptível que o resistor de  $20\Omega$  abaixo está em paralelo com o lado direito do circuito. Por conta disso descobrir-se-á a tensão sobre ele através de análise nodal. No lado direito do nó com potencial  $V_A$ , observa-se, decorrente do fato dos componentes em paralelo, que a corrente  $I_2$  flui por ali no sentido da figura:

$$I_1 = \frac{V_1 - 1,2 \cdot V_2 - V_A}{20\Omega} = \frac{V_1 - V_A}{20\Omega}$$

$$I_3 = \frac{V_A}{20\Omega}$$

Agora, equacionando o nó  $V_A$ :

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_3 \\ \Rightarrow \frac{V_1 - V_A}{20\Omega} + I_2 &= \frac{V_A}{20\Omega} \\ \Rightarrow \frac{V_1 - V_A}{20\Omega} + \frac{20\Omega}{20\Omega} I_2 &= \frac{V_A}{20\Omega} \\ \Rightarrow V_1 &= 2V_A - 20\Omega \cdot I_2 \end{aligned} \quad (\text{I})$$

Então, analisando o paralelo na direita, onde determinou-se que há uma tensão comum de  $V_A$ , encontrar-se-á uma relação entre  $V_A$  e  $I_2$ :

$$\begin{aligned} I_2 &= 10 \cdot I_1 - \frac{V_A}{100\Omega} \\ I_1 &= I_3 - I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{V_A}{20\Omega} - I_2 \\ \Rightarrow I_2 &= 10 \cdot \left( \frac{V_A}{20\Omega} - I_2 \right) - \frac{V_A}{100\Omega} \\ \Rightarrow \frac{100\Omega}{100\Omega} I_2 &= \frac{50}{100\Omega} V_A - \frac{1000\Omega}{100\Omega} I_2 - \frac{1}{100\Omega} V_A \\ \Rightarrow 1100\Omega \cdot I_2 &= 49V_A \\ \Rightarrow V_A &= \frac{1100}{49} \Omega \cdot I_2 \end{aligned} \quad (\text{II})$$

Utilizando a equação II na equação I:

$$\begin{aligned} V_1 &= 2 \cdot \left( \frac{1100}{49} \Omega \cdot I_2 \right) - 20\Omega \cdot I_2 \\ \Rightarrow V_1 &= \frac{2200}{49} \Omega \cdot I_2 - \frac{980}{49} \Omega \cdot I_2 \\ \Rightarrow V_1 &= \frac{1220}{49} \Omega \cdot I_2 \end{aligned}$$

Cuidando o sinal da equação 2:

$$a''_{12} = -\frac{1220}{49}\Omega \approx -24,898\Omega$$

Com a equação II, pode-se calcular  $I_1$ :

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_A}{20\Omega} - I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{\frac{1100}{49}\Omega \cdot I_2}{20\Omega} - I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{1100}{980}I_2 - I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{1100}{980}I_2 - \frac{980}{980}I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{120}{980}I_2 \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{6}{49}I_2 \end{aligned}$$

Novamente cuidando do sinal na equação 2:

$$\Rightarrow a''_{22} = -\frac{6}{49} \approx -0,122$$

#### Unindo os parâmetros $a''$ do quadripolo Q1

Concluindo, abaixo estão os parâmetros calculados para esse quadripolo:

$$\begin{aligned} a''_{11} &= \frac{284}{245} & a''_{12} &= -\frac{1220}{49}\Omega \\ a''_{21} &= -\frac{1}{980}S & a''_{22} &= -\frac{6}{49} \end{aligned} \tag{4}$$

\*

### 3.1.4 União dos Quadripolos

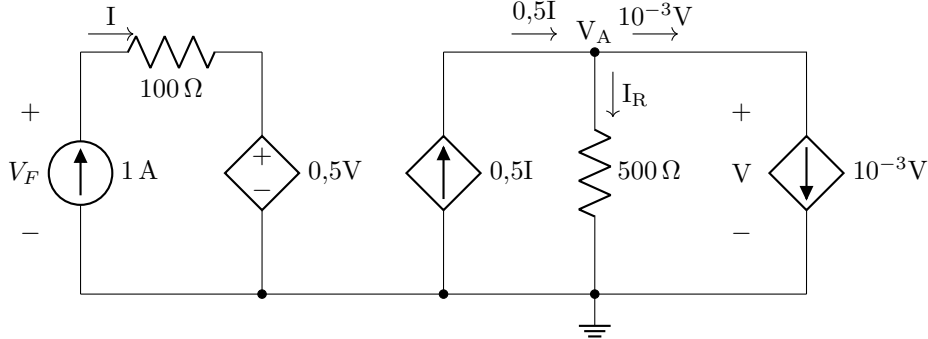
Juntando os parâmetros  $a'$  da equação 3 e os parâmetros  $a''$  da equação 4 na equação 1 de associação em cascata:

$$\begin{aligned} a_{11} &= a'_{11}a''_{11} + a'_{12}a''_{21} & a_{12} &= a'_{11}a''_{12} + a'_{12}a''_{22} \\ a_{21} &= a'_{21}a''_{11} + a'_{22}a''_{21} & a_{22} &= a'_{21}a''_{12} + a'_{22}a''_{22} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= a'_{11}a''_{11} + a'_{12}a''_{21} \\ \Rightarrow a_{11} &= \left(-\frac{1000031007}{1999999500}\right) \cdot \left(\frac{284}{245}\right) + \left(-\frac{3020}{3999999}\Omega\right) \cdot \left(-\frac{1}{980}S\right) \\ \Rightarrow a_{11} &= -\frac{284008805988}{489999877500} + \frac{3020}{3919999020} \\ \Rightarrow a_{11} &= -\frac{1113314241144330131760}{1920799039600120050000} + \frac{1479799630050000}{1920799039600120050000} \\ \Rightarrow a_{11} &= -\frac{111331276134470008176}{192079903960012005000} \approx -0,579 \end{aligned}$$

## 4.1 Circuito Equivalente de Norton da Saída

Partindo do circuito de saída sorteado (figura 5), sabe-se de cara que, por não haver nenhuma fonte de tensão ou de corrente independente, a corrente de Norton é  $I_N = 0A$ . Para determinar-se o valor de  $R_N$ , pode-se colocar uma fonte independente na saída e medir a outra grandeza sobre essa, visto que  $R_N = \frac{V_F}{I_F}$ . Para esse circuito em específico, colocar-se-á uma fonte de corrente de  $I_F = 1A$  para cima e medir-se-á a tensão  $V_F$  sobre ela:



Nesse caso, com essa fonte de corrente, forçou-se  $I = 1A$ . Por conta disso, do outro lado do circuito, obteve-se que a primeira fonte de corrente controlada fornece ou consome  $0,5 \cdot I = 0,5A$ .

A partir dessa informação, no nó  $V_A$ , obtém-se que a corrente  $I_R$  sobre o resistor de  $500\Omega$  se dá por:

$$\begin{aligned} 0,5 \cdot I &= I_R + 10^{-3} \cdot V \\ \Rightarrow I_R &= 0,5 \cdot I - 10^{-3} \cdot V \\ \Rightarrow I_R &= 0,5A - 10^{-3} \cdot V \end{aligned}$$

Com essa informação, como, em resistores,  $V = R \cdot I$ :

$$\begin{aligned} V &= I_R \cdot 500\Omega \\ \Rightarrow V &= (0,5A - 10^{-3} \cdot V) \cdot 500\Omega \\ \Rightarrow V &= 250V - 0,5 \cdot V \\ \Rightarrow 1,5 \cdot V &= 250V \\ \Rightarrow V &= \frac{500}{3}V \end{aligned}$$

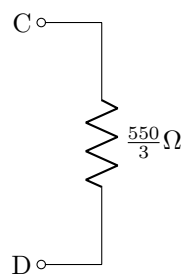
Com essa informação, basta retornar para o outro lado do circuito e determinar a tensão  $V_F$  através de Lei das Malhas:

$$\begin{aligned} -V_F + I \cdot 100\Omega + 0,5 \cdot V &= 0 \\ \Rightarrow V_F &= I \cdot 100\Omega + 0,5 \cdot V \\ \Rightarrow V_F &= 1A \cdot 100\Omega + 0,5 \cdot \frac{500}{3}V \\ \Rightarrow V_F &= 100V + \frac{250}{3}V \\ \Rightarrow V_F &= \frac{550}{3}V \end{aligned}$$

Logo, a partir dessa tensão, pode-se determinar por fim o valor de  $R_N$ :

$$\begin{aligned} R_N &= \frac{V_F}{I_F} \\ \Rightarrow R_N &= \frac{\frac{550}{3}V}{1A} \\ \Rightarrow R_N &= \frac{550}{3}\Omega = 183,3\Omega \end{aligned}$$

Ou seja, o circuito equivalente Norton da saída é o seguinte:



\*



## 5.1 Ganho de Tensão da Saída $V_2/V_1$