

# **Simulação de redes passivas “ladder” LC**

**Síntese de Circuitos – ENGC46**

**Professor: Maicon D. Pereira**

**Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação**

**Universidade Federal da Bahia**



# Resumo

- **Generalidades**
- **Antoniou GIC**
- **Ladder Ativa (Leap-Frog)**

## Simulação de redes passivas “ladder” LC

- Os indutores de uma rede passiva “ladder” LC são substituídos por redes com Amp-Op's, resistores e capacitores.
- Aproveitam a baixa sensibilidade das redes LC.
- Conversores Generalizados de Impedância (GIC – Generalized Impedance Converter) podem ser utilizados para simular indutores.

## Antoniou GIC

- Conversor Generalizado de Impedância de Antoniou:

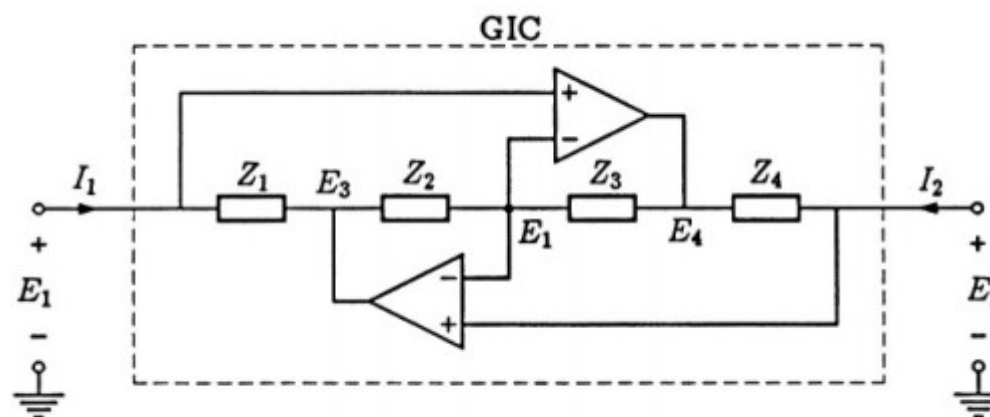


Figure 12.3: A generalized impedance converter.

Terminando E2 com um carga  $R_L$ , a impedância (aterrada) vista a partir de E1 é:

$$Z_{in} = KR_L = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} R_L$$

## Antoniou GIC - indutor aterrado

Substituindo  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = R$  e  $Z_4 = 1/(sC)$ , temos um indutor aterrado:

$$Z_{in} = sCRR_L \rightarrow L_{eq} = CRR_L$$

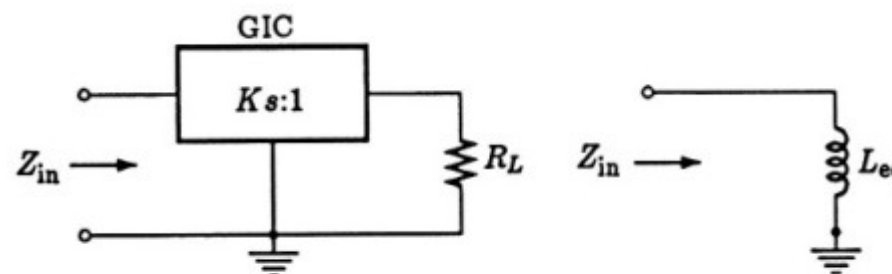


Figure 12.6: Simulation of a grounded inductor.

Exemplo:

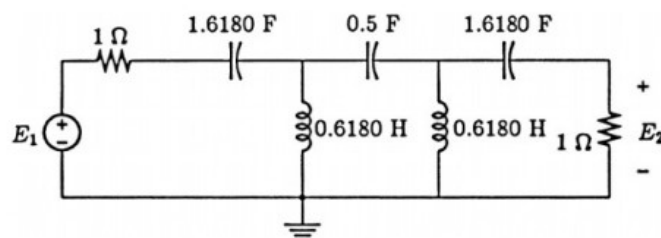


Figure 12.7: A fifth-order Butterworth highpass filter.

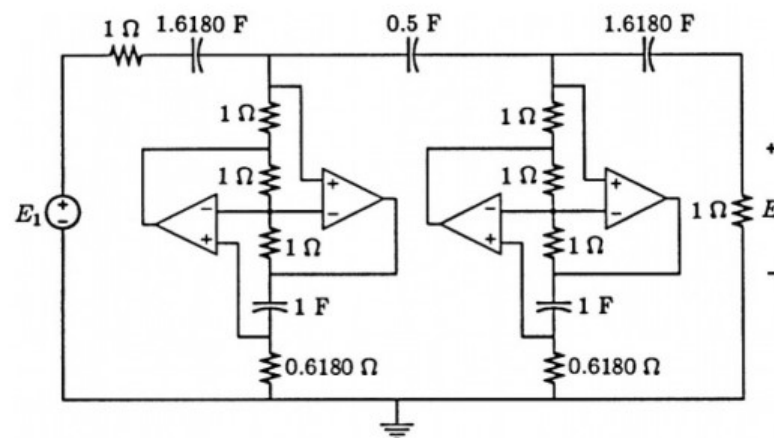


Figure 12.8: Active simulation of the filter of Fig. 12.7.

## Antoniou GIC - indutor flutuante

Dois GICs e uma resistência conectados em cascata, com o segundo GIC invertido, formam um indutor flutuante:

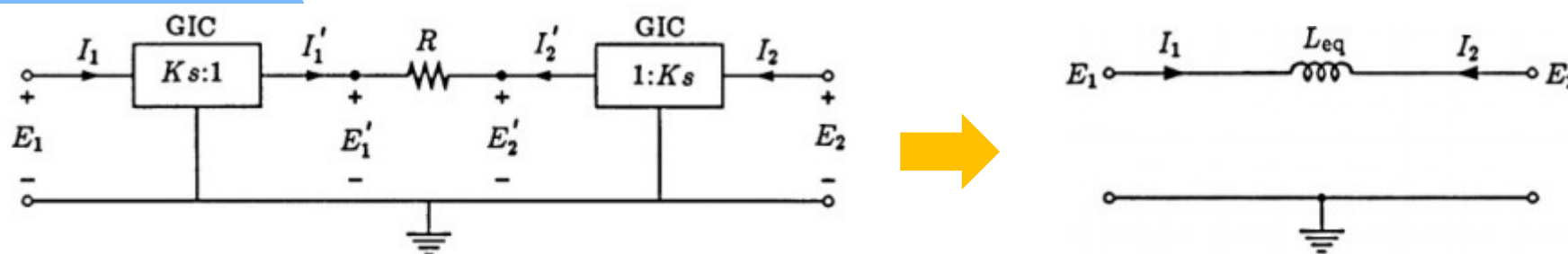


Figure 12.9: Simulation of a floating inductor.

$$L_{eq} = CR^2$$

Exemplo:

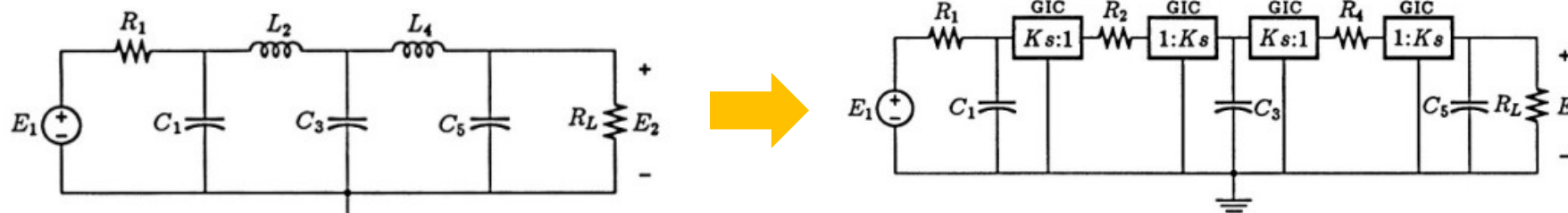


Figure 12.11: A lowpass filter.

Figure 12.12: Active simulation of the filter of Fig. 12.11.

$$R_2 = L_2 / CR$$

$$R_4 = L_4 / CR$$

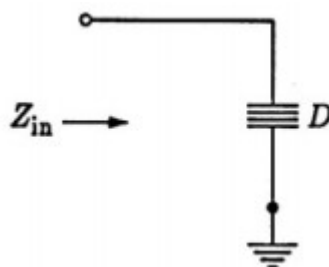
## Antoniou GIC – Transformação de Bruton

Transformação de Bruton: baseia no escalamento de todas as impedâncias do filtro por um fator de escala  $1/s$ , mantendo a  $T(s)$  inalterada. Propósito: eliminar indutores.

Resultados da transformação de Bruton de acordo com  $Z$ :

Elemento original	Elemento após escalamento
Indutor $L_0 \rightarrow Z = sL_0$	Resistor $R = L_0$
Resistor $R_0$	Capacitor com $Z_C = R_0/s$
Capacitor $C_0 \rightarrow Z = 1/(sC_0)$	$Z_{\text{FDNR}} = 1/s^2D = -1/\omega^2D$ , onde $D = C_0$

O FDNR (Frequency Dependent Negative Resistor), também conhecido como supercapacitor, é definido pelo parâmetro  $D$ .



Símbolo do FDNR

## Antoniou GIC – Transformação de Bruton

Transformação de Bruton: O GIC de Antoniou pode ser utilizado para a FDNR.

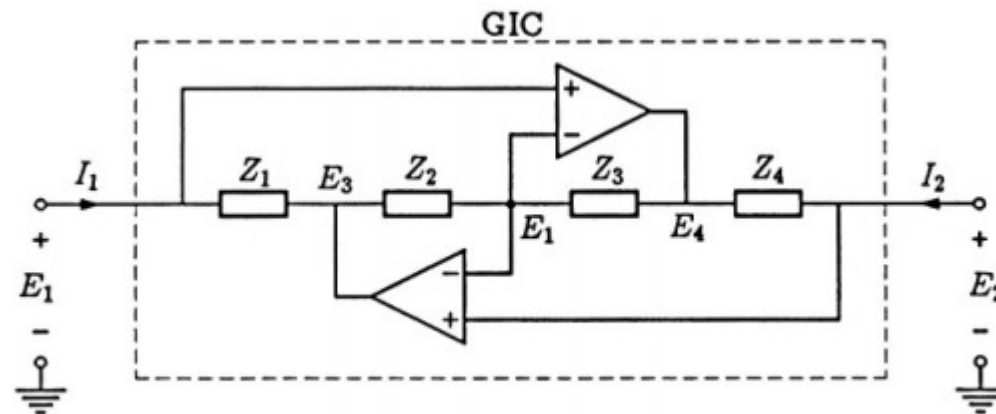


Figure 12.3: A generalized impedance converter.

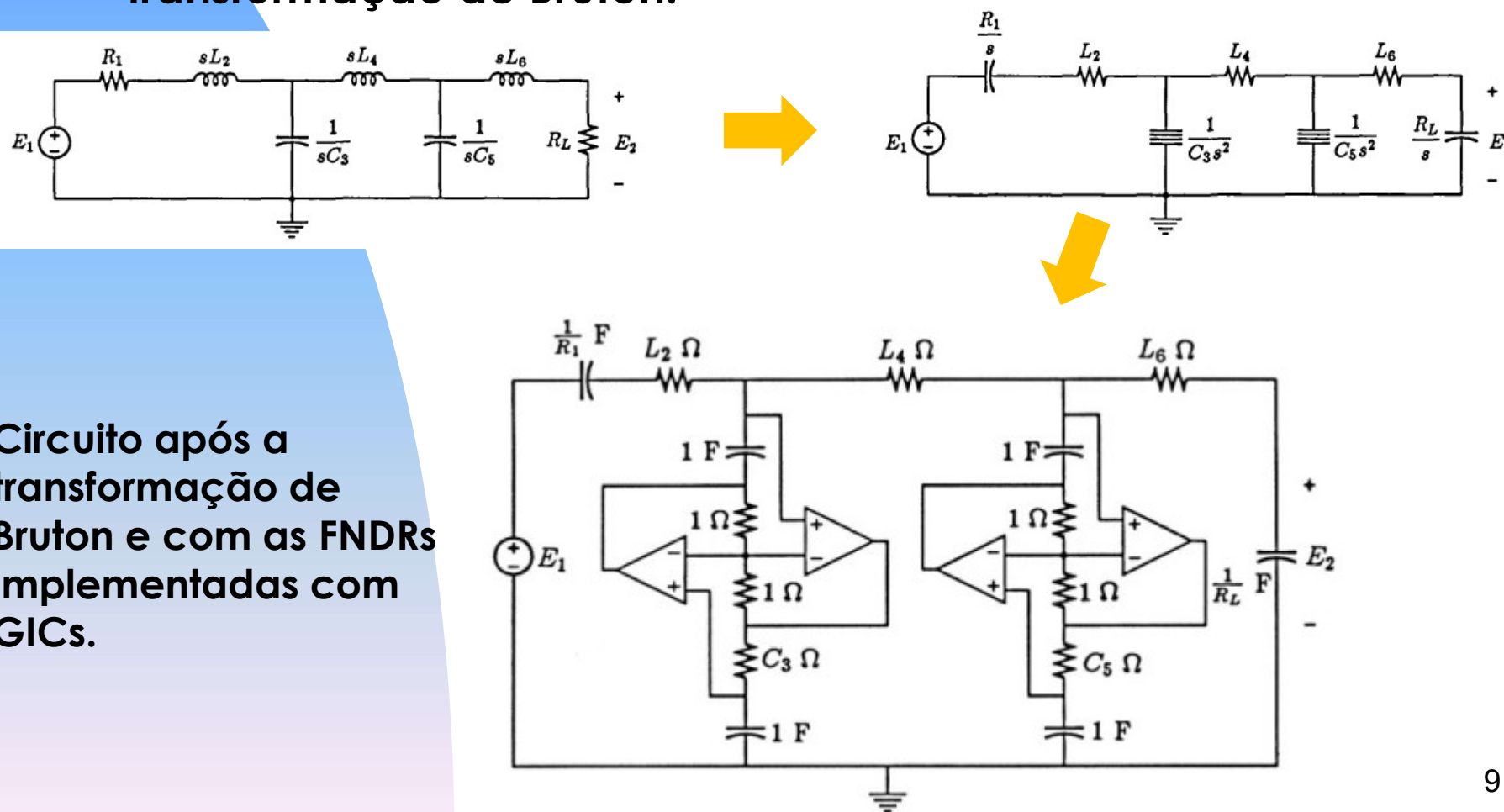
Terminando  $E_2$  com uma componente  $Z_L = 1/sC_0$ , o escalamento  $1/s$  é obtido substituindo  $Z_1 = 1/(sC)$ ,  $Z_2 = Z_3 = Z_4 = R$ . Teremos então um componente FDNR aterrado:

$$Z_{in} = KZ_L = \frac{1}{sCR} \frac{1}{sC_0} = \frac{1}{s^2 C_0 CR} = -\frac{1}{\omega^2 C_0 CR} \rightarrow D = C_0 CR$$



## Antoniou GIC – Transformação de Bruton

Exemplo: determinação da rede equivalente após a transformação de Bruton.



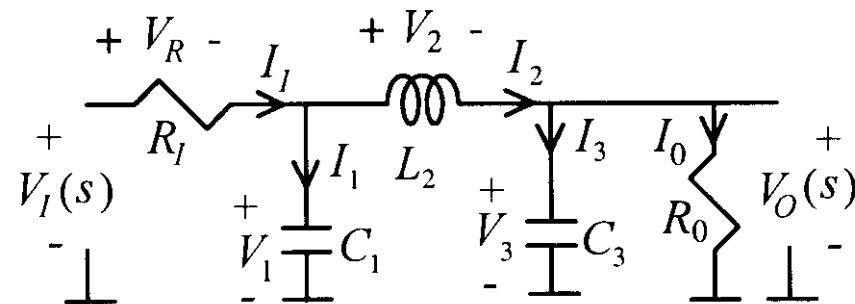
Circuito após a transformação de Bruton e com as FNDRs implementadas com GICs.

## Ladder Ativa (Leap-Frog)

- **Simulação funcional da rede ladder LC duplamente terminada completa com uma rede multirealimentada equivalente.**
- **Capacitores e indutores são simulados com integradores. Somadores reproduzem as relações entre tensões e corrente importantes dentro da rede original.**
- **As redes Leap-frog são um caso particular desta técnica e servem para filtros passa-baixa polinomiais.**

## Ladder Ativa (Leap-Frog)

Exemplo: determinação da rede ativa equivalente para a rede passiva de 3ª ordem.



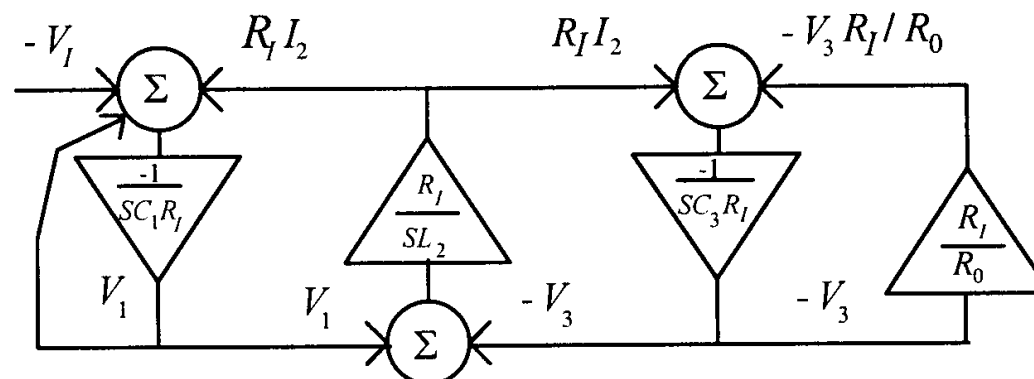
Aplicação da Leis de Kirchhoff:

$$V_1 = \frac{-1}{sC_1 R_i} (-V_i + V_1 + R_i I_2) \quad R_i I_2 = \left( \frac{R_1}{sL_2} \right) (V_1 - V_3)$$

$$-V_3 = \left( \frac{-1}{sC_3 R_i} \right) \left( R_i I_2 + \frac{R_i}{R_0} (-V_3) \right)$$

## Ladder Ativa (Leap-Frog)

Diagrama de blocos representativo das equações de Kirchhoff da rede LC.

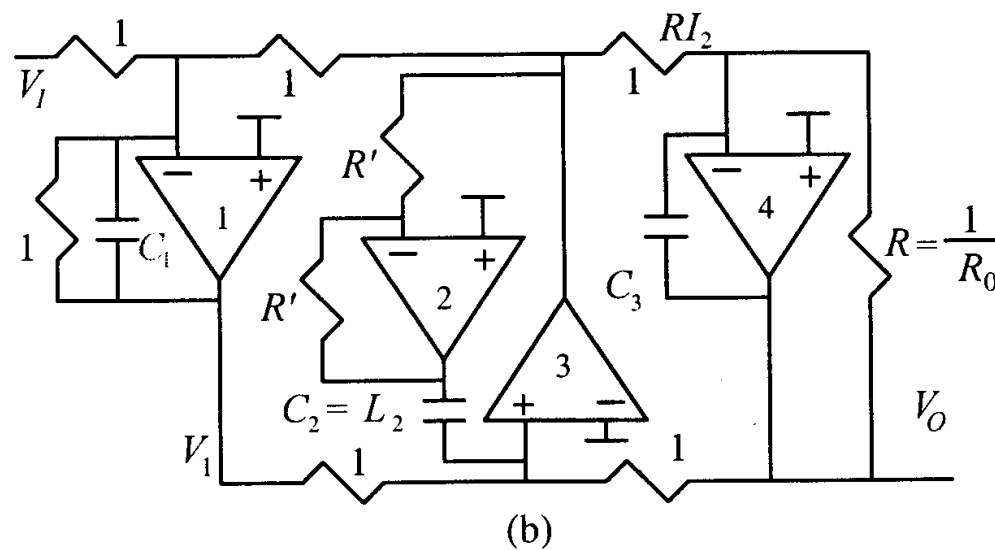
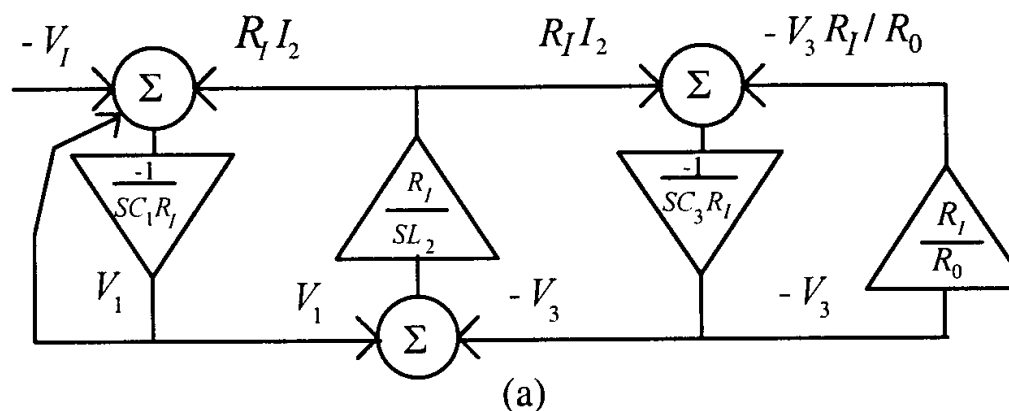


$$V_1 = \frac{-1}{sC_1 R_i} (-V_i + V_1 + R_i I_2)$$

$$R_i I_2 = \left( \frac{R_i}{sL_2} \right) (V_1 - V_3)$$

$$-V_3 = \left( \frac{-1}{sC_3 R_i} \right) \left( R_i I_2 + \frac{R_i}{R_0} (-V_3) \right)$$

## Ladder Ativa (Leap-Frog)



**Circuito RC-ativo  
equivalente.**

## **Referências e leituras recomendadas**

**Seções 6.10-6.12, Noceti-Filho, Sidnei, “Filtros Seletores de Sinais,” Editora da UFSC, Florianópolis, 2003.**

**Capítulo 11, Daryanani, Gobind, “Principles of Active Network Synthesis and Design,” John Wiley & Sons, New York.**

**Capítulo 12, Kendall Su, “Analog Filters,” Kluwer Academic Publishers.**

**Van Valkenburg, “Analog Filter Design,” Oxford, New York.**