

# Gráfico de Fluxo de Sinais

SEL 369 Micro-ondas/SEL5900 Circuitos de Alta  
Frequência

Amílcar Careli César  
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

# Atenção!

---



- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação em engenharia elétrica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

# Finalidade e definições

---

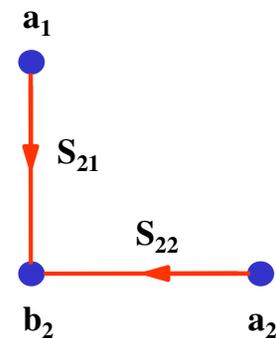
## ✓ Finalidade

- técnica conveniente para representar e analisar a transmissão e reflexão de ondas em amplificadores de microondas

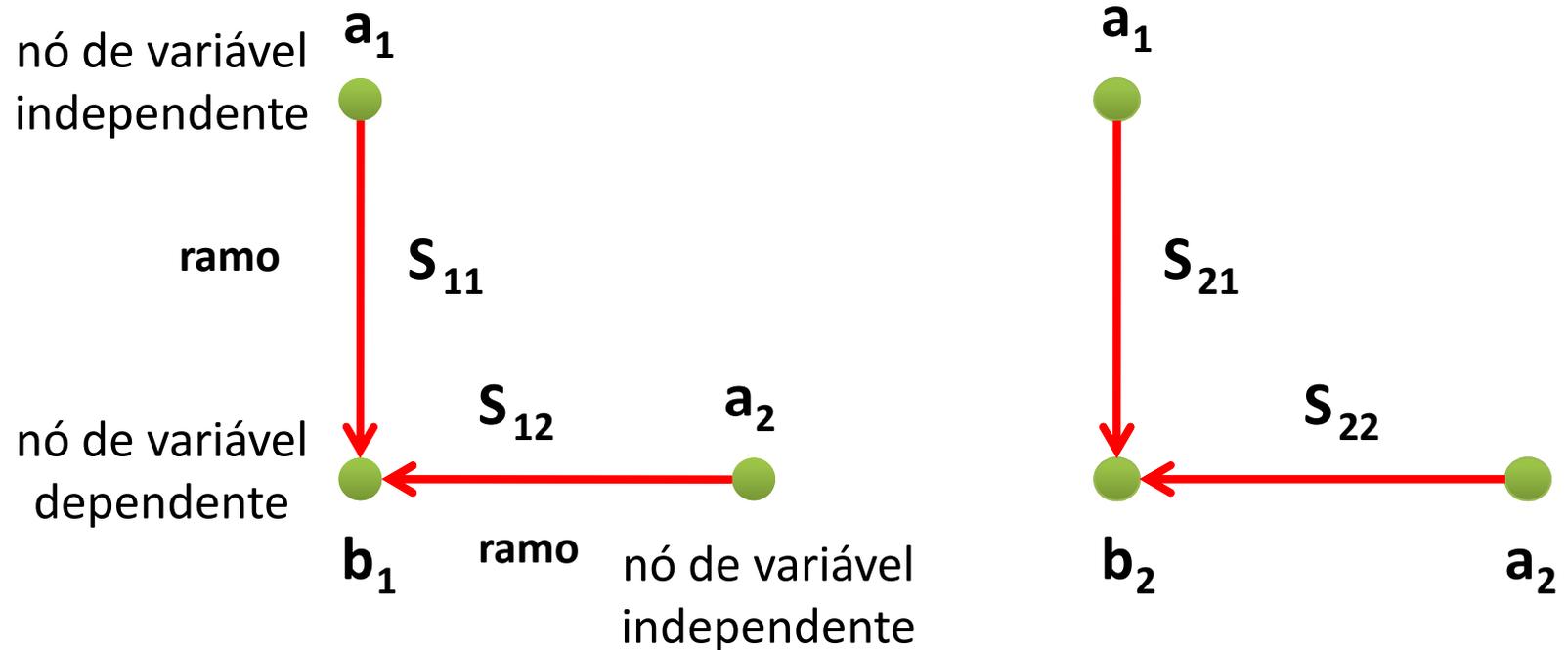
## ✓ Relação entre as variáveis é dada pela **REGRA DE MASON**

## ✓ Definições

- Cada variável é designada como um nó
- parâmetros  $S$  e coeficientes de reflexão são representados por ramos
- os ramos chegam aos nós de variáveis dependentes
- os ramos saem dos nós de variáveis independentes
  - ondas incidentes são nós de variáveis independentes
  - ondas refletidas são nós de variáveis dependentes



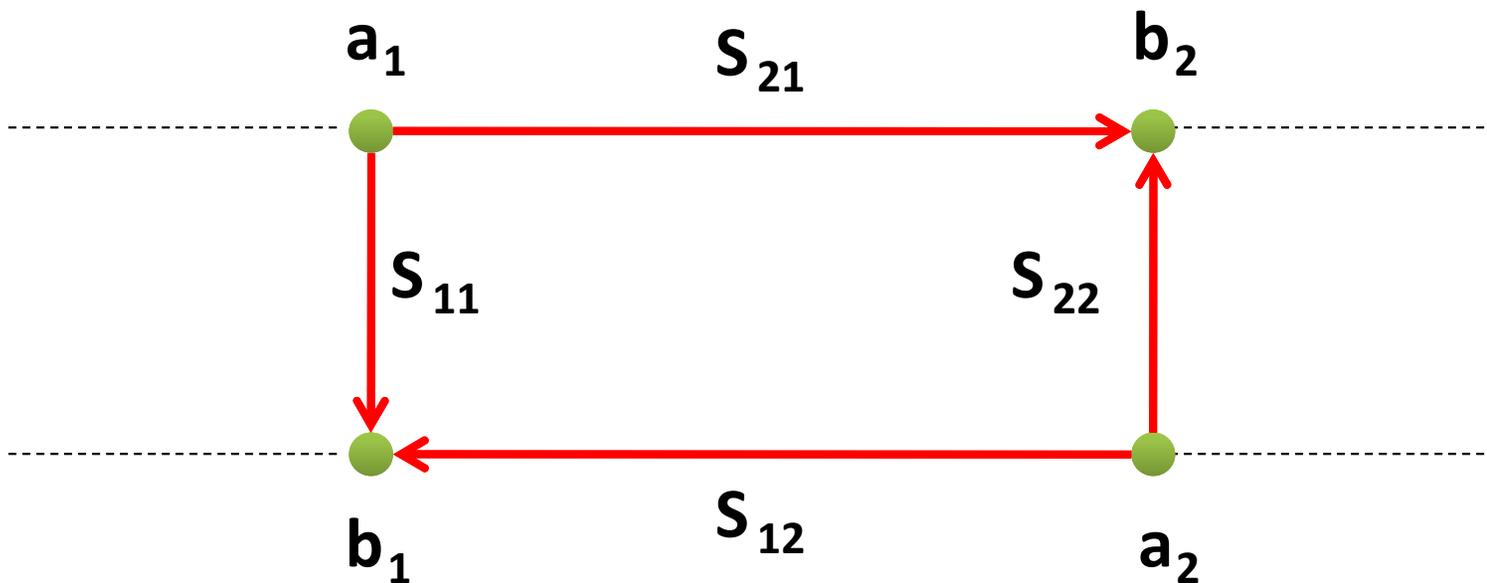
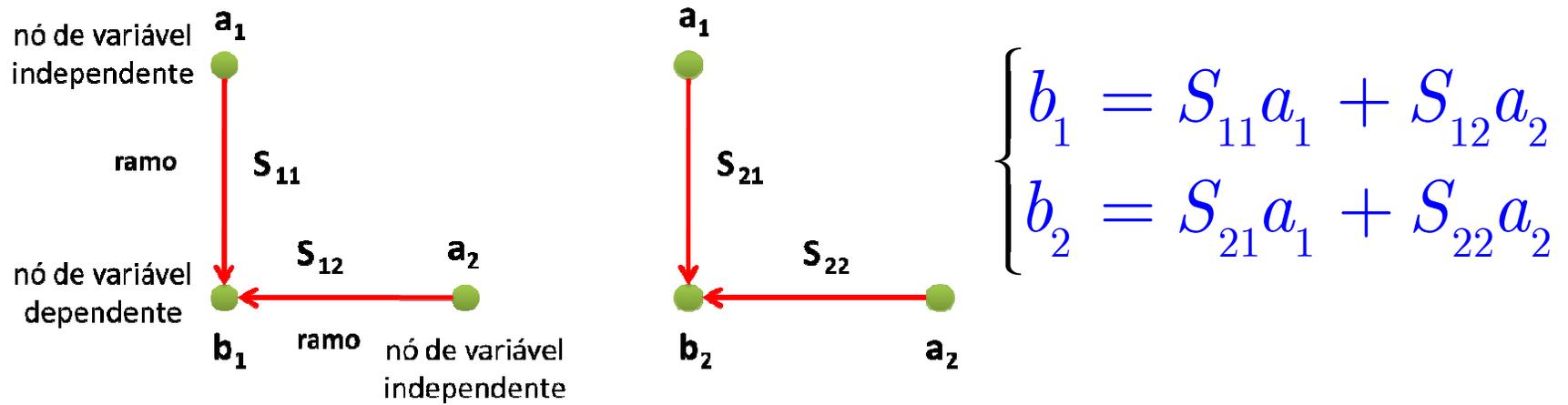
# Gráfico de fluxo de sinais e parâmetros S-1



$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

$a_1$ : onda normalizada incidente  
 $a_2$ : onda normalizada espalhada

# Gráfico de fluxo de sinais e parâmetros S-2



# GERADOR

# CARGA

# Gráfico de fluxo de sinais do gerador-1

---

$$V_g = E_s + Z_s I_g$$

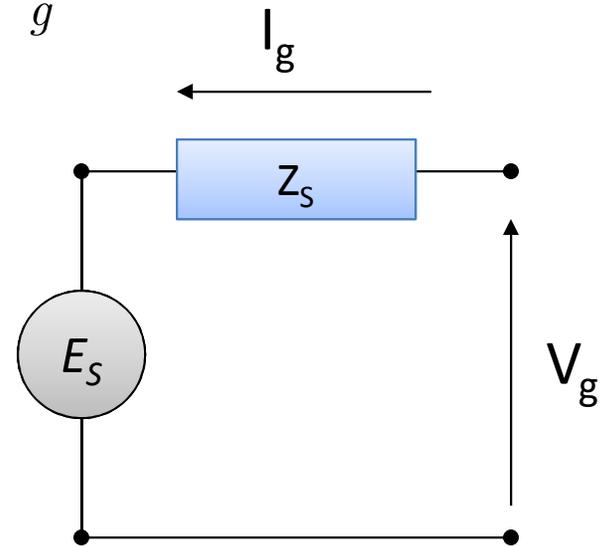
A tensão total em cada ponto da linha corresponde à superposição das ondas incidente e refletida

$$V_g = V_g^+ + V_g^- \quad \text{e} \quad I_g = I_g^+ - I_g^-$$

$$V_g^+ + V_g^- = E_s + \left( \frac{V_g^+}{Z_0} - \frac{V_g^-}{Z_0} \right) Z_s$$

Multiplicando por  $Z_0$

$$Z_0 (V_g^+ + V_g^-) = Z_0 E_s + Z_s (V_g^+ - V_g^-)$$



# Gráfico de fluxo de sinais do gerador-2

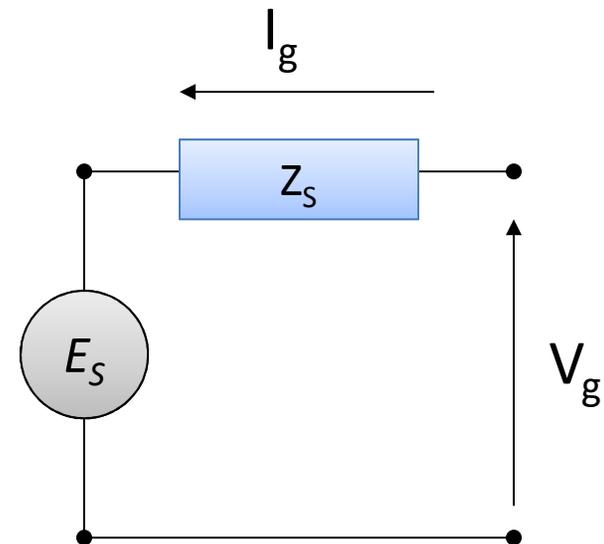
$$Z_0(V_g^+ + V_g^-) = Z_0 E_s + Z_s(V_g^+ - V_g^-)$$

Resolvendo para  $V_g^-$

$$V_g^- = \left( \frac{Z_0}{Z_s + Z_0} \right) E_s + \frac{(Z_s - Z_0)}{(Z_s + Z_0)} V_g^+$$

Dividindo por  $\sqrt{Z_0}$

$$\frac{V_g^-}{\sqrt{Z_0}} = \frac{Z_0}{(Z_s + Z_0)} \frac{E_s}{\sqrt{Z_0}} + \frac{(Z_s - Z_0)}{(Z_s + Z_0)} \frac{V_g^+}{\sqrt{Z_0}}$$



# Gráfico de fluxo de sinais do gerador-3

Definindo

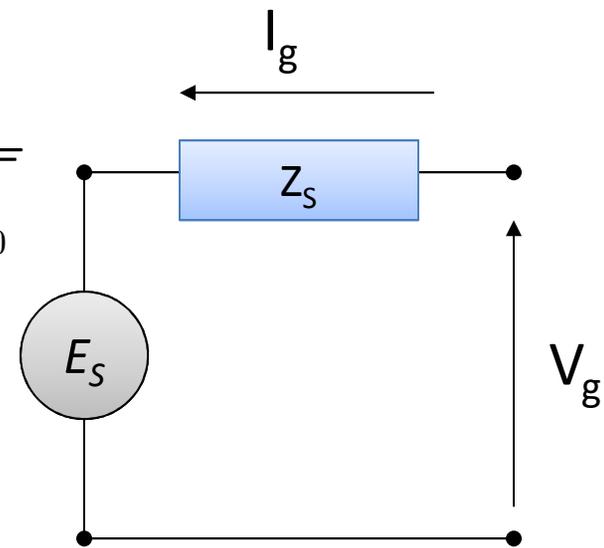
$$\frac{V_g^-}{\sqrt{Z_0}} \equiv b_g; \quad \frac{V_g^+}{\sqrt{Z_0}} \equiv a_g; \quad \frac{Z_0 E_s}{\sqrt{Z_0} (Z_s + Z_0)} \equiv b_s; \quad \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \equiv \Gamma_s$$

Substituindo na equação

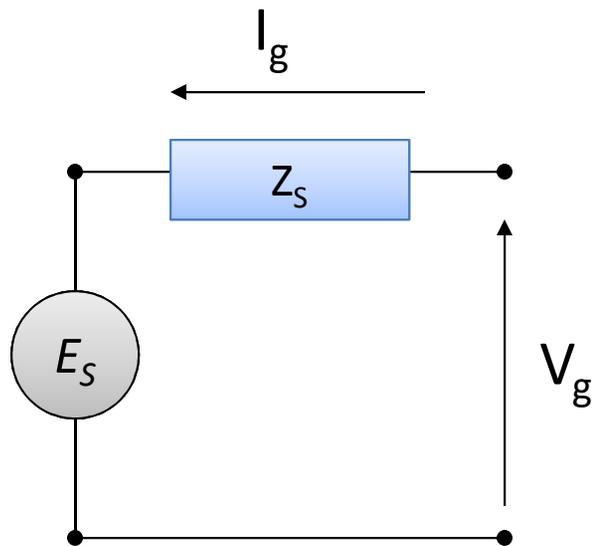
$$\frac{V_g^-}{\sqrt{Z_0}} = \frac{Z_0}{(Z_s + Z_0)} \frac{E_s}{\sqrt{Z_0}} + \frac{(Z_s - Z_0)}{(Z_s + Z_0)} \frac{V_g^+}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_g = b_s + \Gamma_s a_g$$

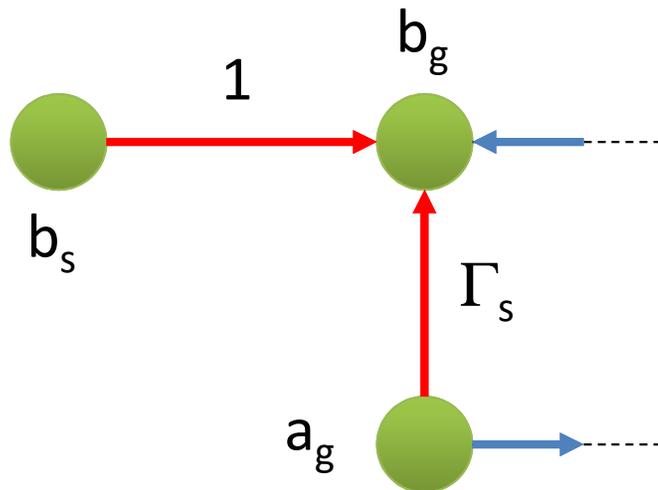
Equação de fluxo de sinais do gerador



# Gráfico de fluxo de sinais do gerador-4



$$V_g = E_s + Z_s I_g$$



$$b_g = b_s + \Gamma_s a_g$$

# Gráfico de fluxo de sinais da carga-1

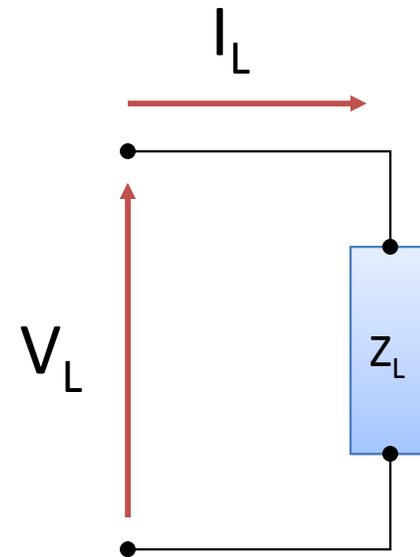
$$V_L = Z_L I_L \quad \text{Tensão na carga}$$

A tensão total em cada ponto da linha corresponde à superposição das ondas incidente e refletida

$$V_L^+ + V_L^- = Z_L \left( \frac{V_L^+}{Z_0} - \frac{V_L^-}{Z_0} \right)$$

Resolvendo para  $V_L^-$

$$V_L^- = \left( \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) V_L^+$$



# Gráfico de fluxo de sinais da carga-2

---

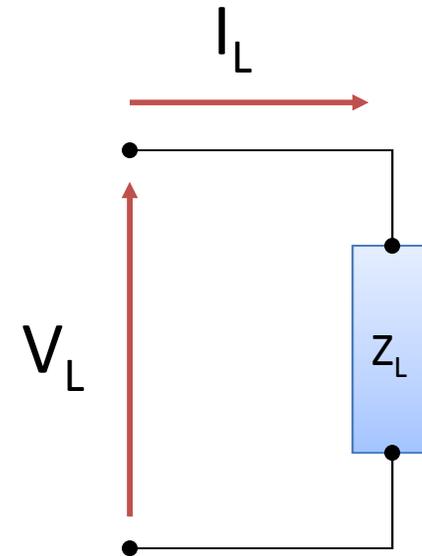
$$V_L^- = \left( \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) V_L^+$$

Dividindo por  $\sqrt{Z_0}$

$$\frac{V_L^-}{\sqrt{Z_0}} = \left( \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) \frac{V_L^+}{\sqrt{Z_0}}$$

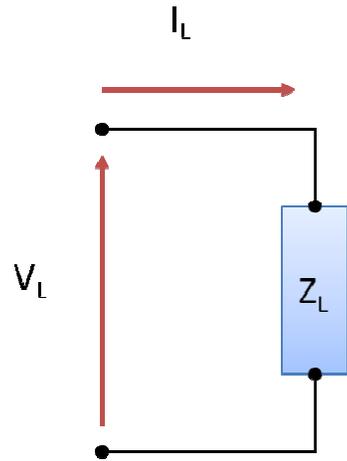
Definindo

$$\left( \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) = \Gamma_L ; \quad \frac{V_L^+}{\sqrt{Z_0}} \equiv a_L ; \quad \frac{V_L^-}{\sqrt{Z_0}} \equiv b_L$$

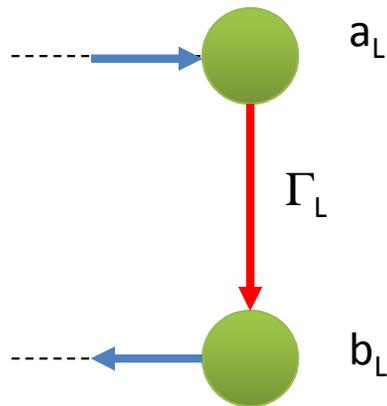


# Gráfico de fluxo de sinais da carga-3

---



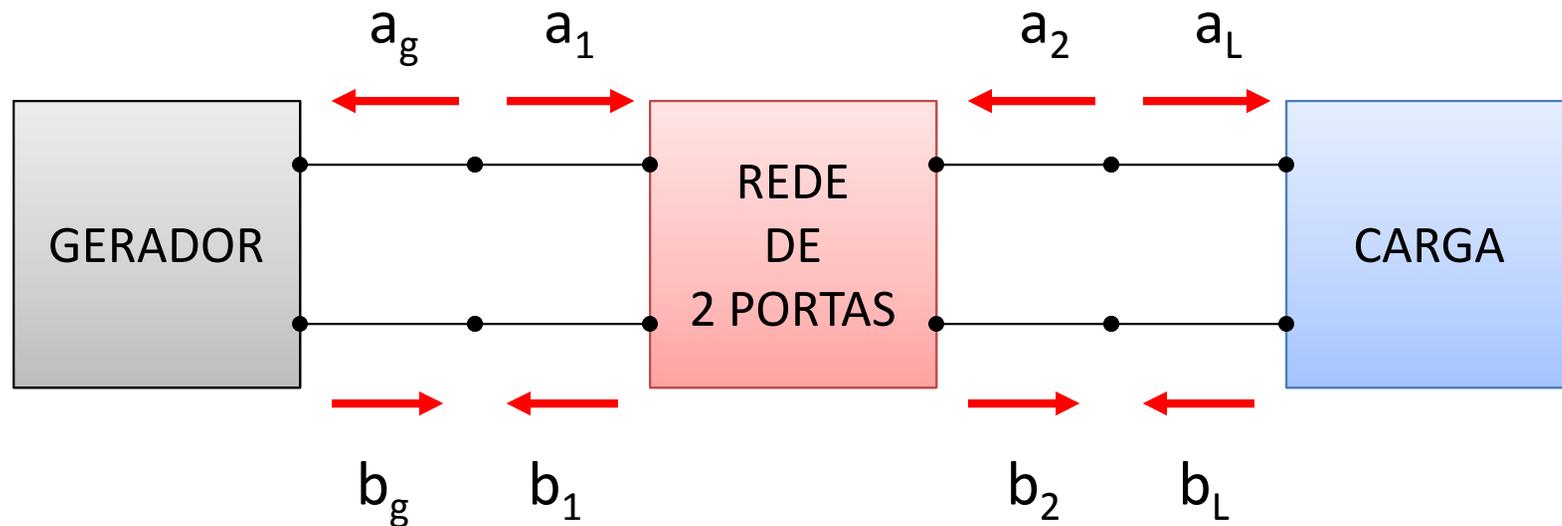
$$V_L^- = \left( \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) V_L^+$$



$$b_L = \Gamma_L a_L$$

# ASSOCIAÇÃO DE ELEMENTOS OU CIRCUITOS EM CASCATA

# Gráfico de fluxo de sinais da associação-1



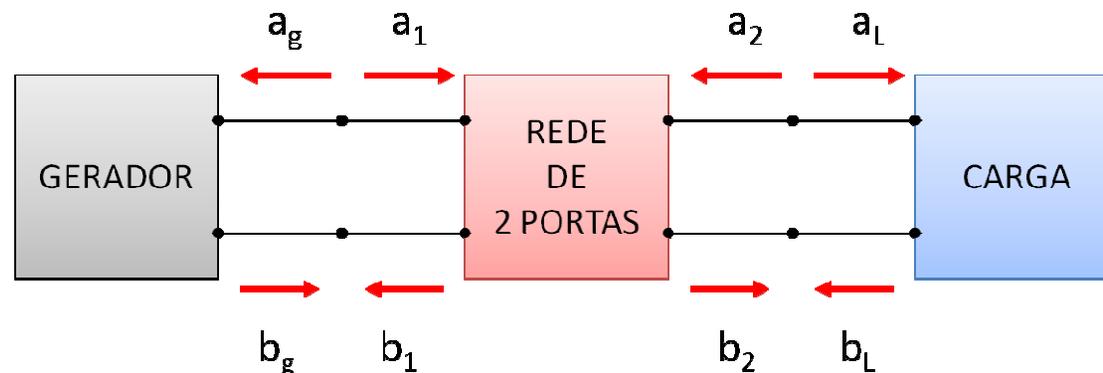
$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \\ b_g = b_s + \Gamma_s a_g \\ b_L = \Gamma_L a_L \end{cases}$$

# Gráfico de fluxo de sinais da associação-2

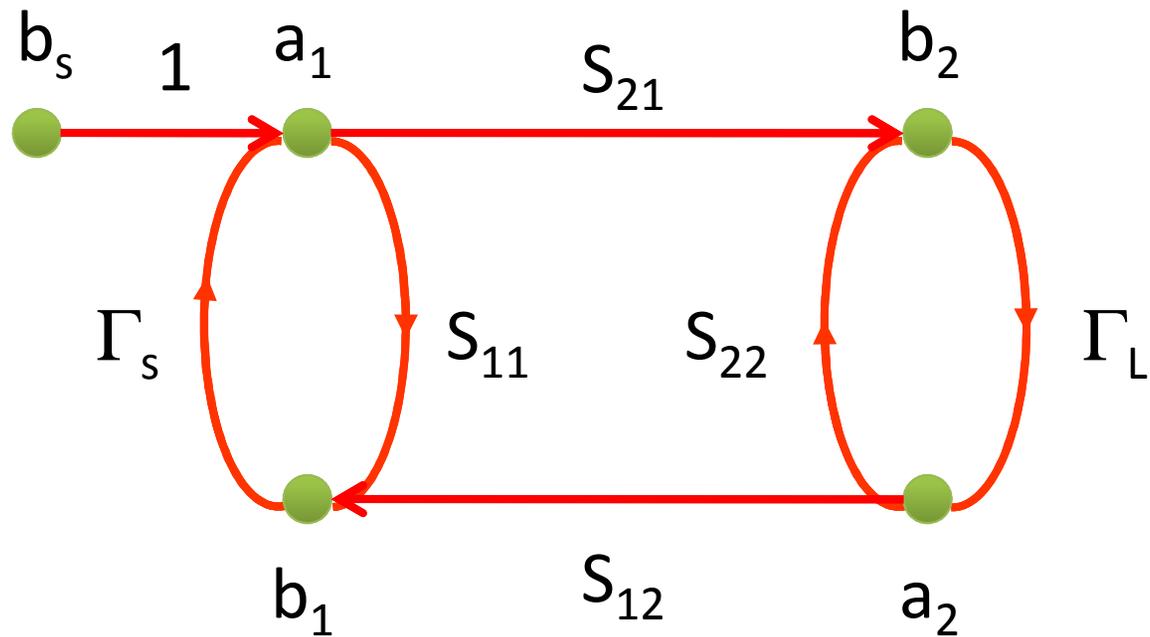
Da figura,

$$b_g = a_1; \quad a_g = b_1; \quad a_L = b_2; \quad b_L = a_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \\ b_g = b_s + \Gamma_s a_g \\ b_L = \Gamma_L a_L \end{array} \right. \quad \text{A substituição} \\ \text{resulta em:} \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \\ a_1 = b_s + \Gamma_s b_1 \\ a_2 = \Gamma_L b_2 \end{array} \right.$$

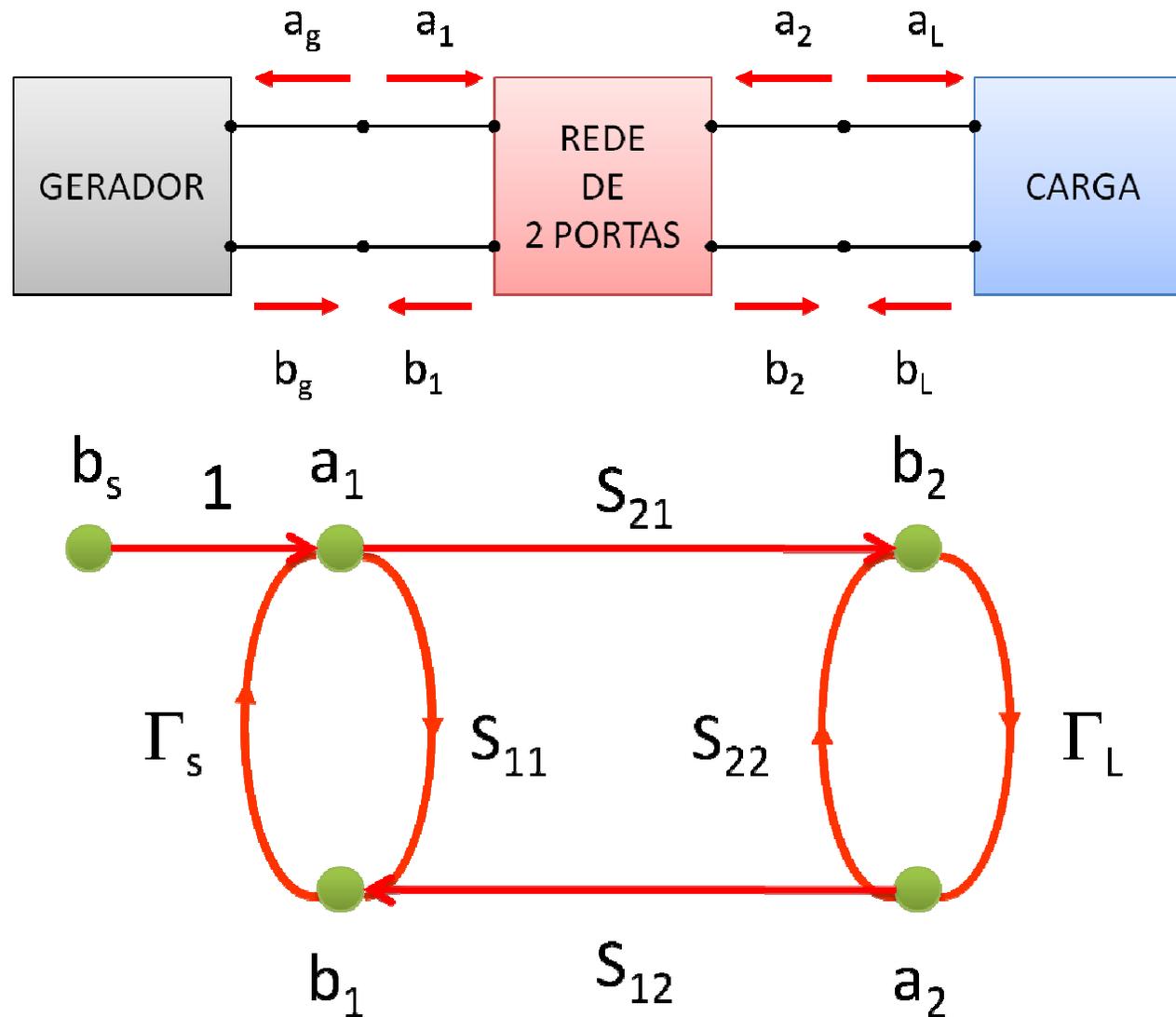


# Gráfico de fluxo de sinais da associação-3



$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \\ a_1 = b_s + \Gamma_s b_1 \\ a_2 = \Gamma_L b_2 \end{cases}$$

# Gráfico de fluxo de sinais da associação-4

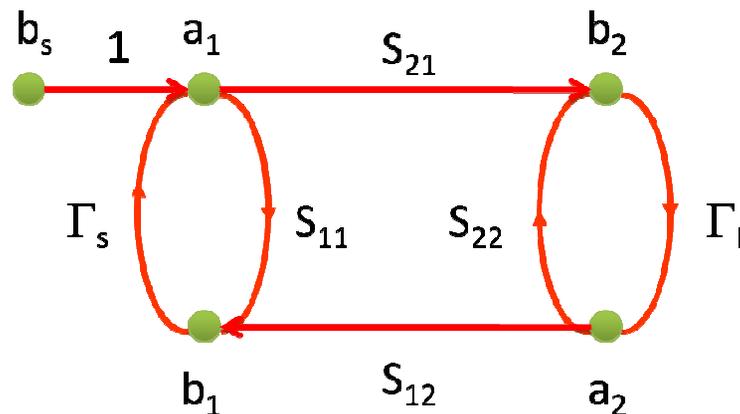


# REGRA DE MASON

# Regra de Mason-1

- ✓ Facilita a determinação da relação ou função de transferência,  $T$ , entre variáveis dependente e independente

$$T = \frac{P_1 \left[ 1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(1)} - \dots \right] + P_2 \left[ 1 - \sum L(1)^{(2)} + \dots \right] + \dots}{1 - \sum L(1) + \sum L(2) - \sum L(3) + \dots}$$



# Regra de Mason-2

---

$$T = \frac{P_1 \left[ 1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(1)} - \dots \right] + P_2 \left[ 1 - \sum L(1)^{(2)} + \dots \right] + \dots}{1 - \sum L(1) + \sum L(2) - \sum L(3) + \dots}$$

✓  $P_1, P_2, \dots$

- são os diferentes caminhos ligando as variáveis dependente e independente, cuja função de transferência deseja-se determinar

✓ **Caminho**

- é um conjunto de ramos consecutivos e codirecionais, ao longo do qual nenhum nó é encontrado mais do que uma única vez, conforme percorremos o gráfico do nó independente para o nó dependente

✓ **Valor do caminho,  $P_1, P_2, \dots$**

- é o produto de todos os coeficientes dos ramos ao longo do caminho

# Regra de Mason-3

---

$$T = \frac{P_1 \left[ 1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(1)} - \dots \right] + P_2 \left[ 1 - \sum L(1)^{(2)} + \dots \right] + \dots}{1 - \sum L(1) + \sum L(2) - \sum L(3) + \dots}$$

## ✓ $\sum L(1)$

– é a soma de todas as malhas de 1ª ordem

- Uma malha de 1ª ordem é o produto dos ramos encontrados no caminho fechado percorrido na direção das setas de um nó até ele mesmo

## ✓ $\sum L(2)$

– é a soma de todas as malhas de 2ª ordem

- Uma malha de 2ª é o produto de 2 malhas de 1ª ordem quaisquer que não se tocam

# Regra de Mason-4

---

$$T = \frac{P_1 \left[ 1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(1)} - \dots \right] + P_2 \left[ 1 - \sum L(1)^{(2)} + \dots \right] + \dots}{1 - \sum L(1) + \sum L(2) - \sum L(3) + \dots}$$

## ✓ $\sum L(3)$

– é a soma de todas as malhas de 3ª ordem

- Uma malha de 3ª ordem é o produto de 3 malhas de 1ª ordem quaisquer que não se tocam

## ✓ $\sum L(4), \sum L(5)$

– representam malhas de 4ª e 5ª ordem

# Regra de Mason-5

---

$$T = \frac{P_1 \left[ 1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(1)} - \dots \right] + P_2 \left[ 1 - \sum L(1)^{(2)} + \dots \right] + \dots}{1 - \sum L(1) + \sum L(2) - \sum L(3) + \dots}$$

## ✓ $\sum L(1)^{(P)}$

- é a soma de todas as malhas de 1ª ordem que não tocam o caminho **P** entre as variáveis independente e dependente

## ✓ $\sum L(2)^{(P)}$

- é a soma de todas as malhas de 2ª ordem que não tocam o caminho **P** entre as variáveis independente e dependente