

# Sistemas Digitais

## Conversão Digital-Analógico

Adaptações Prof. José Artur Quilici-Gonzalez

Elementos de Eletrônica Digital – Idoeta e Capuano

Eletrônica Digital – Bignell e Donovan

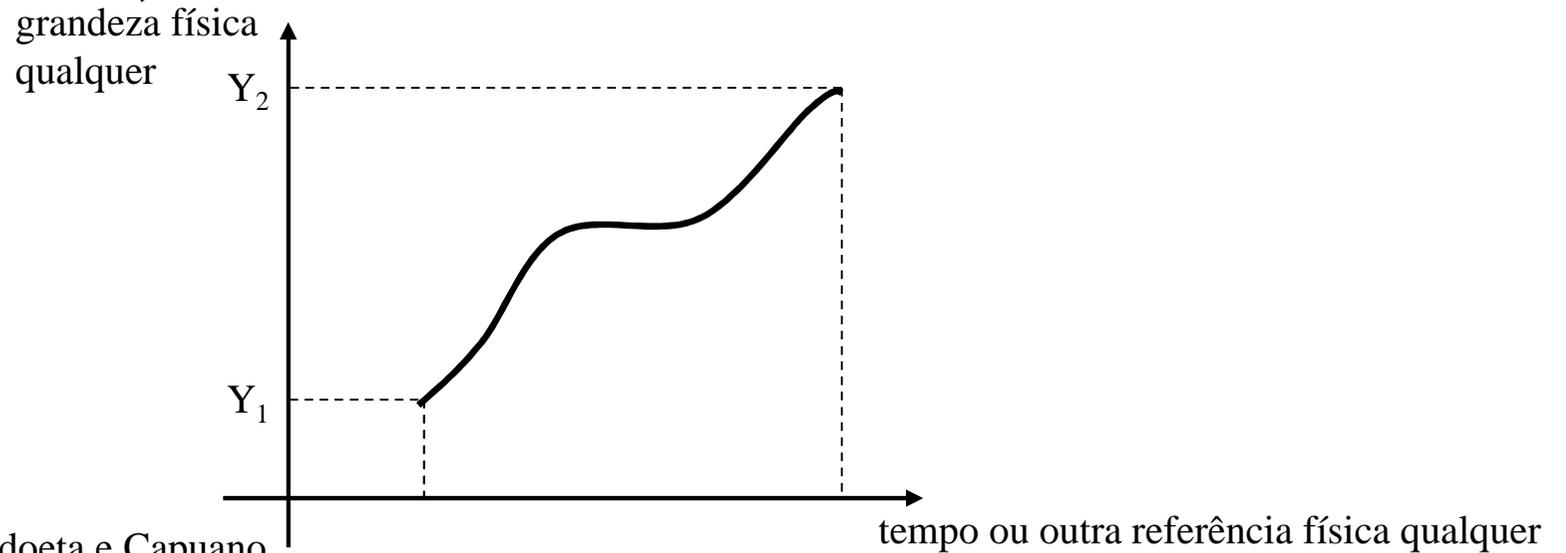
Sistemas Digitais – Tocci e Widmer

# Sumário

- Introdução
- Conversão Digital-Analógico (DAC)
- DAC com Escada Binária
- DAC com Escada Binária e Amplificador Operacional
- DAC com Rede R-2R
- DAC com Rede R-2R e Amplificador Operacional

# Introdução – Variável Analógica

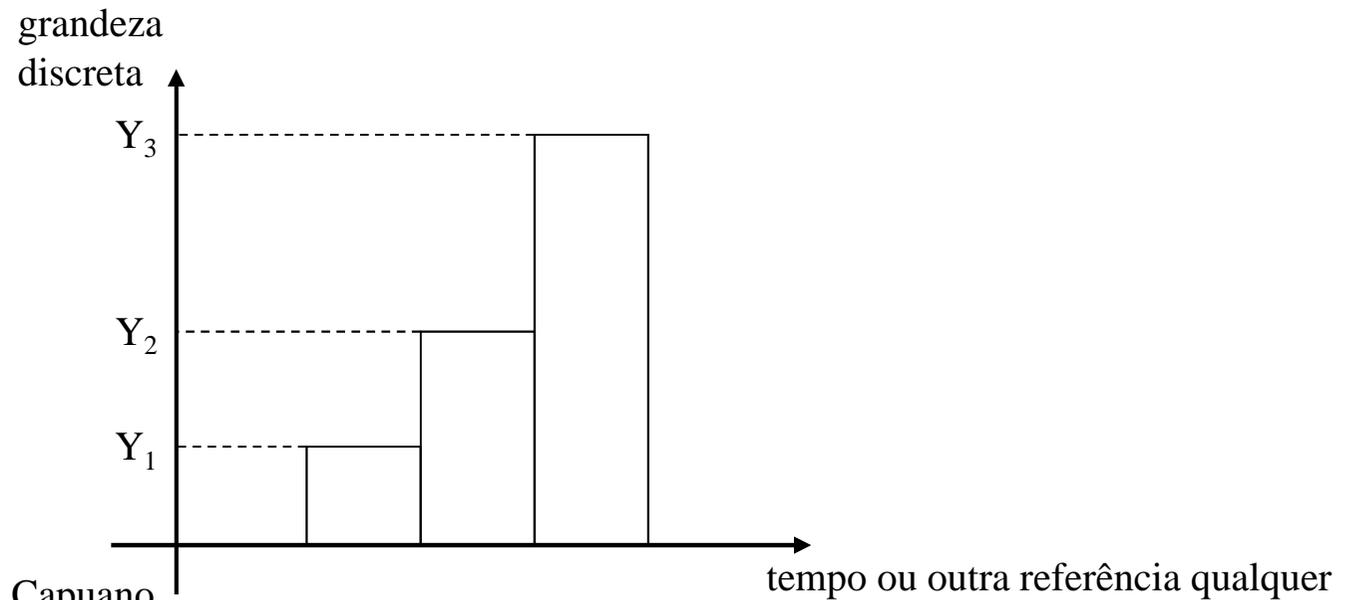
- A maioria das variáveis físicas é analógica
- Uma **grandeza analógica** pode assumir qualquer valor ao longo de uma **faixa contínua de valores**
- Ex.: velocidade, pressão, temperatura, corrente elétrica, tensão, resistência etc.



# Introdução – Variável Digital

Entende-se por **digital** toda **variação discreta**, ou seja, a passagem de um valor a outro se dá por saltos

Ex.: códigos digitais (BCD 8421), CD-ROM, contador etc.



# Introdução – Quantidade Digital

Na prática, uma **variável** ou **quantidade digital** terá seu valor codificado com grandezas binárias, como 0 ou 1, **BAIXO** ou **ALTO** etc., que por sua vez pode se situar dentro de **faixas especificadas de valores**

Na lógica TTL

**nível lógico 0** varia de 0V a 0,8V

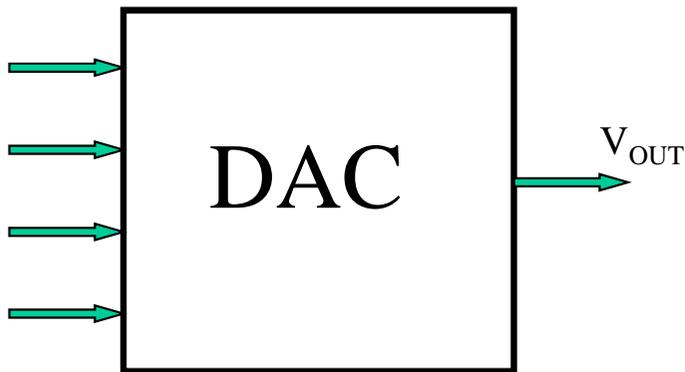
**nível lógico 1** varia de 2V a 5V

# Introdução – Sistemas Digitais

- **Sistemas Digitais** realizam as operações internas usando **circuitos digitais e operações digitais**
- Portanto para que os dados coletados no mundo analógico possam ser processados num sistema digital, eles precisam ser colocados no formato digital
- Normalmente, uma variável física analógica é coletada por um Transdutor que a converte num sinal elétrico analógico, que servirá de entrada para um **Conversor Analógico-Digital (ADC)**
- Depois do Processamento Digital dos dados, os resultados podem ser convertidos por um **Conversor Digital-Analógico (DAC)** para atuarem no mundo analógico

# Saída de Fundo de Escala (FS)

- Na conversão D/A, um valor representado em código digital (como o binário direto ou o BCD) é convertido para uma tensão ou corrente proporcional ao valor digital
- O valor máximo que um conversor D/A pode gerar é conhecido como **saída de fundo de escala (FS)**



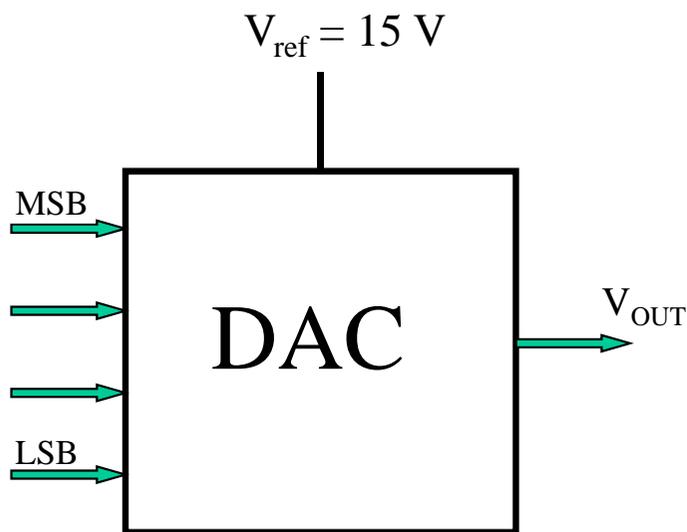
Um conversor DAC com 4 entradas pode distinguir  $2^4 = 16$  valores binários, por ex., de 0000 a 1111, que podem representar, por ex., tensões de 0V a 15V medidas em  $V_{OUT}$

Geralmente,

**Saída Analógica = K x Entrada Digital (K=1V)**

# Fator de Proporcionalidade K

- O Fator de Proporcionalidade K é um valor constante para um determinado DAC, considerando uma tensão  $V_{ref}$  fixa
- Sua unidade depende da unidade da Saída Analógica (normalmente tensão ou corrente)



$$V_{OUT} = (1\text{ V}) \times \text{Entrada Digital}$$

Por ex., se a Entrada Digital for  $1100_2 = 12_{10}$

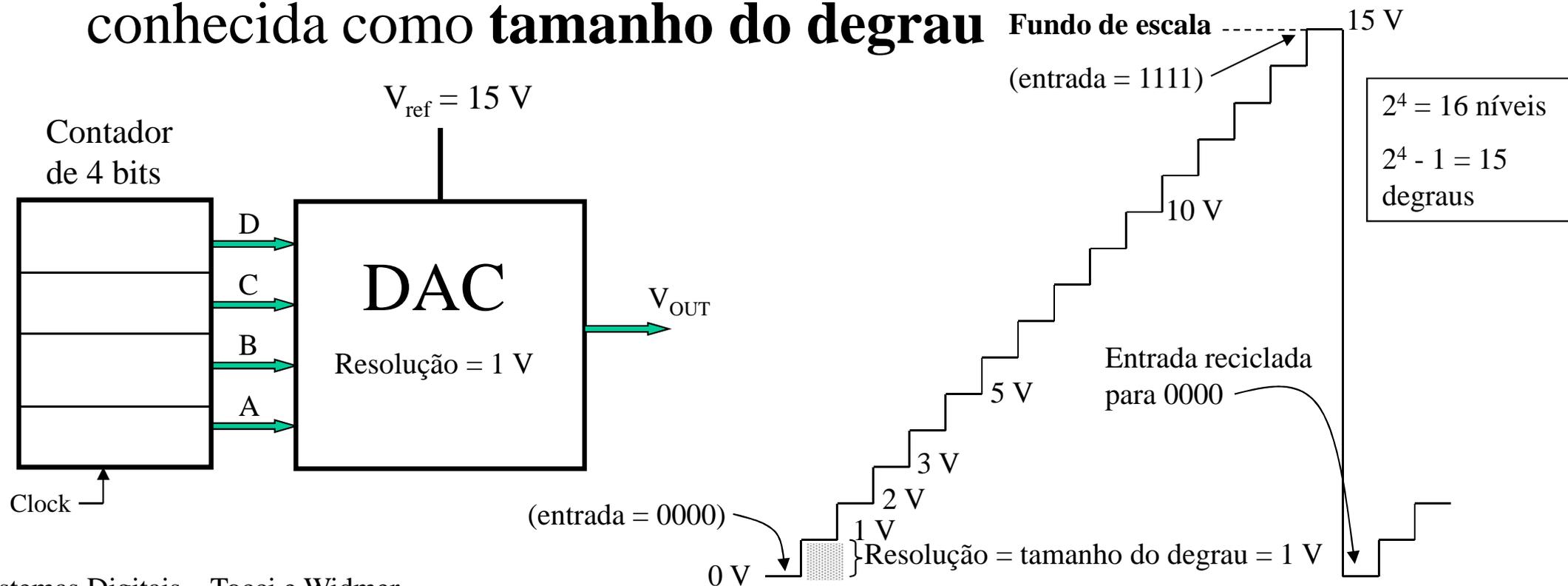
$$V_{OUT} = (1\text{ V}) \times 12 = 12\text{ V}$$

LSB – *Least Significant Bit* ou *Bit Menos Significativo*

MSB – *Most Significant Bit* ou *Bit Mais Significativo*

# Resolução – Tamanho do Degrau

- A **resolução** de um conversor D/A é definida como a **menor variação** que pode ocorrer na **saída analógica** como resultado de uma mudança na entrada digital
- A resolução é sempre igual ao peso do bit LSB e também é conhecida como **tamanho do degrau**



# Resolução, K e Tamanho do Degrau

- Para um DAC de  $N$  bits, o **número de níveis diferentes** é  $2^N$  e o **número de degraus** é  $2^N - 1$
- A resolução (tamanho do degrau) é igual ao fator de proporcionalidade  $K$
- **Saída Analógica =  $K \times$  Entrada Digital**
- Interpretação possível: uma **entrada digital** é igual ao número de degraus,  $K$  é a quantidade de tensão por degrau e a **saída analógica**, o produto dos dois
- **Resolução =  $K = \frac{\text{Saída Analógica de Fundo de Escala}}{(2^N - 1)}$**

# Resolução Percentual

- É possível expressar a resolução como uma porcentagem da saída de fundo de escala

$$\% \text{resolução} = \frac{\text{tamanho do degrau}}{\text{fundo de escala (FS)}} \times 100\%$$

Para o exemplo dado,

$$\% \text{resolução} = \frac{1 \text{ V}}{15 \text{ V}} \times 100\% = 6,67\%$$

# Resolução Percentual e N° de Degraus

- A resolução percentual também pode ser calculada a partir de

$$\% \text{resolução} = \frac{1}{n^{\circ} \text{ total de degraus}} \times 100\%$$

Para o exemplo dado,

$$\% \text{resolução} = \frac{1}{15} \times 100\% = 6,67\%$$

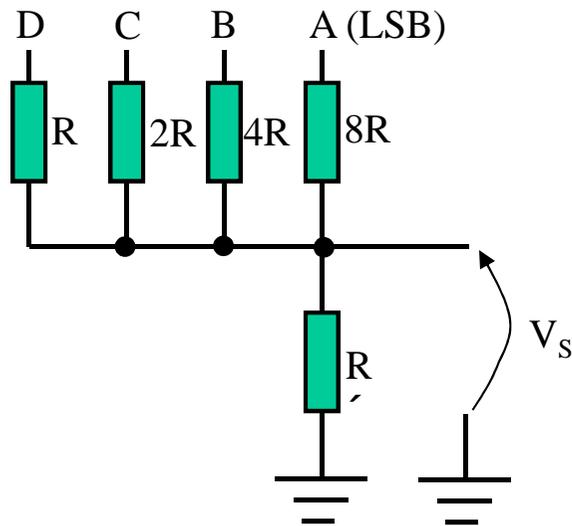
**Conclusão: apenas o n° de bits  
determina a resolução percentual**

Aumentando-se o n° de bits,  
aumenta o n° de degraus para  
atingir o fundo de escala

# Conversor Digital-Analógico Básico

## DAC básico (Escada Binária) utilizando apenas resistores

Entrada Digital (Cód. BCD8421)



Saída Analógica  
(Nível de Tensão)

$R'$  deve ter um valor muito menor do que  $R$ , para que não influa no circuito

Se tivermos nível 1 ( $V_{cc}$ ) em D, e 0 nas demais entradas ( $1000_2$ ), a tensão em  $R'$  será:

$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R'}{R + R'} \quad \text{como } R' \ll R,$$

$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R'}{R}$$

Se tivermos nível 1 em C e 0 nas demais entradas ( $0100_2$ ), a tensão em  $R'$  será:

$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R'}{2R}$$

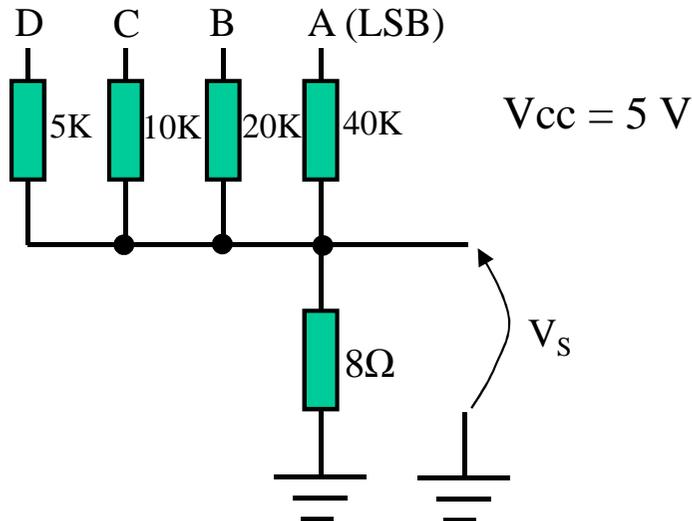
Se tivermos nível 1 em B e 0 nas demais entradas ( $0010_2$ ), a tensão em  $R'$  será:

$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R'}{4R}$$

Se tivermos nível 1 em A e 0 nas demais entradas ( $0001_2$ ), a tensão em  $R'$  será:

$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R'}{8R}$$

# Exemplo Numérico de DAC Básico

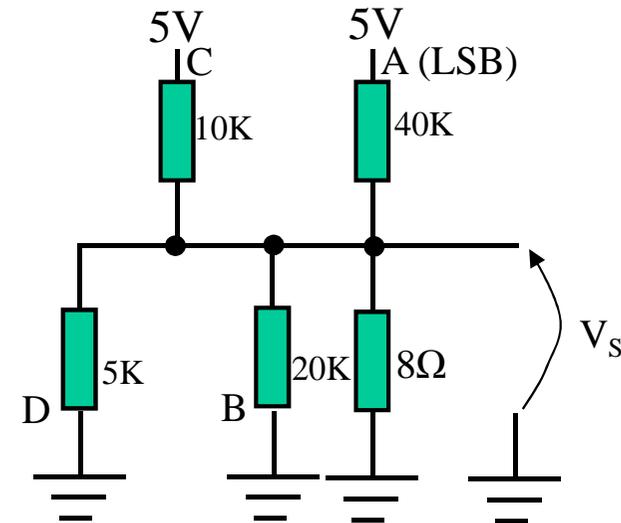


Se tivermos nível 0 em todas as entradas ( $0000_2$ ), a tensão  $V_S$  será  $V_S = 0V$

A resolução ( $0001_2$ ) é de  $V_{S(\text{LSB})} = 1 \text{ mV}$   
( $V_{S(\text{LSB})} = 5 * 8 / 40K$ )

Se tivermos nível 1 em todas as entradas ( $1111_2$ ), a tensão  $V_S$  será  $V_S = 15 \text{ mV}$

Se tivermos nível 1 em C e A ( $0101_2$ ), a tensão  $V_S$  será:



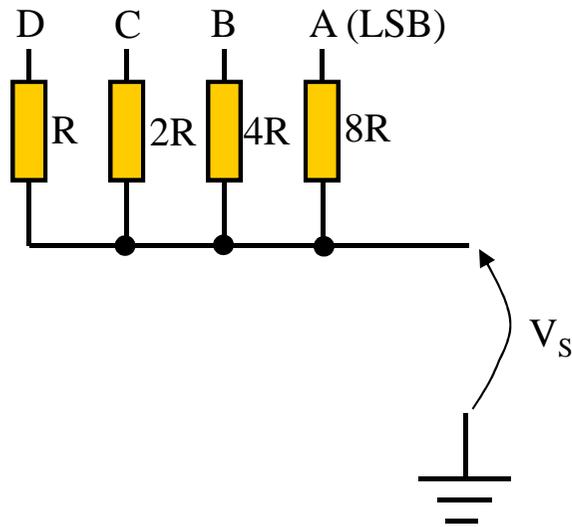
$$V_S = 8 \cdot \left[ \frac{5}{10000} + \frac{5}{40000} \right] = 5 \text{ mV}$$



Para  $0101_2 = 5_{10}$ ,  $V_S = 5 \text{ mV}$

# Configuração Escada Binária Sem R'

Entrada Digital (Cód. BCD8421)



Saída Analógica  
(Nível de Tensão)

Se tivermos nível 1 em C e 0 nas demais entradas (0100<sub>2</sub>), a tensão V<sub>S</sub> será:

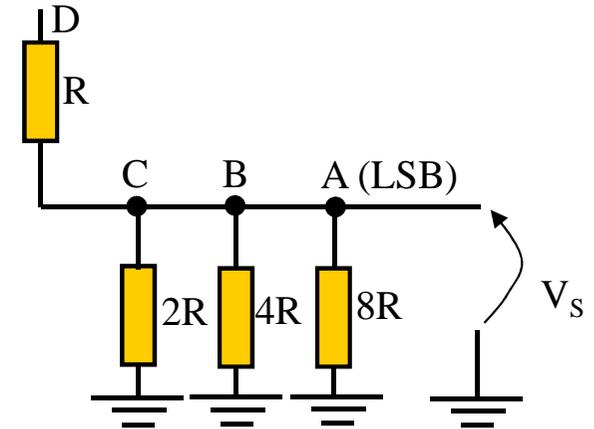
$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot 4}{15}$$

Se tivermos nível 1 em B e 0 nas demais entradas (0010<sub>2</sub>), a tensão V<sub>S</sub> será:

$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot 2}{15}$$

Se tivermos nível 1 em A e 0 nas demais entradas (0001<sub>2</sub>), a tensão V<sub>S</sub> será:

$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot 1}{15}$$



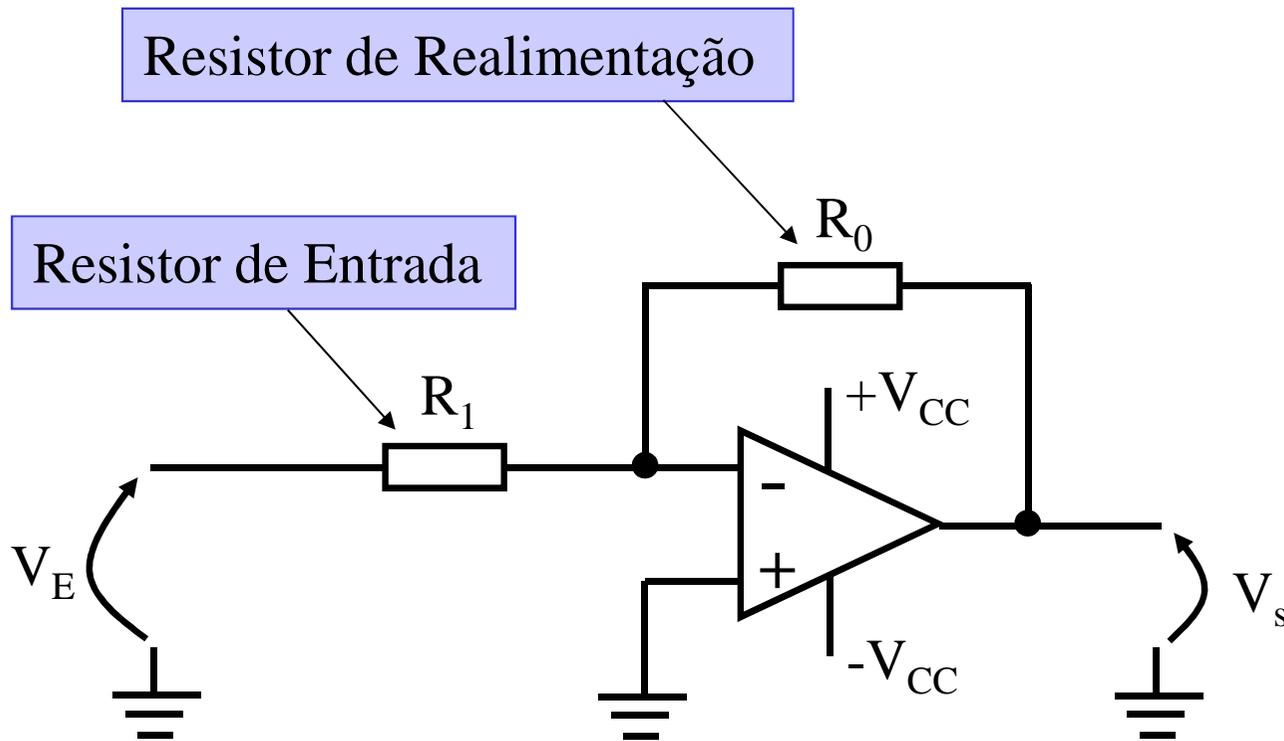
Se tivermos nível 1 (V<sub>CC</sub>) em D, e 0 nas demais entradas (1000<sub>2</sub>), a tensão V<sub>S</sub> será:

$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot \left[ \frac{1}{1/2R + 1/4R + 1/8R} \right]}{R + \left[ \frac{1}{1/2R + 1/4R + 1/8R} \right]} \Rightarrow V_S = \frac{V_{CC} \cdot 8}{15}$$

**CONCLUSÃO:**

$$V_S = \frac{V_{CC} \cdot (\text{Entr. Digital})}{2^N - 1}$$

# Amplificador Operacional



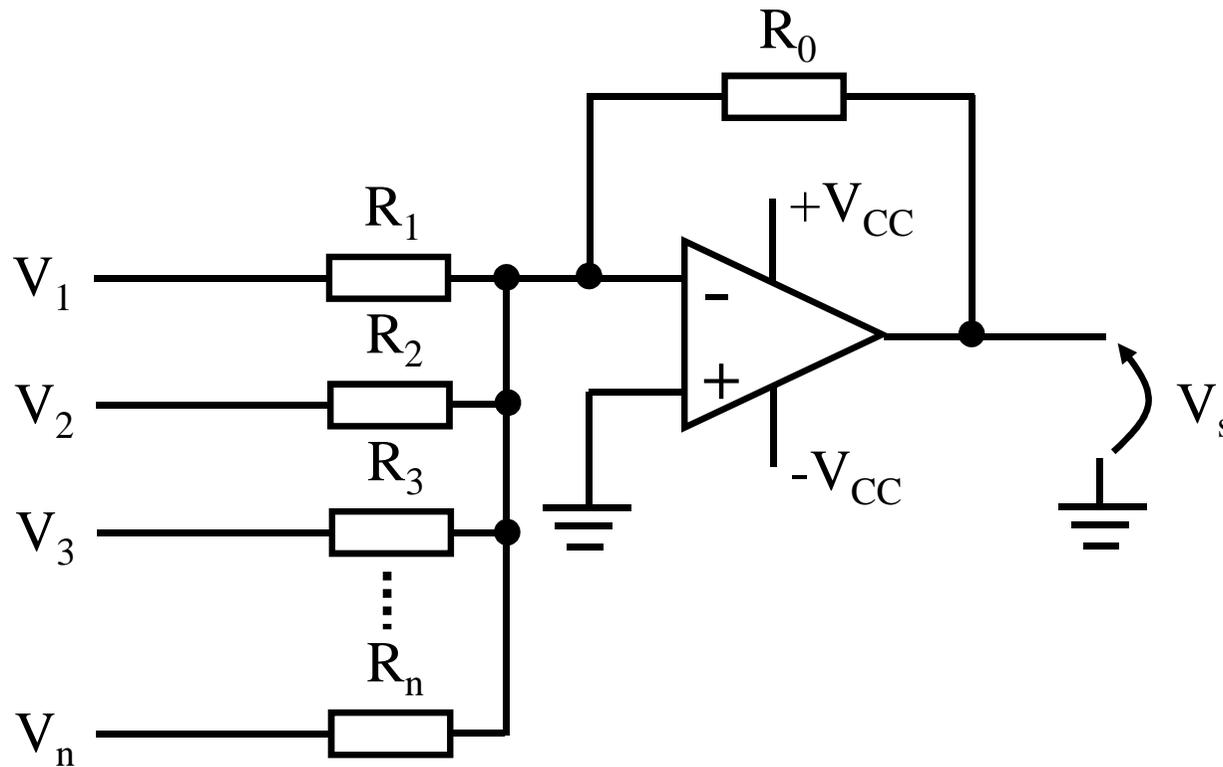
Ganho do AmpOp

$$G = (-) \frac{V_s}{V_E} = - \frac{R_0}{R_1}$$

Tensão de Saída  $V_s$

$$V_s = - V_E \frac{R_0}{R_1}$$

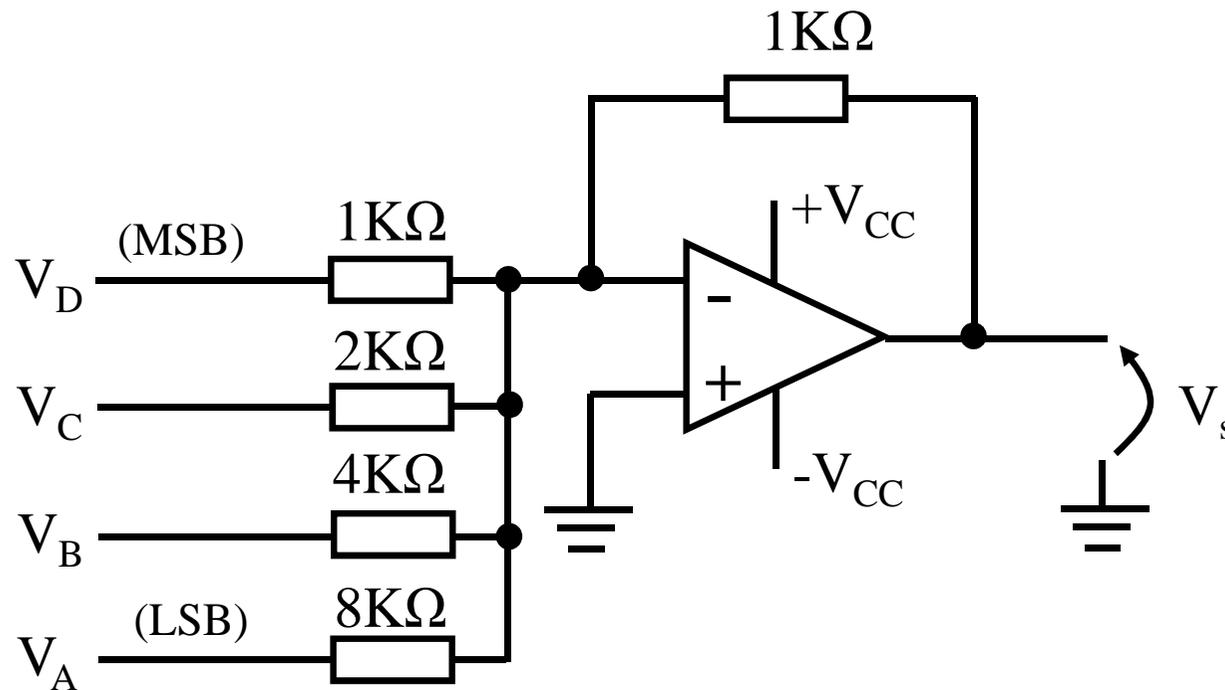
# DAC com Amplificador Operacional



Um Amplificador Somador produz a soma ponderada das tensões de entrada

$$V_s = - \left( \frac{R_0}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_0}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R_0}{R_3} \cdot V_3 + \dots + \frac{R_0}{R_n} \cdot V_n \right)$$

# Exemplo de DAC-4 bits com AmpOp

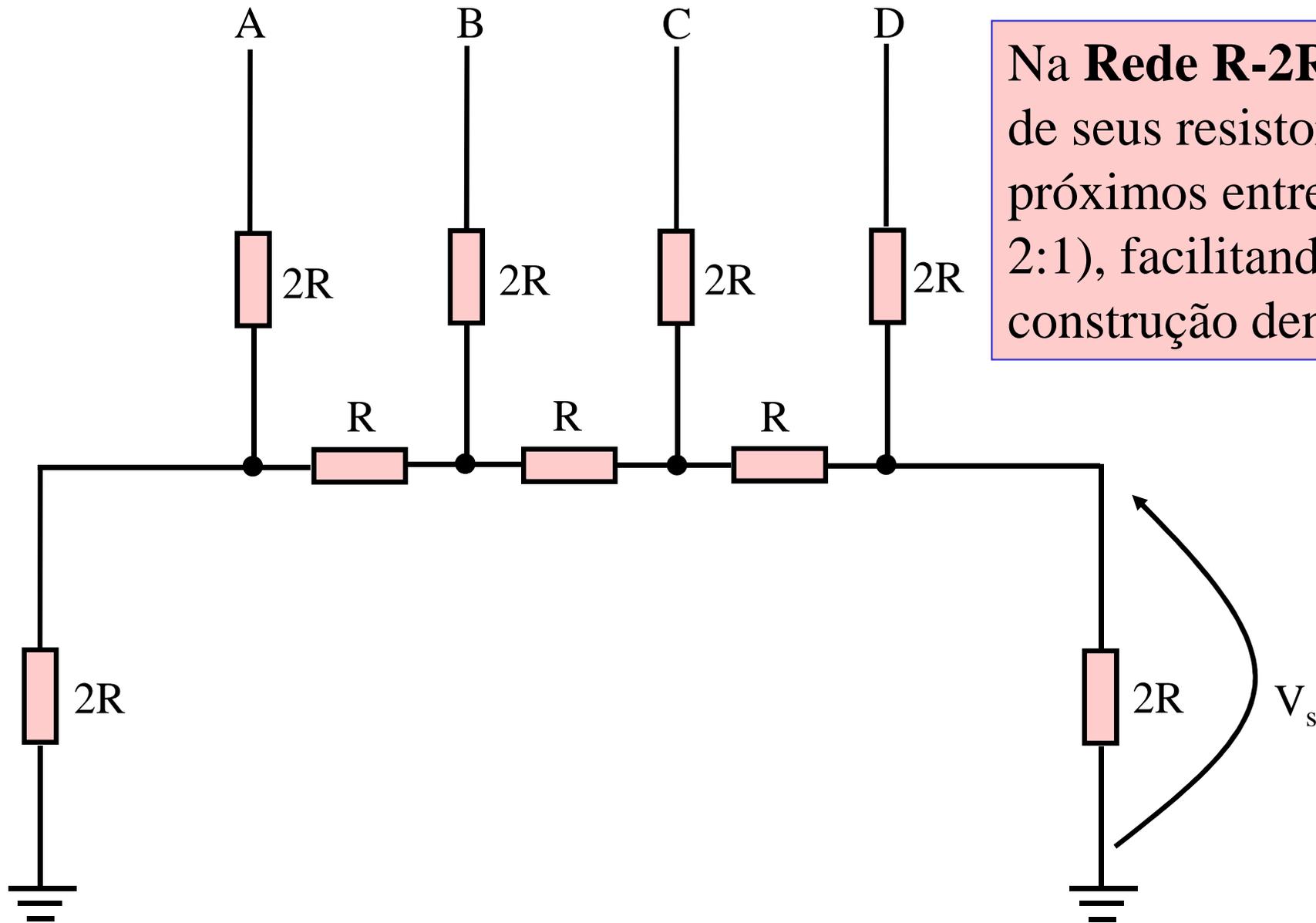


Para  $V_D = V_B = 5V$  e  
 $V_C = V_A = 0V$ , (1010)  
 $\Rightarrow V_s = -(5V + 0V +$   
 $\frac{1}{4} \cdot 5V + 0V) = -6,25V$

A resolução é  $(1/8) \cdot 5V$   
 $= 0,625V$ , igual ao peso  
do LSB

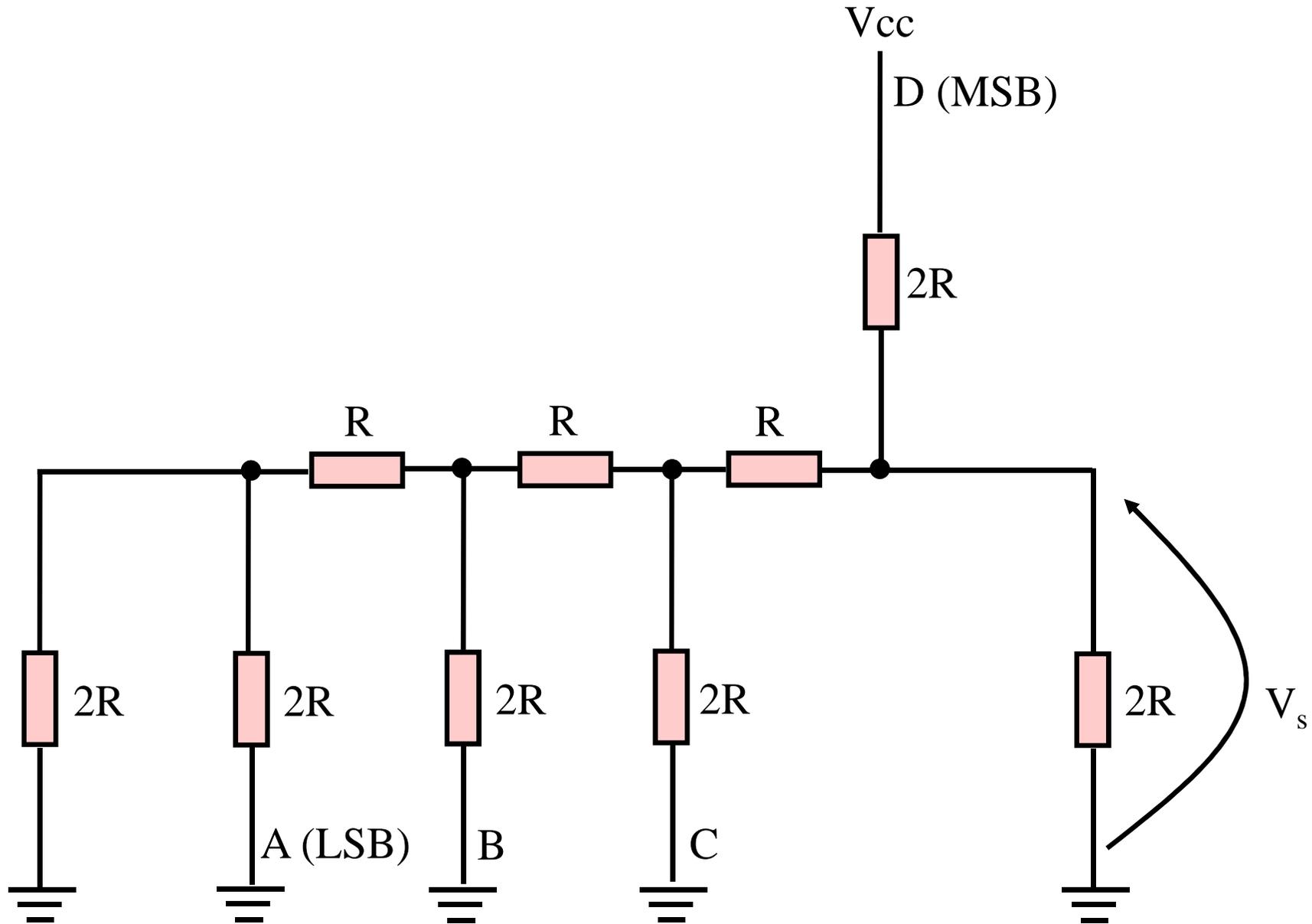
$$V_s = - \left( \frac{1}{1} \cdot V_D + \frac{1}{2} \cdot V_C + \frac{1}{4} \cdot V_B + \frac{1}{8} \cdot V_A \right)$$

# DAC com Rede R-2R

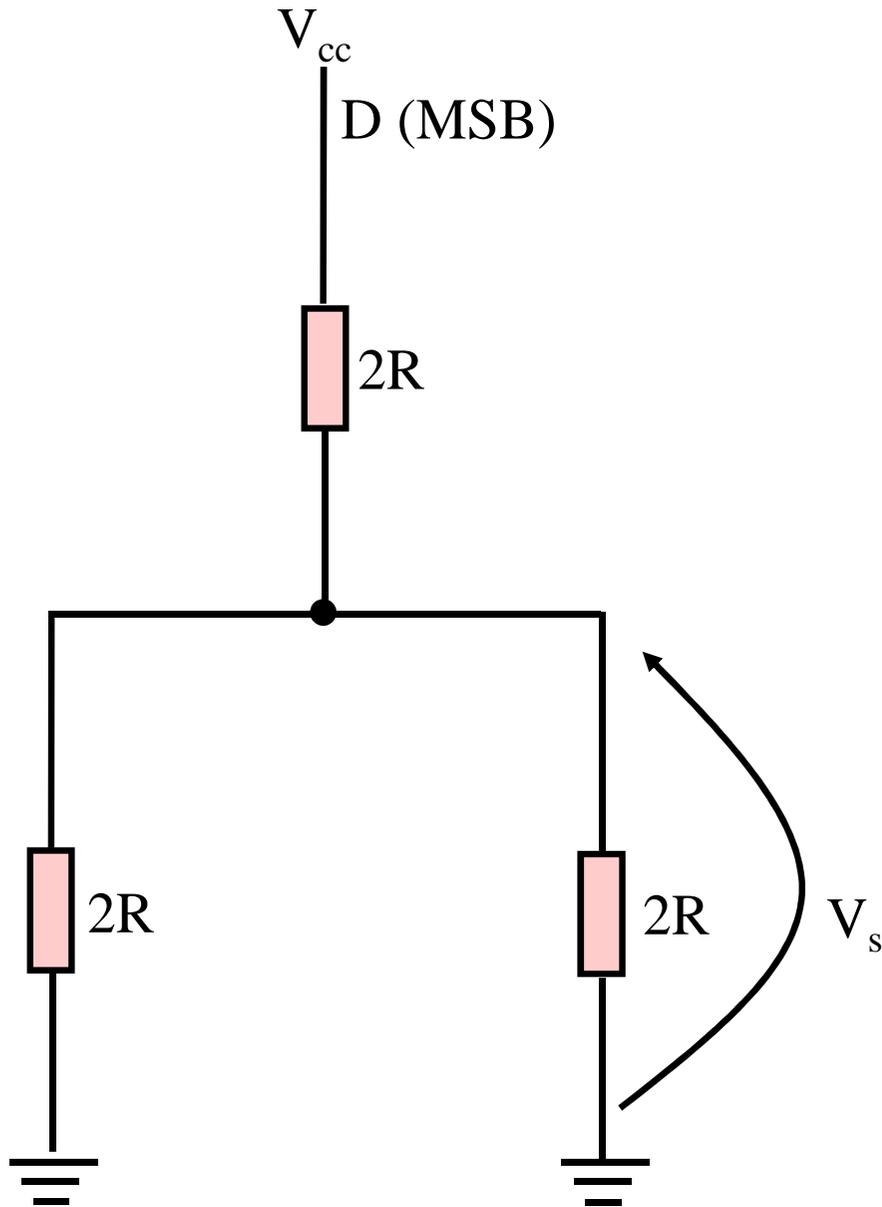


Na **Rede R-2R**, os valores de seus resistores são mais próximos entre si (relação 2:1), facilitando sua construção dentro de um IC

# DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada D



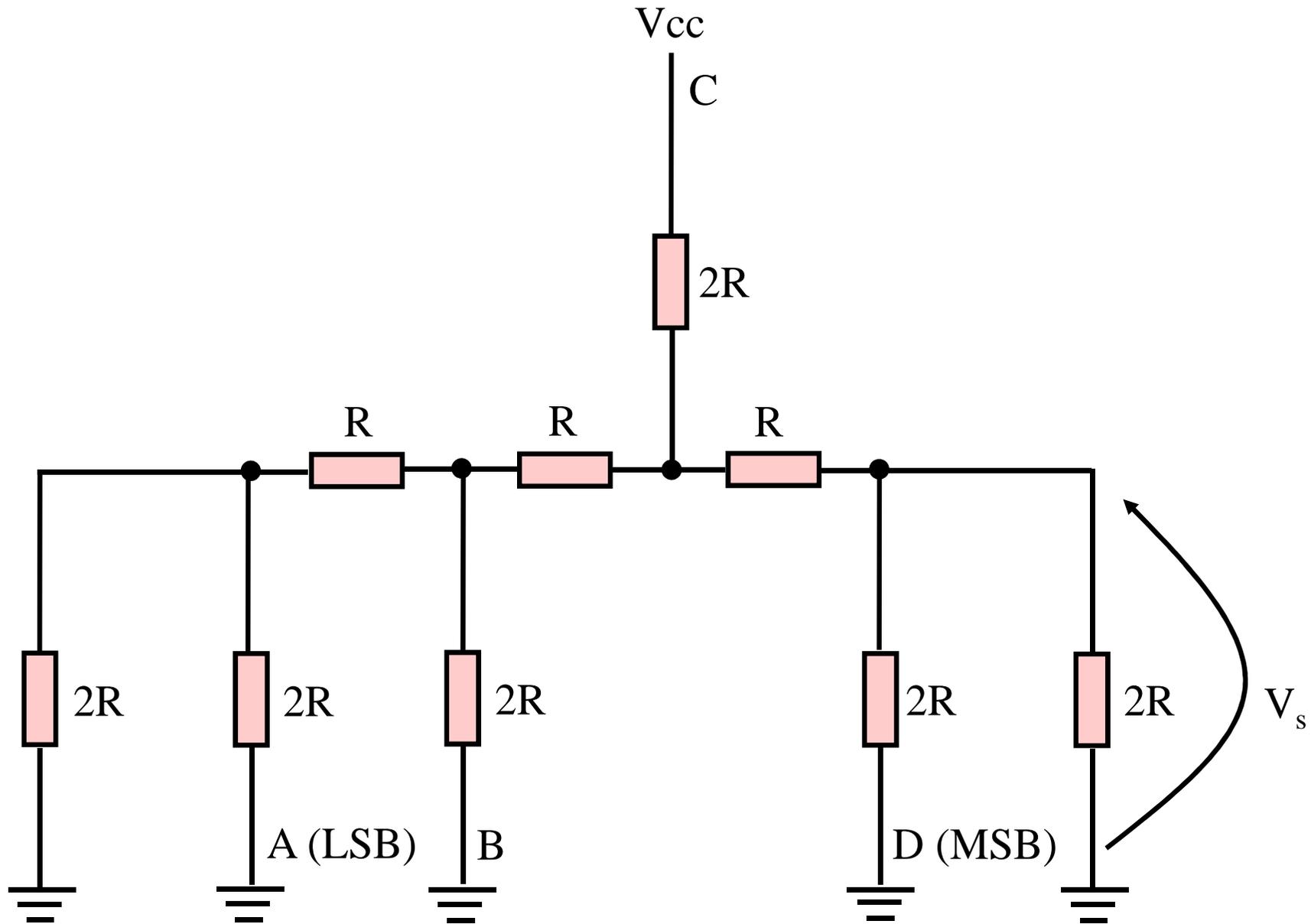
# Peso da Entrada D – Circuito Equivalente



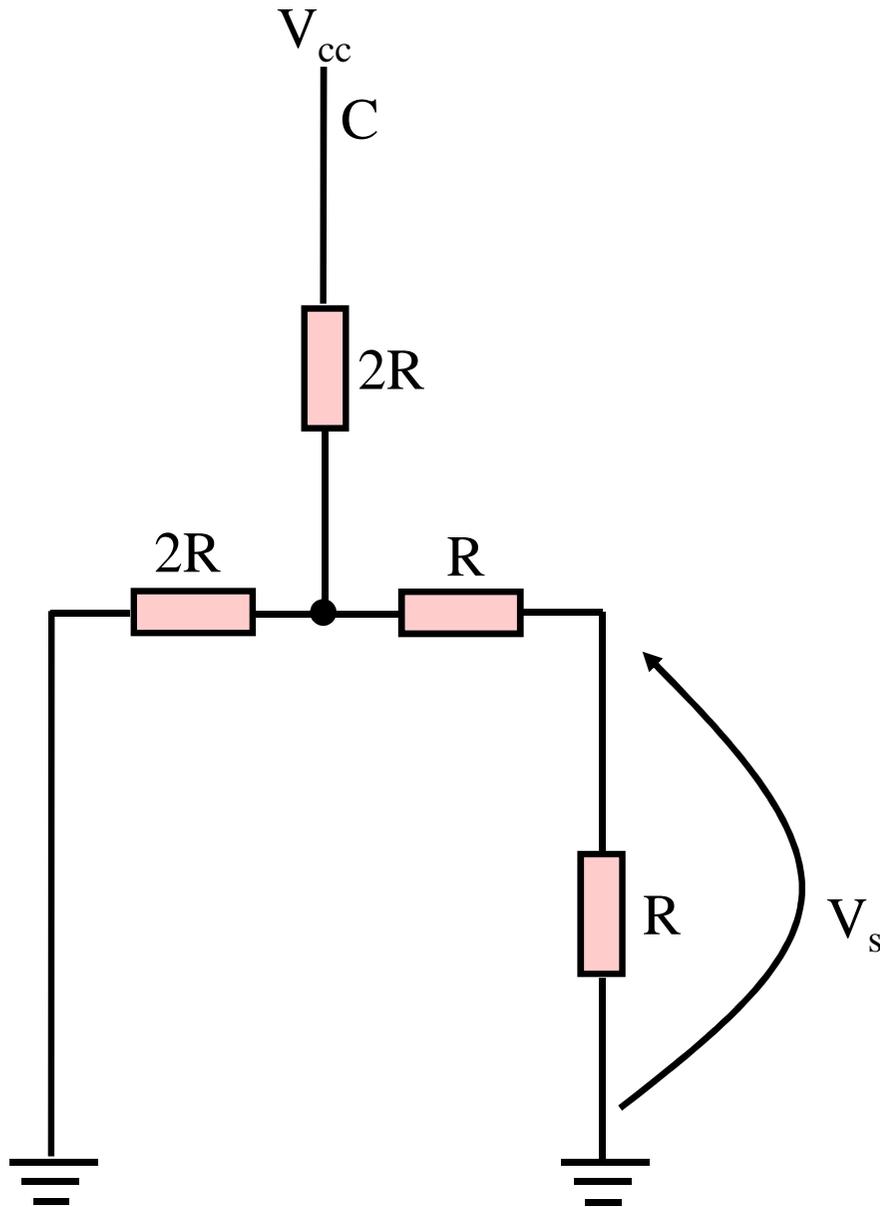
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R}{2R + R}$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{3}$$

# DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada C



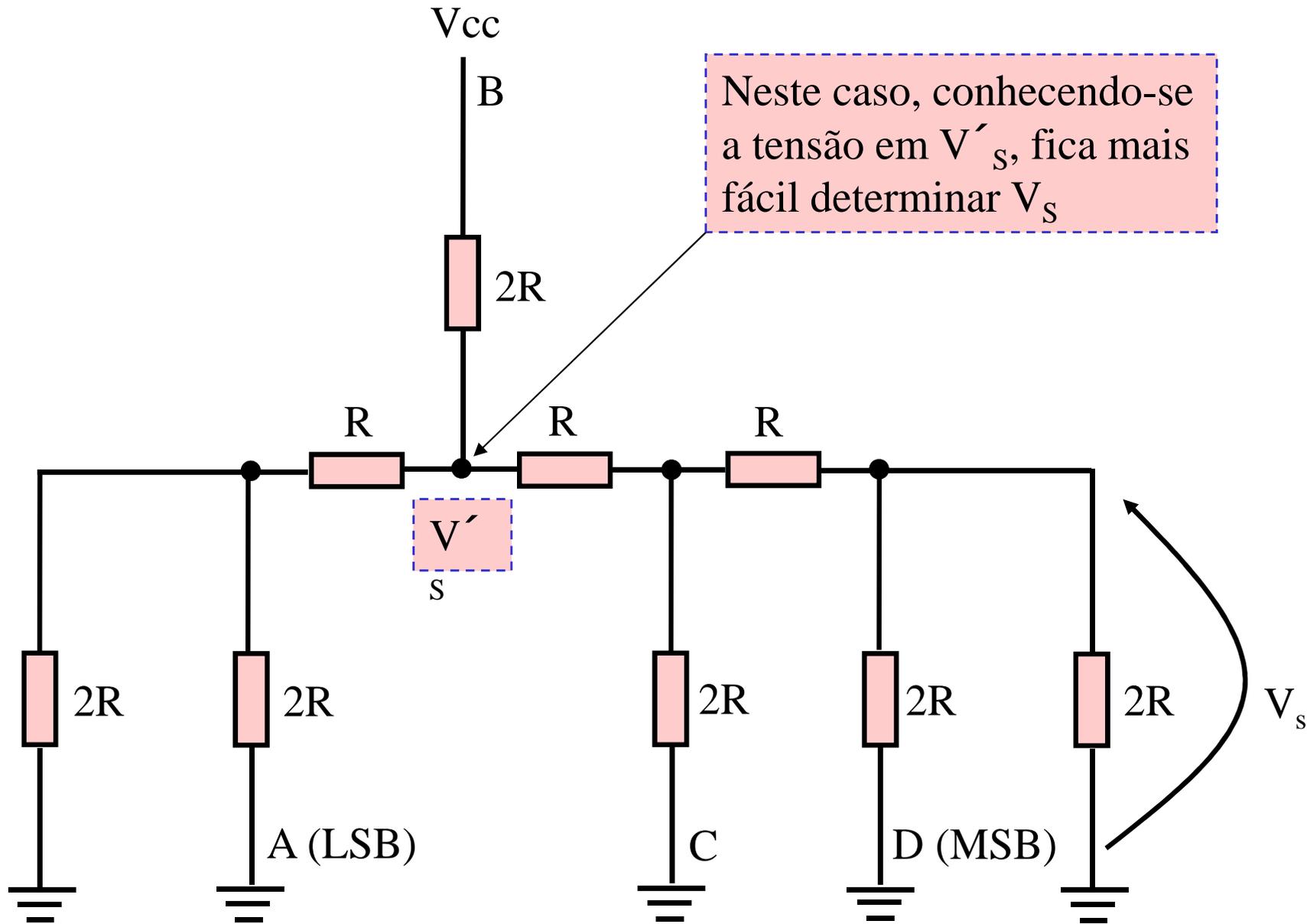
# Peso da Entrada C – Circuito Equivalente



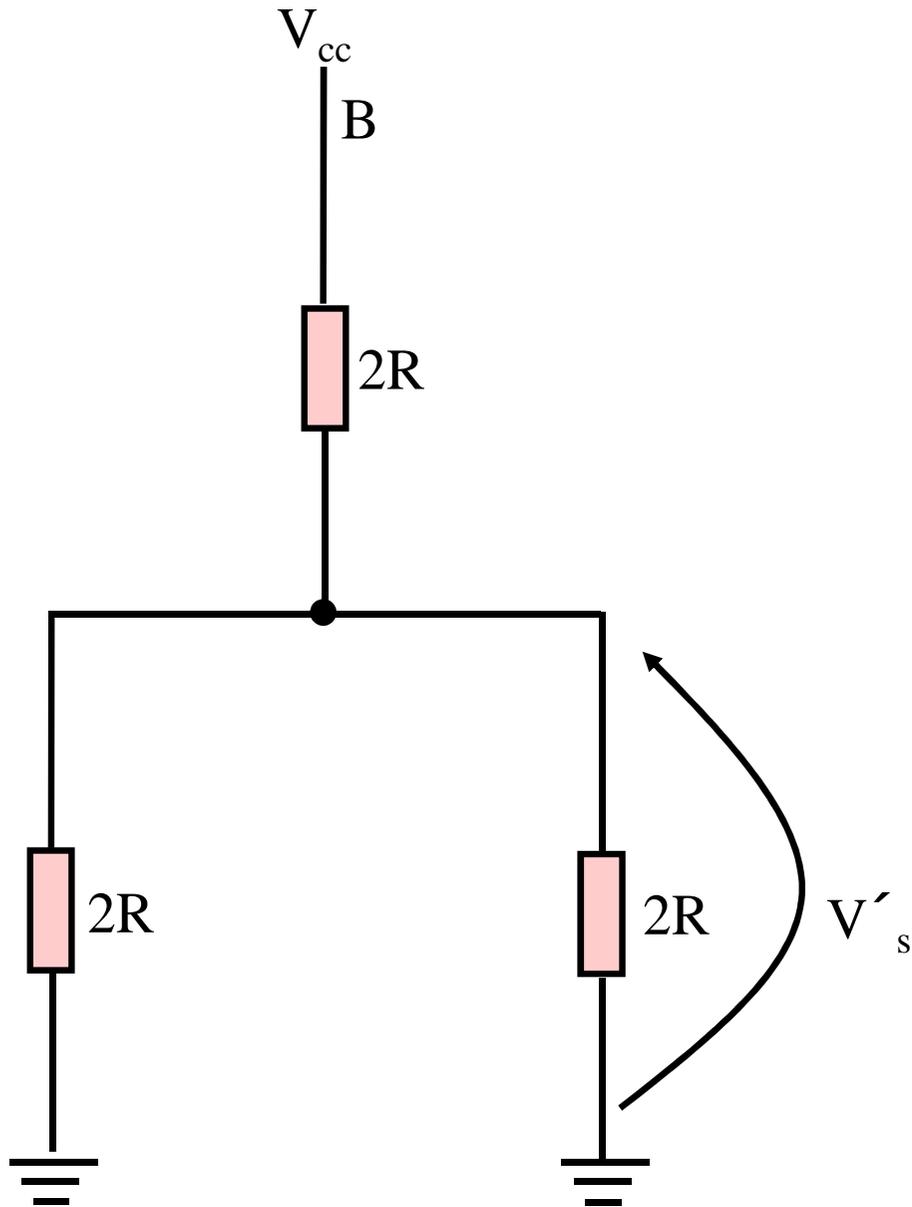
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R}{2R + R}$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{6}$$

# DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada B

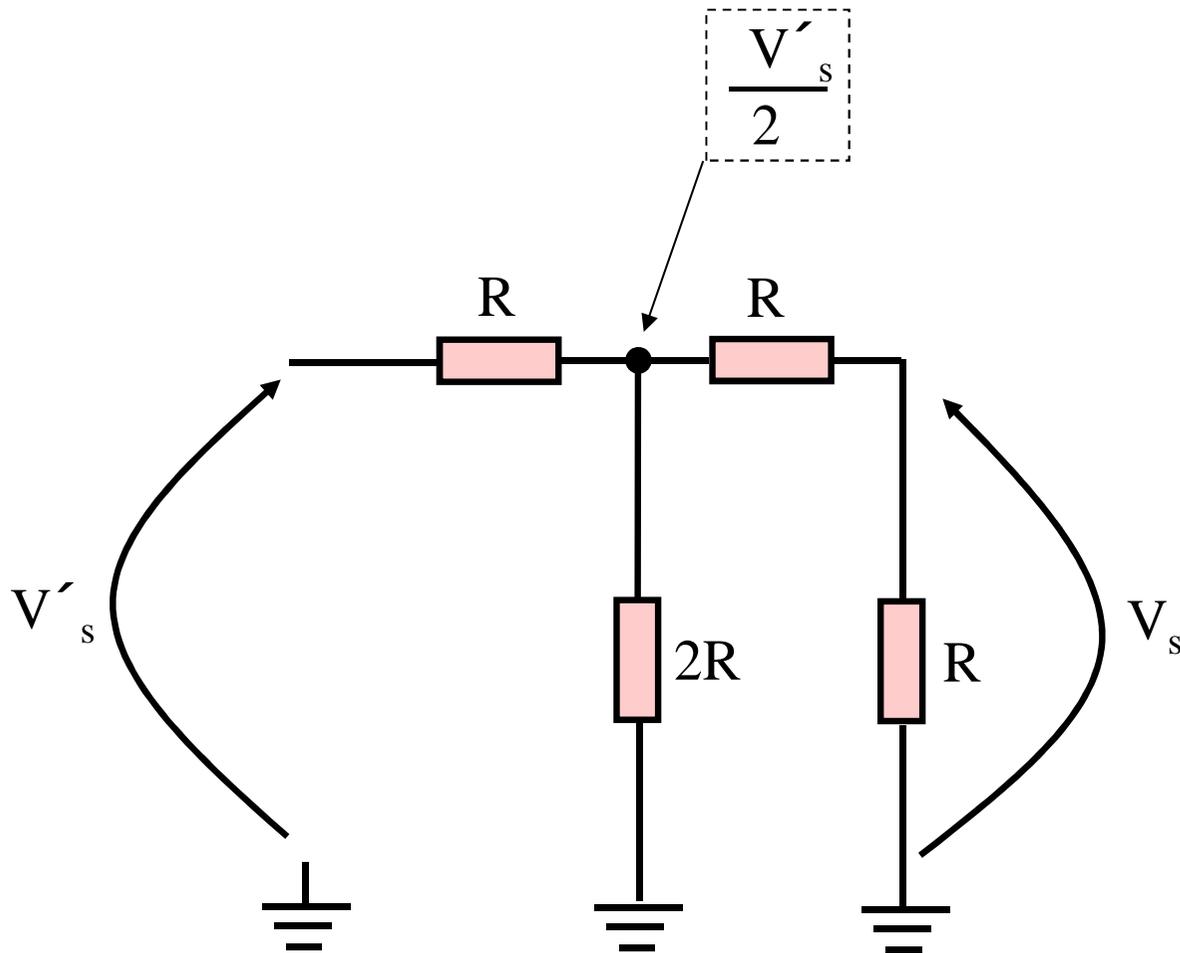


# Peso da Entrada B – Circuito Equivalente



$$V'_s = \frac{V_{cc}}{3}$$

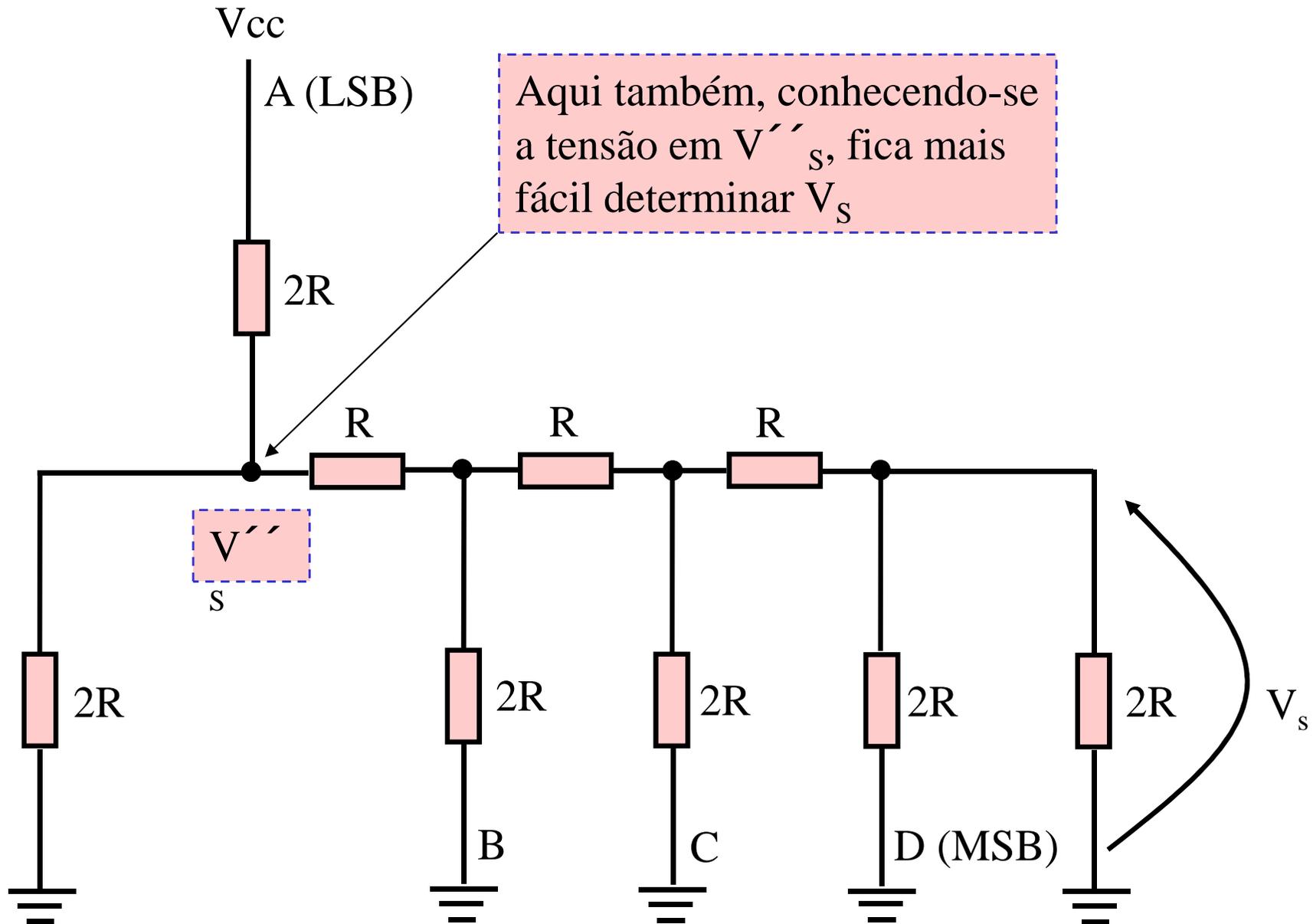
# DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada B



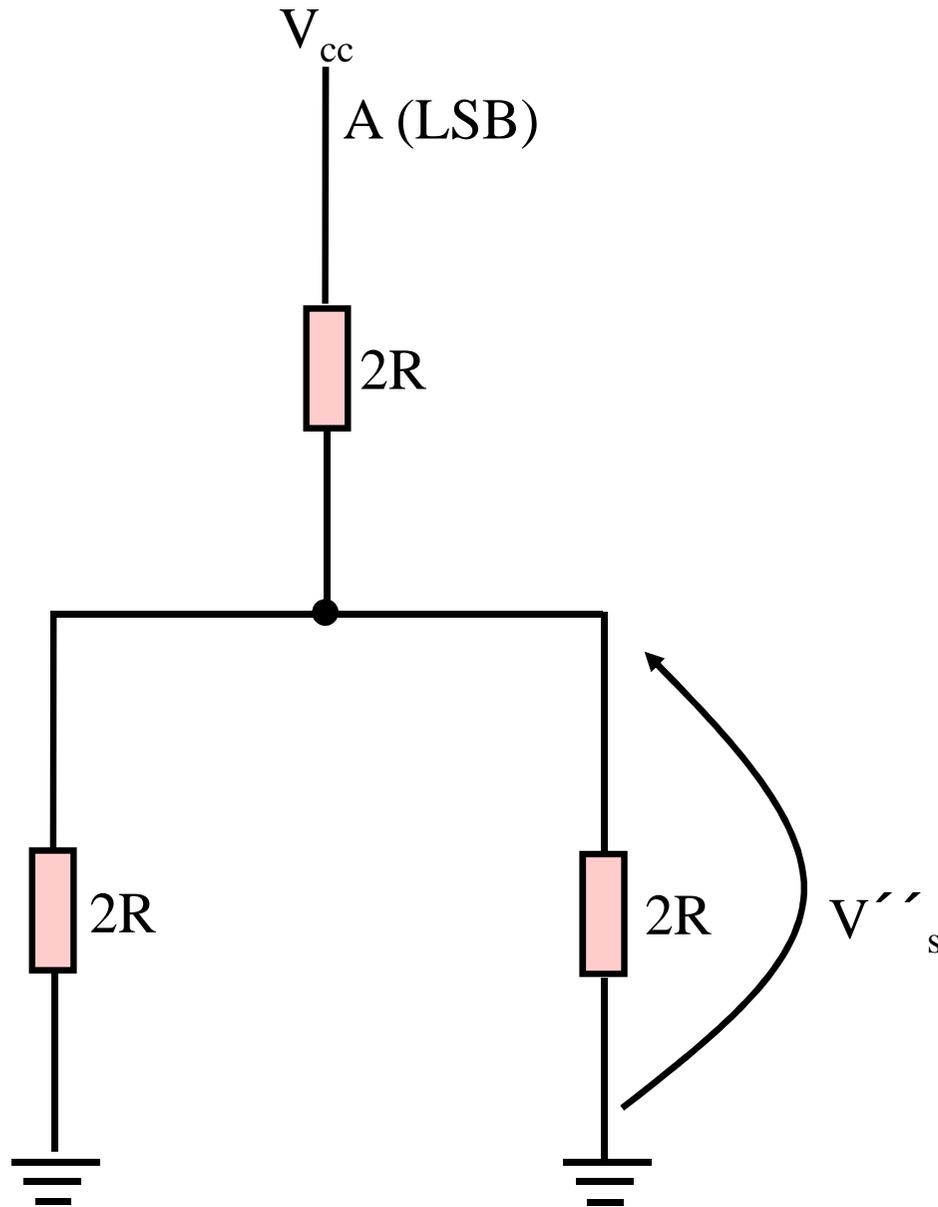
$$V_s = \frac{V'_s}{4}$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{12}$$

# DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada A

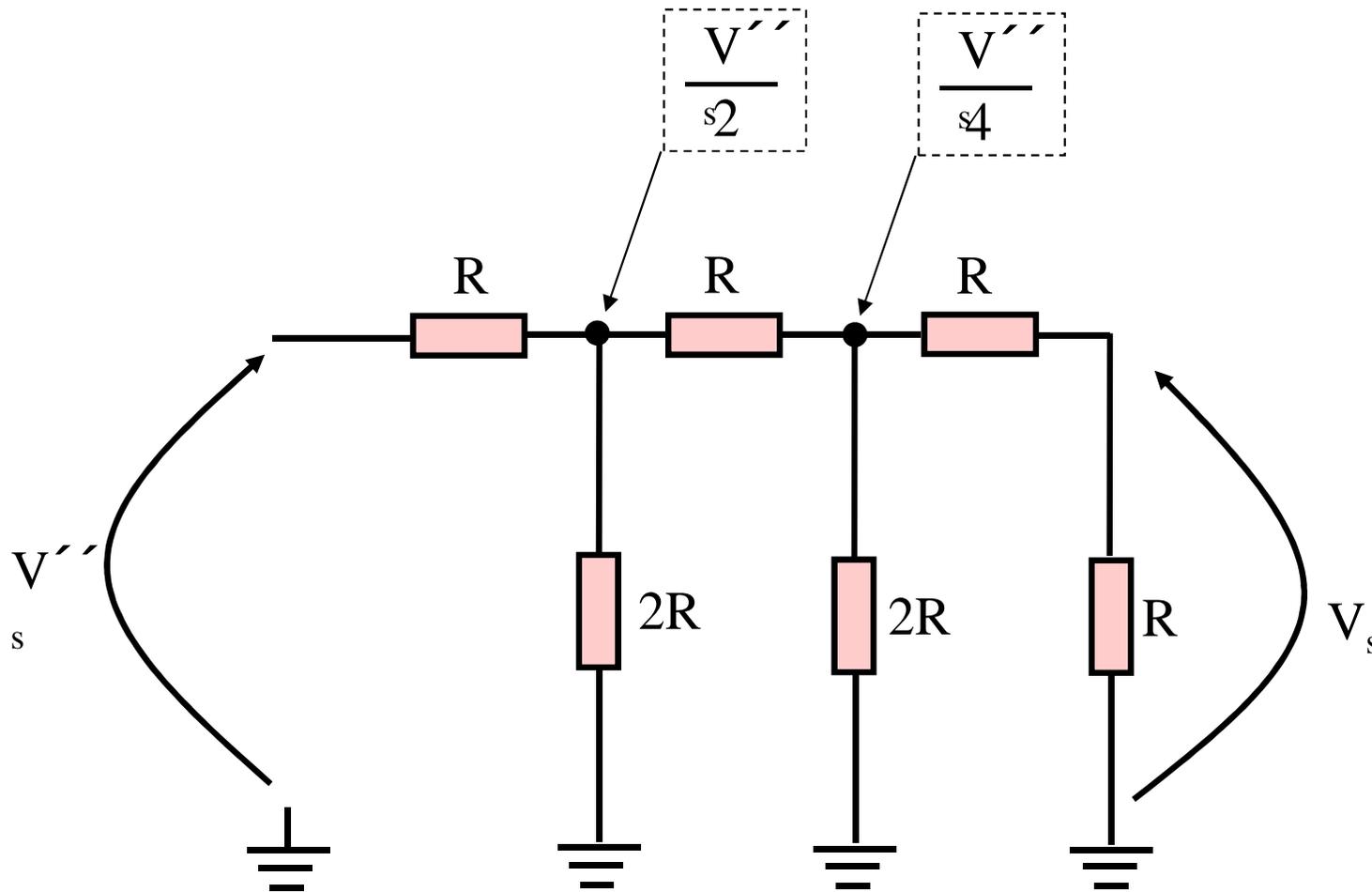


# Peso da Entrada A – Circuito Equivalente



$$V''_s = \frac{V_{cc}}{3}$$

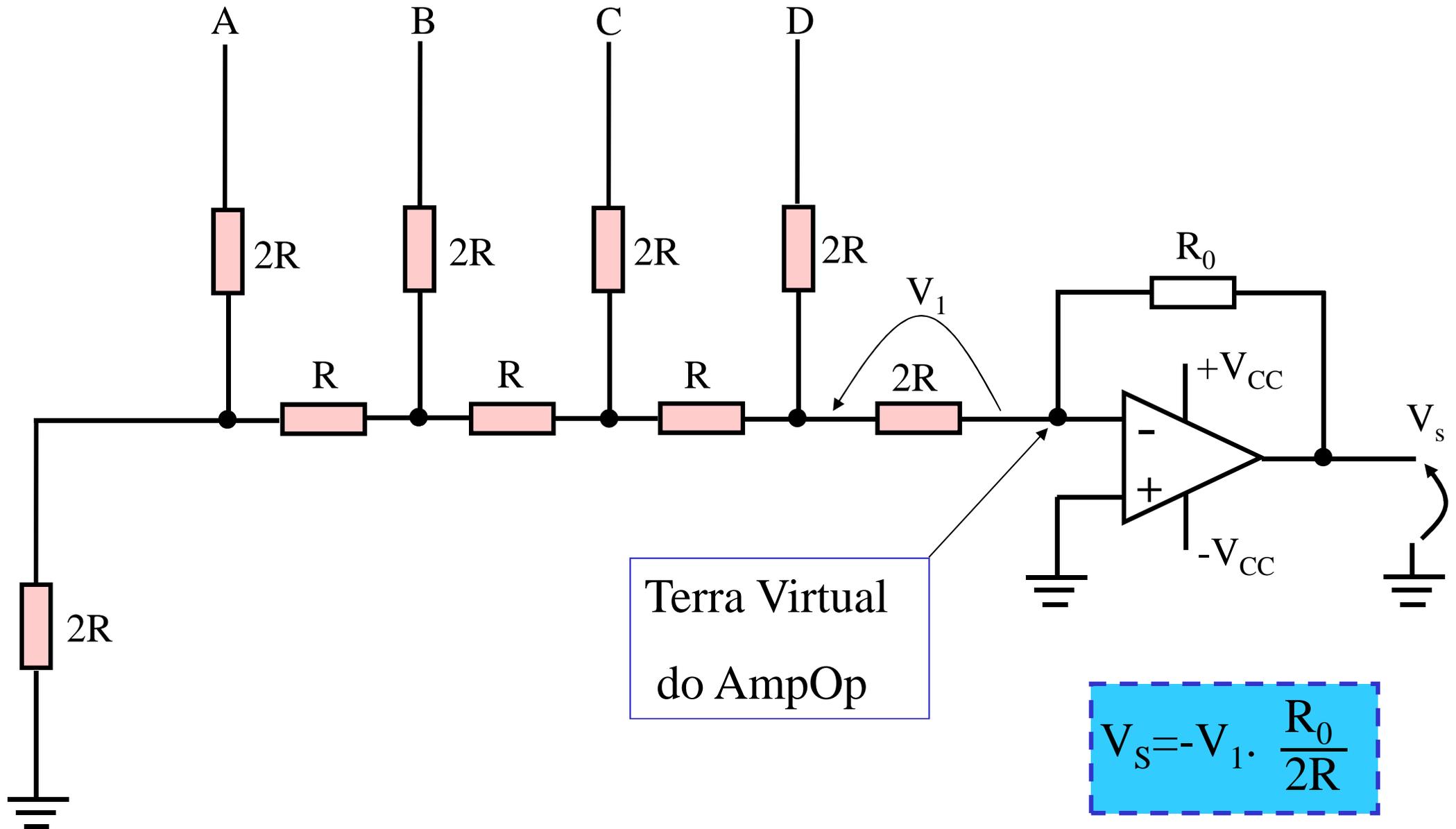
# DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada A



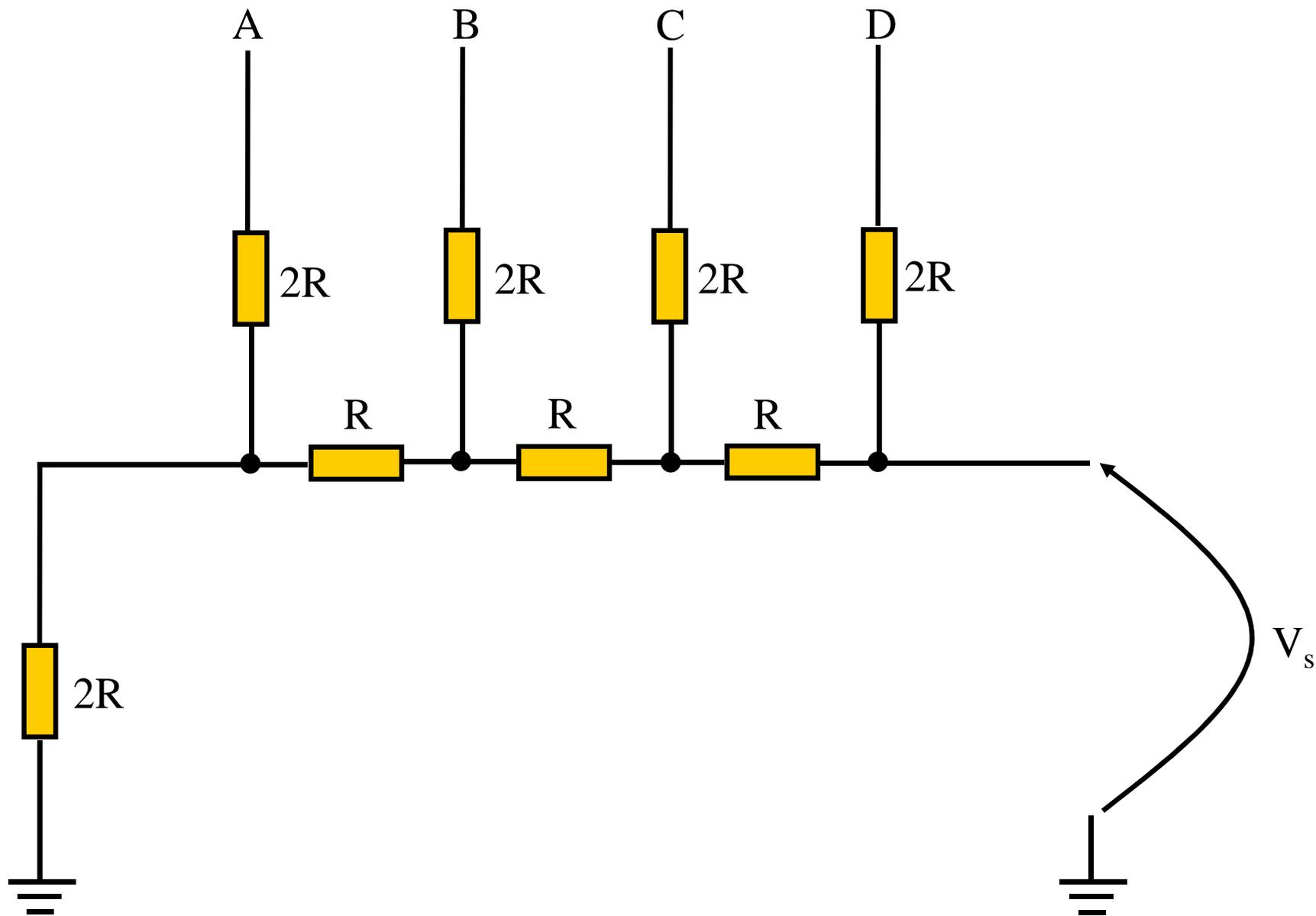
$$V_s = \frac{V''''_s}{8} s$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{24}$$

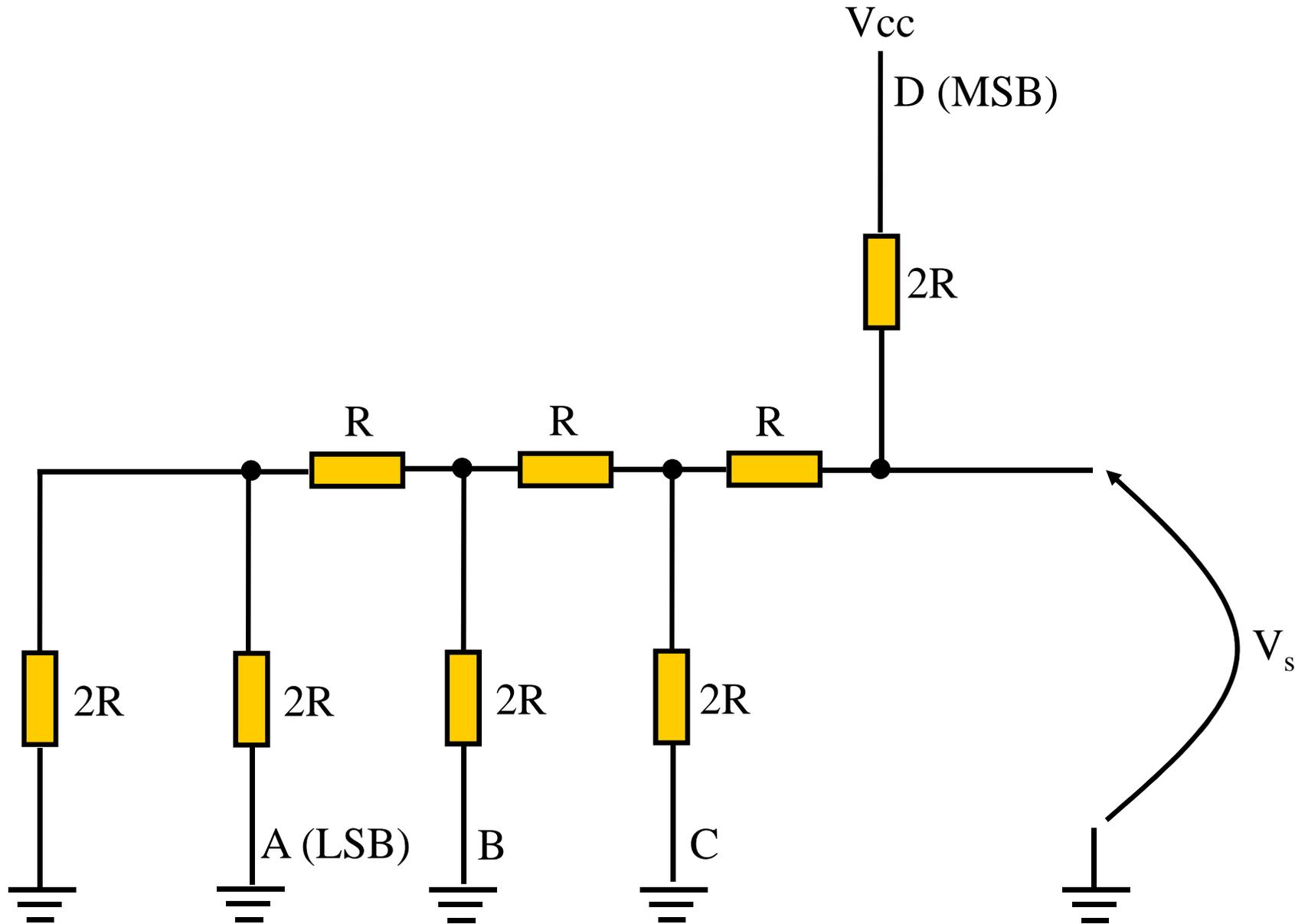
# Rede R-2R com AmpOp



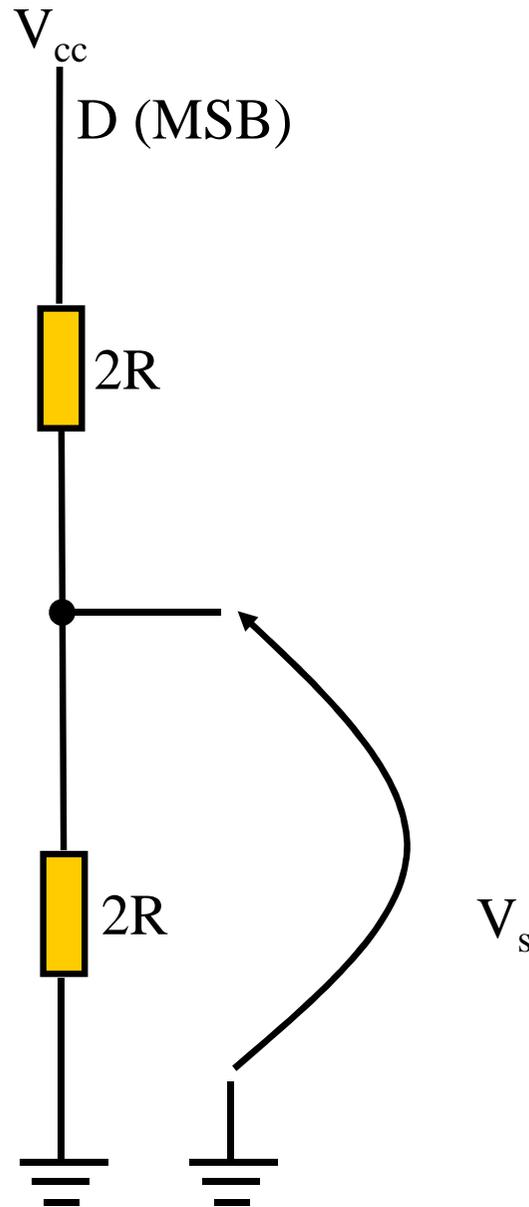
# Rede R-2R Sem Resistor de Saída



# Rede R-2R Sem Resistor de Saída Peso da Entrada D



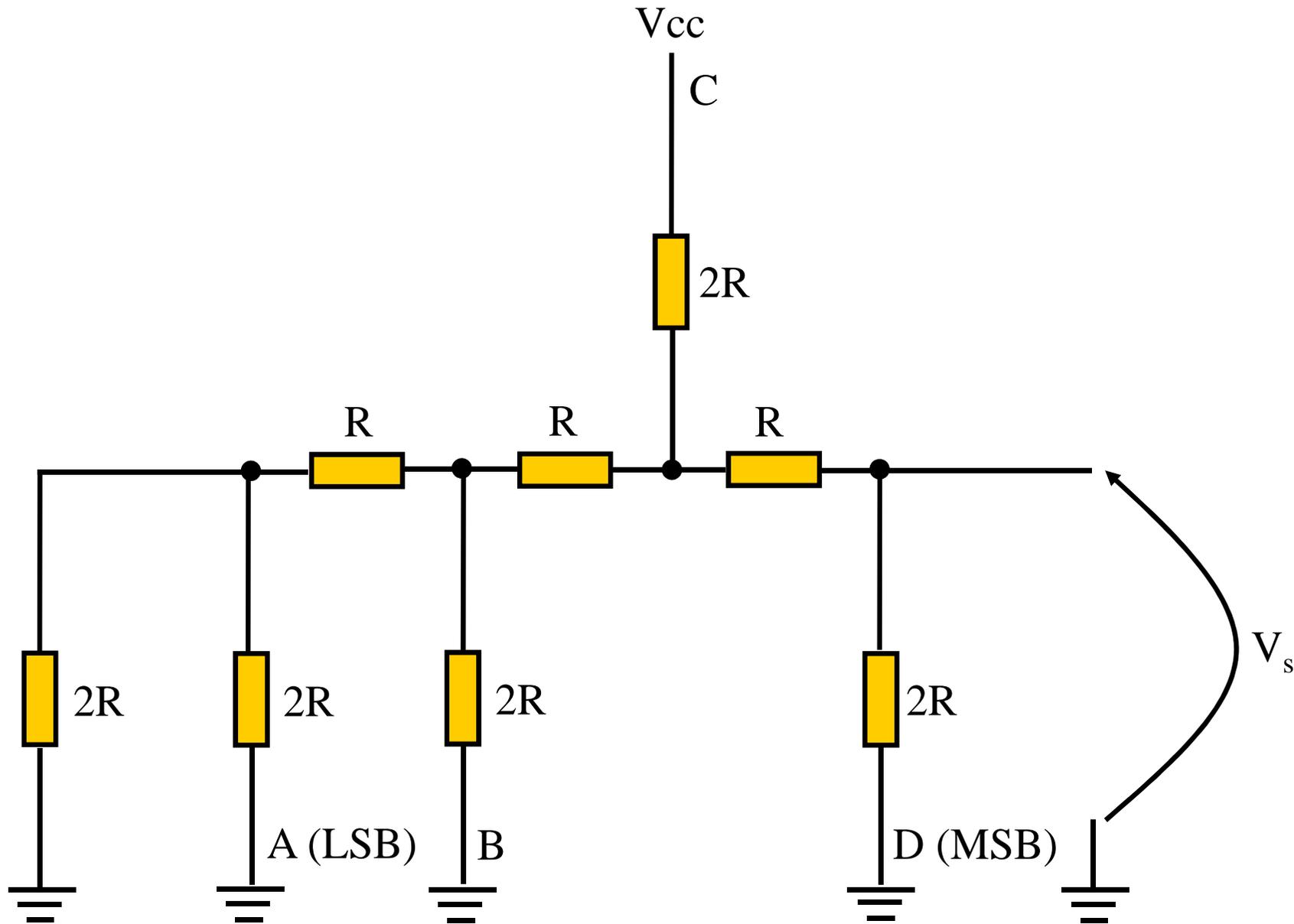
# Peso da Entrada D – Circuito Equivalente



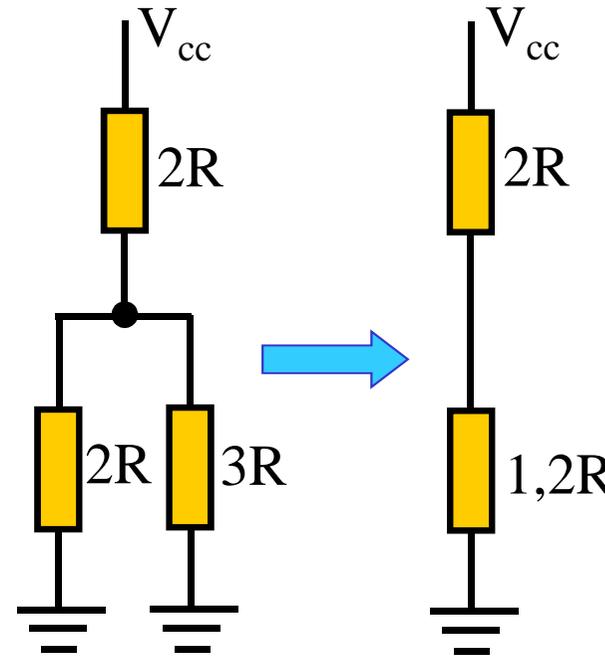
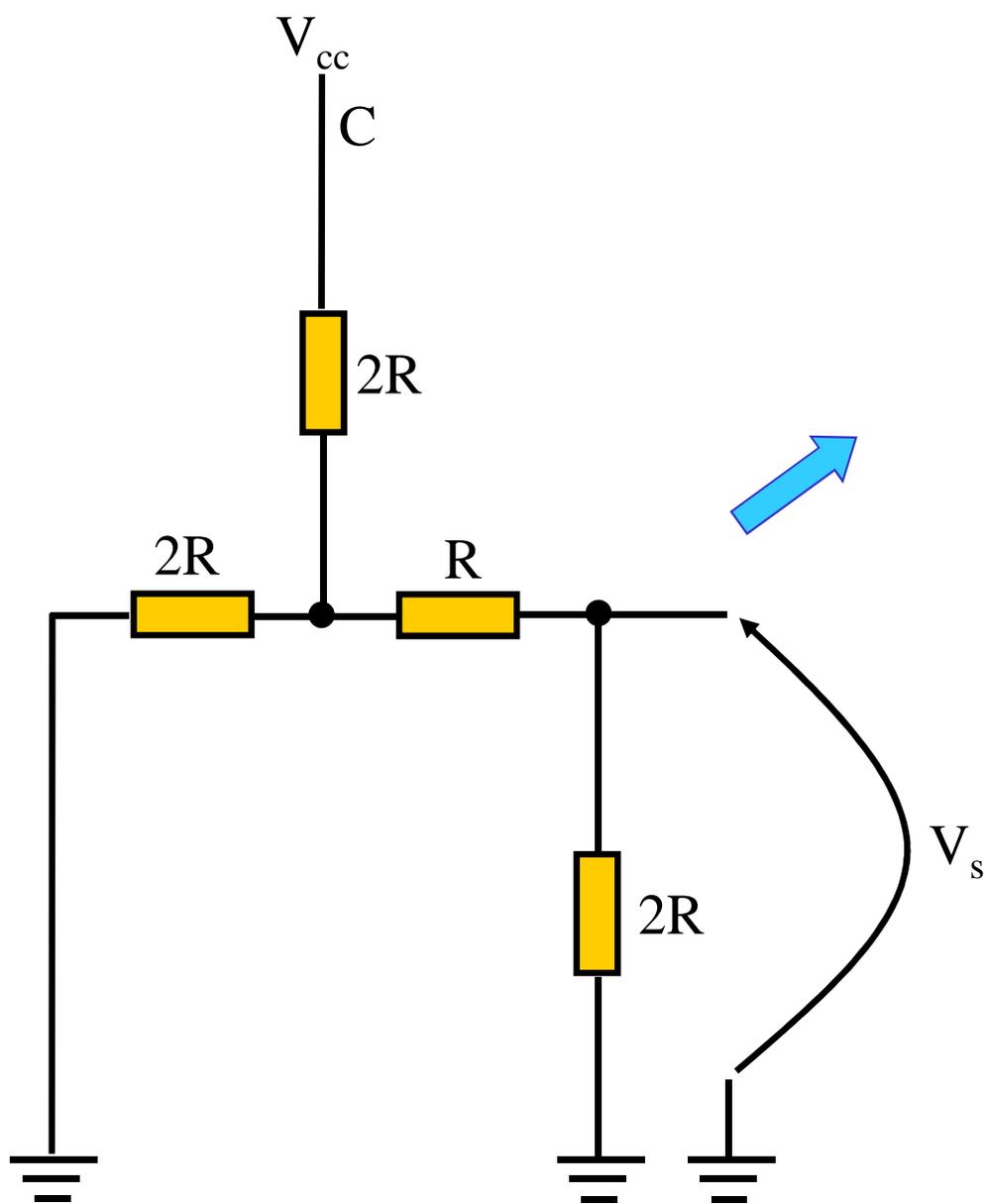
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot 2R}{2R + 2R}$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{2}$$

# Rede R-2R Sem Resistor de Saída Peso da Entrada C



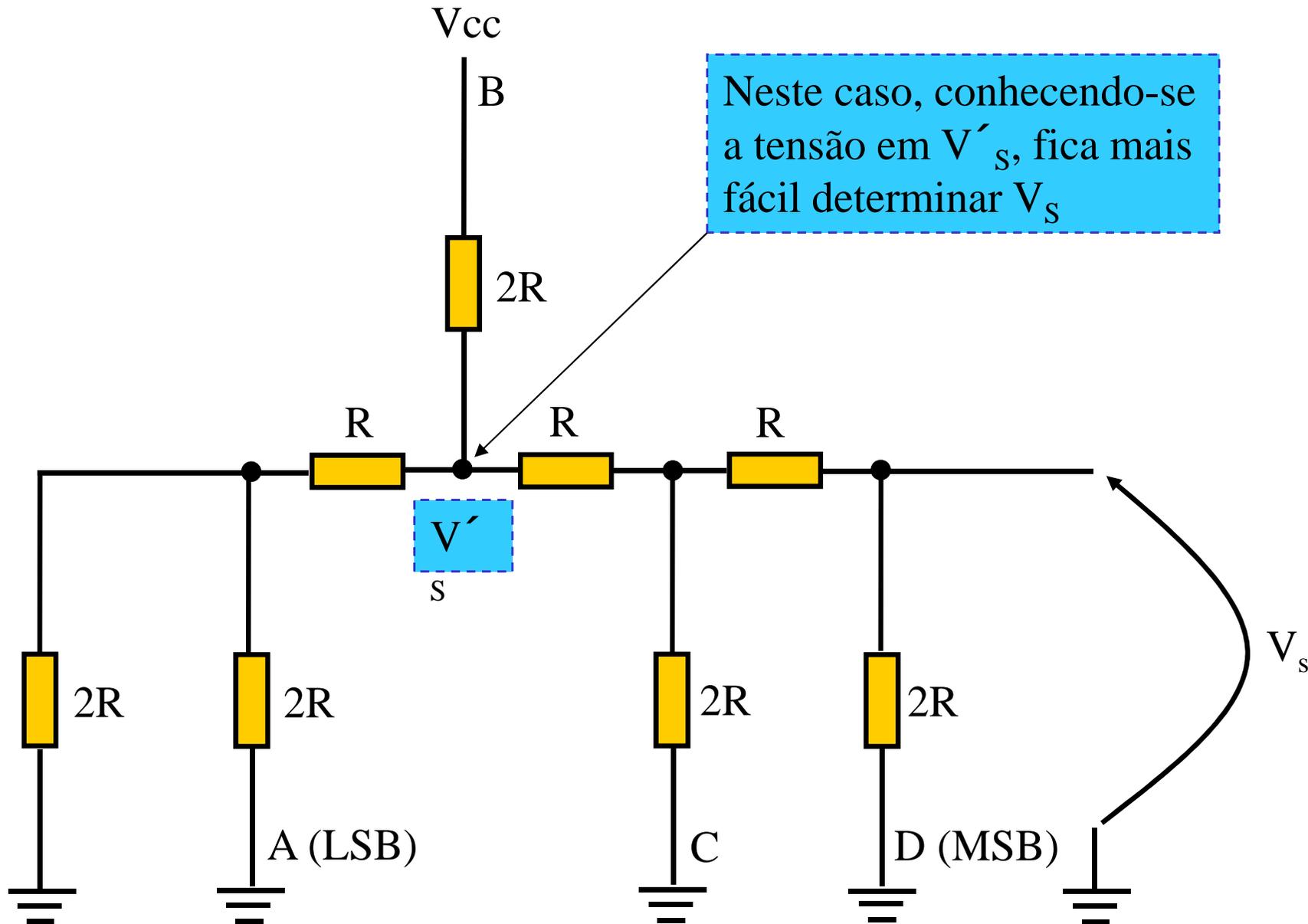
# Peso da Entrada C – Circuito Equivalente



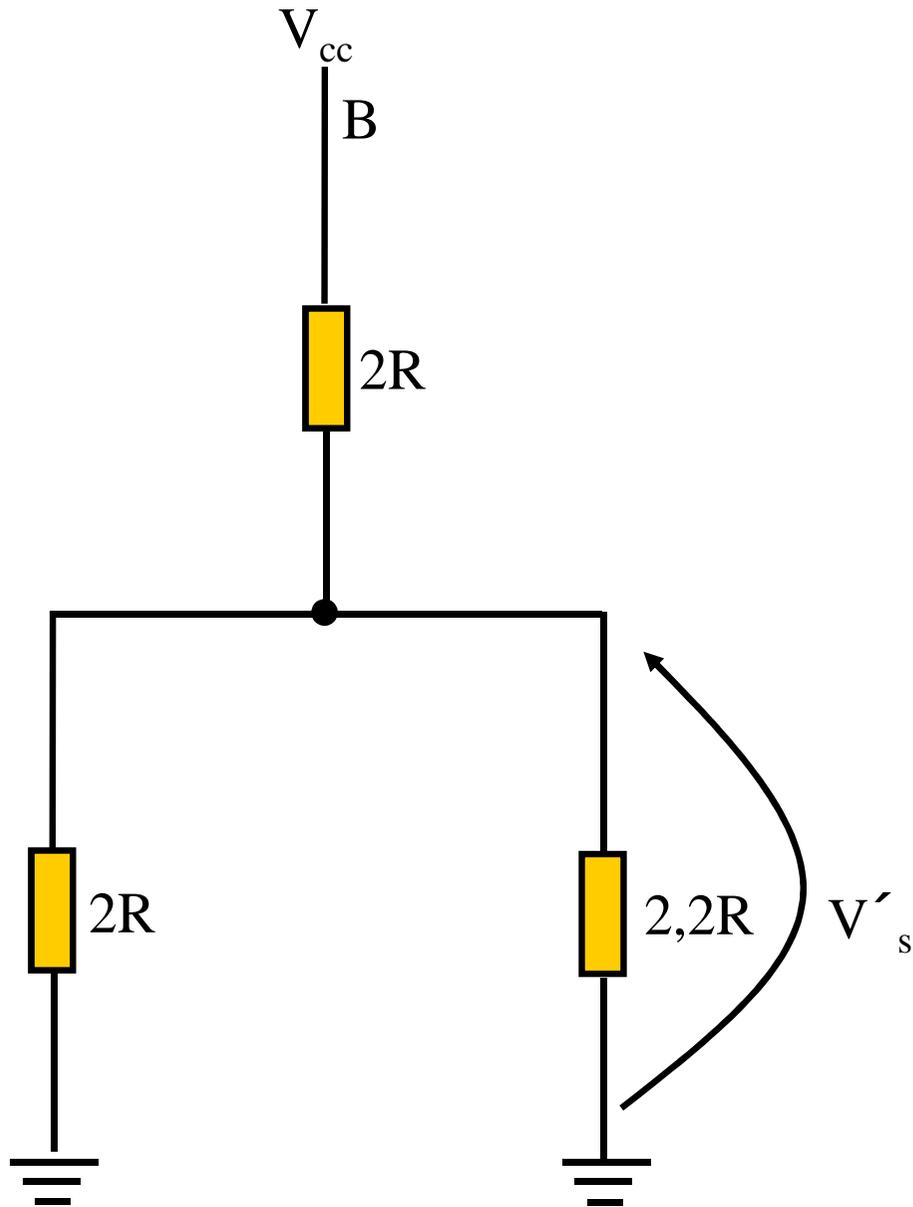
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot (1,2R) \cdot 2}{(3,2R) \cdot 3}$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{4}$$

# Rede R-2R Sem Resistor de Saída Peso da Entrada B



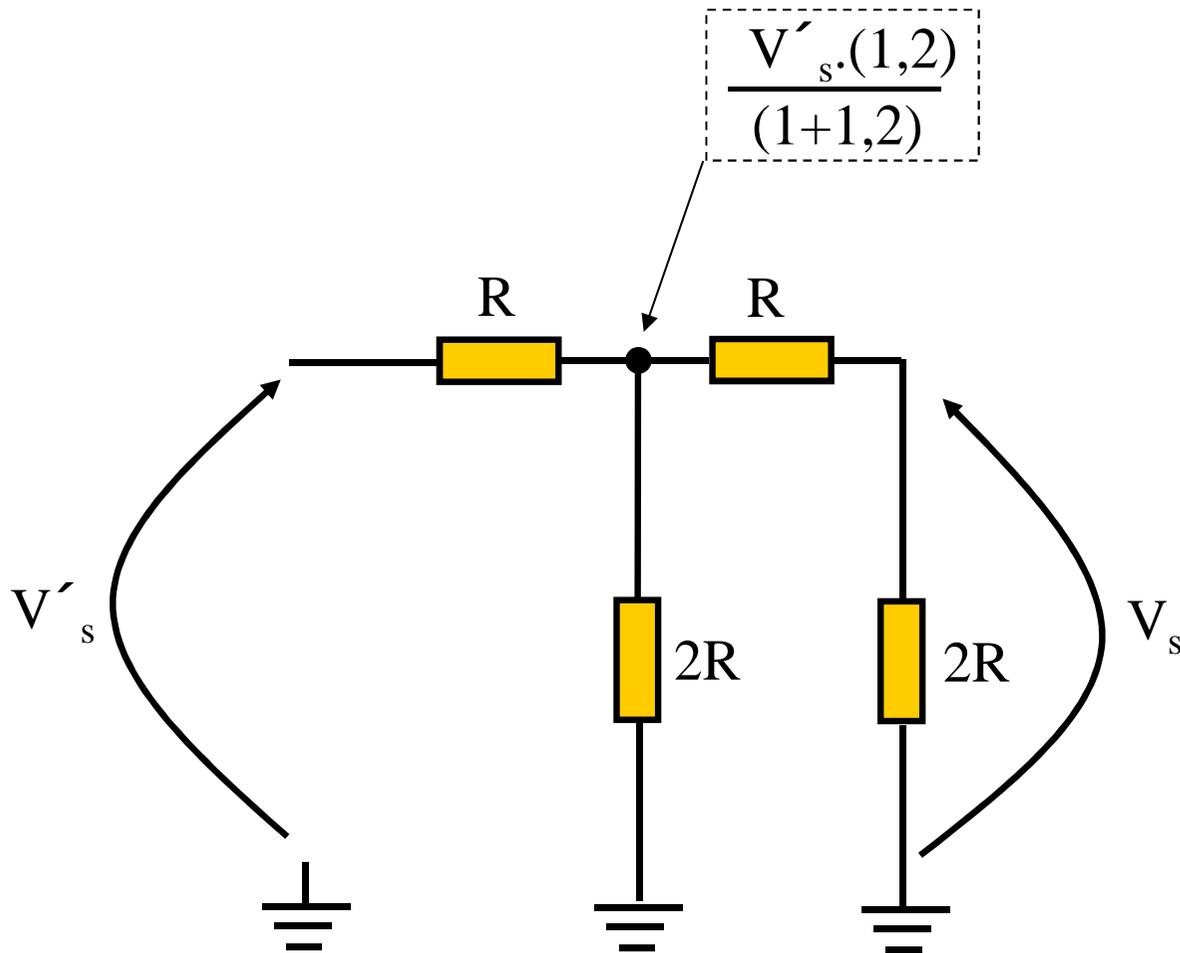
# Peso da Entrada B – Circuito Equivalente



$$V'_s = \frac{V_{cc} \cdot \left( \frac{2 \times 2,2}{2 + 2,2} \right)}{2 + \left( \frac{2 \times 2,2}{2 + 2,2} \right)}$$

$$V'_s = 0,34375 V_{cc}$$

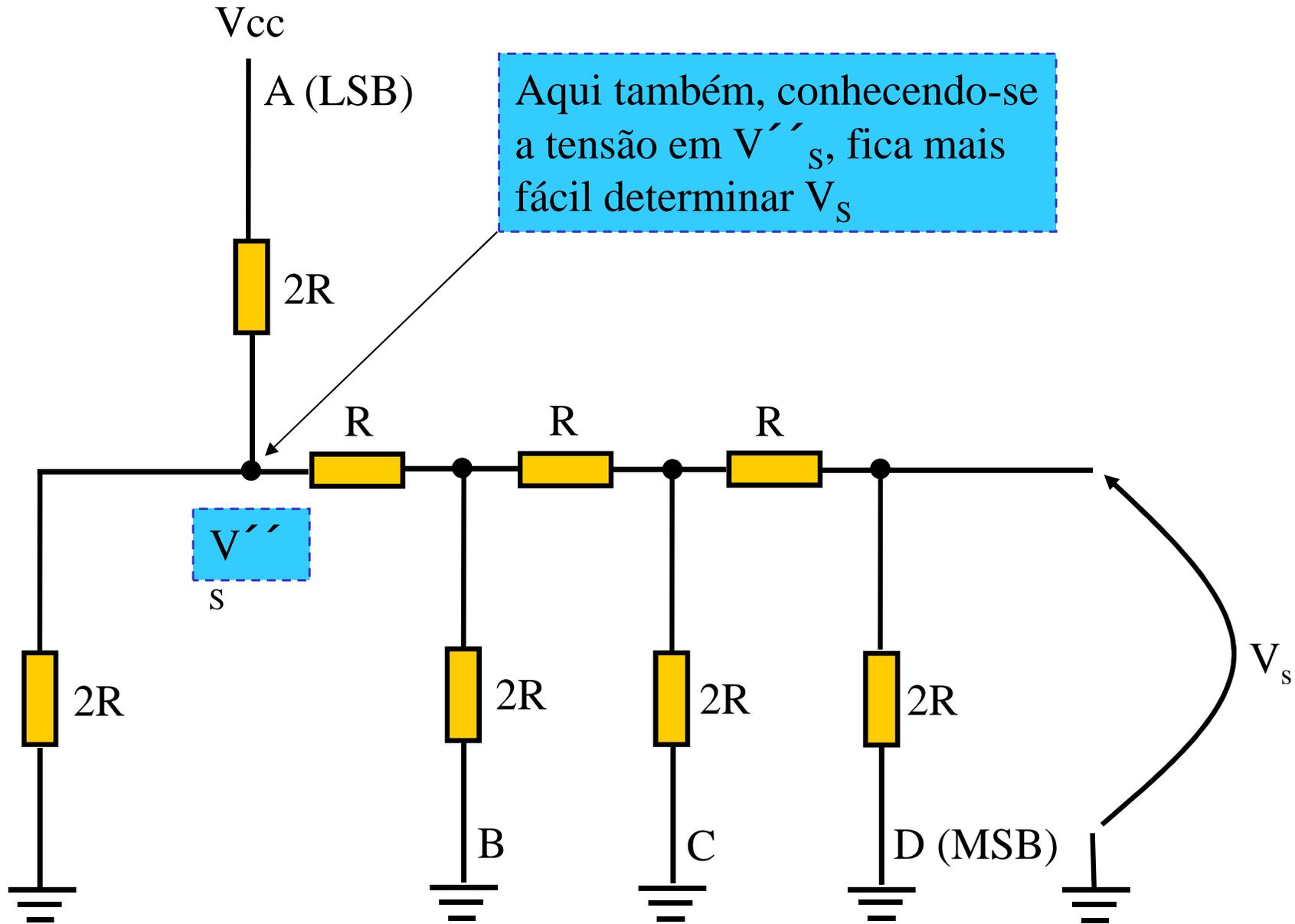
# Rede R-2R Sem Resistor de Entrada Peso da Entrada B



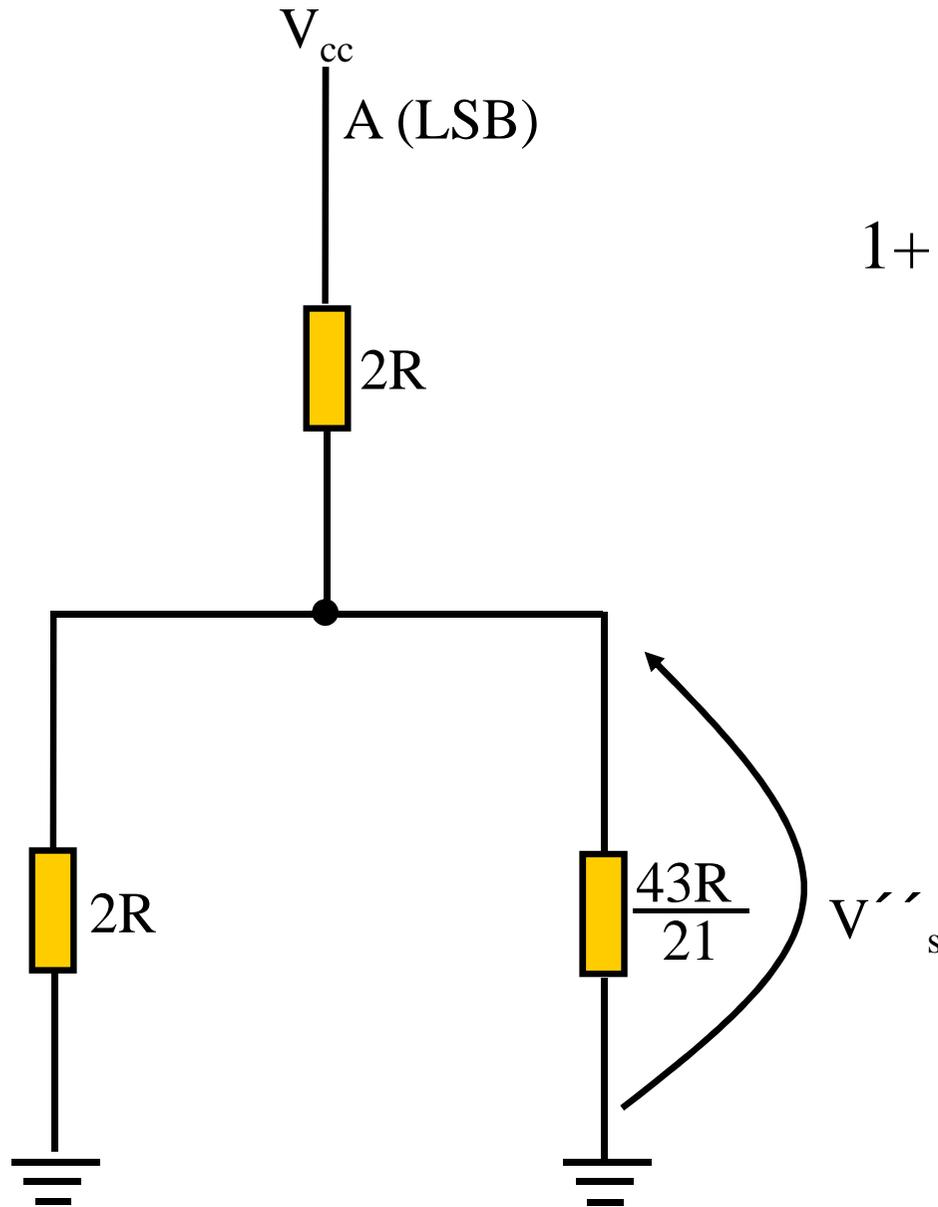
$$V_s = \frac{V'_s \cdot (1,2) \cdot (2)}{(2,2) \cdot (3)}$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{8}$$

# Rede R-2R Sem Resistor de Saída Peso da Entrada A



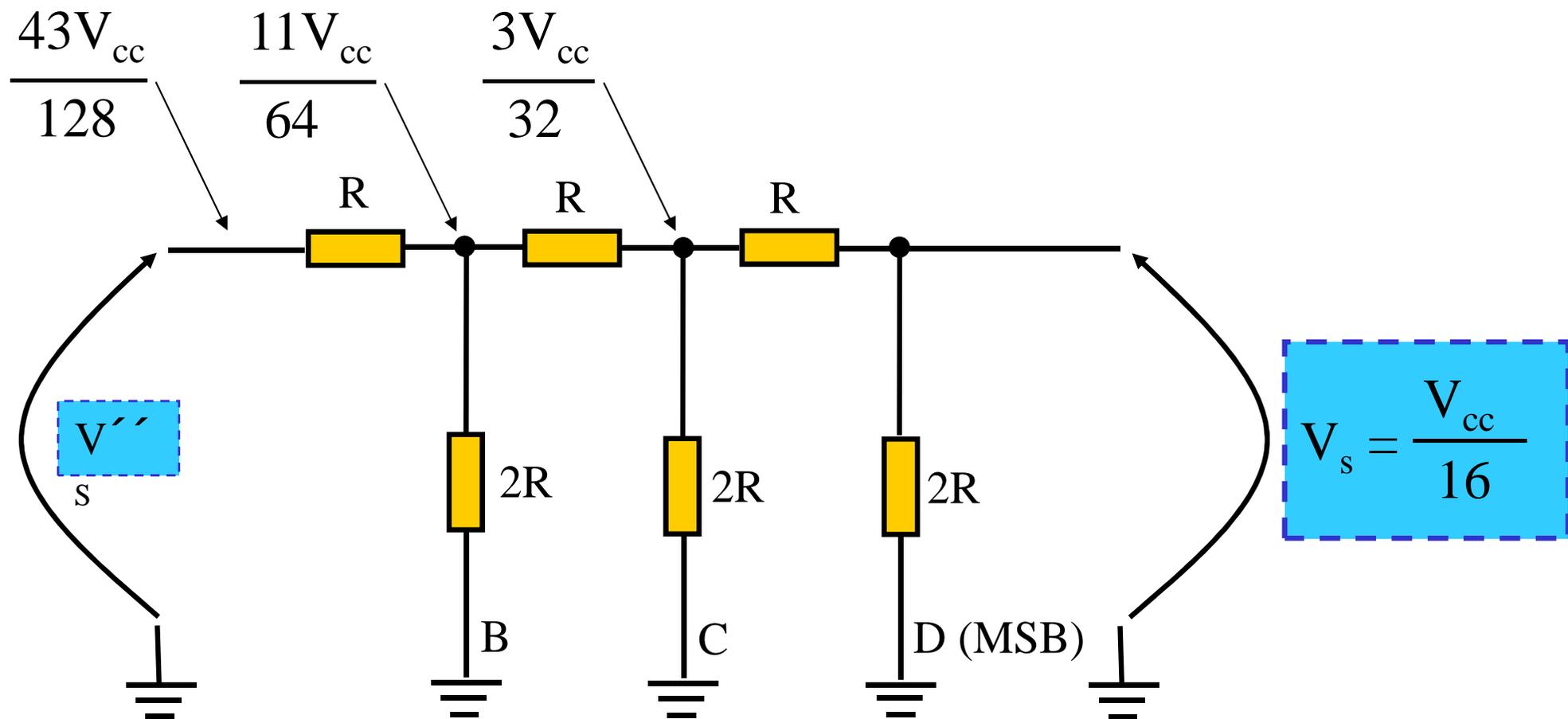
# Peso da Entrada A – Circuito Equivalente



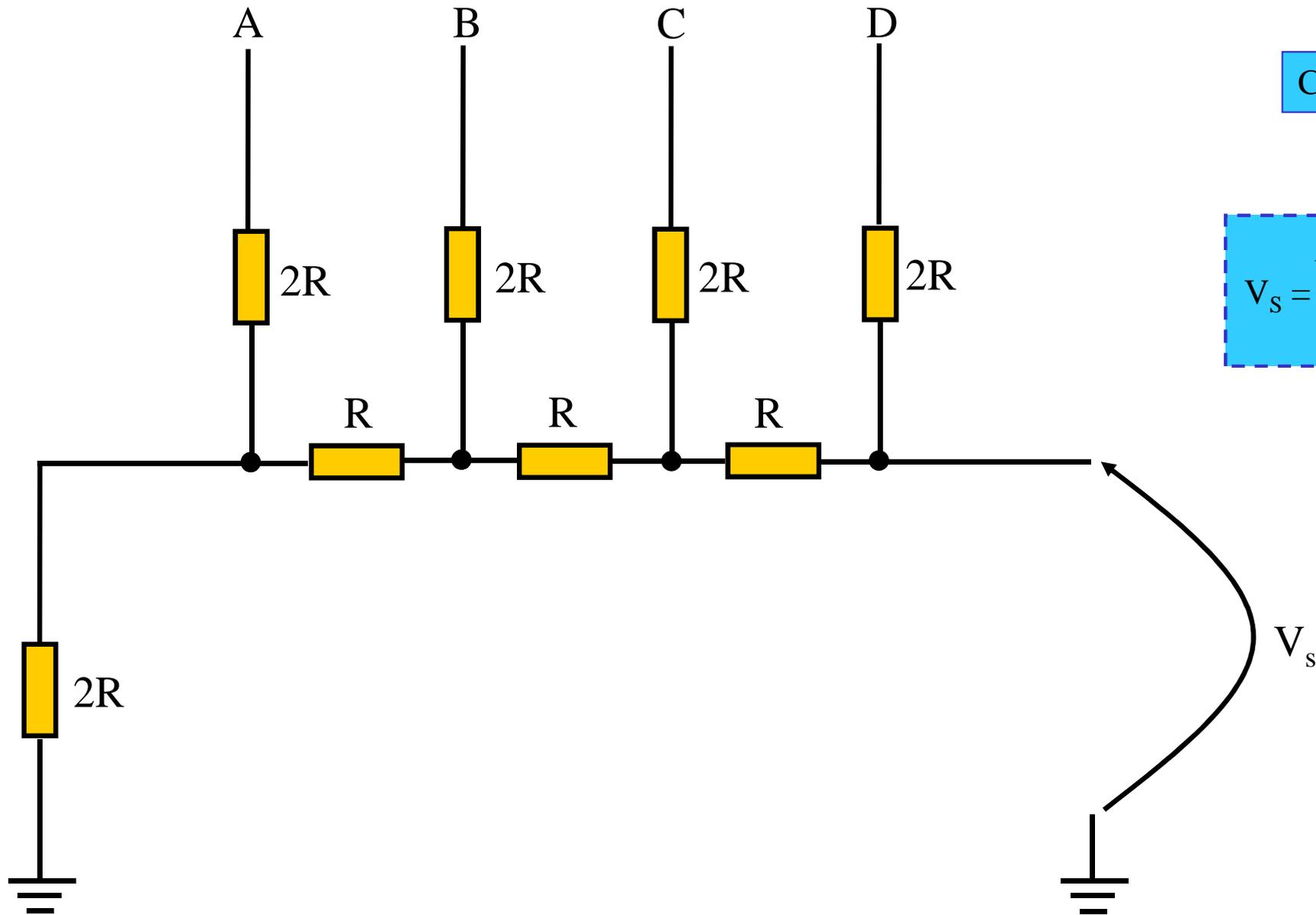
$$1 + \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{2 \times 3}{2 + 3}\right)}{2 + \left(1 + \frac{2 \times 3}{2 + 3}\right)} = \frac{43}{21}$$

$$V''_s = \frac{43V_{cc}}{128}$$

# Rede R-2R Sem Resistor de Saída Peso da Entrada A



# Rede R-2R Sem Resistor de Saída

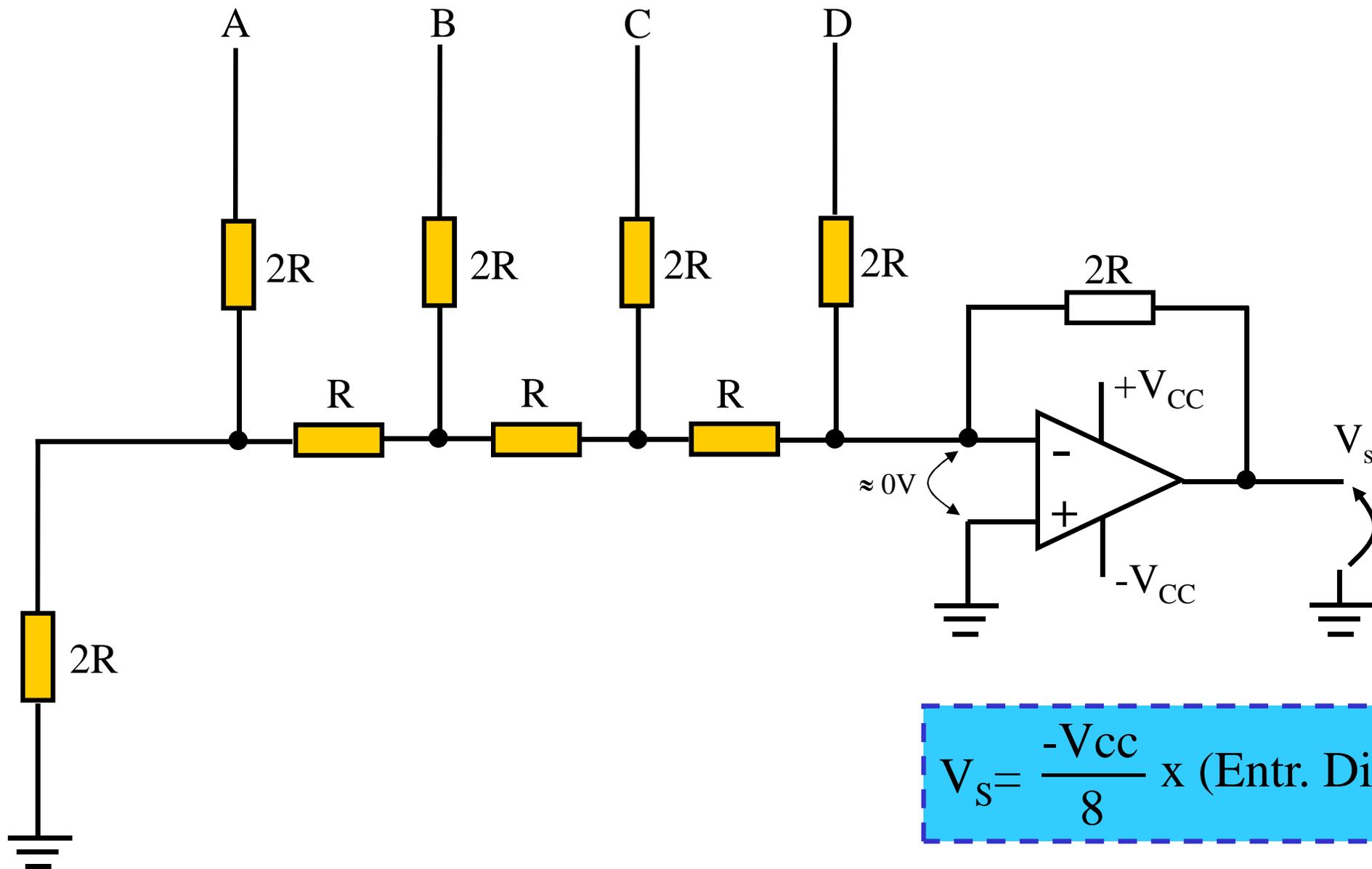


CONCLUSÃO:



$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot (\text{Entr. Digital})}{2^N}$$

# AmpOp Ligado a Rede R-2R Sem Resistor de Saída



$$V_s = \frac{-V_{CC}}{8} \times (\text{Entr. Digital})$$

# Exemplo Numérico de AmpOp Ligado a Rede R-2R Sem Resistor de Saída

Entrada Digital = DCBA = 0100<sub>2</sub> = 4<sub>10</sub>

