

Sistemas Digitais

Conversão Digital-Analógico

Adaptações Prof. José Artur Quilici-Gonzalez

Elementos de Eletrônica Digital – Idoeta e Capuano

Eletrônica Digital – Bignell e Donovan

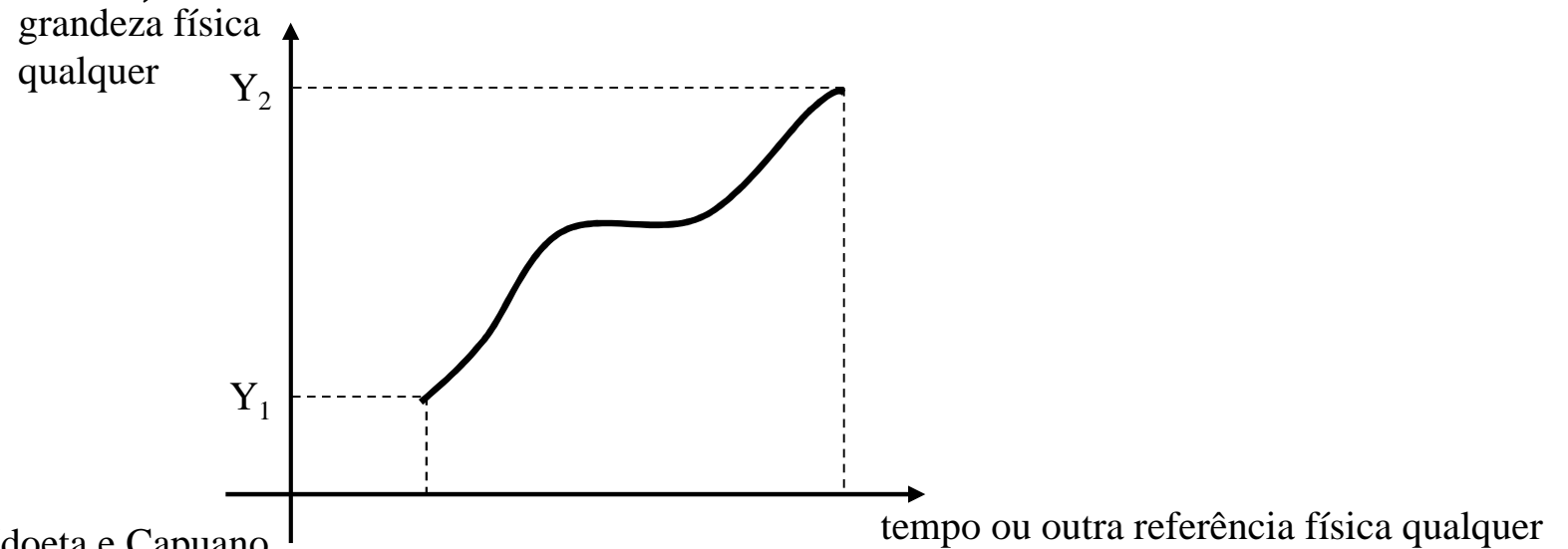
Sistemas Digitais – Tocci e Widmer

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

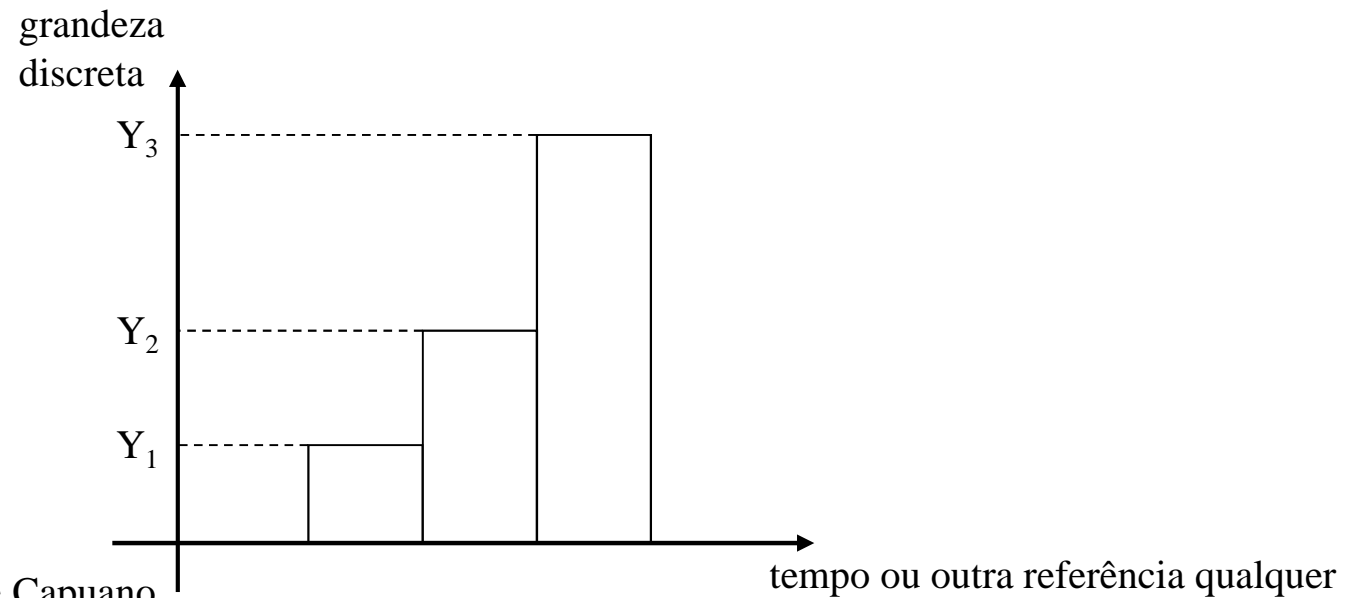
- A maioria das variáveis físicas é analógica
- Uma **grandeza analógica** pode assumir qualquer valor ao longo de uma **faixa contínua de valores**
- Ex.: velocidade, pressão, temperatura, corrente elétrica, tensão, resistência etc.



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

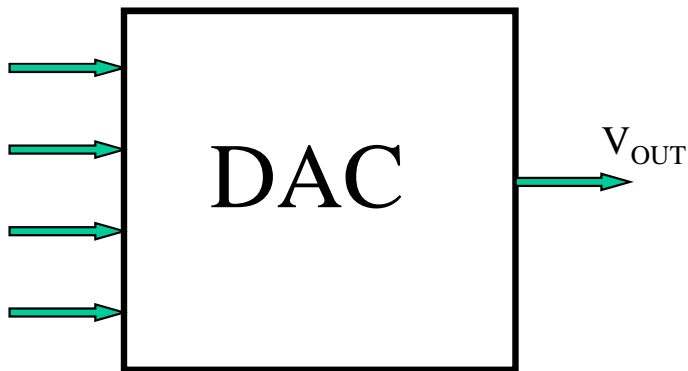
nível lógico 1 varia de 2V a 5V

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)**



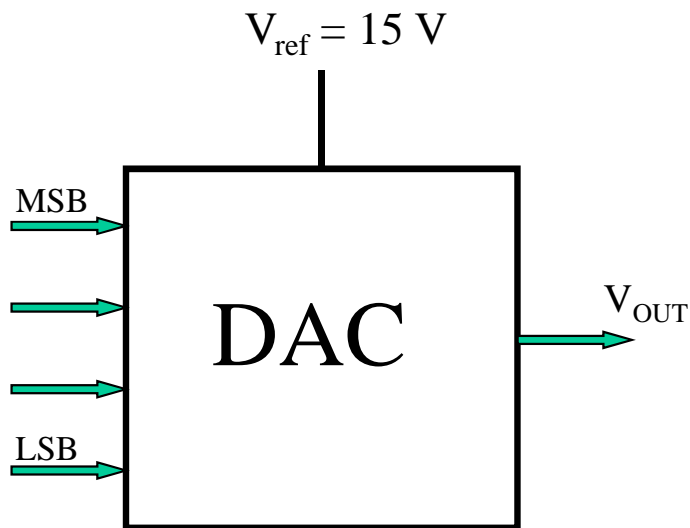
Um conversor DAC com 4 entradas pode distinguir $2^4 = 16$ valores binários, por ex., de 0000 a 1111, que podem representar, por ex., tensões de 0V a 15V medidas em V_{OUT}

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 $1100_2 = 12_{10}$

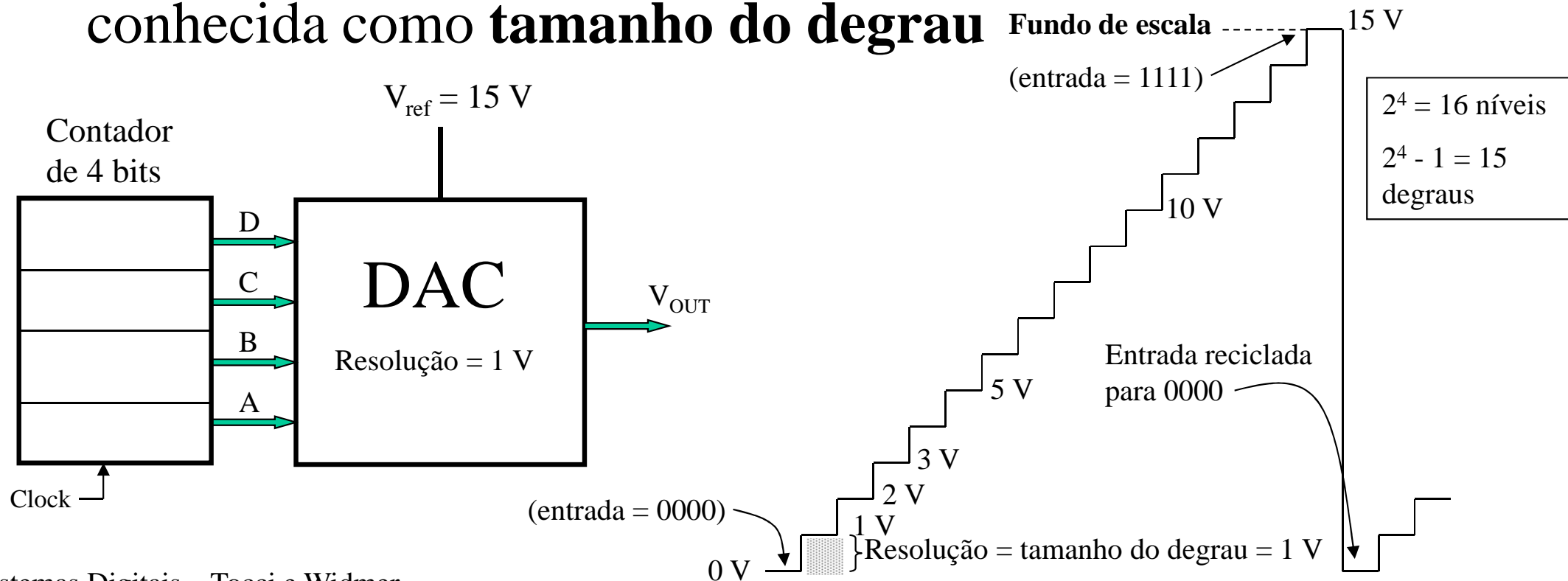
$$V_{OUT} = (1\text{ V}) \times 12 = 12\text{ V}$$

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,

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

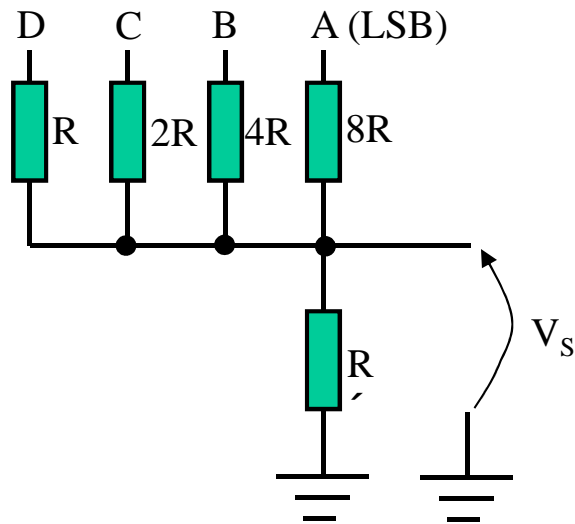
**Conclusão: apenas o n° de bits
determina a resolução percentual**

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 (1000₂), 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 (0100₂), a tensão em R' será:

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

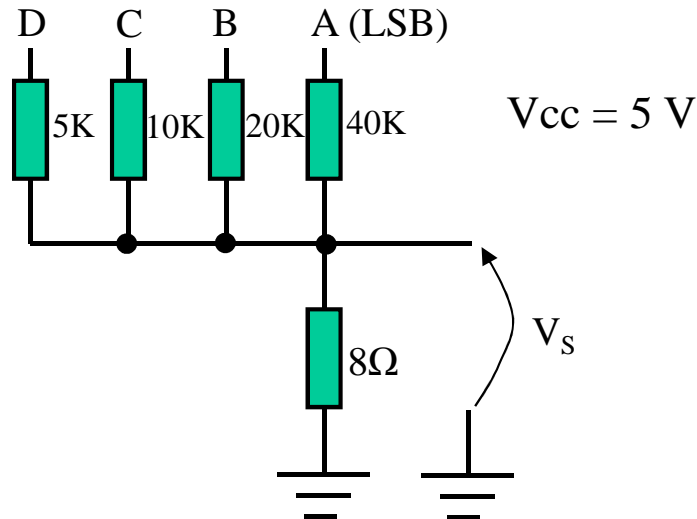
Se tivermos nível 1 em B e 0 nas demais entradas (0010₂), a tensão em R' será:

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

Se tivermos nível 1 em A e 0 nas demais entradas (0001₂), a tensão em R' será:

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

Exemplo Numérico de DAC Básico

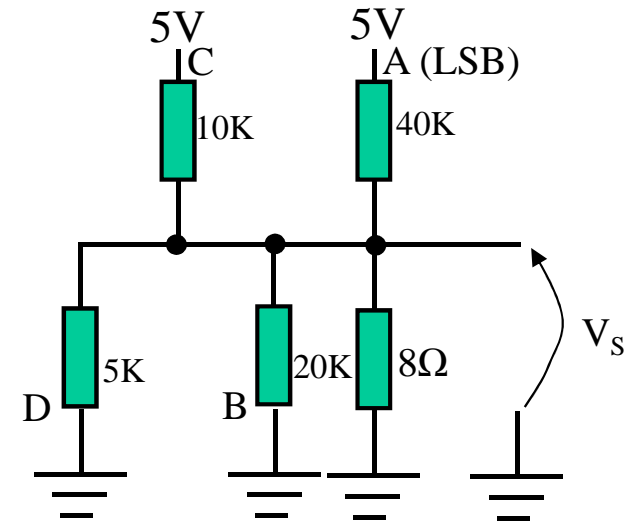


Se tivermos nível 0 em todas as entradas (0000_2), a tensão V_S será $V_S = 0V$

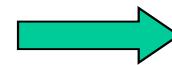
A resolução (0001_2) é de $V_{S(\text{LSB})} = 1 \text{ mV}$
($V_{S(\text{LSB})} = 5 * 8 / 40K$)

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:



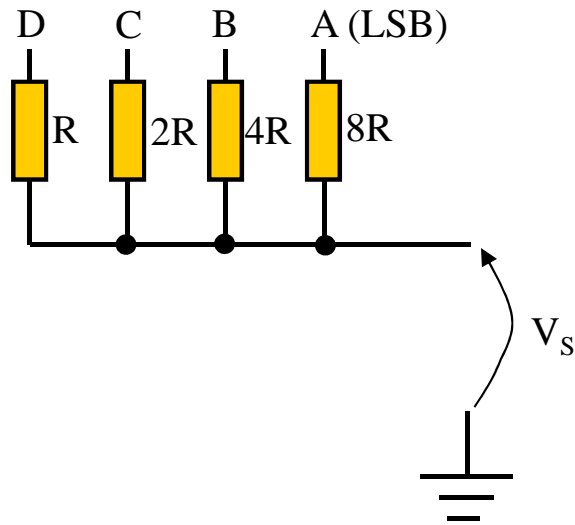
$$V_S = 8 \cdot \left[\frac{5}{10000} + \frac{5}{40000} \right] = 5 \text{ mV}$$



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 (0100₂), a tensão V_S será:

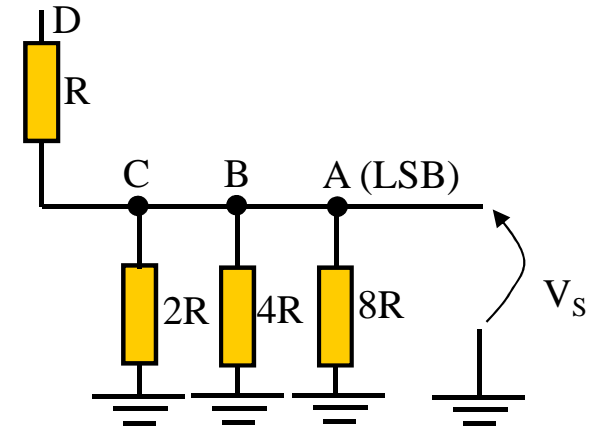
$$V_S = \frac{V_{cc} \cdot 4}{15}$$

Se tivermos nível 1 em B e 0 nas demais entradas (0010₂), a tensão V_S será:

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

Se tivermos nível 1 em A e 0 nas demais entradas (0001₂), a tensão V_S será:

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



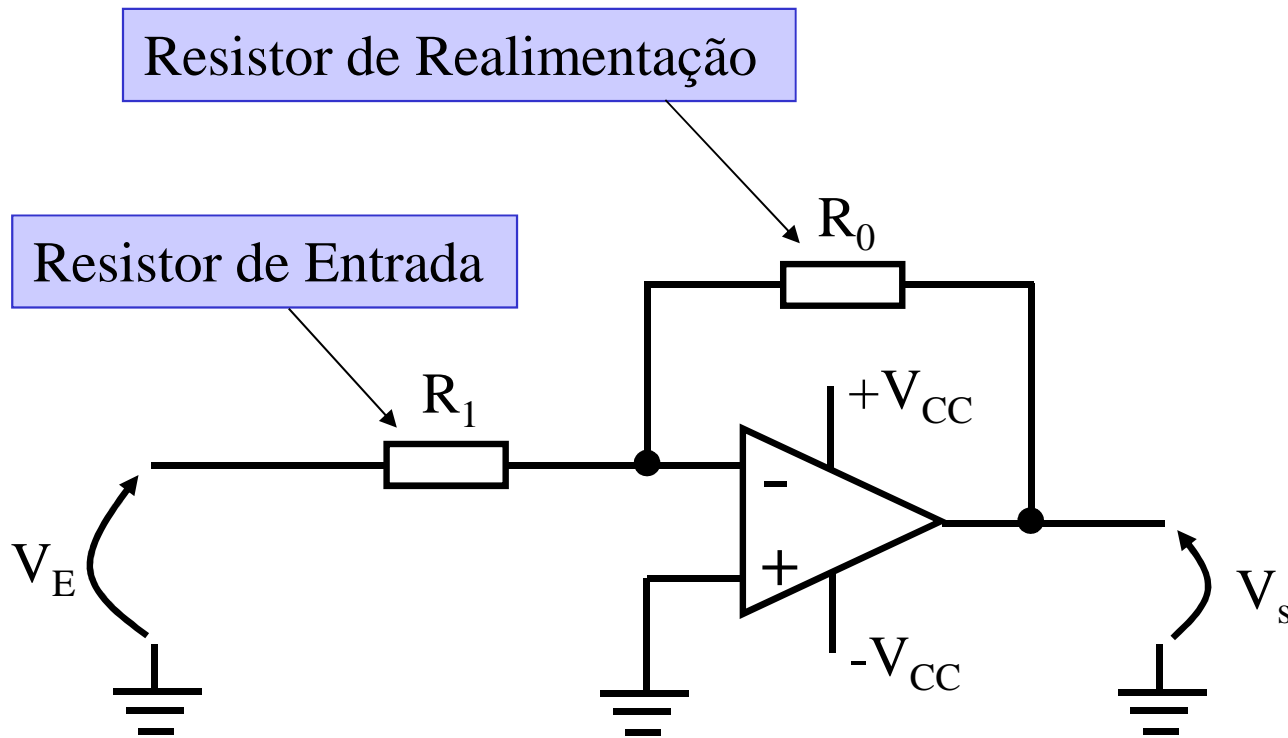
Se tivermos nível 1 (V_{cc}) em D, e 0 nas demais entradas (1000₂), a tensão V_S será:

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

CONCLUSÃO:

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

Amplificador Operacional



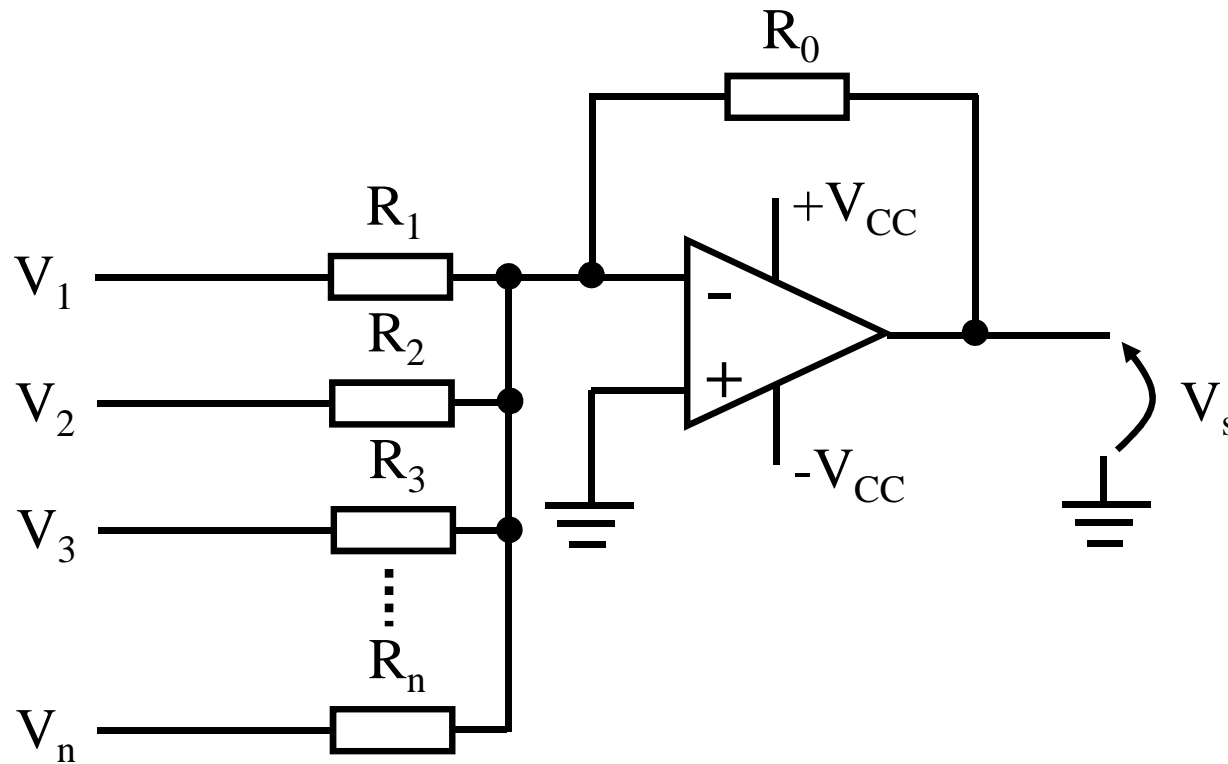
Ganho do AmpOp

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

Tensão de Saída V_s

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

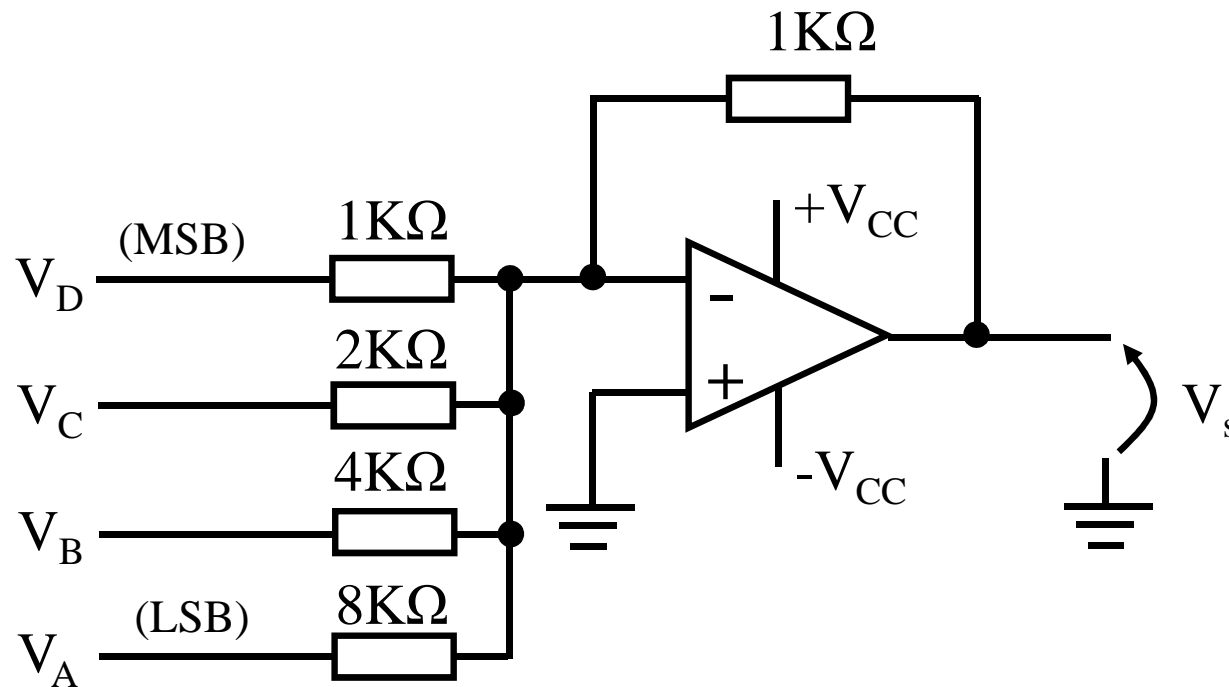
DAC com Amplificador Operacional



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



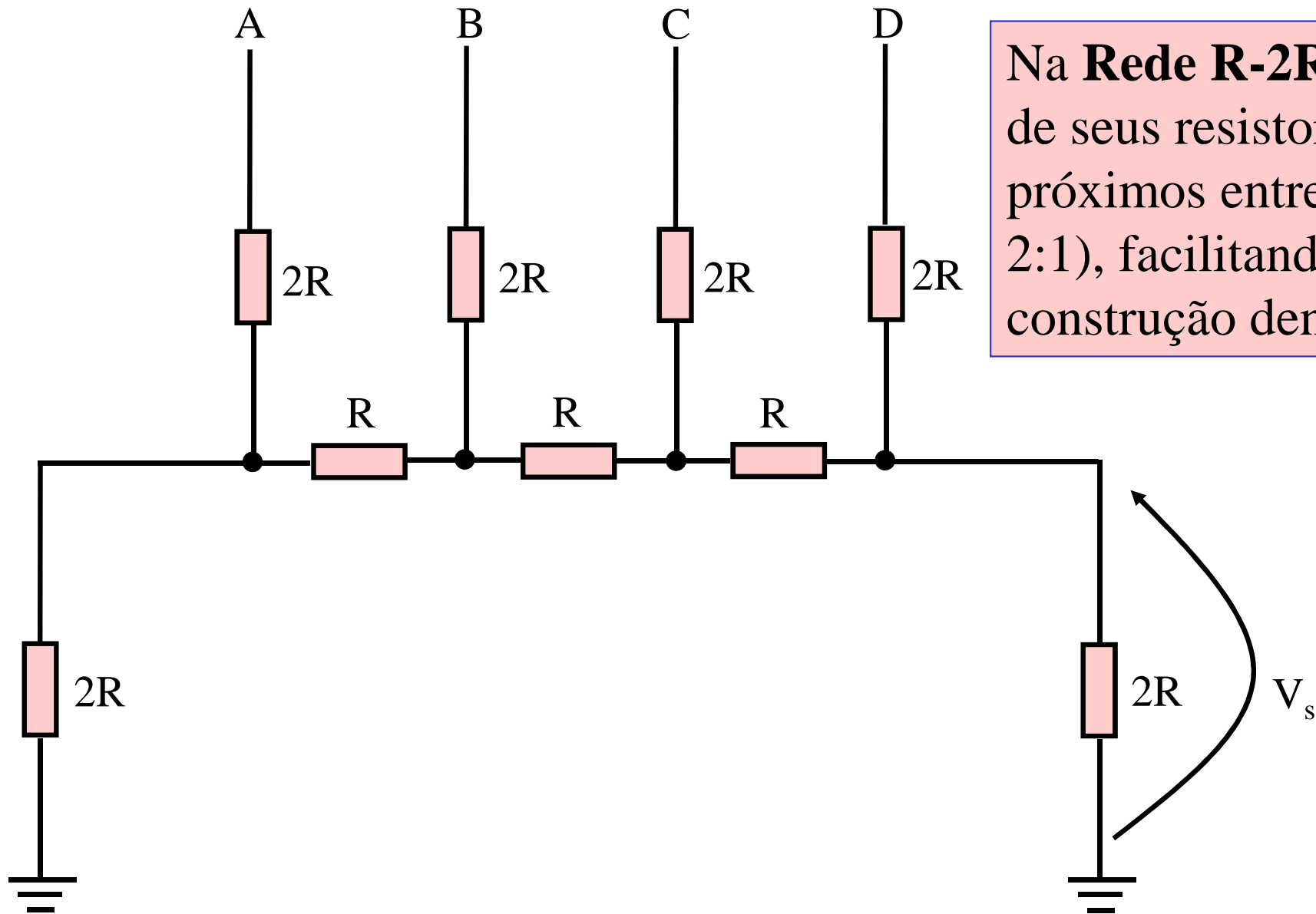
Para $V_D = V_B = 5V$ e
 $V_C = V_A = 0V$, (1010)

$$\Rightarrow V_s = -(5V + 0V + \frac{1}{4} \cdot 5V + 0V) = -6,25V$$

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

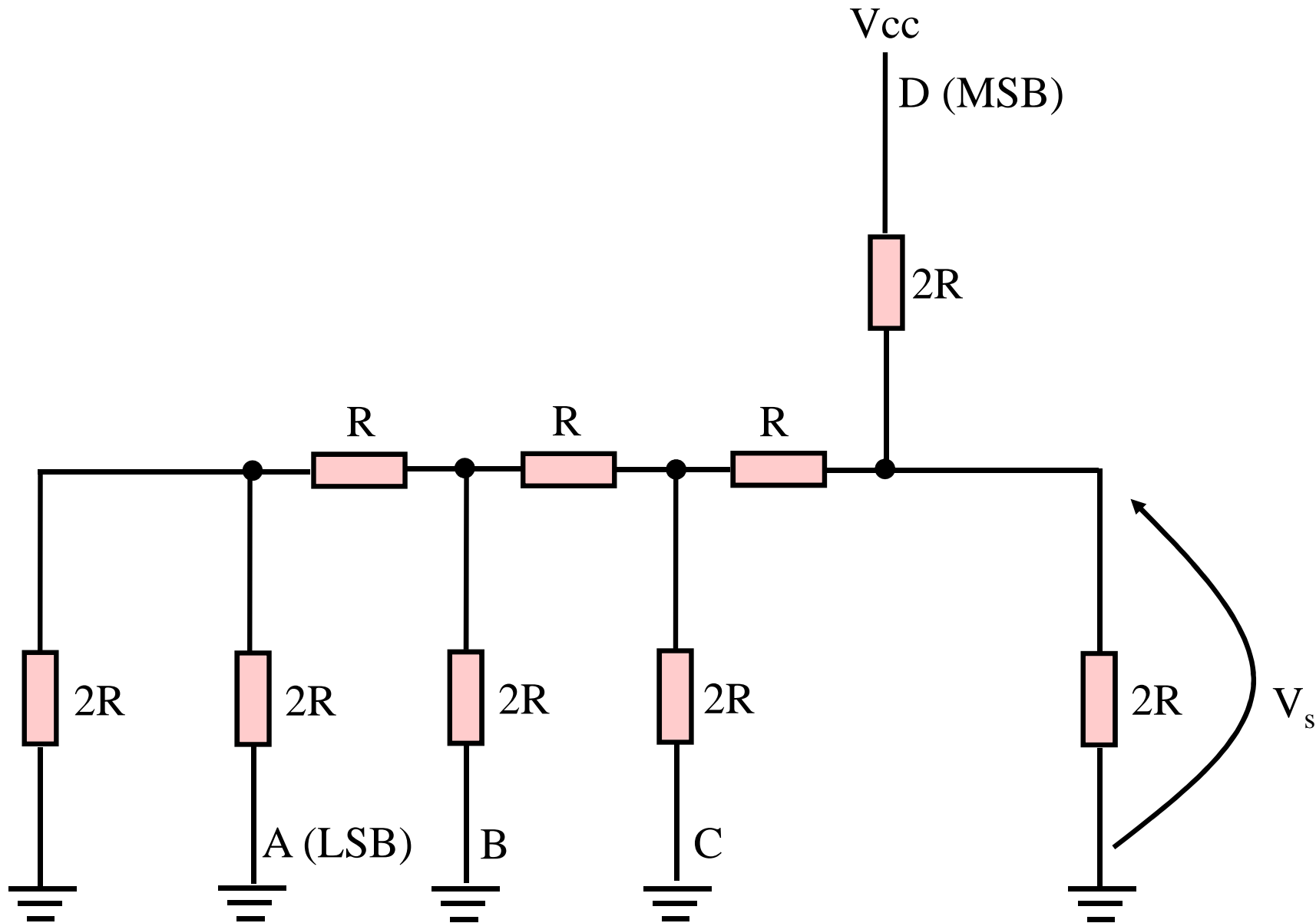
$$V_s = - \left(\frac{1}{1} \cdot V_D + \frac{1}{2} \cdot V_C + \frac{1}{4} \cdot V_B + \frac{1}{8} \cdot V_A \right)$$

DAC com Rede R-2R

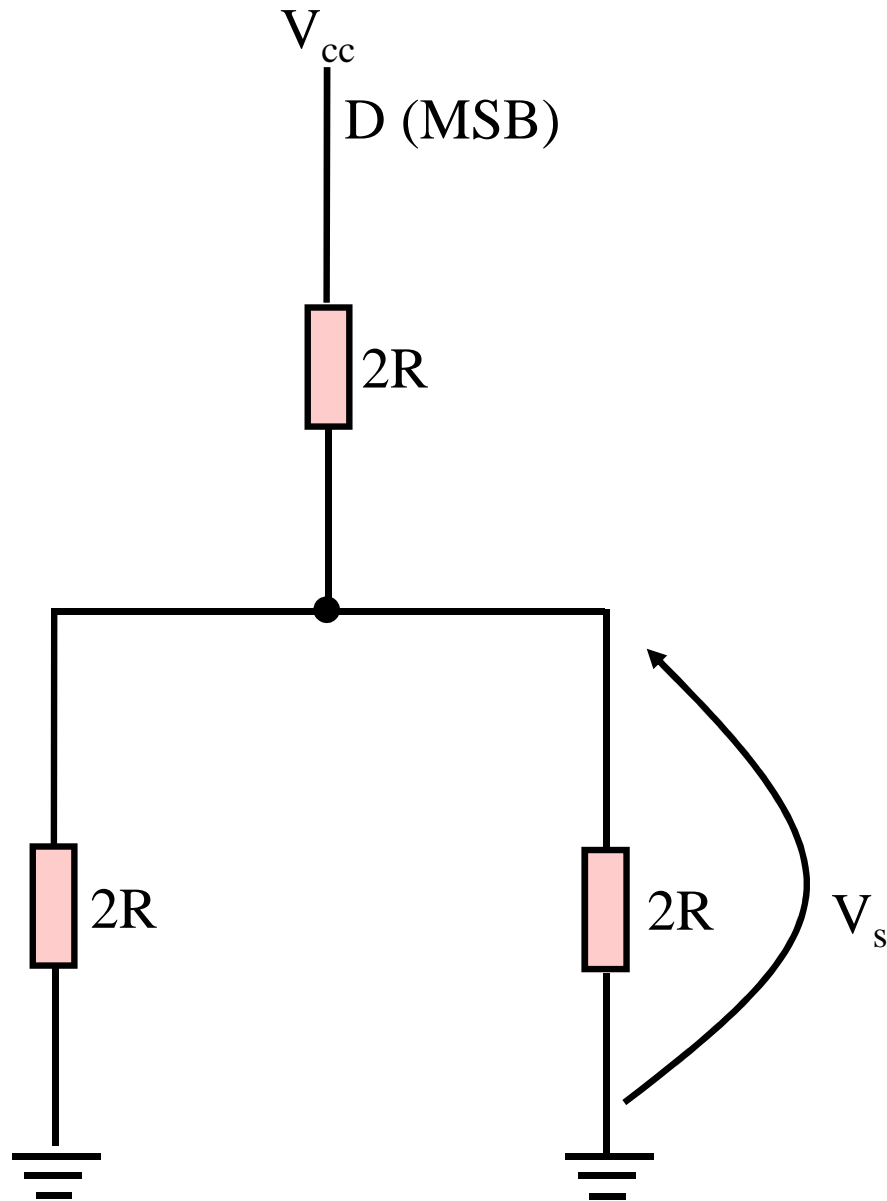


Na **Rede R-2R**, os valores de seus resistores são mais próximos entre si (relação 2:1), facilitando sua construção dentro de um IC

DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada D



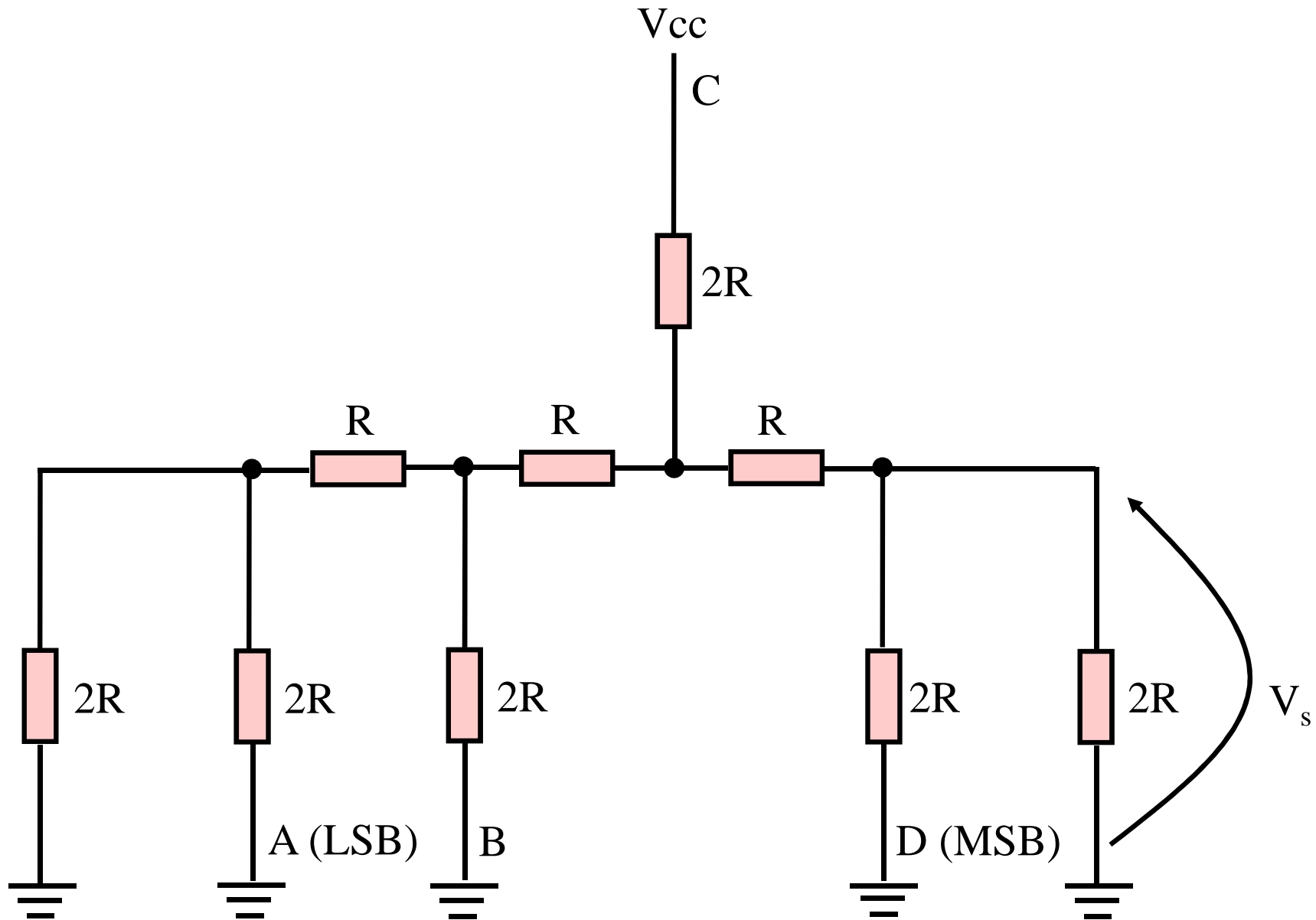
Peso da Entrada D – Circuito Equivalente



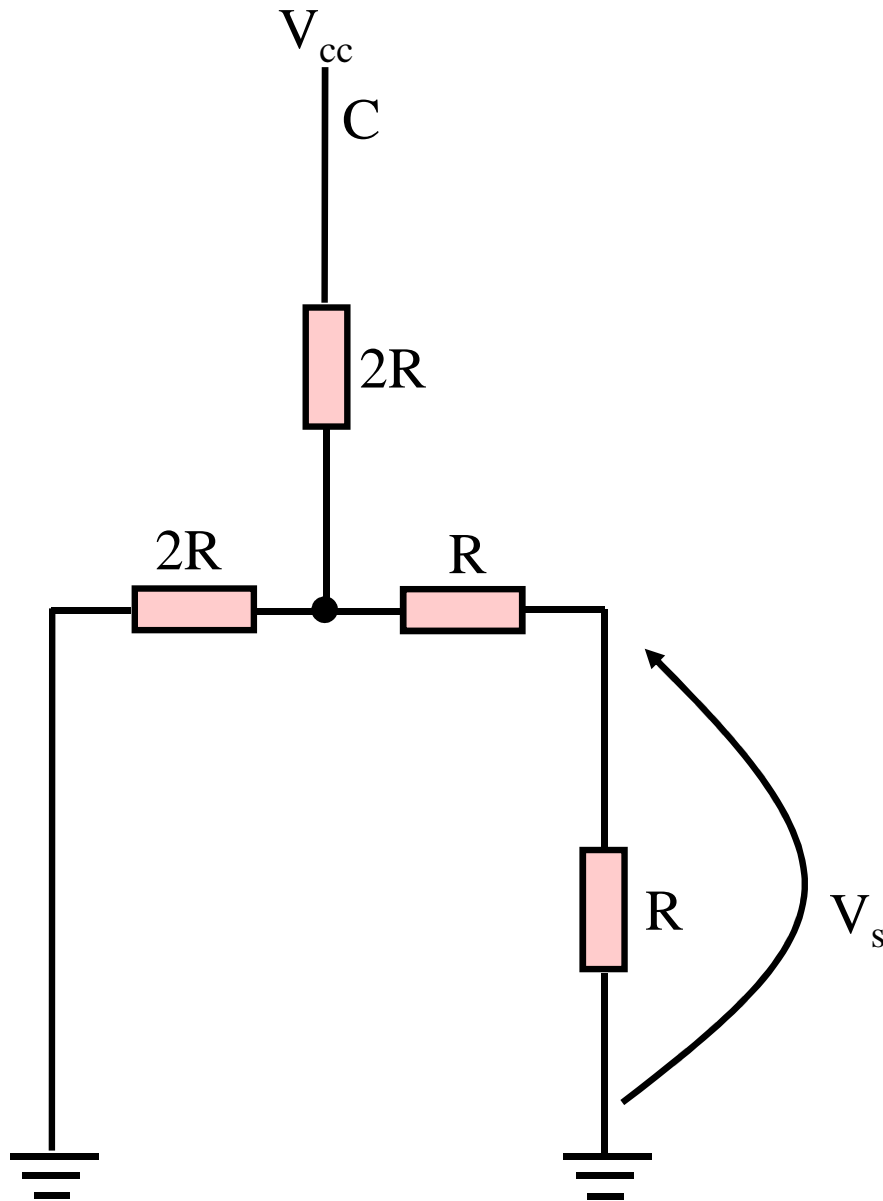
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R}{2R + R}$$

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

DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada C



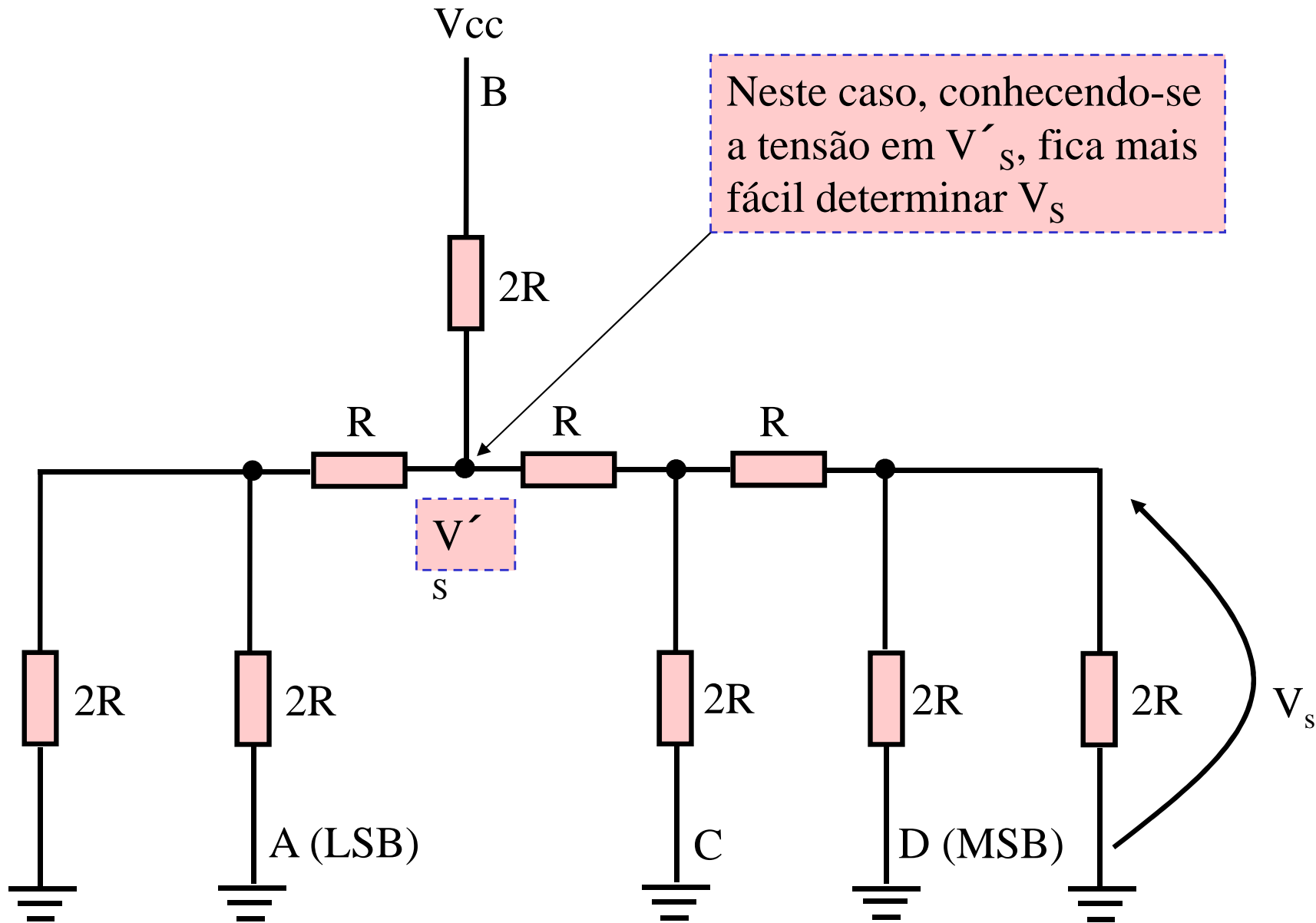
Peso da Entrada C – Circuito Equivalente



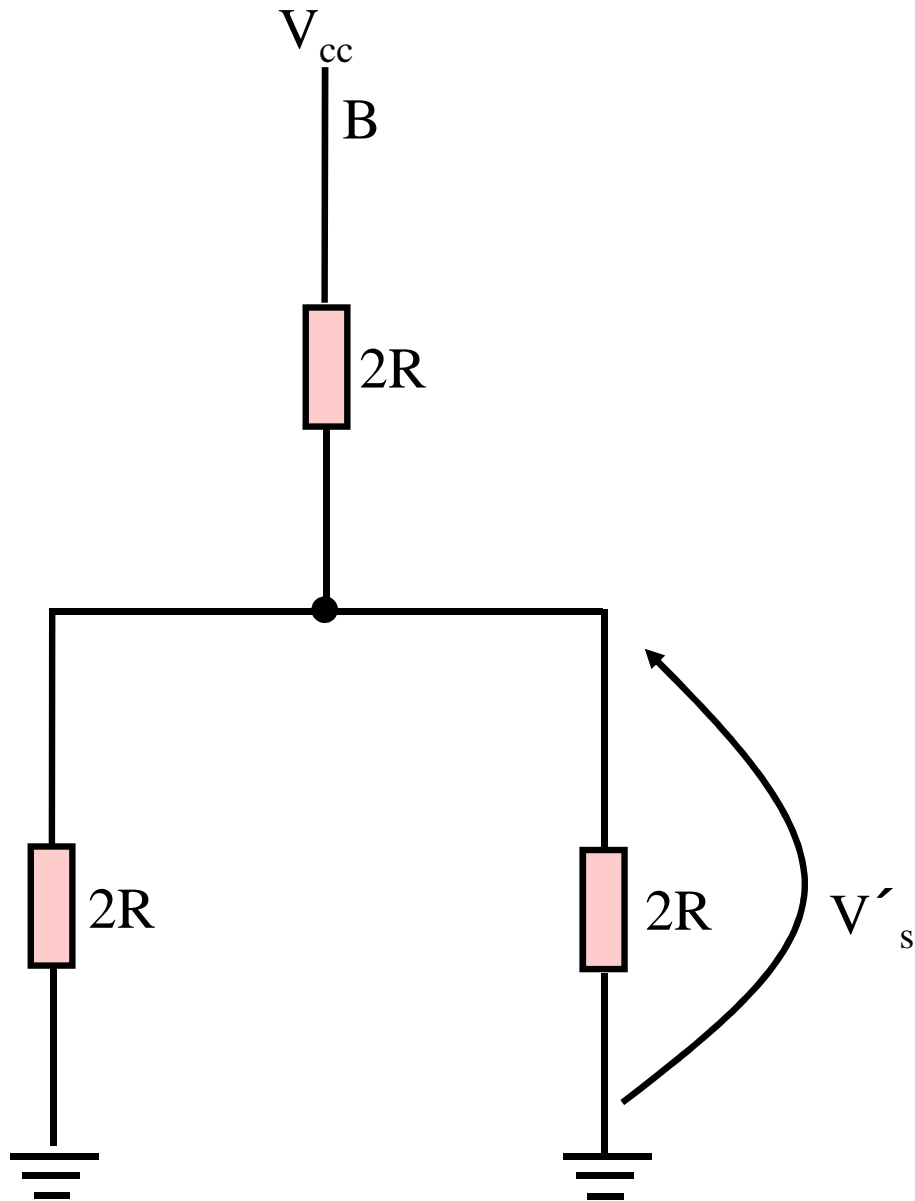
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R}{2R + R}$$

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

DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada B

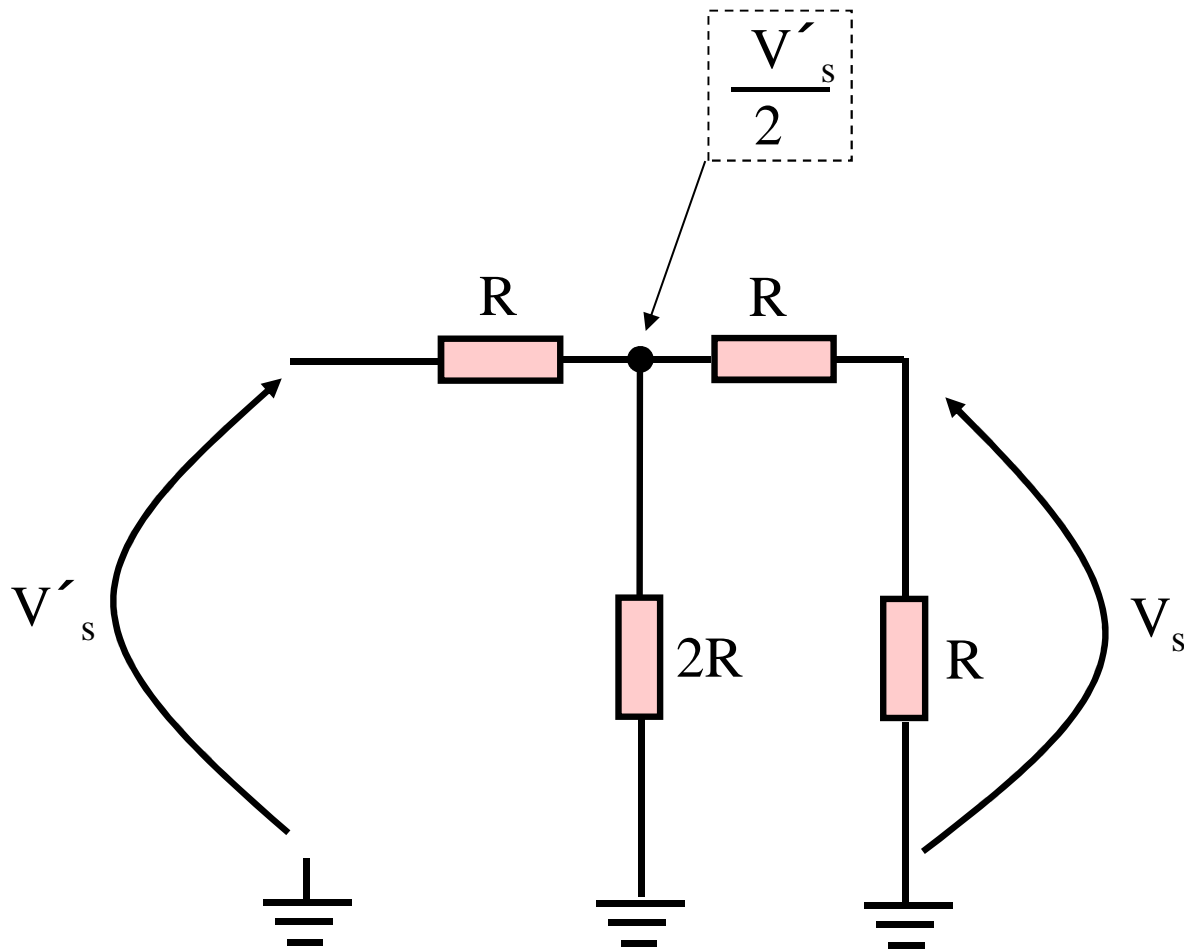


Peso da Entrada B – Circuito Equivalente



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

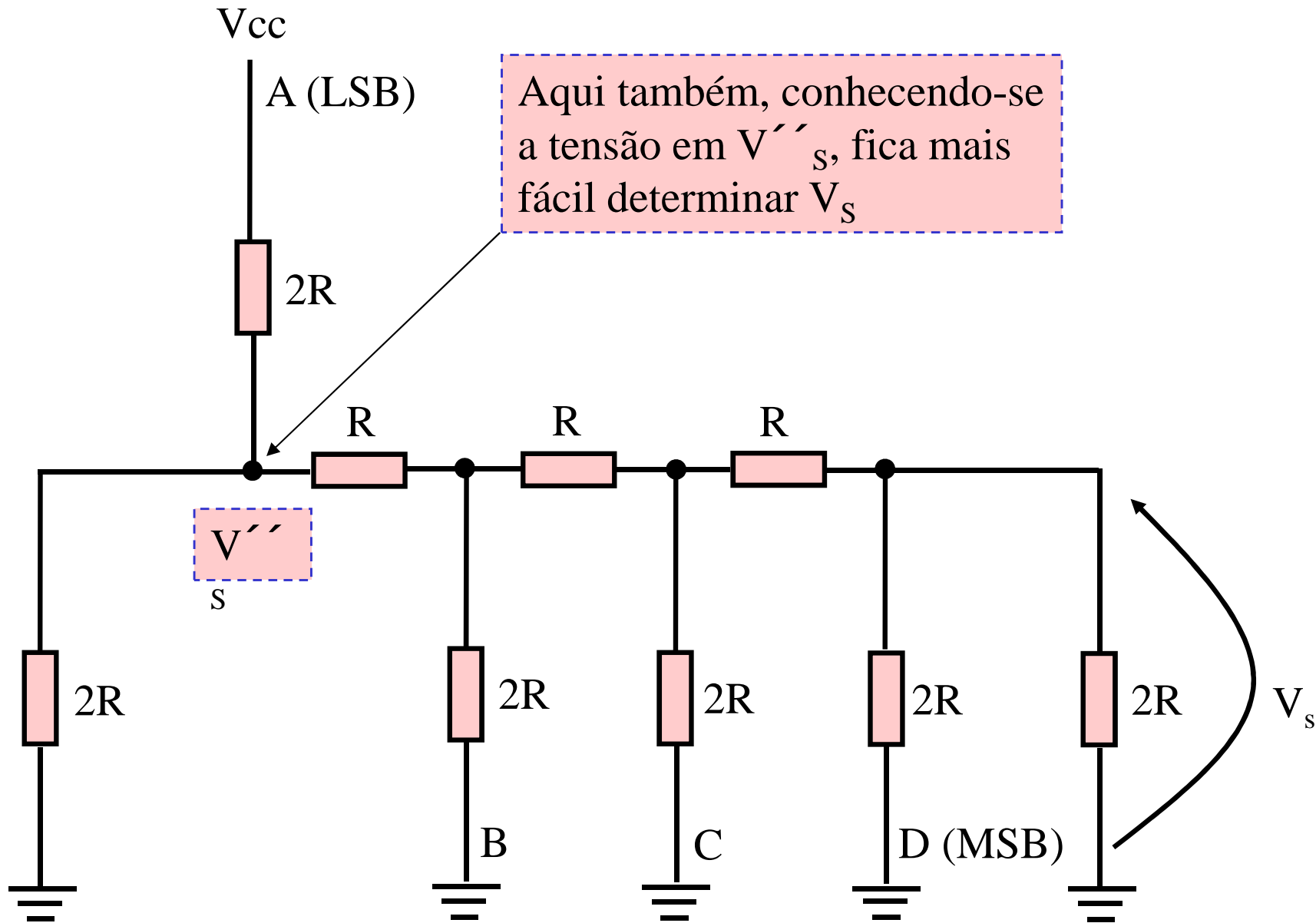
DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada B



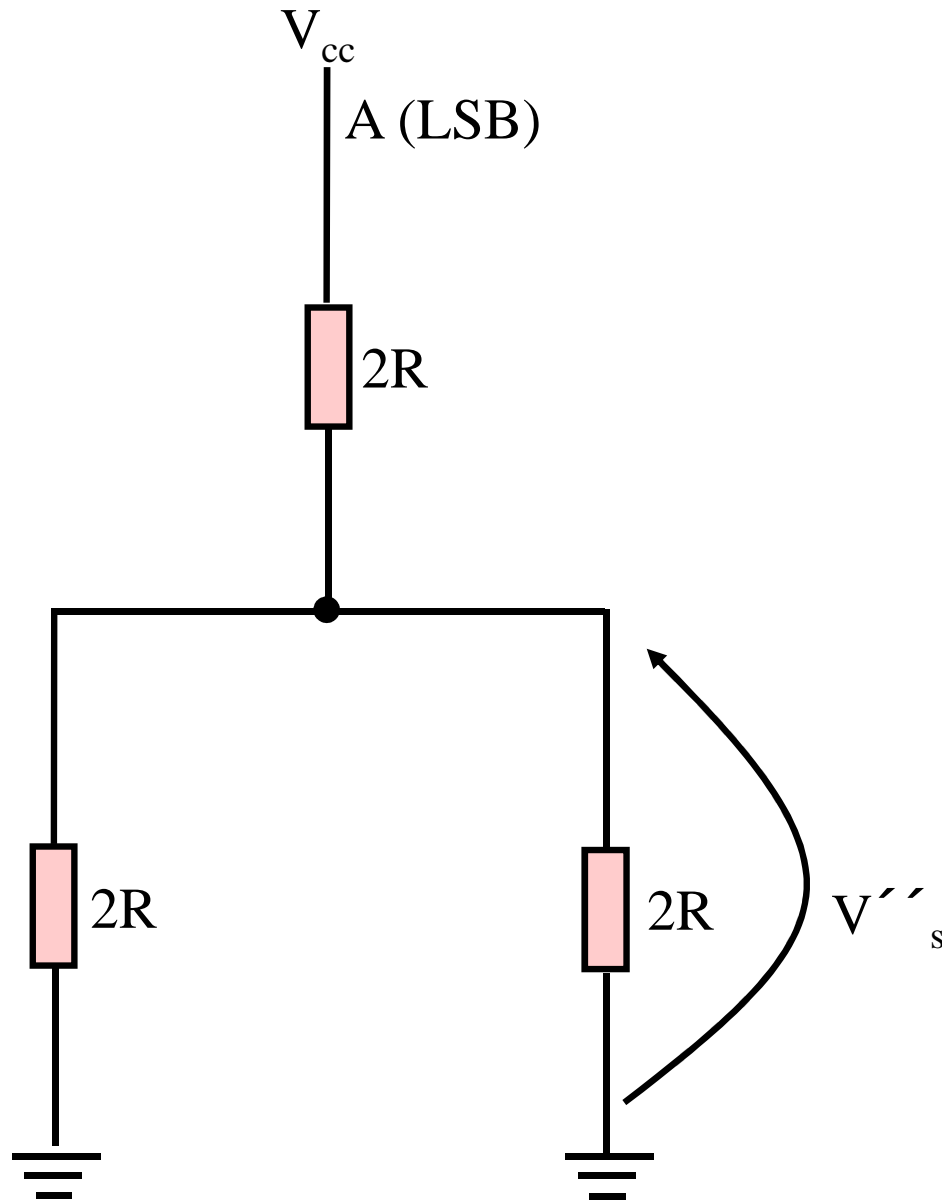
$$V_s = \frac{V'_s}{4}$$

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

DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada A

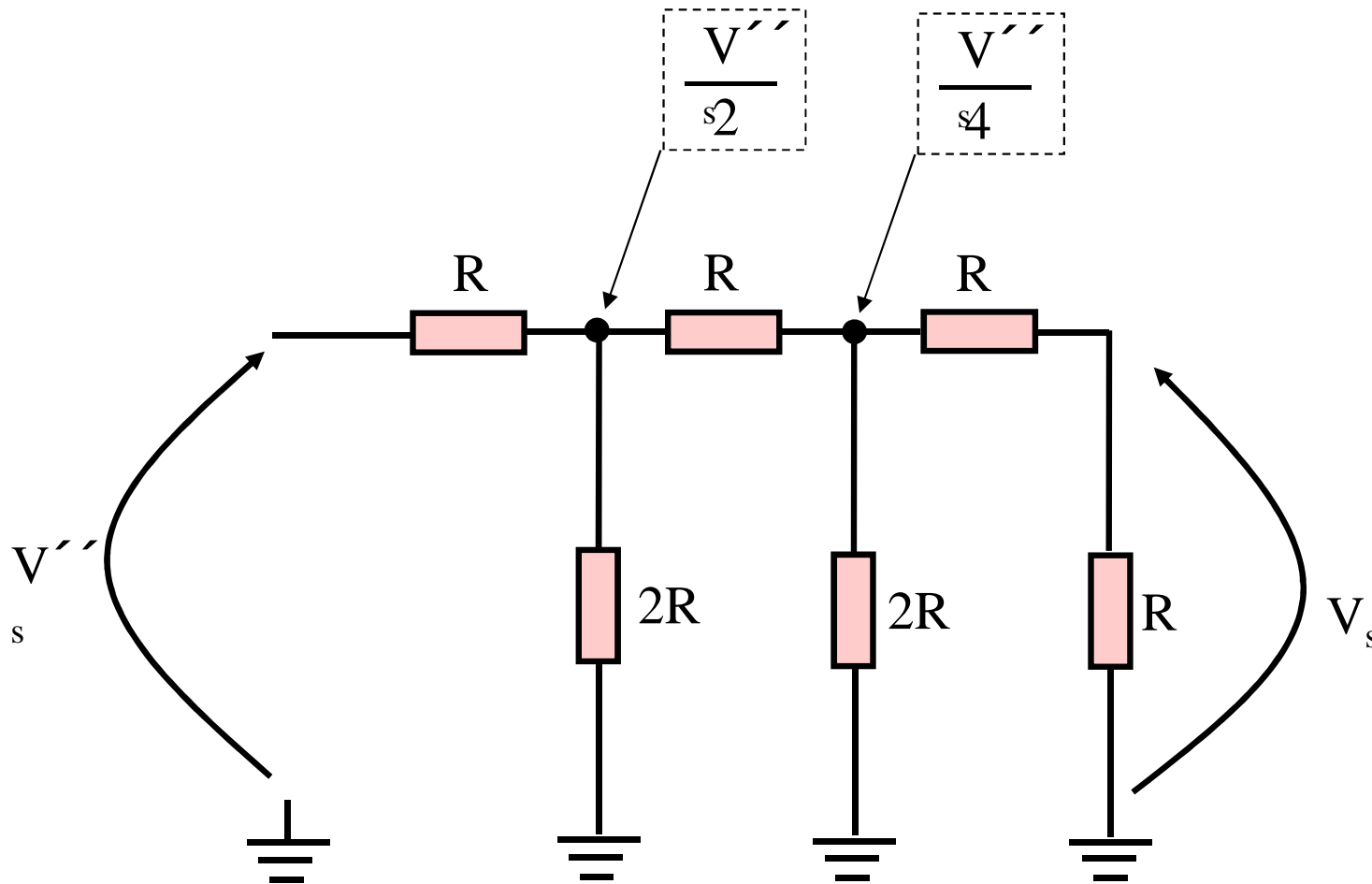


Peso da Entrada A – Circuito Equivalente



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

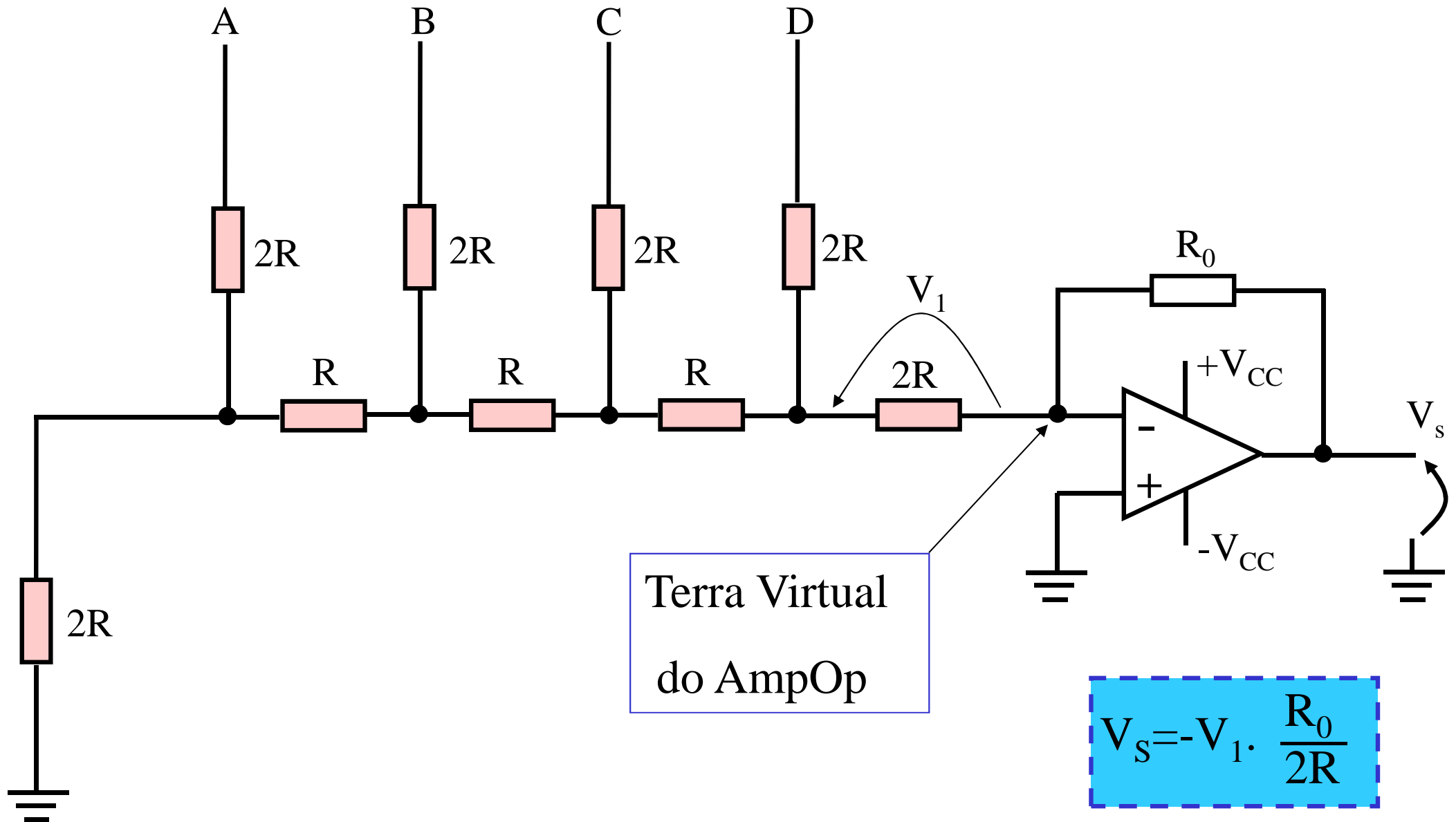
DAC com Rede R-2R – Peso da Entrada A



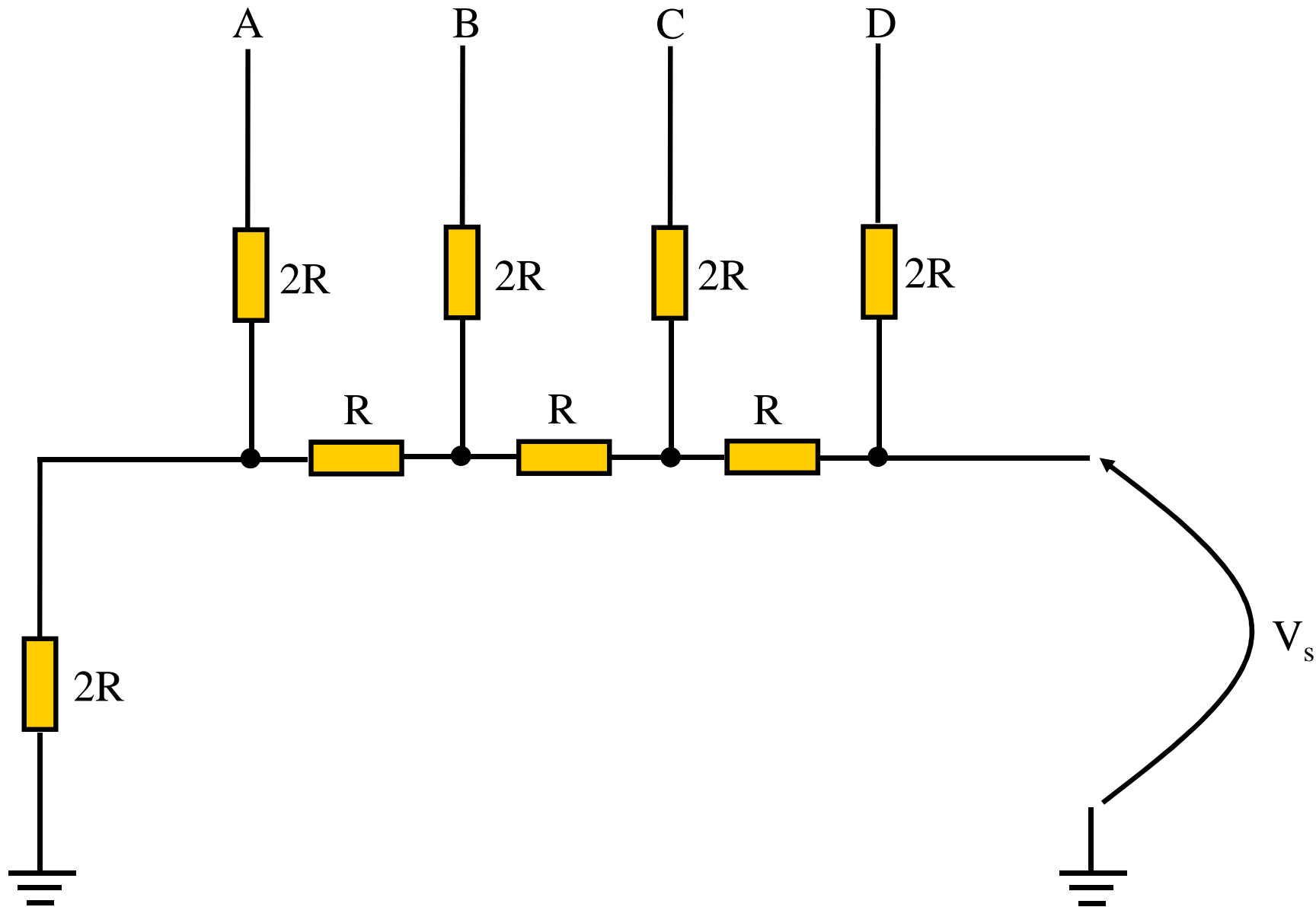
$$V_s = \frac{V'''}{8} S$$

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

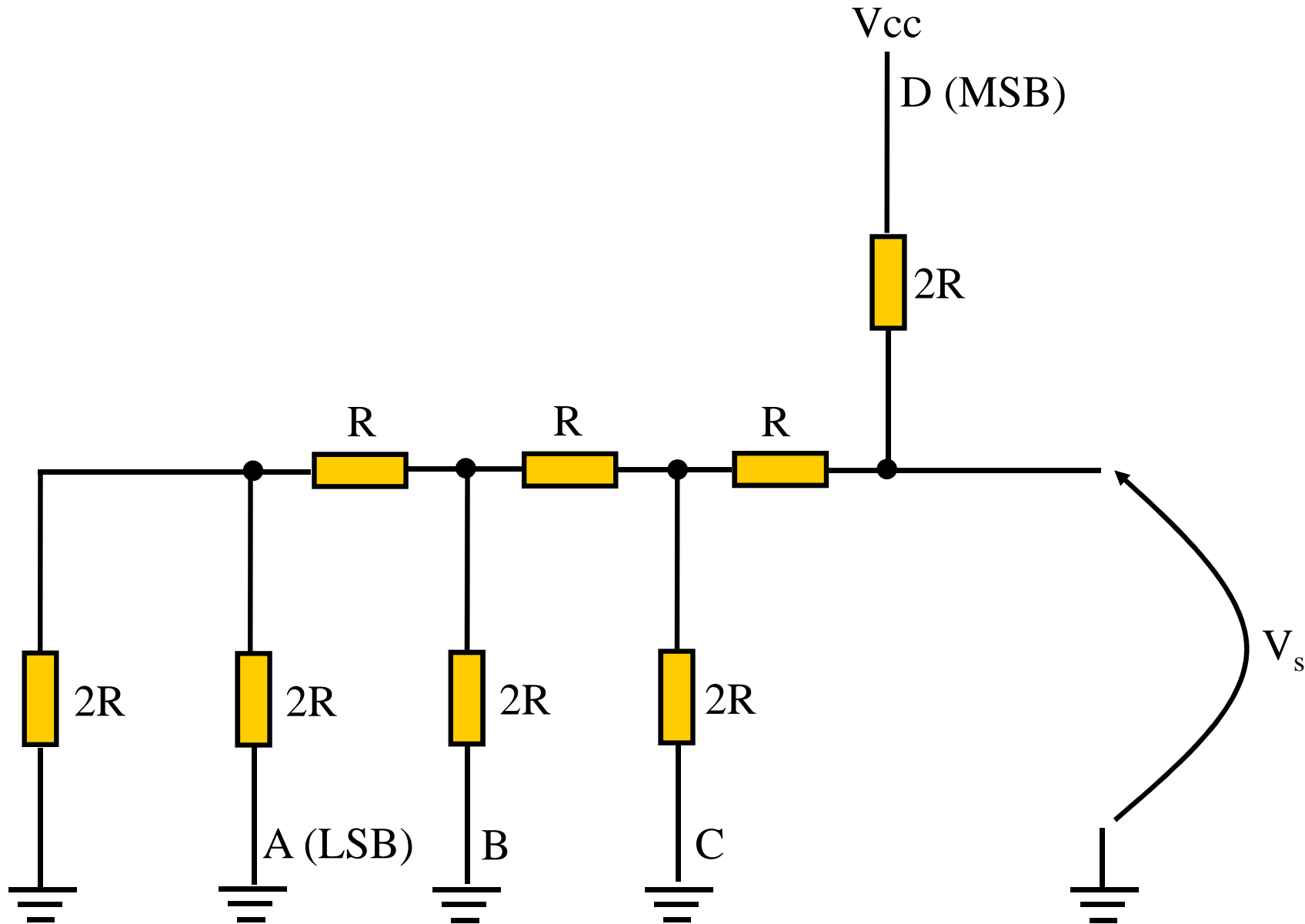
Rede R-2R com AmpOp



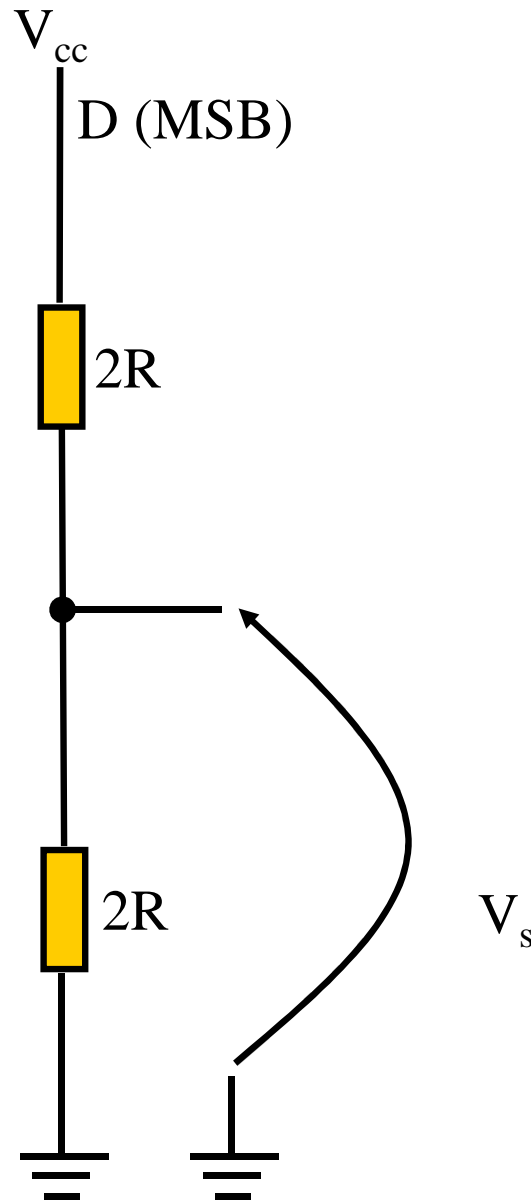
Rede R-2R Sem Resistor de Saída



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



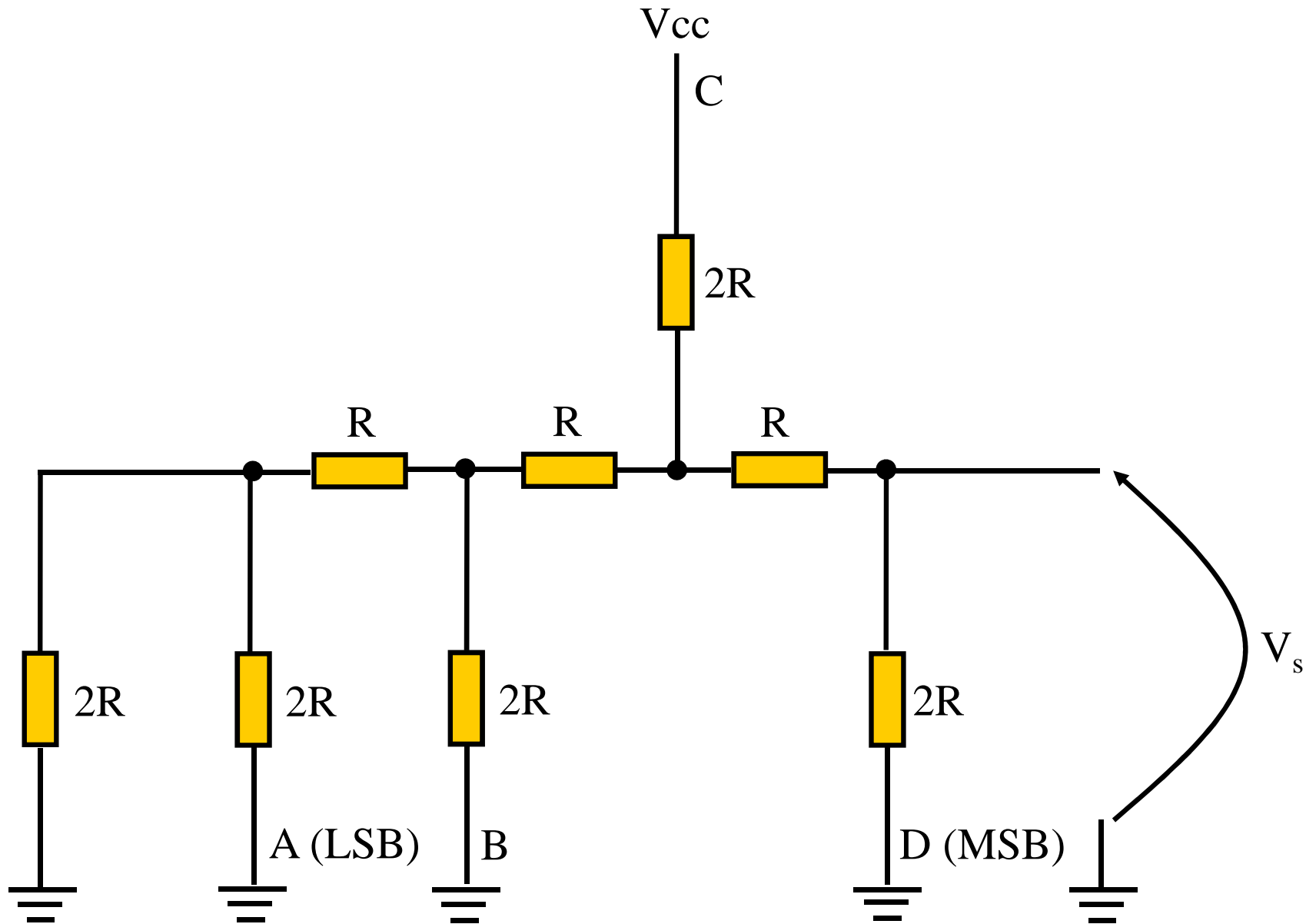
Peso da Entrada D – Circuito Equivalente



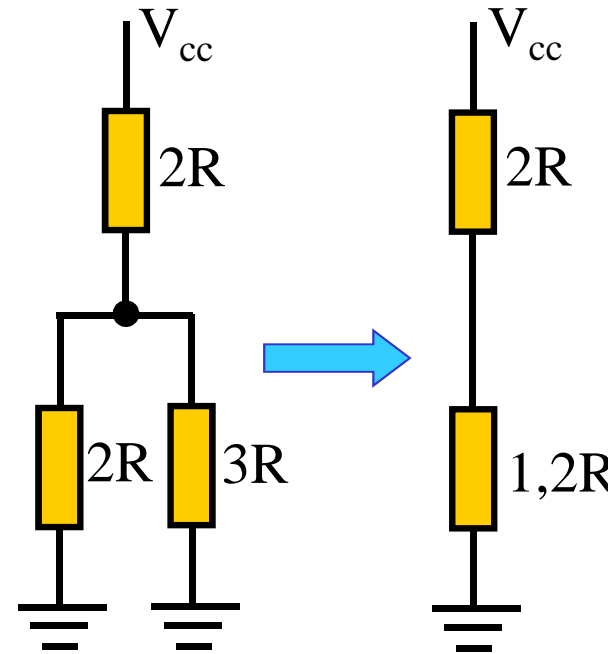
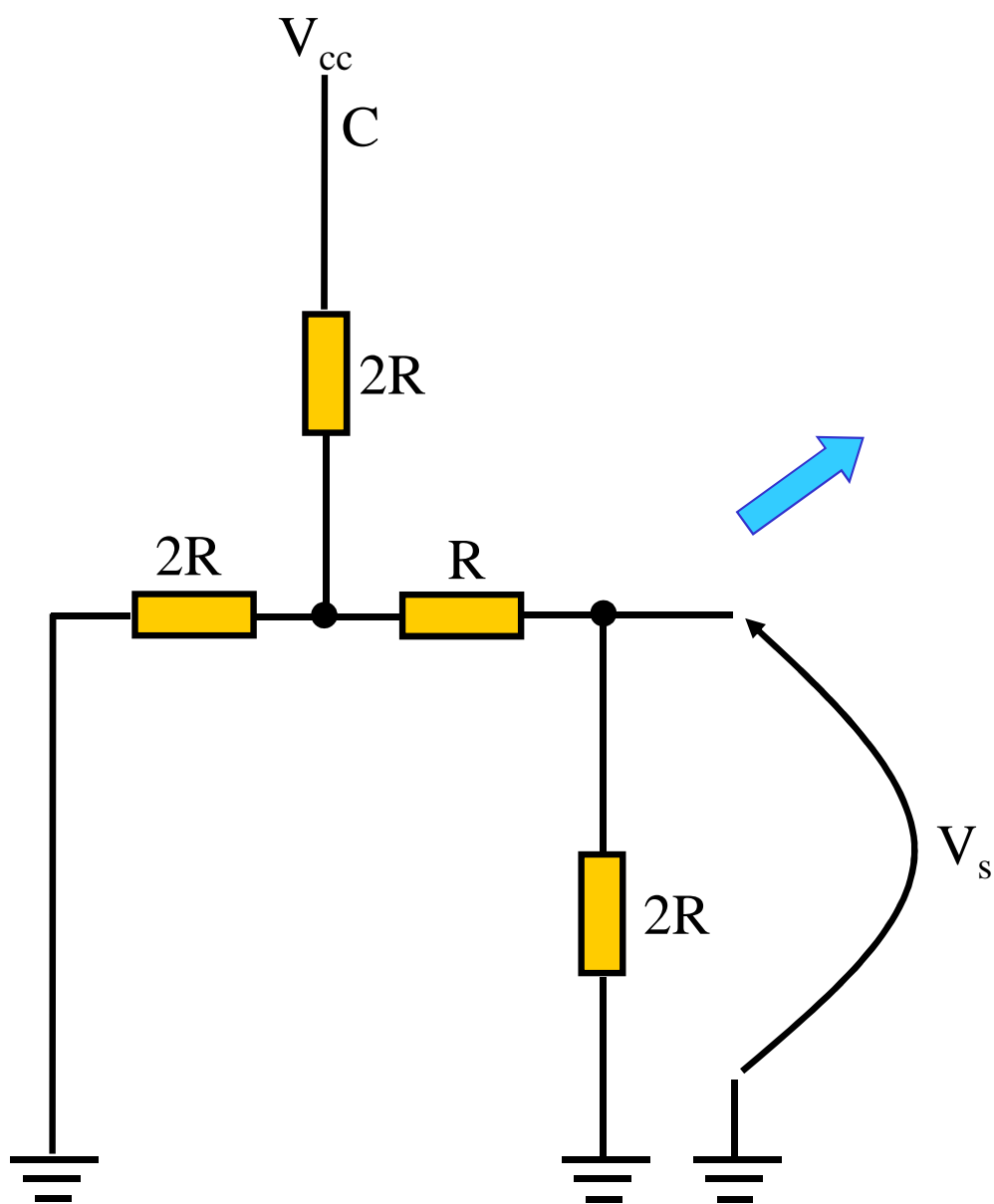
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot 2R}{2R + 2R}$$

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

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



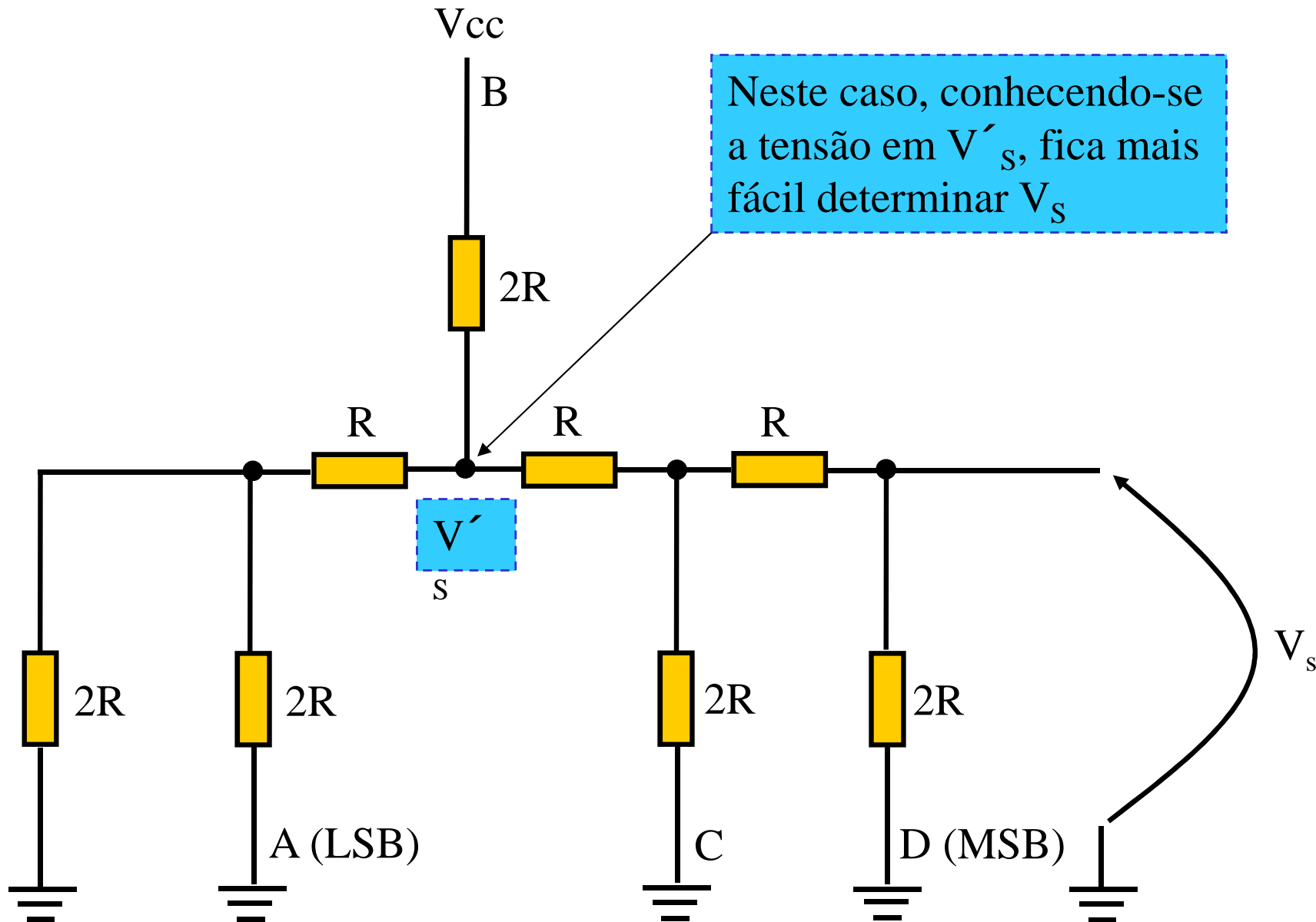
Peso da Entrada C – Circuito Equivalente



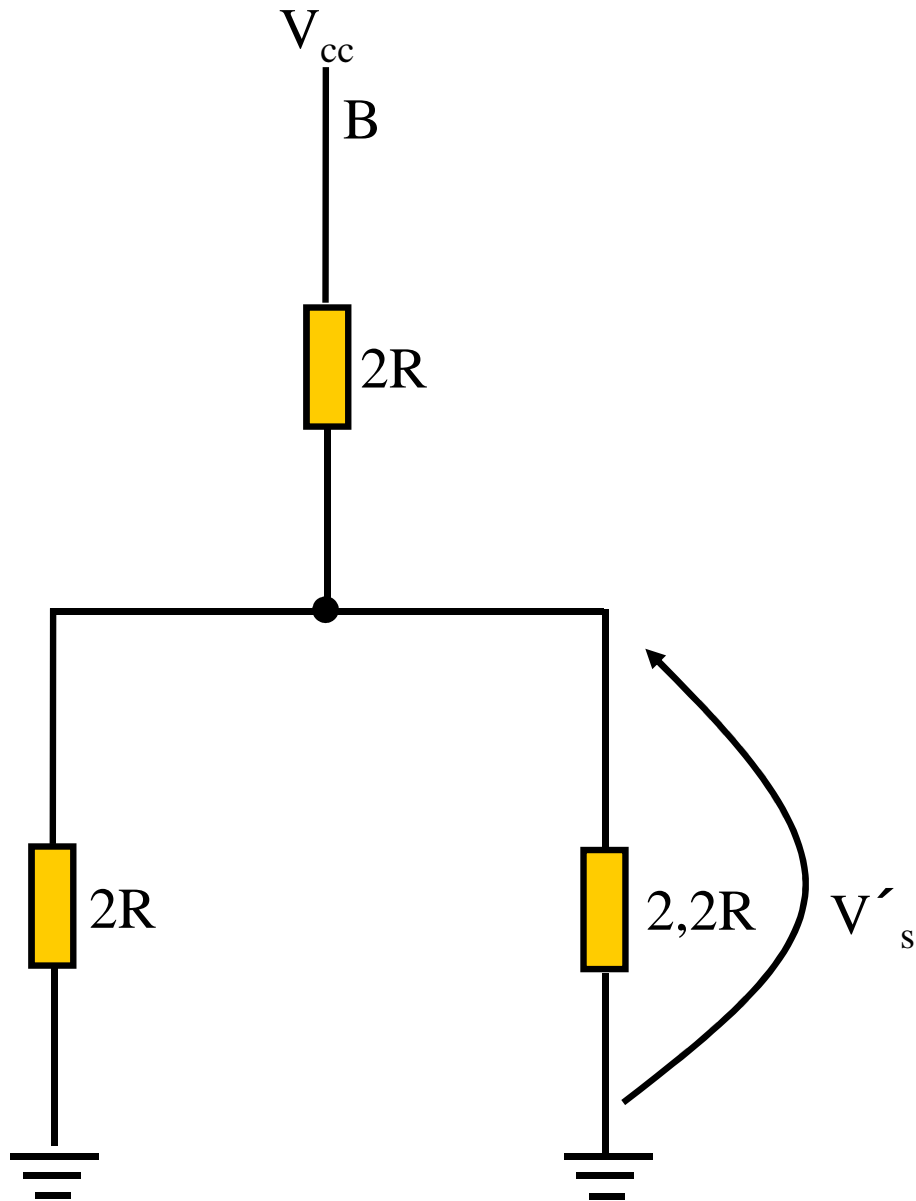
$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot (1,2R) \cdot 2}{(3,2R) \cdot 3}$$

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

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



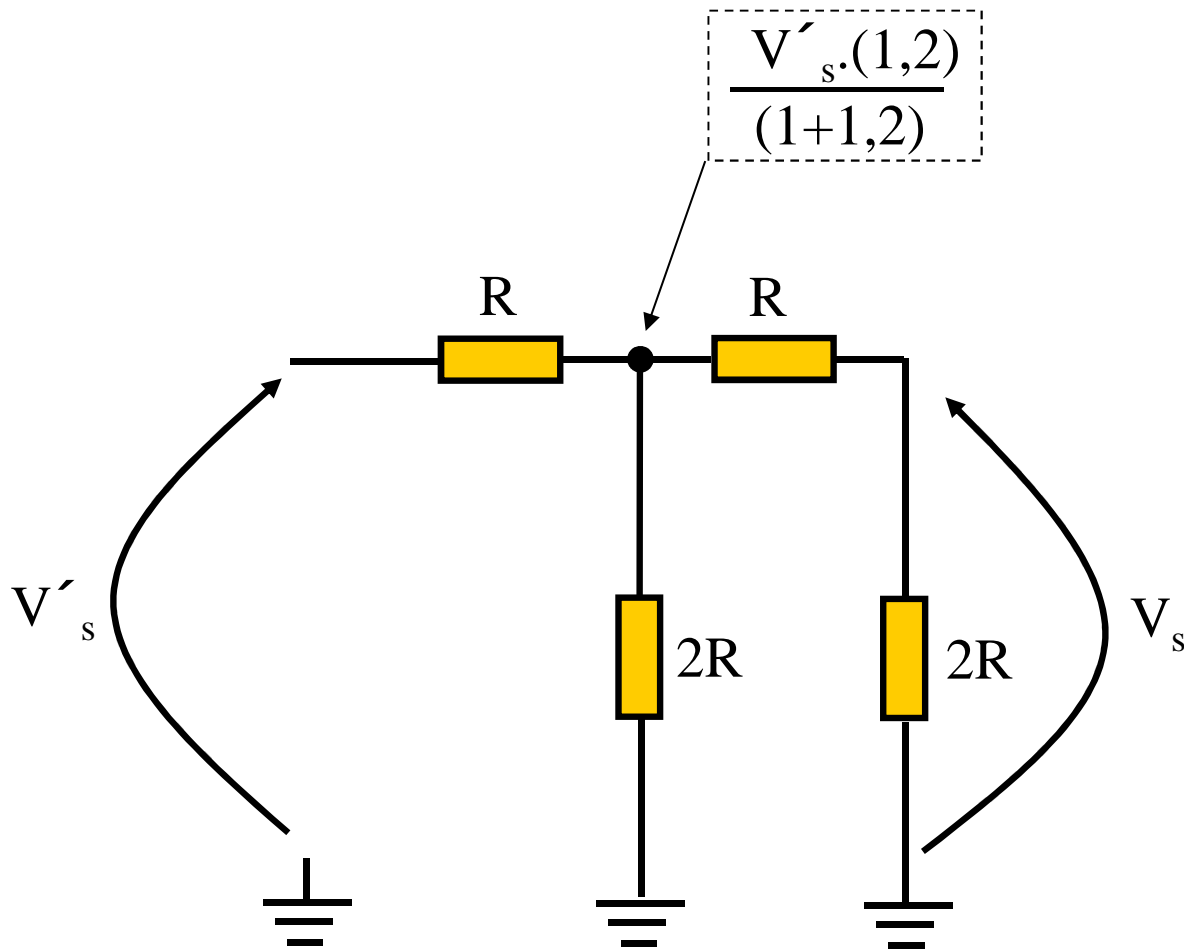
Peso da Entrada B – Circuito Equivalente



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

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

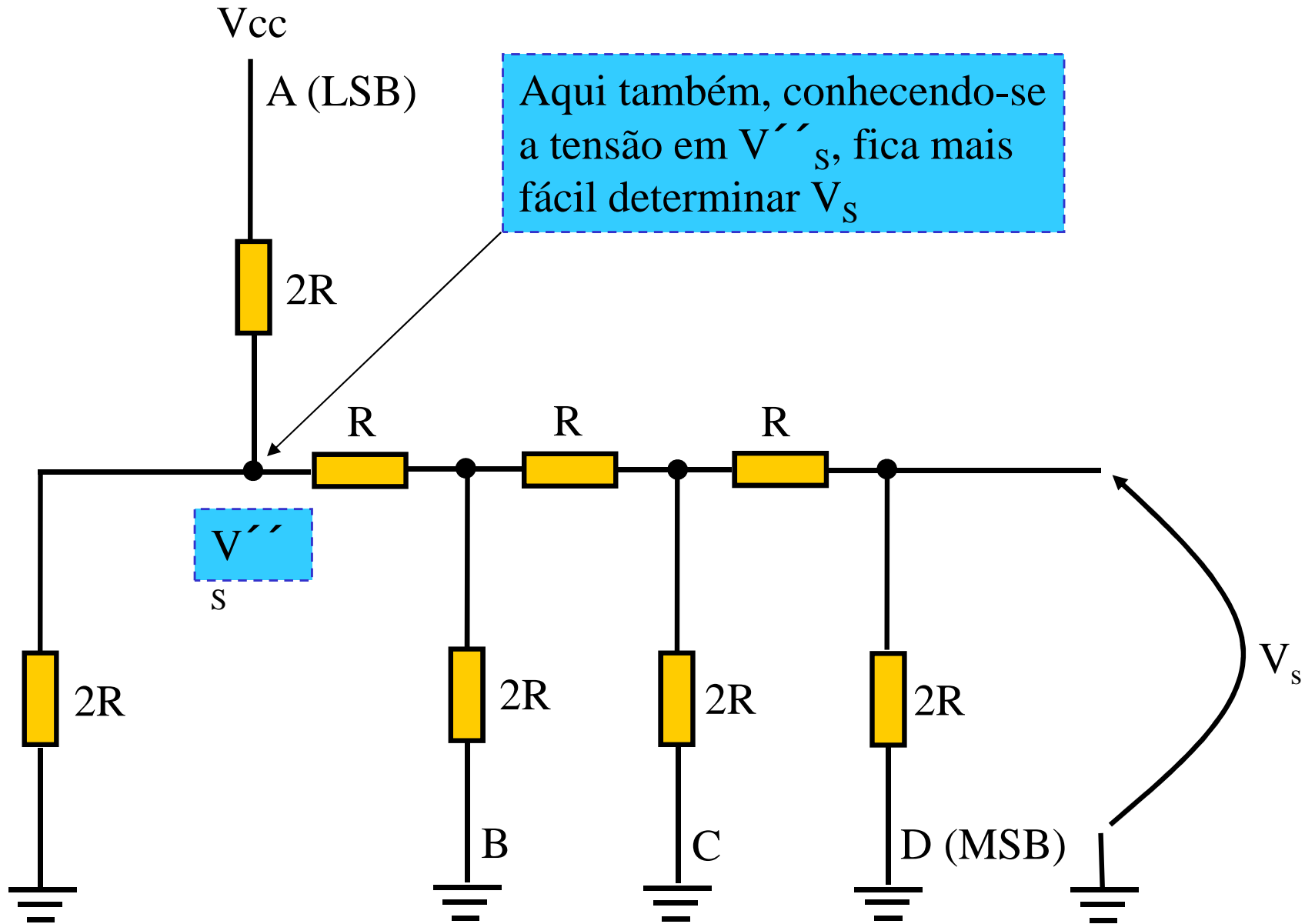
Rede R-2R Sem Resistor de Entrada Peso da Entrada B



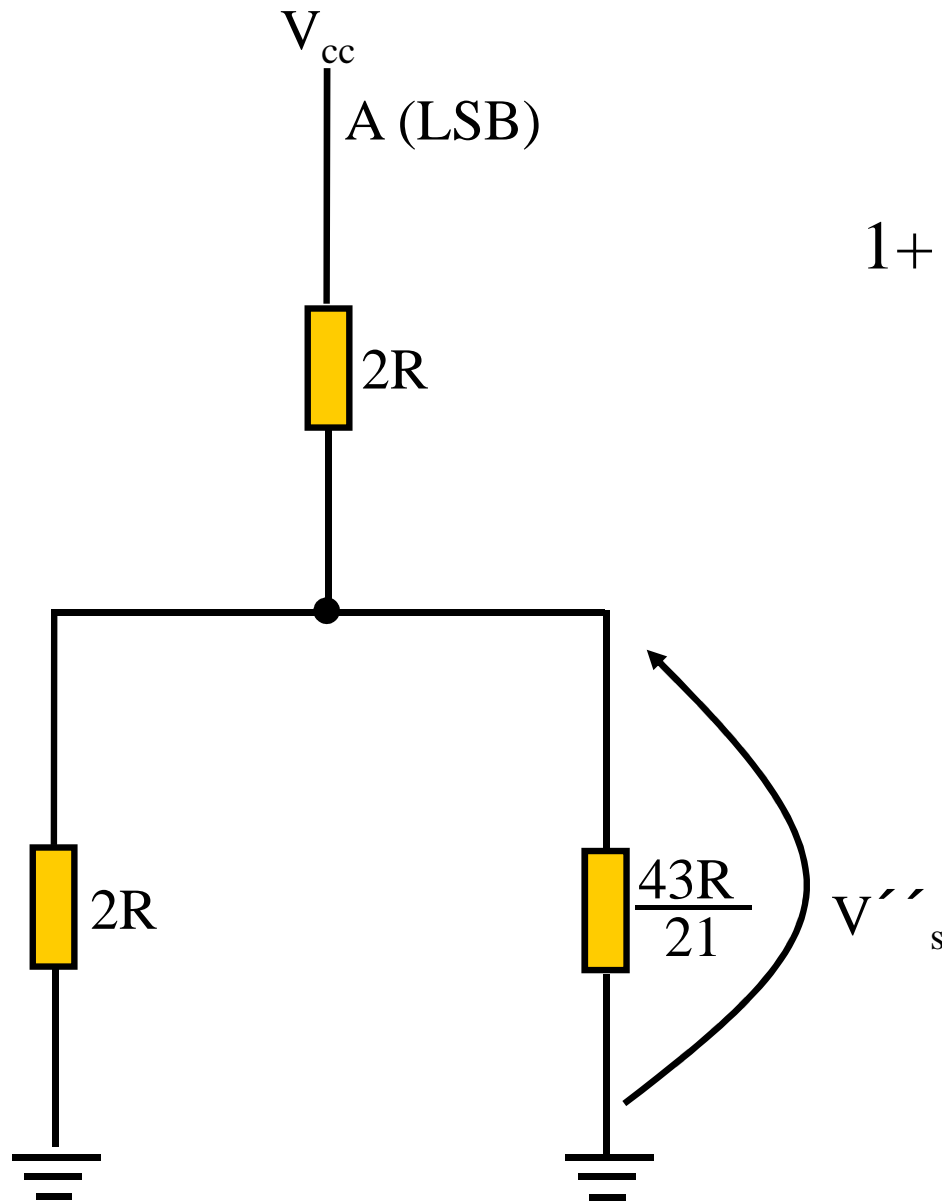
$$V_s = \frac{V'_s \cdot (1,2) \cdot (2)}{(2,2) \cdot (3)}$$

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

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



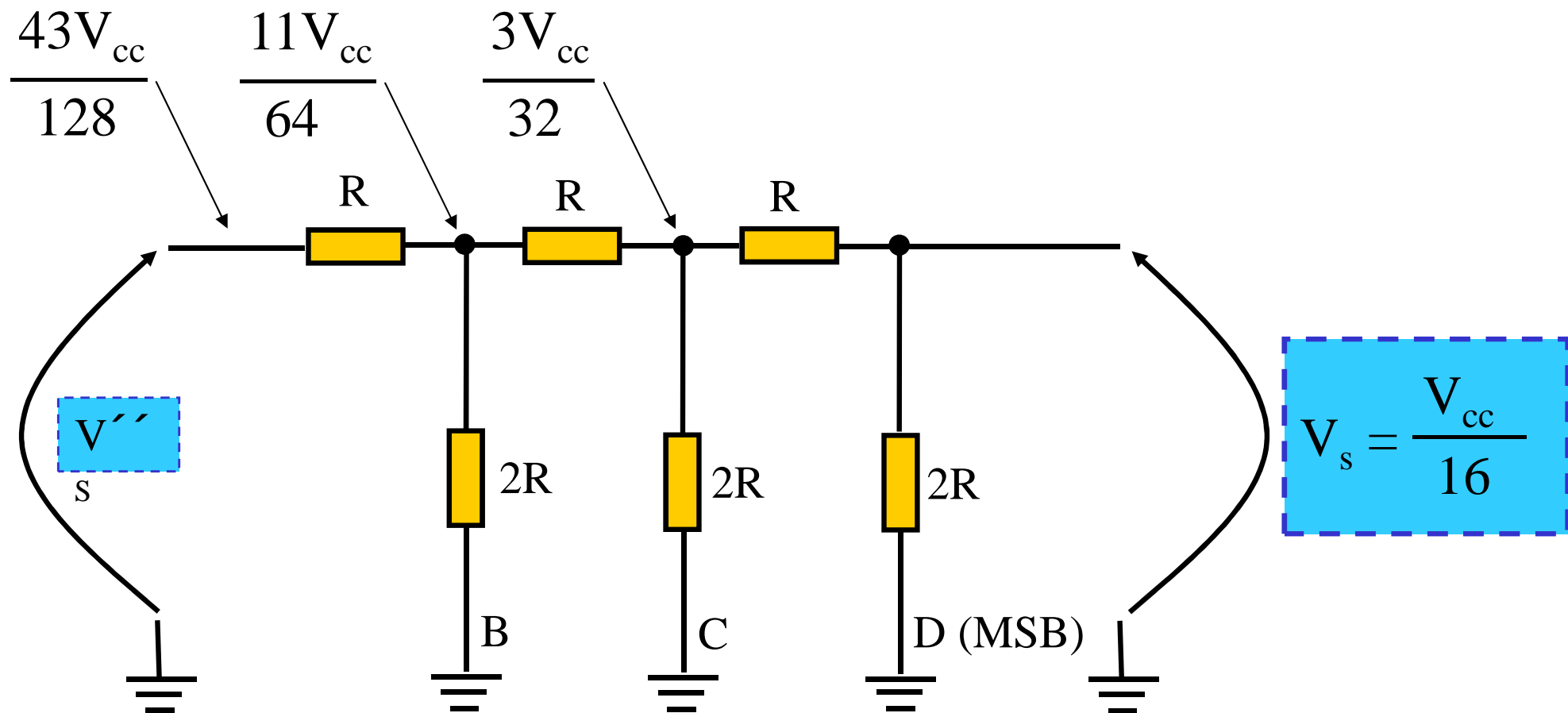
Peso da Entrada A – Circuito Equivalente



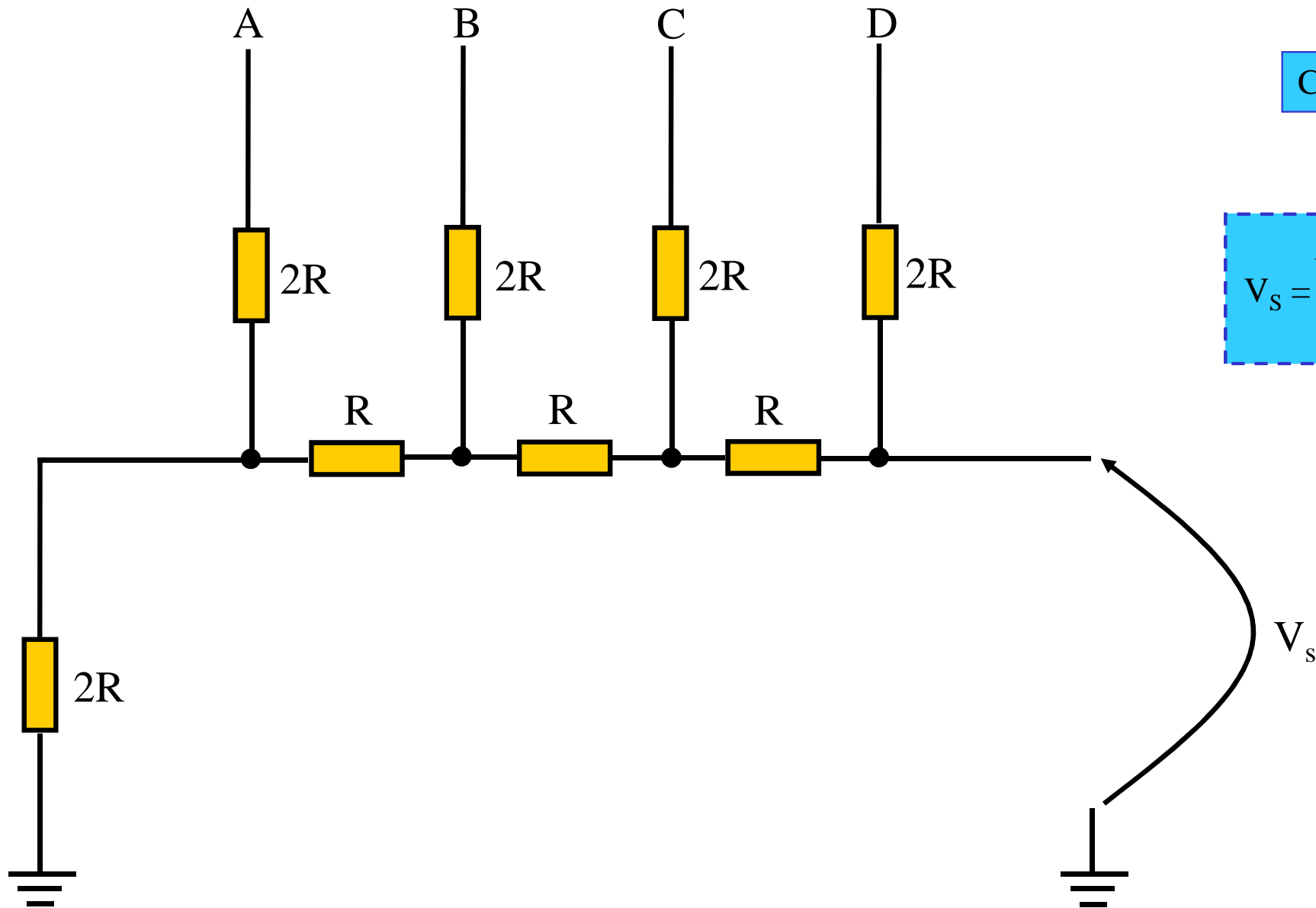
$$1 + \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{2 \times 3}{2 + 3}\right)}{2 + \left(1 + \frac{2 \times 3}{2 + 3}\right)} = \frac{43}{21}$$

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

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



Rede R-2R Sem Resistor de Saída

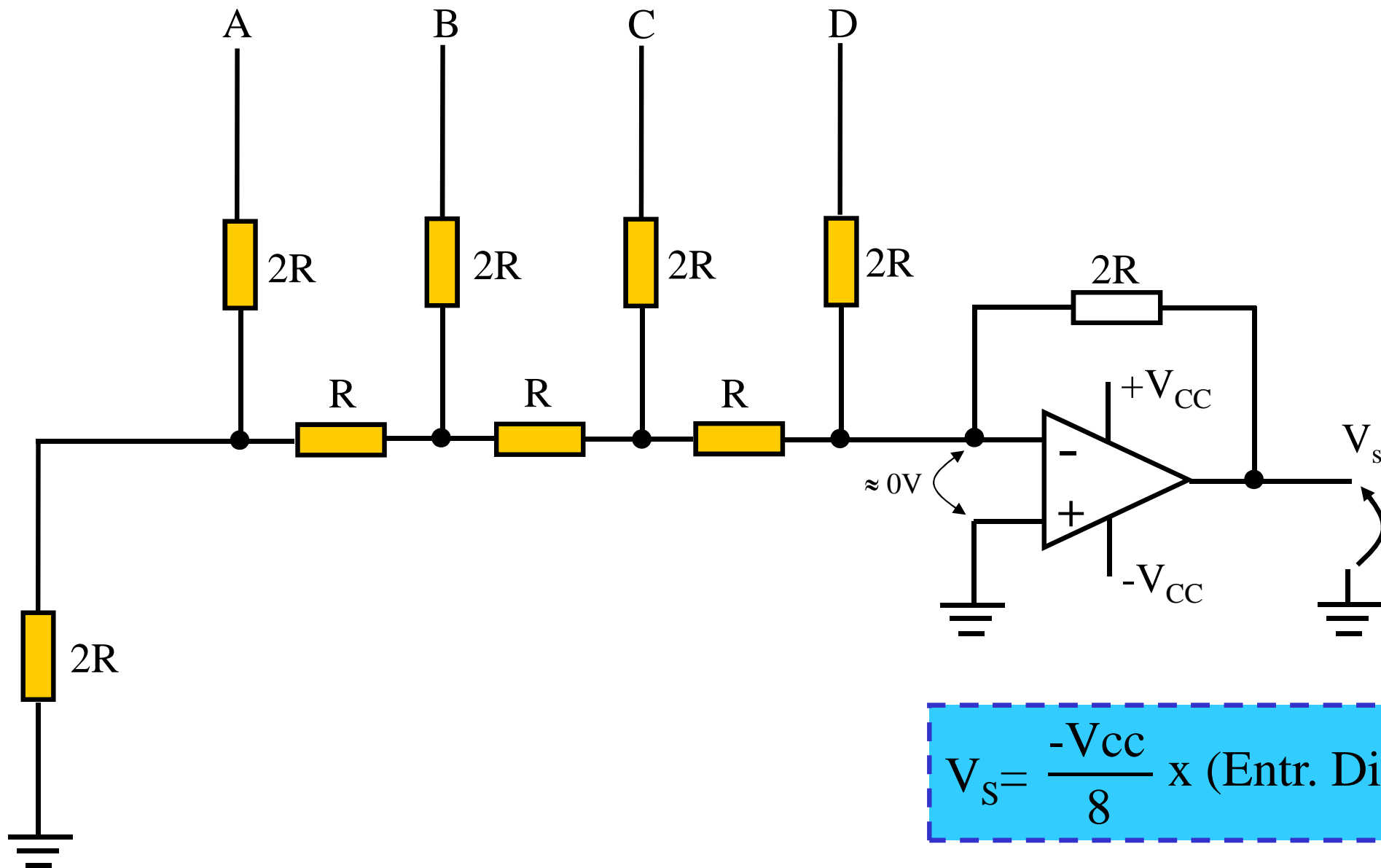


CONCLUSÃO:



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

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 = 0100₂ = 4₁₀

