Capítulo 3

Interface de Sistemas Sigitais com Analógicos

3.1 Conversão Digital $\rightarrow$ Analógico

Tratamos de conversores que, a partir da representação digital de um número, produz um sinal analógico na saída.

Neste texto presumimos que um número B a ser convertido em sinal analógico é representado em binário (BCD8421) na forma $b_3b_2b_1b_0$, de forma que o bit b_3 é o mais significativo, e o bit b_0 é o menos significativo. Por exemplo, se $B = 12$, ele é representado como 1100, sendo $b_0 = b_1 = 0$, e $b_2 = b_3 = 1$.

A saída de fundo de escala (FS, *full-scale output*) é o maior valor que um conversor digital-analógico pode produzir em sua saída (normalemnte o valor de saída para a entrada onde todos os bits são iguais a um).

A saída analógica será diretamente proporcional ao número na entrada digital, e denotamos por K o fator de proporcionalidade.

$$V_{\text{out}} = KB$$

A saída de um conversor pode ser uma tensão ou corrente.

b_3	b_1	b_1	b_0	V_{out}
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0.5
0	0	1	0	1.0
		$\vdots$		$\vdots$
1	1	0	1	6.5
1	1	1	0	7.0
1	1	1	1	7.5

Neste exemplo, $k = 1/2$, e $FS = 7.5$.

Note que cada bit b_i da entrada contribui com $\frac{2^i}{2}V$ na tensão de saída:

b_3	b_2	b_1	b_0	V_{out}
0	0	0	1	1/2
0	0	1	0	2/2
0	1	0	0	4/2
1	0	0	0	8/2

A *resolução*, ou *tamanho do passo* é a menor mudança possível na saída. No exemplo dado, a resolução é igual a $0.5V$.

$$K = \frac{FS}{2^n - 1}$$

A resolução percentual é

$$\%\text{resolução} = \frac{K}{FS} 100\%$$

Note que a resolução percentual depende apenas da quantidade de bits:

$$\begin{aligned} \%\text{resolução} &= \frac{K}{FS} 100\% \\ &= \frac{FS}{2^n - 1} \; \frac{1}{FS} 100\% \\ &= \frac{1}{2^n - 1} 100\%. \end{aligned}$$

A resolução percentual nos diz quanto da escala é usado em cada degrau.

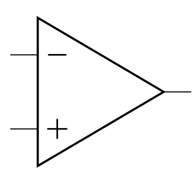
Para o exemplo anterior, onde há quatro bits, a resolução percentual é

$$\%\text{resolução} = \frac{1}{2^n - 1} 100\% = \frac{1}{15} 100\% \approx 0.066\%,$$

ou seja, cada passo ocupa aproximadamente 0.06% da escala.

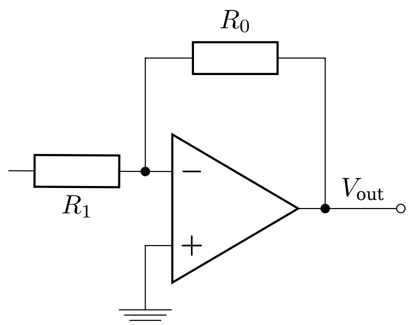
3.2 Aamplificador operacional

Um *amplificador operacional*, ou “Amp Op”, também “Op Amp”, é um componente que amplifica diferença de potencial. Um Op Amp tem duas entradas – uma inversora e uma não inversora – e uma saída.



Op Amps podem ser usados em muitas diferentes configurações. Nos interessam apenas algumas delas.

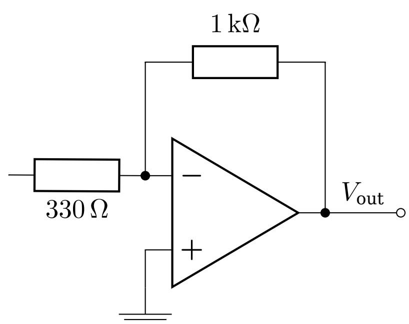
A configuração como amplificador inversor, mostrada na figura a seguir[1].



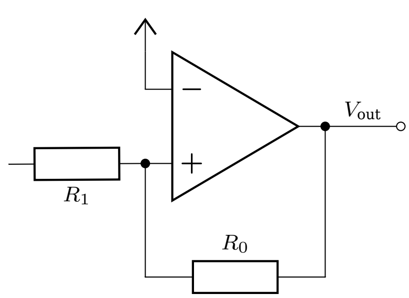
O ganho do amplificador é R_0/R_1, e a tensão na saída será

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \frac{R_0}{R_1}$$

Para um exemplo, suponha que os valores dos resistores sejam $R_0 = 1K\Omega$ e $R_1 = 330\Omega$.



[1]É mais comum a apresentação do amplificador inversor. Seu equivalente não-inversor é mostrado no circuito a seguir.

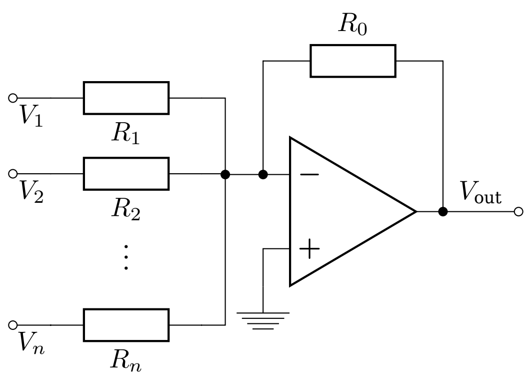


A tensão na saída do amplificador será $V_{\text{out}} = 1.5(1000/330) \approx 4.54V$.

Quando um amplificador operacional é usado nesta configuração, a tensão em sua entrada inversora é usualmente próxima de zero – e por isso este ponto é chamado de *terra virtual* do amplificador.

3.3 Escada simples com amplificador operacional

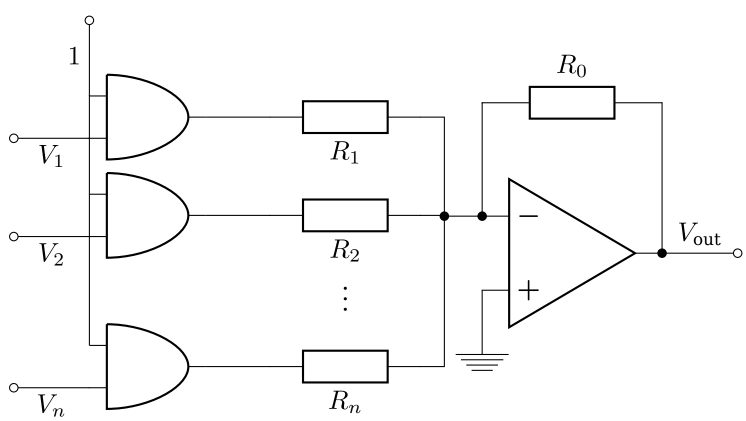
A configuração a seguir é a de um *amplificador somador*.



A tensão na saída será a média ponderada das tensões nas entradas:

$$V_{\text{out}} = -R_0 \sum \frac{V_i}{R_i}.$$

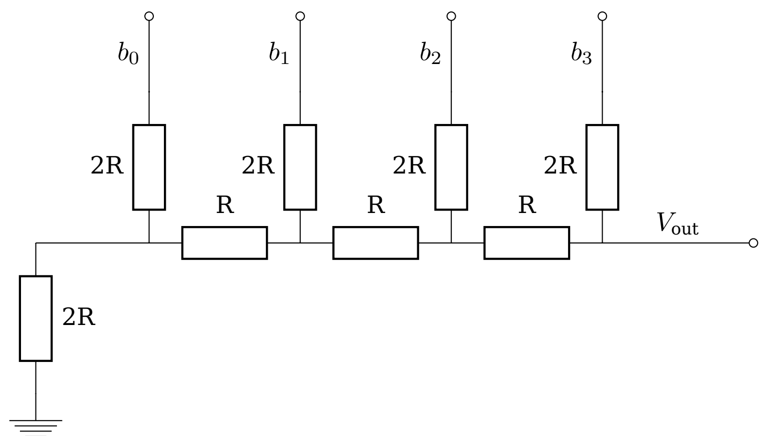
O circuito que será acoplado para oferecer as entradas $(V_1, \ldots, V_n)$ para o conversor tem sua impedância de saída, que a priori desconhecemos. Isto faz com que as tensões de entrada do conversor não sejam bem definidas. Podemos resolver este problema isolando essas impedâncias: basta usar portas "E" na entrada, na mesma configuração que um circuito "enable".



3.4 Rede R-2R

O amplificador somador, embora conceitualmente simples, apresenta um problema: são necessários muitos resistores de valores muito distantes. Para uma entrada de 16 bits, preciasríamos de resistores de um valor R, e também $2R$, $4R$, até $2^{15}R$. Se $R = 100\Omega$, precisaremos de resistores de $100\Omega, 200\Omega, \ldots, 3.3M\Omega$. Isto não é conveniente para implementação em circuitos integrados.

Uma rede R-2R necessita apenas de dois valores de resistor – daí seu nome – e é igualmente eficaz.

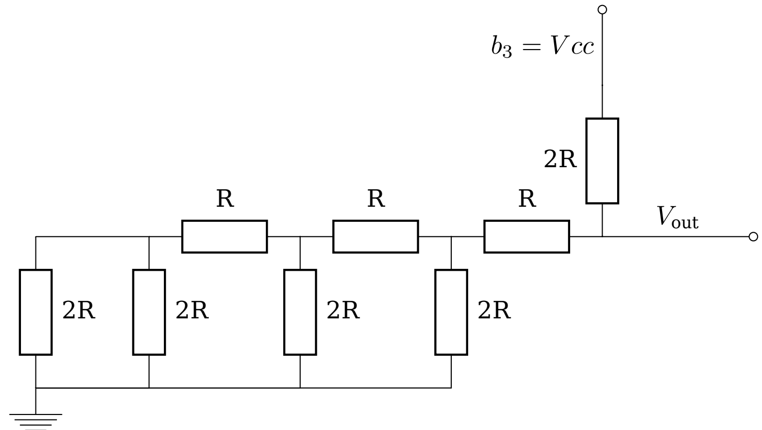


Calcularemos como cada bit contribui para a tensão de saída:

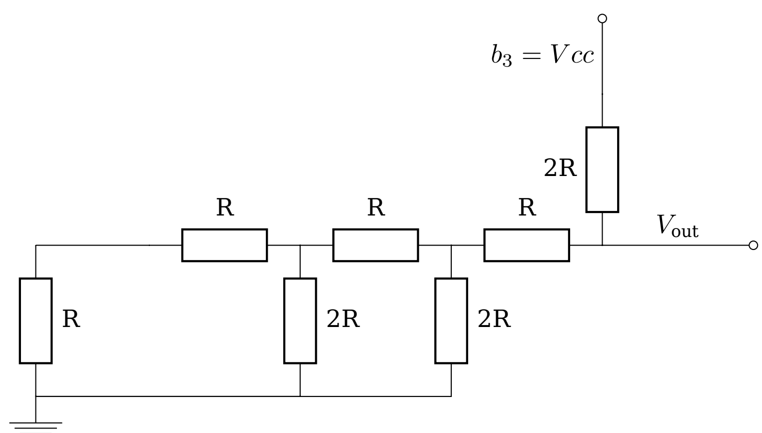
- quando somente b_3 está em nível alto, a saída é $V_{\text{out}} = V_3$;
- quando somente b_2 está em nível alto, a saída é $V_{\text{out}} = V_2$;
- e assim sucessivamente.

Pelo Teorema da superposição, $V_{\text{out}} = V_0 + V_1 + V_2 + V_3$.

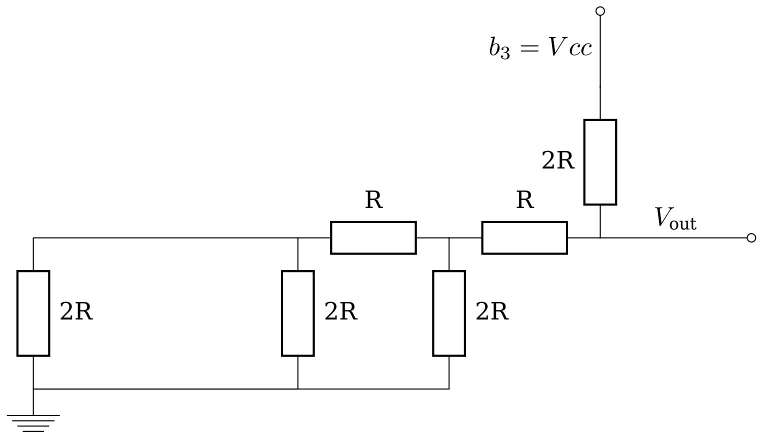
Primeiro verificamos o que acontece quando somente b_3 está em nível alto:



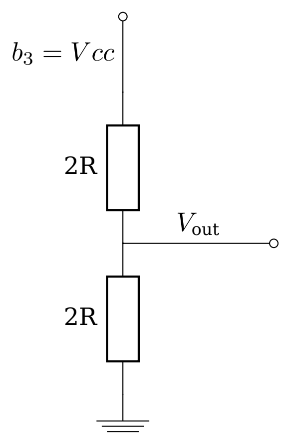
No lado esquerdo do diagrama, há dois resistores de valor $2R$ ligados em paralelo ao terra. Estes são equivalentes a um resistor de valor R.



Agora temos dois resistores de valor R em série – o que nos dá um equivalente de valor $2R$.



Continuando desta forma chegaremos ao circuito equivalente a seguir:



É um divisor de tensão, e claramente

$$V_{\text{out}} = V_3 = \frac{1}{2} Vcc.$$

(falta mostrar como o resto dos bits contribui para a tensão de saída)

Cada bit contribuirá com um peso diferente na tensão de saída:

$$\begin{array}{lrl}
b_3: & 1/2 = 8/16 & \times V_{\text{ref}} \\
b_2: & 1/4 = 4/16 & \times V_{\text{ref}} \\
b_1: & 1/8 = 2/16 & \times V_{\text{ref}} \\
b_0: & 1/16 = 1/16 & \times V_{\text{ref}}
\end{array}$$

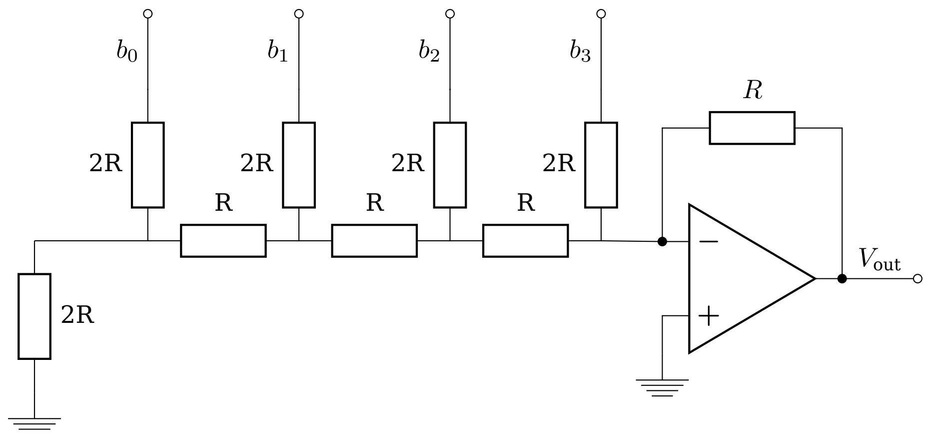
Assim, se o número representado em binário na entrada é B, então

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} &= \frac{8}{16}b_3 + \frac{4}{16}b_2 + \frac{2}{16}b_1 + \frac{1}{16}b_0 \\ &= \frac{2^3 b_3 + 2^2 b_2 + 2^1 b_1 + 2^0 b_0}{2^4}. \end{aligned}$$

e de maneira geral, para n bits,

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} &= \left(\frac{1}{2^n}\sum 2^i b_i\right) Vcc \\ &= \frac{B\ Vcc}{2^n}. \end{aligned}$$

Finalmente, acoplamos a rede R-2R a um amplificador operacional:



A saída do Amplificador será

$$V_{\text{out}} = -\frac{BVcc}{16}.$$

3.5 Conversão Analógico → Digital

A convresão de um sinal analógico em digital é mais trabalhosa do que a conversão digital-analógico.

3.5.1 Rampa Digital

O método da rampa digital consiste em usar um conversor digital-analógico para produzir todos os valores entre $0V$ e o fundo de escala, sequencia-mente, comparando cada um deles com o sinal de entrada. Quando o valor produzidpo for maior ou igual que o sinal de entrada, o número binário usado como entrada no conversor digital-analógico é passado para a saída do sistema.

3.5.2 Aproximações sucessivas (busca binária)

Ao invés de buscar sequenciamente o valor digital que resulta na entrada analógica, o método das aproximações sucessivas realiza uma busca binária: ele determina os bits da saída, um em cada passo.

3.5.3 Flash

O conversor do tipo *flash* não precias de entrada de clock – converte a entrada analógica em digital em um só passo, bem mais rapidamente que os métodos anteriores.