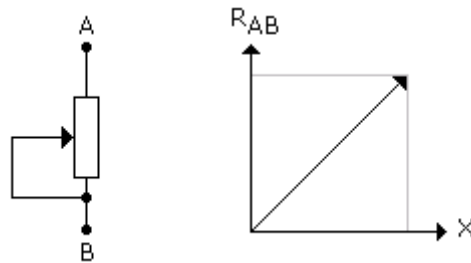


CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO (D/A)

CONVERSORES DIGITAIS-ANALÓGICOS (DA)

O conversor DA converte o sinal digital para a forma analógica.

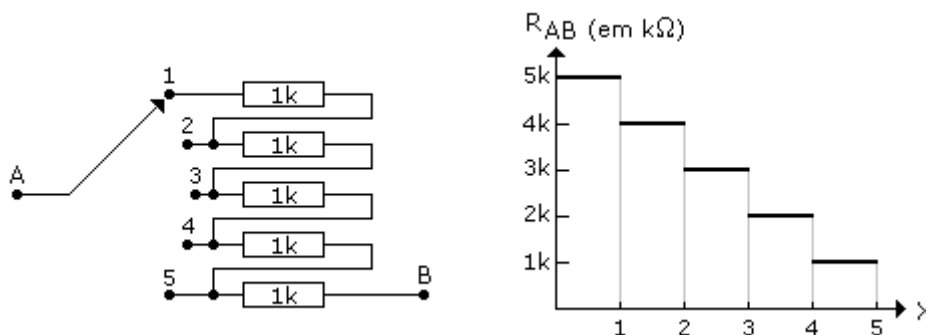
Analisemos então, dois dispositivos: um de variação analógica e outro de variação digital.



X = posicionamento do cursor

A figura acima mostra um potenciômetro, onde a resistência entre os pontos A e B varia de forma analógica, ou seja, a resistência nos extremos do potenciômetro varia de forma continuada, obedecendo a rotação do seu eixo. Assim, R_{AB} assume todos os valores.

A figura a seguir mostra um dispositivo de variação digital, onde a variação da resistência entre os pontos A e B assume 5 valores diferentes, uma vez que, a chave seletora possui apenas 5 posições.



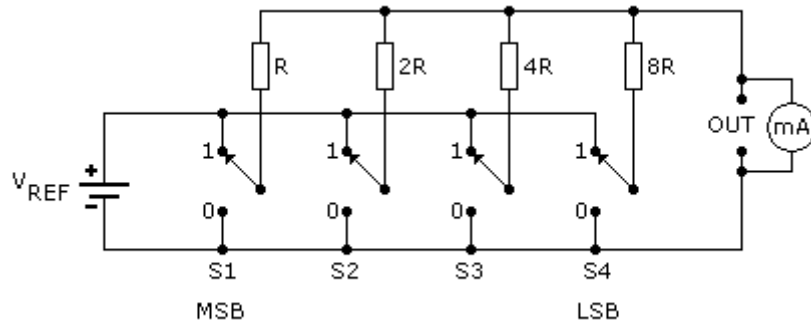
X = posição da chave seletora

A figura a seguir mostra um circuito simples de conversor DA.

O circuito é composto por 4 chaves, onde cada chave representa 1 bit que pode assumir os valores lógicos 0 ou 1 (os dois estados possíveis).

Neste caso, trata-se então de um conversor de 4 bits do tipo "somador".

Quando todas as chaves estiverem na posição 0, V_{OUT} será igual a zero.



Para cada uma das chaves está associado um resistor que representa o código BCD8421 (8R, 4R, 2R e R).

Fechando apenas a chave S1 teremos:

$$I = \frac{V_{REF}}{R}$$

Se as chaves S1 e S4 estiverem fechadas, teremos:

$$I = \frac{V_{REF}}{R} + \frac{V_{REF}}{8R}$$

Como 4 bits nos dão 16 possibilidades, temos 16 níveis de corrente circulando pelo circuito.

A fórmula geral será assim definida:

$$I = S_1 \cdot \frac{V_{REF}}{2^0 \cdot R} + S_2 \cdot \frac{V_{REF}}{2^1 \cdot R} + S_3 \cdot \frac{V_{REF}}{2^2 \cdot R} + S_4 \cdot \frac{V_{REF}}{2^3 \cdot R}$$

S1, S2, S3 e S4 podem assumir os valores 0 ou 1

Supondo que R seja igual a 20kΩ e E = 10V (V_{REF})

a) para S1 fechada, teremos:

$$I = \frac{10V}{R} = \frac{10V}{20k} = 0,5mA$$

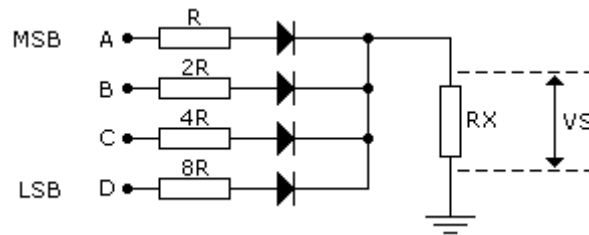
b) para S1 e S2 fechadas, teremos:

$$I = \frac{10V}{R} + \frac{10V}{2R} = \frac{10V}{20k} + \frac{10V}{40k} = 0,5 + 0,25 = 0,75mA$$

Para "n" bits teremos:

$$I = S_1 \cdot \frac{V_{REF}}{2^0 \cdot R} + S_2 \cdot \frac{V_{REF}}{2^1 \cdot R} + S_3 \cdot \frac{V_{REF}}{2^2 \cdot R} + S_n \cdot \frac{V_{REF}}{2^{n-1} \cdot R}$$

A figura a seguir mostra outra opção para a conversão DA. Trata-se também de um circuito simples com diodos. *É imprescindível que R_x seja muito menor do que R .*



A tensão V_S é a tensão na saída, a qual é obtida partir dos níveis lógicos que serão aplicados na entrada, os quais poderão ser definidos como V_{in} (tensão de entrada ou referência).

Desta forma, se tivermos nível lógico 1 na entrada A e nível lógico 0 nas demais entradas, a saída será:

$$V_S = \frac{V_{in}}{R} \cdot R_x$$

Se tivermos nível lógico 1 na entrada D e 0 nas demais entradas:

$$V_S = \frac{V_{in}}{8R} \cdot R_x$$

Para um número binário correspondente a 1001 na entrada, a saída V_S será:

$$V_S = \frac{V_{in}}{R} \cdot R_x + \frac{V_{in}}{8R} \cdot R_x$$

$$V_S = \frac{V_{in} \cdot R_x}{R} + \frac{V_{in} \cdot R_x}{8R} = \frac{8V_{in} \cdot R_x + V_{in} \cdot R_x}{8R} = \frac{9V_{in} \cdot R_x}{8R} = \frac{V_{in}}{R} \cdot \frac{9}{8} R_x$$

Exemplo:

Supondo $V_{in} = 10V$, $R = 10k\Omega$ e $R_x = 8\Omega$, determine a tensão na saída, para uma entrada binária 1011.

$$V_S = \frac{V_{in}}{R} \cdot R_x + \frac{V_{in}}{4R} \cdot R_x + \frac{V_{in}}{8R} \cdot R_x$$

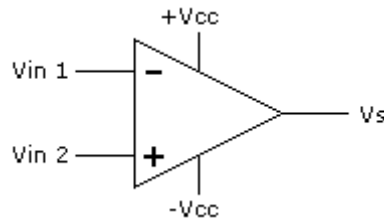
$$V_S = 8 \left(\frac{10}{10k} + \frac{10}{40k} + \frac{10}{80k} \right) = 8 (0,001 + 0,00025 + 0,000125) = 11mV$$

ou

$$V_S = 8 \left(\frac{80+20+10}{80k} \right) = 8 \left(\frac{110}{80k} \right) = 11mV$$

CONVERSORES "DA" COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A figura a seguir mostra as ligações básicas de um amplificador operacional (A.O.)



Vin 1 = entrada inversora

Vin 2 = entrada não inversora

Vs = tensão de saída

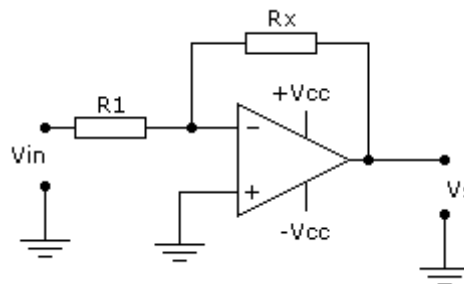
O amplificador operacional ideal possui 3 características importantes:

Alta impedância de entrada (tendendo ao infinito)

Baixa impedância de saída (próxima de zero)

Tensão de saída nula, quando Vin1 = Vin2

O ganho do A.O. pode ser ajustado em função dos resistores externos (entrada e realimentação) conforme ilustra a figura a seguir.



O resistor Rx é o "resistor de realimentação", sendo fundamental para a determinação do ganho do A.O.

O ganho do A.O. é dado por:

$$G_v = \frac{R_x}{R_1}$$

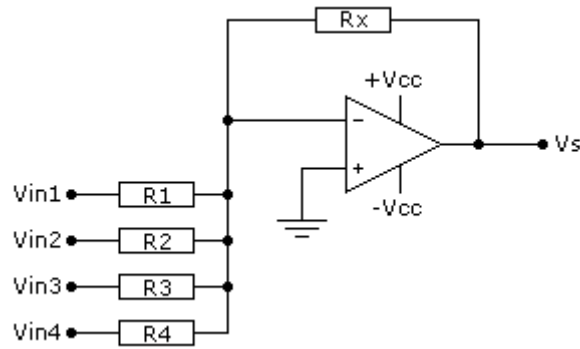
Se $R_x = 10\text{k}\Omega$ e $R_1 = 1\text{k}\Omega$, então o ganho será igual a 10.

O ganho pode ser calculado também por:

$$G_v = \frac{V_s}{V_{in}}$$

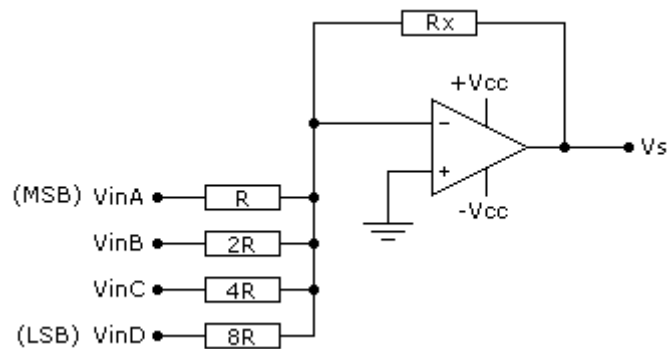
Assim, para uma tensão de saída de 1V e uma tensão de entrada de 100mV, teremos um ganho igual a 10 (1.000mV/100mV).

Um circuito típico é mostrado na figura a seguir.



$$V_s = \frac{R_x}{R_1} \cdot V_{in1} + \frac{R_x}{R_2} \cdot V_{in2} + \frac{R_x}{R_3} \cdot V_{in3} + \frac{R_x}{R_4} \cdot V_{in4}$$

Atribuindo os pesos relativos aos resistores (BCD8421) temos o circuito a seguir.

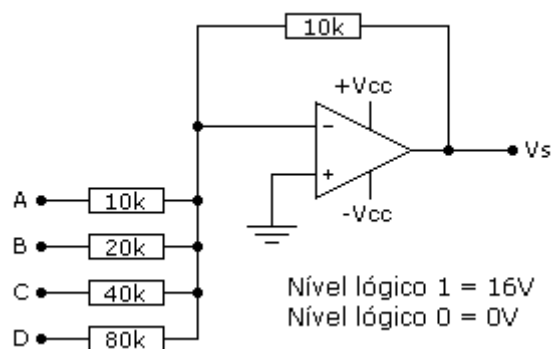


$$V_s = \frac{R_x}{R} \left(\frac{V_{inA}}{1} + \frac{V_{inB}}{2} + \frac{V_{inC}}{4} + \frac{V_{inD}}{8} \right)$$

$$V_s = \frac{R_x}{R} \cdot V_{in} \left(\frac{A}{1} + \frac{B}{2} + \frac{C}{4} + \frac{D}{8} \right)$$

A, B, C e D podem assumir os valores 0 ou 1.

Tomando como exemplo o circuito a seguir:



Determine os valores de V_s para as entradas:

- a) 0011; b) 1011; c) 1010 e d) 1110

Solução:

a) para ABCD = 0011

$$V_s = \frac{10k}{10k} \cdot 16 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{3}{8} \right) = 1 \cdot 6 = 6V$$

$$\underline{V_s = 6V}$$

b) para ABCD = 1011

$$V_s = \frac{10k}{10k} \cdot 16 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{4} + \frac{8}{8} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{8+2+1}{8} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{11}{8} \right) = 22V$$

$$\underline{V_s = 22V}$$

c) para ABCD = 1010

$$V_s = \frac{10k}{10k} \cdot 16 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{4} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{4+1}{4} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{5}{4} \right) = 20V$$

$$\underline{V_s = 20V}$$

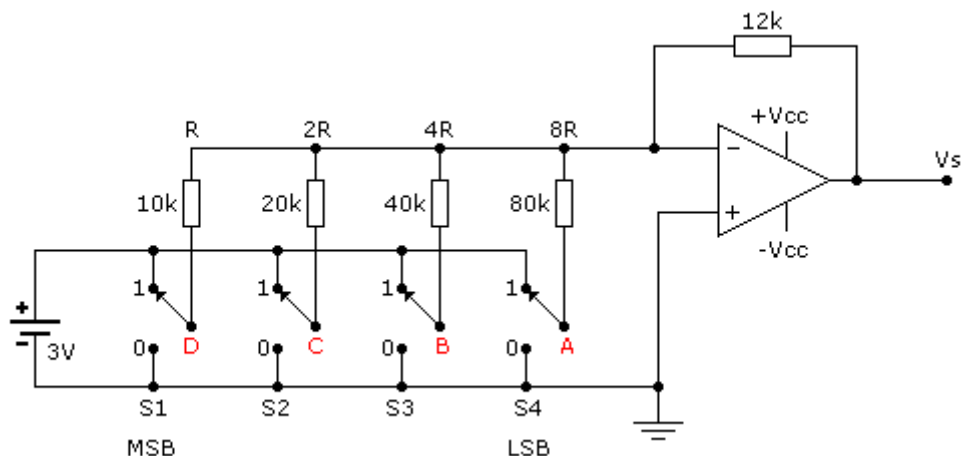
d) para ABCD = 1110

$$V_s = \frac{10k}{10k} \cdot 16 \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{8}{4} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{4+2+1}{4} \right) = 1 \cdot 16 \left(\frac{7}{4} \right) = 28V$$

$$\underline{V_s = 28V}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Determine os valores da tensão V_s para todas as possibilidades no circuito a seguir, completando a tabela.



LINHA	ENTRADA BINÁRIA				TENSÃO NA SAÍDA (Vs)
	D	C	B	A	
0	0	0	0	0	0V
1	0	0	0	1	0,45V
2	0	0	1	0	0,9V
3	0	0	1	1	1,35V
4	0	1	0	0	1,8V
5	0	1	0	1	2,25V
6	0	1	1	0	2,7V
7	0	1	1	1	3,15V
8	1	0	0	0	3,6V
9	1	0	0	1	4,05V
10	1	0	1	0	4,5V
11	1	0	1	1	4,95V
12	1	1	0	0	5,4V
13	1	1	0	1	5,85V
14	1	1	1	0	6,3V
15	1	1	1	1	6,75V

Para calcular o valor da tensão de saída (Vs) podemos utilizar a fórmula vista anteriormente.

Linha 0 - DCBA = 0000, temos Vs = 0

Linha 1 – DCBA = 0001, temos A = 1 e DCB = 0, portanto;

$$V_s = \frac{12k}{80k} \cdot V_{in} = 0,15 \times 3V = 0,45V$$

A partir da linha 2, já não é preciso fazer mais cálculos, uma vez que a diferença entre as linhas 0 e 1, representam o incremento para cada linha, que neste caso é 0,45V.

No entanto, para elucidar melhor, faremos o cálculo das linhas 2 e 3.

Linha 2 – DCBA = 0010, temos B = 1 e DCA = 0

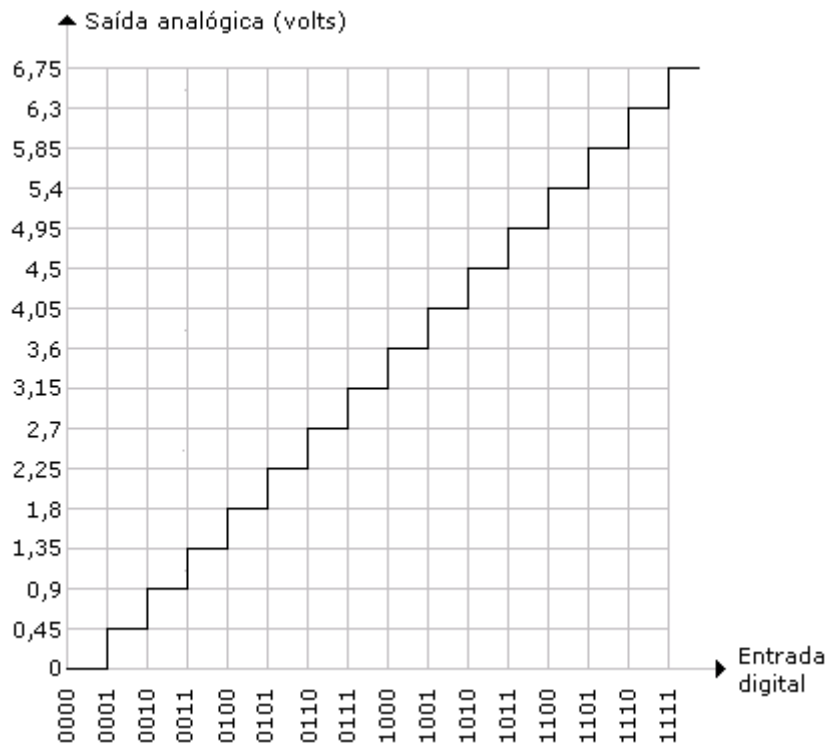
$$V_s = \frac{12k}{40k} \cdot V_{in} = 0,3 \times 3V = 0,9V$$

Linha 3 – DCBA = 0011, temos A = B = 1 e C = D = 0

$$V_s = \frac{12k}{\frac{80k \cdot 40k}{80k + 40k}} = \frac{12k}{26,667k} = 0,45 \times 3V = 1,35V$$

Preenchida a tabela, podemos levantar o gráfico da saída de tensão analógica x entrada digital.

Pela característica do circuito com relação ao valor de referência e dos resistores, para cada entrada digital, há uma variação de 0,45V na saída.



Para o nível de referência sugerido (3V), para todas as entradas digitais, a tensão na saída (Vs) variou de 0 a 6,75V.

Verifica-se que há um incremento de 0,45V para cada linha da tabela da verdade, que representa na verdade, a variação da tensão analógica para cada tensão digital na entrada.

Se quisermos diminuir o valor da variação da tensão na saída analógica, podemos proceder da seguinte forma:

- a) diminuir Vin (Vref)
- b) aumentar o valor dos resistores (R, 2R, 4R e 8R)
- c) diminuir Rx

Ocorre no entanto, que a gama das saídas também diminuirá.

Supondo por exemplo que Rx de 12kΩ fosse alterado para 6kΩ (metade do valor inicial) e mantidos inalterados os demais componentes, teríamos como variação analógica na saída:

$$V_s = \frac{6k}{80k} \cdot V_{in} = 0,075 \times 3V = 0,225V$$

A tensão cairá pela metade e a máxima tensão na saída também, como podemos comprovar a seguir:

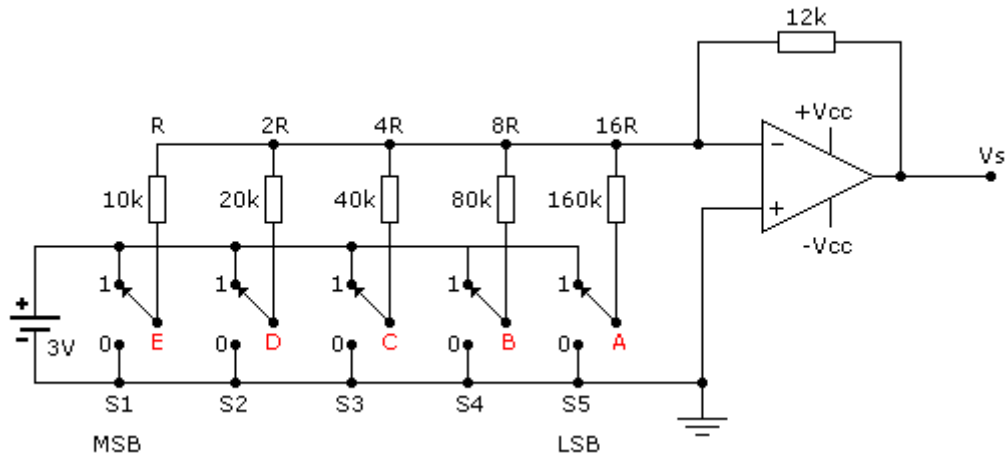
$$V_s = \frac{6k}{\frac{1}{80k} + \frac{1}{40k} + \frac{1}{20k} + \frac{1}{10k}} \cdot V_{in} \rightarrow \frac{6k}{1+2+4+8} \cdot V_{in}$$

$$V_s = \frac{6k}{\frac{80k}{15}} \cdot V_{in} \rightarrow \frac{6k}{5,333k} \cdot V_{in} = 1,125 \times 3V = \underline{3,375V}$$

Verifica-se assim, que a tensão máxima também cai pela metade, ou seja a variação será de 0 a 3,375V contra 0 a 6,75V anteriores.

Torna-se bastante claro que a solução ideal para diminuir o incremento da saída analógica para cada entrada digital, será aumentar o número de entradas.

A figura a seguir ilustra um conversor DA de 5 entradas.



Aumentando apenas 1 entrada, o incremento da tensão na saída (V_s) deverá diminuir, caindo pela metade.

Linha 0 - EDCBA = 00000, temos $V_s = 0$

Linha 1 – EDCBA = 00001, temos A = 1 e DCB = 0, portanto;

$$V_s = \frac{12k}{160k} \cdot V_{in} = 0,075 \times 3V = 0,225V$$

A máxima tensão de saída praticamente será mantida, ou seja, será somada à tensão máxima com 4 bits calculada anteriormente: 6,75V, o incremento de tensão de 0,225V.

$$\text{Então } V_s = 6,75V + 0,225V = 6,975V$$

Comprovando:

Linha 31 – EBCDA = 11111, temos A=B=C=D=E=1

$$V_s = \frac{12k}{\frac{1}{160k} + \frac{1}{80k} + \frac{1}{40k} + \frac{1}{20k} + \frac{1}{10k}} \cdot V_{in} \rightarrow \frac{12k}{\frac{1+2+4+8+16}{160k}} \cdot V_{in}$$

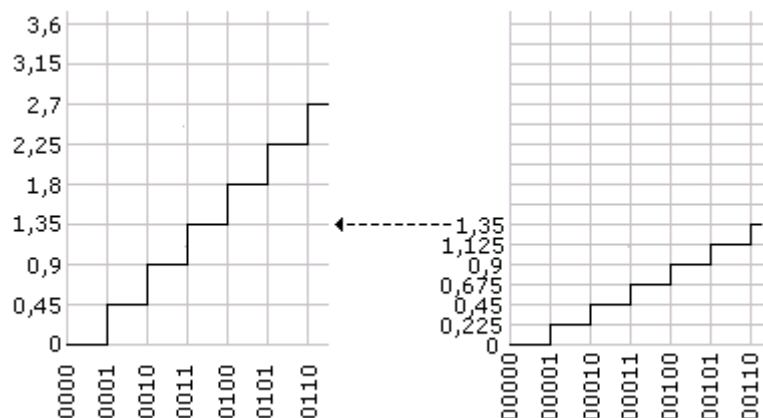
$$V_s = \frac{12k}{\frac{160k}{31}} \cdot V_{in} \rightarrow \frac{12k}{5,1613k} \cdot V_{in} = 2,325 \times 3V = \underline{6,975V}$$

A tabela da verdade passará de 16 linhas (0 a 15) para 32 linhas (0 a 31).

LINHA	ENTRADAS					SAÍDA ANALÓGICA (VOLTS)
	E	D	C	B	A	
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0,225
2	0	0	0	1	0	0,45
3	0	0	0	1	1	0,675
4	0	0	1	0	0	0,9
5	0	0	1	0	1	1,125
6	0	0	1	1	0	1,35
7	0	0	1	1	1	1,575
8	0	1	0	0	0	1,8
9	0	1	0	0	1	2,025
10	0	1	0	1	0	2,25
11	0	1	0	1	1	2,475
12	0	1	1	0	0	2,7
13	0	1	1	0	1	2,925
14	0	1	1	1	0	3,15
15	0	1	1	1	1	3,375
16	1	0	0	0	0	3,6
17	1	0	0	0	1	3,825
18	1	0	0	1	0	4,05
19	1	0	0	1	1	4,275
20	1	0	1	0	0	4,5
21	1	0	1	0	1	4,725
22	1	0	1	1	0	4,95
23	1	0	1	1	1	5,175
24	1	1	0	0	0	5,4
25	1	1	0	0	1	5,625
26	1	1	0	1	0	5,85
27	1	1	0	1	1	6,075
28	1	1	1	0	0	6,3
29	1	1	1	0	1	6,525
30	1	1	1	1	0	6,75
31	1	1	1	1	1	6,975

Desta forma, quanto maior for a quantidade de bits de um conversor DA, menor será o incremento da tensão analógica de saída, para uma determinada entrada digital.

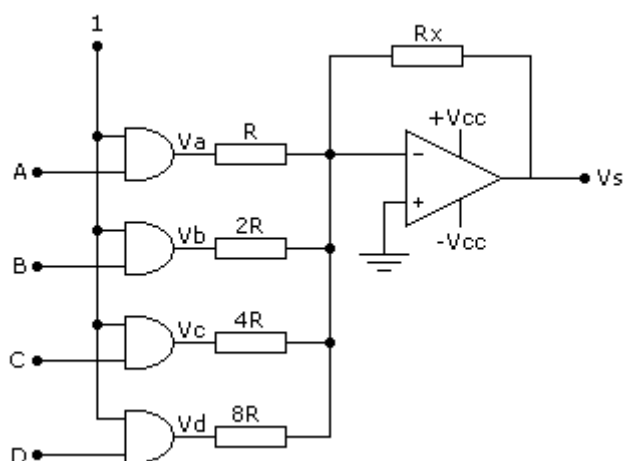
A figura a seguir mostra uma comparação entre os níveis de saída de tensão analógica (V_s) nos dois casos.



Enquanto que no conversor com 4 bits a tensão V_s de 1,35V correspondia a uma entrada digital binária 0011, no conversor com 5 bits, o mesmo valor de V_s foi conseguido com uma entrada digital binária equivalente a 00110.

A figura a seguir mostra um conversor DA com as mesmas características, porém, usando uma chave digital.

As chaves seletoras são portas AND, cuja finalidade principal é o isolamento de impedâncias entre o A.O. e o circuito de entrada.



Os conversores DA vistos até agora apresentam seus resistores distribuídos na forma $R, 2R, 4R, 8R \dots 2^{n-1}R$.

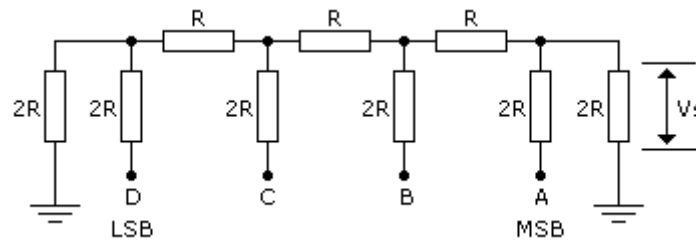
Esses conversores são conhecidos como *CONVERSORES "DA" DE RESISTORES PONDERADOS*. Esses conversores exigem resistores de faixa de tolerância muito estreita a fim de assegurar mínima introdução de erro, e por esse motivo, não são muito práticos.

CONVERSORES "DA" DO TIPO R-2R

Esses conversores são também conhecidos como *CONVERSORES DA TIPO ESCADA*.

A vantagem desses conversores é que utilizam somente 2 valores de resistores (um é o dobro do outro), o que facilita o seu projeto.

A figura a seguir ilustra um circuito básico de um conversor R-2R.

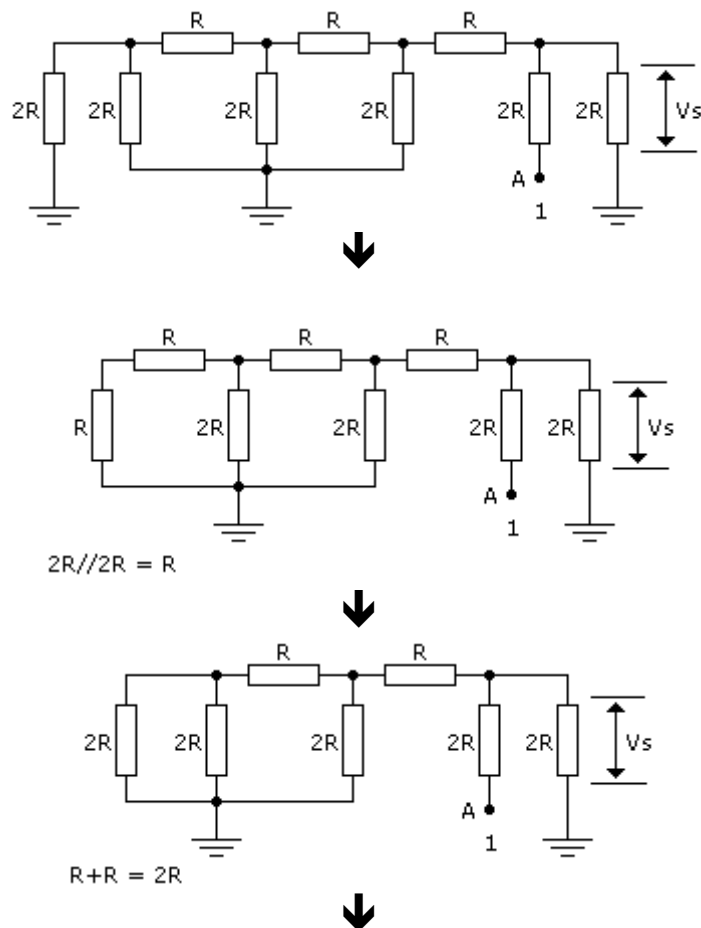


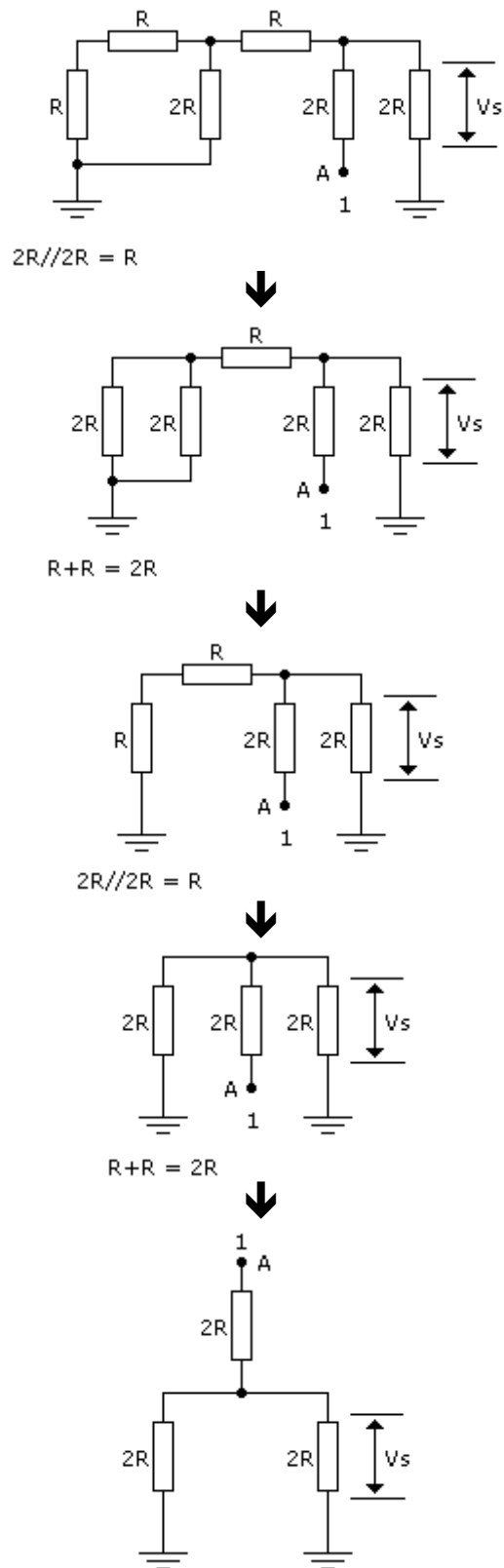
O circuito em si é bastante simples, cuja análise recairá na associação série/paralela de resistores.

Como temos as entradas DCBA, analisaremos cada uma delas, pois a partir daí o processo de análise seguirá sempre o mesmo padrão para qualquer tipo de conversor DA tipo R-2R.

CASO 1 – DCBA = 0001 (entrada A = 1 e as demais = 0)

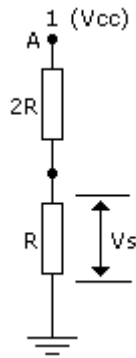
Para analisar o circuito, basta aterrarmos as entradas DCB e aplicar na entrada D nível lógico 1.





O que temos então após a simplificação do circuito são dois resistores $2R$ em paralelo, em série com um resistor $2R$.

Como sabemos, em um circuito paralelo de resistores, a tensão é igual para todos eles, que nos dará o circuito equivalente a seguir.

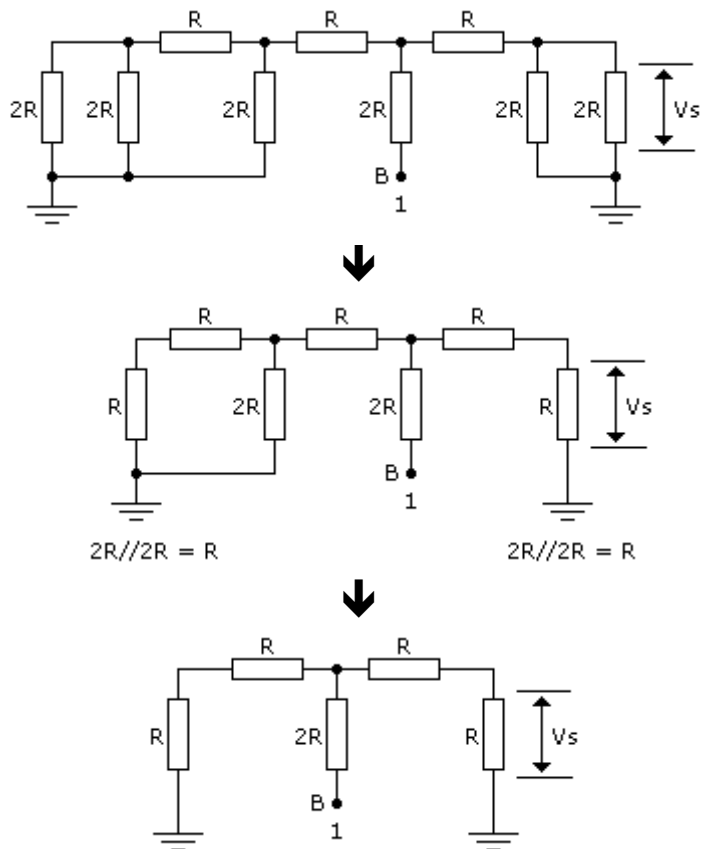


Partindo do pressuposto de que o nível lógico 1 representa V_{cc} , teremos então:

$$V_s = \frac{V_{cc} \cdot R}{R + 2R} = \frac{V_{cc} \cdot R}{3R} = \frac{V_{cc}}{3}$$

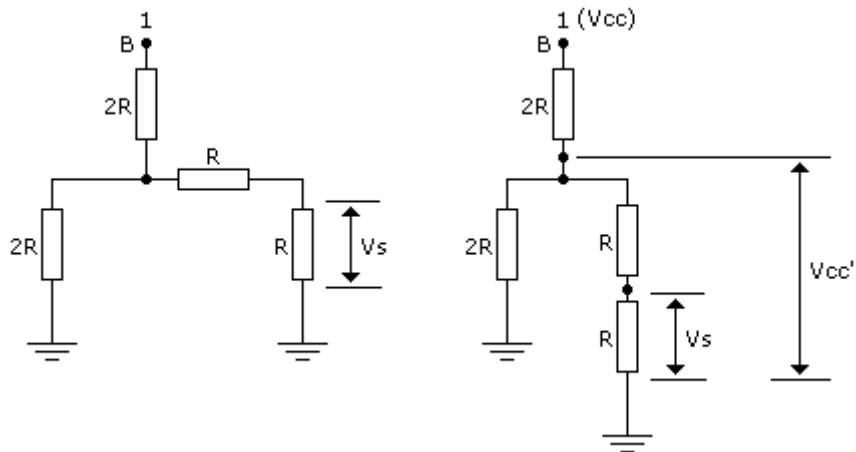
assim: $V_s = \frac{V_{cc}}{3}$

CASO 2 – DCBA = 0010 (entrada B = 1 e as demais = 0)



Assumindo que o nível lógico 1 representa V_{cc} , a saída V_s recairá sobre R , conforme indica a figura acima.

Teremos então, o circuito equivalente mostrado a seguir, onde se observa que V_s faz parte de um divisor de tensão.



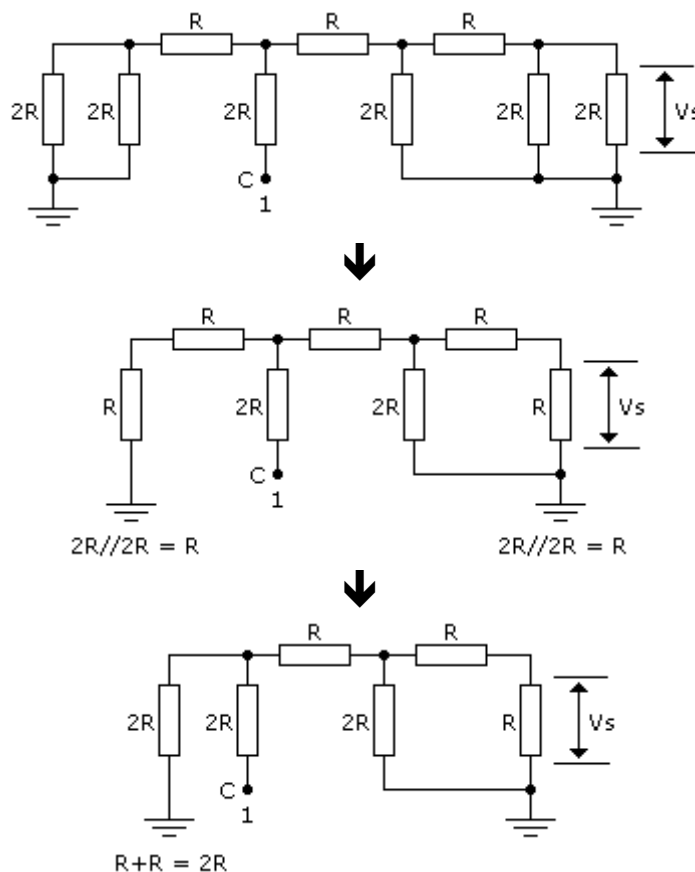
Pelo cálculo anterior (caso 1), sabemos que $V_{cc'} = \frac{V_{cc}}{3}$

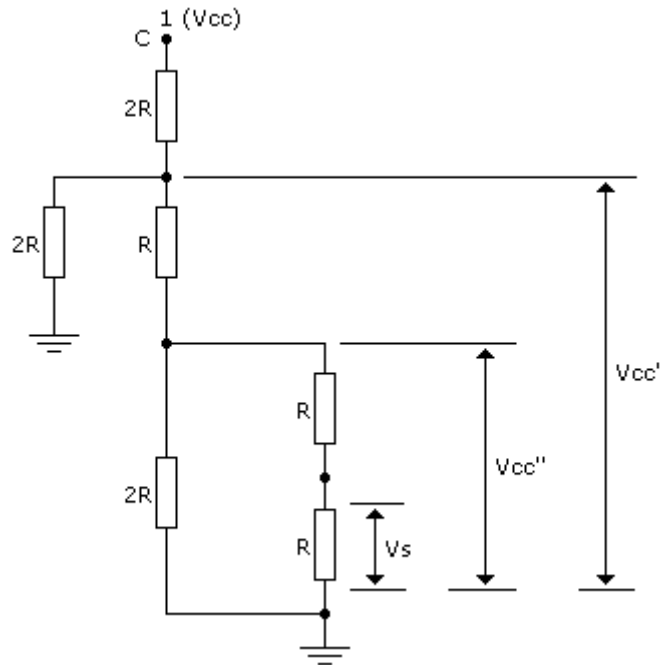
$$V_s = \frac{\frac{V_{cc}}{3} \cdot R}{R + R} = \frac{\frac{V_{cc}}{3} \cdot R}{2R} = \left(\frac{V_{cc}}{3} \cdot R \right) \cdot \left(\frac{1}{2R} \right) = \frac{V_{cc} \cdot R}{6R}$$

Simplificando (eliminando-se R do numerador e denominador), temos:

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

CASO 3 – DCBA = 0100 (entrada C = 1 e as demais = 0)





Pelo cálculos anteriores temos:

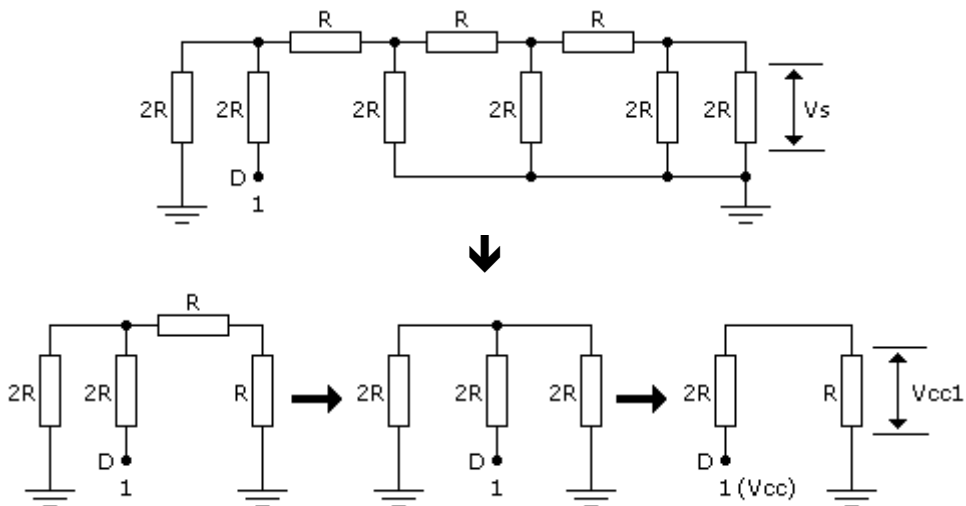
$$V_{cc'} = \frac{V_{cc}}{3} \quad \rightarrow \quad V_{cc''} = \frac{V_{cc}}{6}$$

$$V_s = \frac{\frac{V_{cc}}{6} \cdot R}{R+R} = \frac{\frac{V_{cc}}{6} \cdot R}{2R} = \left(\frac{V_{cc}}{6} \cdot R \right) \cdot \left(\frac{1}{2R} \right) = \frac{V_{cc} \cdot R}{12R}$$

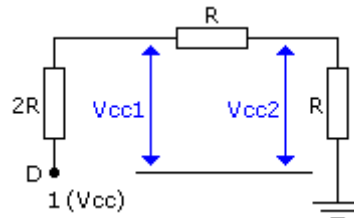
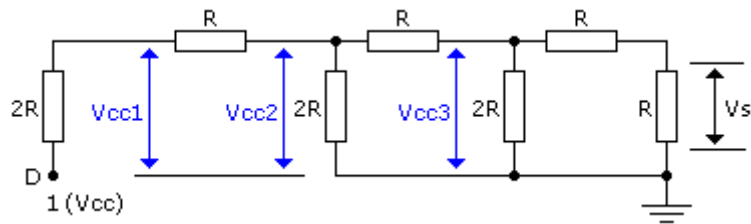
Simplificando (eliminando-se R do numerador e denominador), temos:

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

CASO 4 – DCBA = 1000 (entrada D = 1 e as demais = 0)



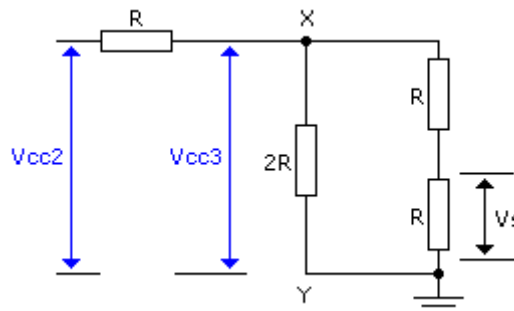
$$V_{cc1} = \frac{V_{cc} \cdot R}{2R + R} = \frac{V_{cc} \cdot R}{3R} = \frac{V_{cc}}{3}$$



$$V_{cc2} = \frac{V_{cc1} \cdot R}{R + R} = \frac{\frac{V_{cc1} \cdot R}{3}}{2R} = \frac{V_{cc}}{3} \cdot R \cdot \frac{1}{2R} = \frac{V_{cc} \cdot R}{6R}$$

Simplificando (eliminando-se R do numerador e denominador), temos:

$$V_{cc2} = \frac{V_{cc}}{6}$$



$$V_{cc3} = \frac{V_{cc2} \cdot R}{R + R} = \frac{\frac{V_{cc2} \cdot R}{6}}{2R} = \frac{V_{cc}}{6} \cdot R \cdot \frac{1}{2R} = \frac{V_{cc} \cdot R}{12R}$$

Simplificando (eliminando-se R do numerador e denominador), temos:

$$V_{cc3} = \frac{V_{cc}}{12}$$

Resta agora calcular Vs. A tensão Vcc3 que está entre os pontos X e Y (Y está aterrado), encontra-se presente também nos dois resistores R (em série) que estão em paralelo com X-Y.

Assim, forma-se um divisor de tensão entre X-Y, para os resistores R.

$$V_s = \frac{V_{cc}3.R}{R+R} = \frac{V_{cc}.R}{2R} = \frac{V_{cc}}{12}.R.\frac{1}{2R} = \frac{V_{cc}.R}{24R}$$

Simplificando (eliminando-se R do numerador e denominador), temos:

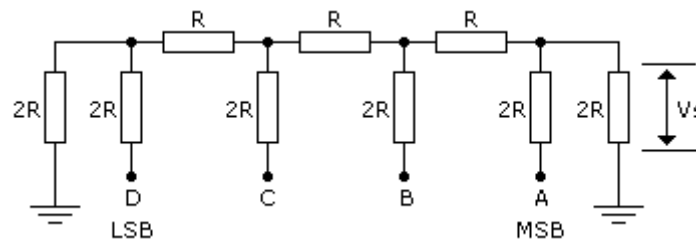
$$V_s = \frac{V_{cc}}{24}$$

Resumindo:

$A = 1$ $BCD = 0$ $V_s = \frac{V_{cc}}{3}$	$B = 1$ $ACD = 0$ $V_s = \frac{V_{cc}}{6}$	$C = 1$ $ABD = 0$ $V_s = \frac{V_{cc}}{12}$	$D = 1$ $ABC = 0$ $V_s = \frac{V_{cc}}{24}$
--	--	---	---

Se mais de uma entrada for submetida a nível lógico 1, na saída aparecerá a soma ponderada das tensões, que pode ser calculada utilizando o teorema da superposição.

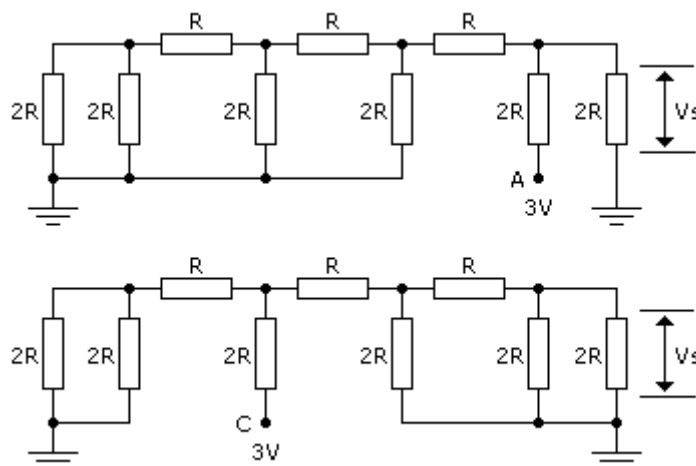
Veja alguns exemplos a seguir.



a) Supondo:

$A = C = 1$; $B = D = 0$
 Nível lógico 1 = 3V, calcular a tensão V_s

Os circuitos equivalentes são mostrados a seguir.



Solução:

$$\text{Para } A = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{3} = \frac{3V}{3} = 1V$$

$$\text{Para } C = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{12} = \frac{3V}{12} = 0,25V$$

Portanto, quando $A = 1$ e $C = 1$ e as demais entradas forem 0, teremos 1010_2 que corresponde a 10 decimal.

$$\text{Nestas condições } 1010_2 = V_s = 1,25V$$

b) Supondo:

$A = B = D = 1$; $C = 0$, que representa 1101_2 que corresponde a 13 decimal, calcular o valor da tensão de saída V_s , supondo nível lógico 1 igual a 3V.

Solução:

$$\text{Para } A = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{3} = \frac{3V}{3} = 1V$$

$$\text{Para } B = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{6} = \frac{3V}{6} = 0,5V$$

$$\text{Para } D = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{24} = \frac{3V}{24} = 0,125V$$

$$V_s = 1,625V$$

c) Para o mesmo nível lógico acima, calcule o valor da tensão de saída V_s para $A = B = C = D = 1$. Nestas condições temos 1111_2 que equivale a 15 decimal.

Solução:

$$\text{Para } A = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{3} = \frac{3V}{3} = 1V$$

$$\text{Para } B = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{6} = \frac{3V}{6} = 0,5V$$

$$\text{Para } C = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{12} = \frac{3V}{12} = 0,25V$$

$$\text{Para } D = 1 \rightarrow V_s = \frac{V_{cc}}{24} = \frac{3V}{24} = 0,125V$$

$$V_s = 1,875V$$

A tabela a seguir mostra todos os valores da tensão de saída V_s para as respectivas entradas digitais.

DECIMAL	ENTRADA DIGITAL				SAÍDA ANALÓGICA (VOLTS)
	A	B	C	D	
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0,125
2	0	0	1	0	0,25
3	0	0	1	1	0,375
4	0	1	0	0	0,5
5	0	1	0	1	0,625
6	0	1	1	0	0,75
7	0	1	1	1	0,875
8	1	0	0	0	1
9	1	0	0	1	1,125
10	1	0	1	0	1,25
11	1	0	1	1	1,375
12	1	1	0	0	1,5
13	1	1	0	1	1,625
14	1	1	1	0	1,75
15	1	1	1	1	1,875

FATOR DE PROPORCIONALIDADE: O fator de proporcionalidade da tabela acima é igual a 8.

Isto significa que a saída analógica não é igual ao valor decimal da entrada. Por exemplo, para uma entrada digital $0100_2 = 4$ decimal, temos uma saída $V_s = 0,5V$.

Então o fator de proporcionalidade pode ser assim calculado:

$$\text{Fator de proporcionalidade} = \frac{4_{10}}{0,5V} = \frac{4}{0,5} = 8$$

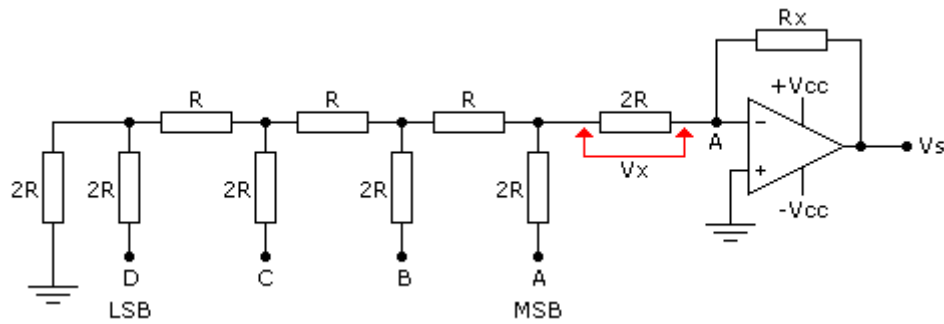
Utilizando outros valores, chegamos ao mesmo fator de proporcionalidade:

$$\text{Para uma entrada } 1001_2 \rightarrow \frac{9_{10}}{1,125V} = \frac{9}{1,125} = 8$$

$$\text{Para uma entrada } 1111_2 \rightarrow \frac{15_{10}}{1,875V} = \frac{15}{1,875} = 8$$

CONVERSORES "DA" DO TIPO R-2R COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A vantagem da utilização de um amplificador operacional A.O. para esse circuito, é que além de proporcionar um isolamento de impedância da rede R-2R, possibilita a obtenção da tensão de saída com qualquer fator de proporcionalidade, através do reajuste do resistor de realimentação R_x .



O cálculo de V_x pode ser feito como anteriormente, lembrando que V_x é a própria tensão V_s sem o amplificador operacional.

Quando o A.O. estiver em operação, o ponto A é considerado como terra.

$$V_s = V_x \cdot \frac{R_x}{2R}$$

Exemplo:

Dados:

Nível lógico 1 = $V_{cc} = 3V$

Nível lógico 0 = GND = 0V

$R = 10k\Omega$

$R_x = 12k\Omega$

Determinar o valor da tensão V_s para as entradas digitais:

a) A = 1; BCD = 0

$$V_x = \frac{3V}{6} = 1V$$

$$V_s = 1V \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 1V \times 0,6 = 0,6V$$

b) B = 1; ACD = 0

$$V_x = \frac{3V}{6} = 0,5V$$

$$V_s = 0,5V \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,5V \times 0,6 = 0,3V$$

c) C = 1; ABD = 0

$$V_x = \frac{3V}{12} = 0,25V$$

$$V_s = 0,25V \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,25V \times 0,6 = 0,15V$$

d) D = 1; ABC = 0

$$V_x = \frac{3V}{24} = 0,125V$$

$$V_s = 0,125V \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,125V \times 0,6 = 0,075V$$

O fator de proporcionalidade é de 13,333 (calculado como no capítulo anterior).

Através do fator de proporcionalidade, podemos montar a tabela da verdade para esse conversor, que tem uma resolução de 4 bits.

Partindo de:

$$\text{Fator de proporcionalidade} = \frac{A}{B}$$

onde: A é a entrada digital, convertida para decimal (base 10) e B é a tensão analógica da saída (Vs)

$$13,333 = \frac{1_{10}}{B} \rightarrow B = \frac{1}{13,333} = 0,075V$$

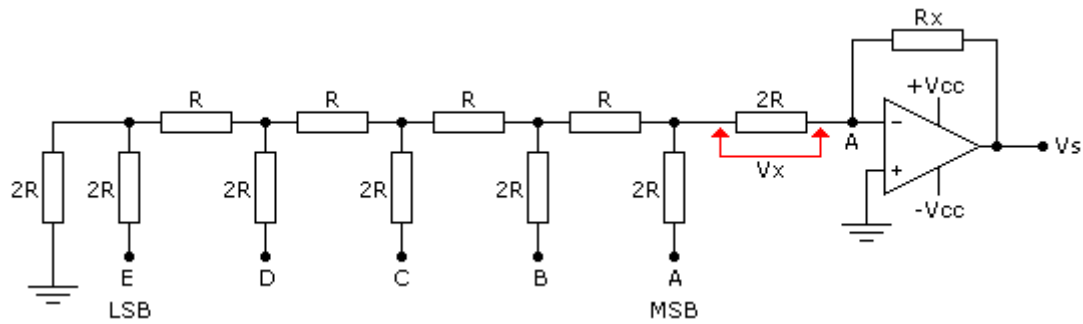
Isto significa que a linha 1 da tabela da verdade terá uma tensão Vs igual a 0,075V, que é a mesma coisa quando D = 1 e ABC = 0 e que, servirá como incremento para as demais linhas.

DECIMAL (LINHA)	ENTRADA DIGITAL				SAÍDA ANALÓGICA (VOLTS)
	A	B	C	D	
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0,075
2	0	0	1	0	0,15
3	0	0	1	1	0,225
4	0	1	0	0	0,3
5	0	1	0	1	0,375
6	0	1	1	0	0,45
7	0	1	1	1	0,525
8	1	0	0	0	0,6
9	1	0	0	1	0,675
10	1	0	1	0	0,75
11	1	0	1	1	0,825
12	1	1	0	0	0,9
13	1	1	0	1	0,975
14	1	1	1	0	1,05
15	1	1	1	1	1,125

Para melhorar a resolução desse conversor basta acrescentar mais uma entrada, passando assim a ter um incremento de tensão menor, pois existirão 32 possibilidades (linhas 0 a 31).

Exercício resolvido:

Dado o circuito abaixo, calcule a tensão de saída (Vs) para todas as entradas digitais.



Dados:
 Nível lógico 1 = $V_{cc} = 3V$
 Nível lógico 0 = $GND = 0V$
 $R = 10k\Omega$
 $R_x = 12k\Omega$

Solução:

A partir da linha 1, podemos calcular a tensão de saída (V_s) que servirá de incremento para as demais linhas.

A partir daí podemos calcular também o fator de proporcionalidade para todas as linhas da tabela da verdade.

$E = 1$; $ABCD = 0$

$$V_x = \frac{V_{cc}}{48} \rightarrow V_s = \frac{3}{48} \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,0625 \times 0,6 = 0,0375V$$

Podemos calcular a tensão de saída (V_s) para a última linha, ou seja, a linha 31.

$A = B = C = D = E = 1$

$$V_x = \frac{V_{cc}}{3} \rightarrow V_s = \frac{3}{3} \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 1 \times 0,6 = 0,6V$$

$$V_x = \frac{V_{cc}}{6} \rightarrow V_s = \frac{3}{6} \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,5 \times 0,6 = 0,3V$$

$$V_x = \frac{V_{cc}}{12} \rightarrow V_s = \frac{3}{12} \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,25 \times 0,6 = 0,15V$$

$$V_x = \frac{V_{cc}}{24} \rightarrow V_s = \frac{3}{24} \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,125 \times 0,6 = 0,075V$$

$$V_x = \frac{V_{cc}}{48} \rightarrow V_s = \frac{3}{48} \cdot \frac{12k\Omega}{20k\Omega} = 0,0625 \times 0,6 = 0,0375V$$

Somando os valores: $0,6V + 0,3V + 0,15 + 0,075V + 0,0375$

$$V_s = 1,1625V$$

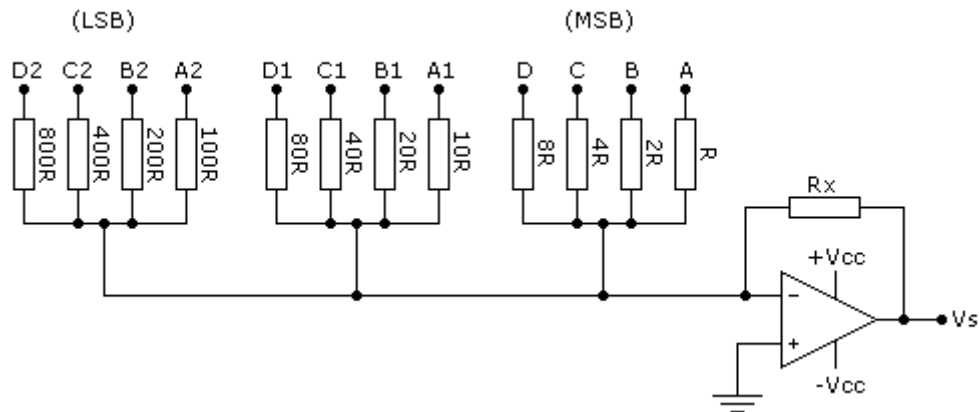
Calculando o fator de proporcionalidade:

$$\text{Fator de proporcionalidade} = \frac{1_{10}}{0,0375V} = 26,6667$$

DECIMAL (LINHA)	ENTRADA DIGITAL					SAÍDA ANALÓGICA (VOLTS)
	A	B	C	D	E	
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0,0375
2	0	0	0	1	0	0,075
3	0	0	0	1	1	0,1125
4	0	0	1	0	0	0,15
5	0	0	1	0	1	0,1875
6	0	0	1	1	0	0,225
7	0	0	1	1	1	0,2625
8	0	1	0	0	0	0,3
9	0	1	0	0	1	0,3375
10	0	1	0	1	0	0,375
11	0	1	0	1	1	0,4125
12	0	1	1	0	0	0,45
13	0	1	1	0	1	0,4875
14	0	1	1	1	0	0,525
15	0	1	1	1	1	0,5625
16	1	0	0	0	0	0,6
17	1	0	0	0	1	0,6375
18	1	0	0	1	0	0,675
19	1	0	0	1	1	0,7125
20	1	0	1	0	0	0,75
21	1	0	1	0	1	0,7875
22	1	0	1	1	0	0,825
23	1	0	1	1	1	0,8625
24	1	1	0	0	0	0,9
25	1	1	0	0	1	0,9375
26	1	1	0	1	0	0,975
27	1	1	0	1	1	1,0125
28	1	1	1	0	0	1,05
29	1	1	1	0	1	1,0875
30	1	1	1	1	0	1,125
31	1	1	1	1	1	1,1625

CONVERSORES "DA" COM MAIS DE UM ALGARISMO

A figura a seguir mostra um conversor DA de mais de um algarismo, a partir de uma codificação BCD8421.



A tensão de saída V_s é calculada pela fórmula abaixo, onde V_{in} é a entrada de nível lógico 1 (V_{cc})

$$R_x \cdot \frac{R_x}{R} \cdot V_{in} \left[\left(\frac{A}{1} + \frac{B}{2} + \frac{C}{4} + \frac{D}{8} \right) + \left(\frac{A1}{10} + \frac{B1}{20} + \frac{C1}{40} + \frac{D1}{80} \right) + \left(\frac{A2}{100} + \frac{B2}{200} + \frac{C2}{400} + \frac{D2}{800} \right) \right]$$

Exemplo:

Supondo que no circuito em questão seja aplicado o número decimal 736 (736_{10}), calcular a tensão de saída V_s , supondo:

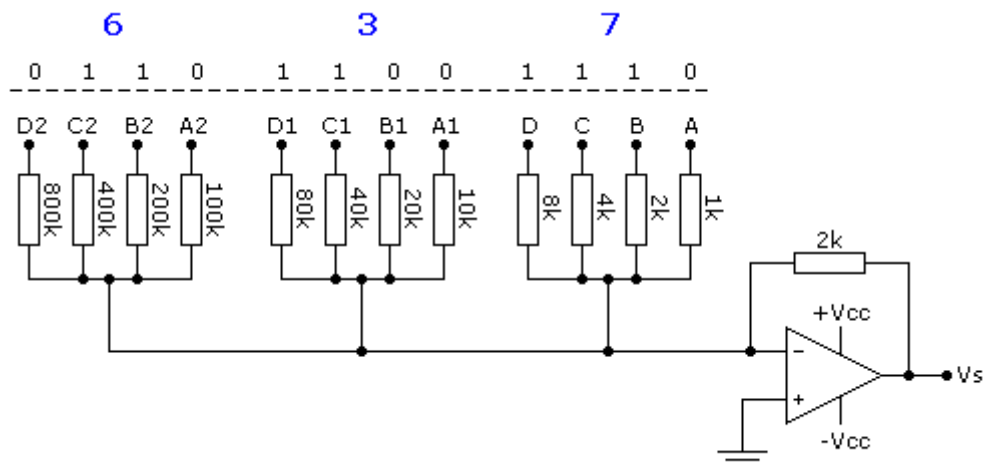
Nível lógico 1 = 5V (V_{cc} ou V_{in})

Nível lógico 0 = GND

$R = 1k\Omega$

$R_x = 2k\Omega$

Solução:

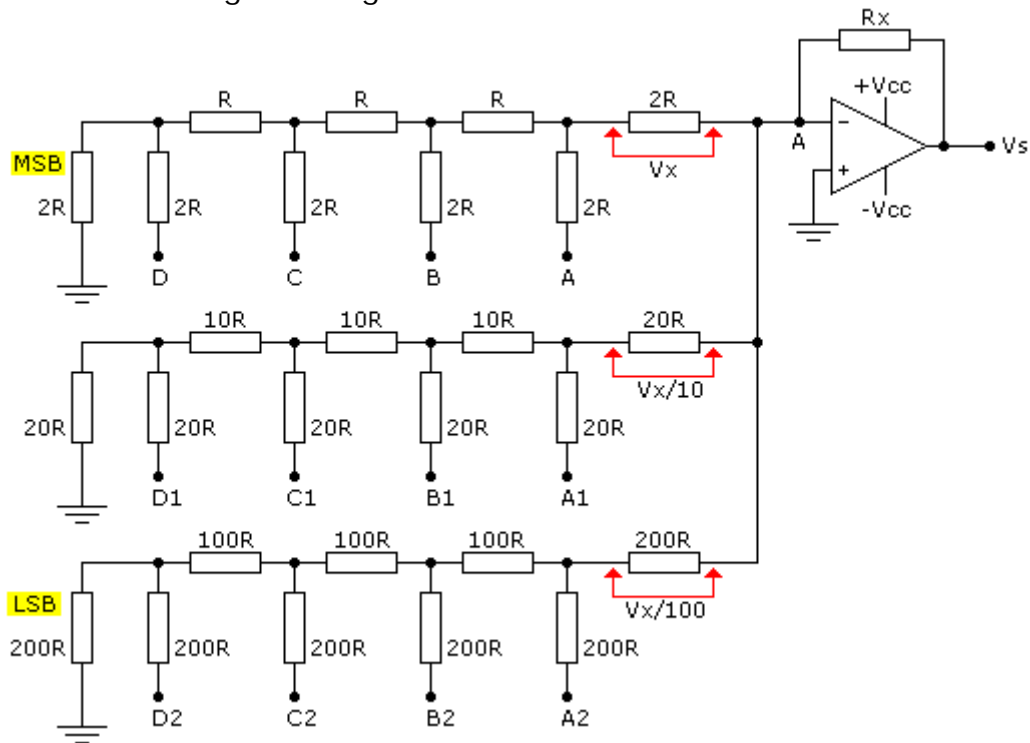


$$V_s = \frac{2k\Omega}{1k\Omega} \cdot V_{in} \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \right) + \left(\frac{1}{40} + \frac{1}{80} \right) + \left(\frac{1}{200} + \frac{1}{400} \right) \right]$$

$$V_s = \frac{2k\Omega}{1k\Omega} \cdot 5V \left(\frac{200 + 100 + 50 + 10 + 5 + 2 + 1}{400} \right)$$

$$V_s = 2 \times 5 \times \frac{368}{400} = 10 \times 0,92 = 9,2V$$

O conversor DA de mais de um algarismo pode ser construído utilizando rede R-2R, conforme ilustra a figura a seguir.



$$V_s = \frac{R_x}{R} \left(V + \frac{V}{10} + \frac{V}{100} \right)$$

Exemplo:

Supondo que nesse circuito fosse aplicada a entrada 333 decimal (333_{10}), qual a tensão de saída, para os dados:

$$\begin{aligned} V_{in} \text{ ou } V_{cc} \text{ ou nível lógico } 1 &= 5V \\ R &= 1k\Omega \\ R_x &= 4k\Omega \end{aligned}$$

Quando: C = D = 1 (demais entradas = 0)

$$V_x = \frac{V_{cc}}{12} + \frac{V_{cc}}{24} = \frac{5}{12} + \frac{5}{24} = 0,416667 + 0,208333 = 0,625V$$

Quando: C1 = D1 = 1 (demais entradas = 0)

$$\frac{V_x}{10} = \frac{\frac{V_{cc}}{12} + \frac{V_{cc}}{24}}{10} = \frac{\frac{5}{12} + \frac{5}{24}}{10} = \frac{0,416667 + 0,208333}{10} = 0,0625V$$

Quando: C2 = D2 = 1 (demais entradas = 0)

$$\frac{V_x}{100} = \frac{\frac{V_{cc}}{12} + \frac{V_{cc}}{24}}{100} = \frac{\frac{5}{12} + \frac{5}{24}}{100} = \frac{0,416667 + 0,208333}{100} = 0,00625V$$

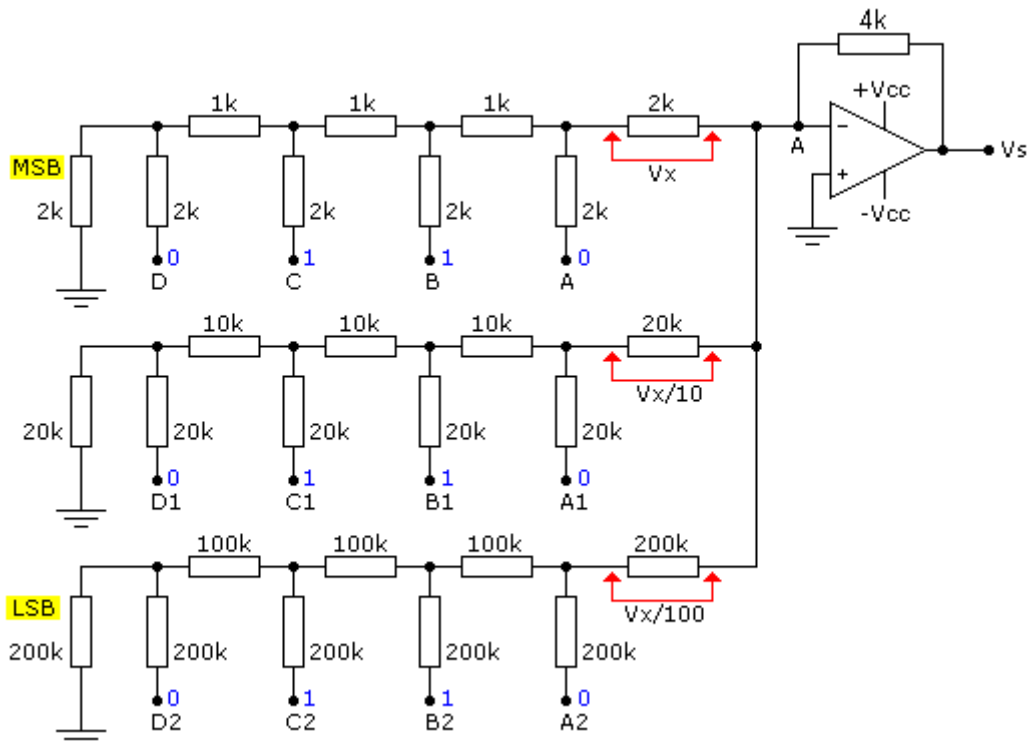
Temos então:

$$V + \frac{V}{10} + \frac{V}{100} = 0,625 + 0,0625 + 0,00625 = 0,69375V$$

Dai:

$$V_s = \frac{2k\Omega}{1k\Omega} \times 0,69375 = 2 \times 0,69375 = 1,3875V$$

A figura a seguir mostra o circuito com as aplicações das entradas digitais, respeitando-se o LSB e MSB.



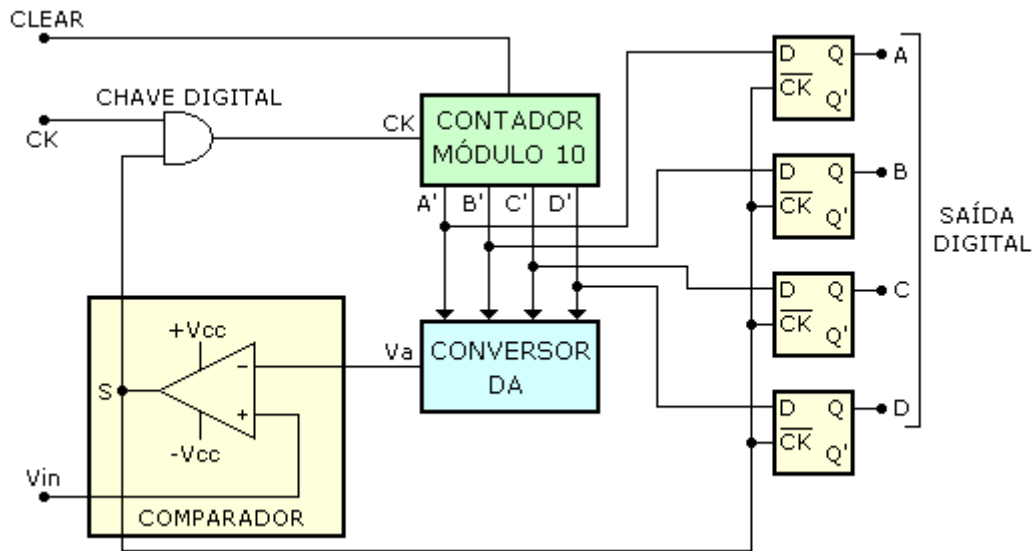
CONVERSORES ANALÓGICOS-DIGITAIS (A/D)

Conversores AD são circuitos que convertem sinais analógicos em sinais digitais. Portanto, o conversor analógico-digital (AD) inverte o processo do conversor digital-analógico (DA).

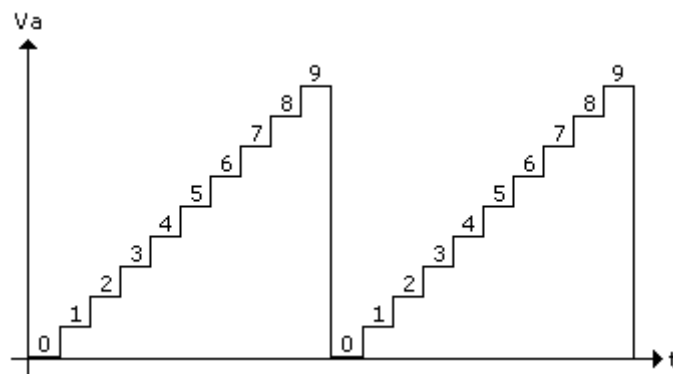


Uma das formas mais simples para se converter sinais analógicos em sinais digitais é a utilização de circuitos chamados *FEEDBACK CONVERTERS* ou conversores por realimentação, utilizando conversores DA.

A figura a seguir ilustra um conversor AD, que conforme se pode ver, é bastante complexo.

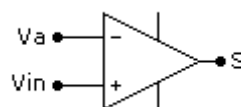


- O contador módulo 10 (contador de década) gera o código BCD nas saídas A', B', C' e D'.
- Essas saídas são injetadas no conversor DA que gera uma tensão analógica, que chamaremos de "Va", a qual servirá como referência.
- A tensão Va é injetada em uma das entradas do comparador, geralmente constituído por um A.O.
- Na outra entrada do comparador é injetada a tensão que queremos converter para digital, a qual chamaremos de Vin.
- A saída do comparador (S) formará o clock dos FFs do circuito de saída e acionará a chave digital formada pela porta AND, que inibirá ou não a entrada dos pulsos de clock do contador módulo 10.
- Ao se ligar as saídas do contador módulo 10 ao conversor DA, este fornecerá uma tensão analógica, conforme ilustra a figura a seguir.



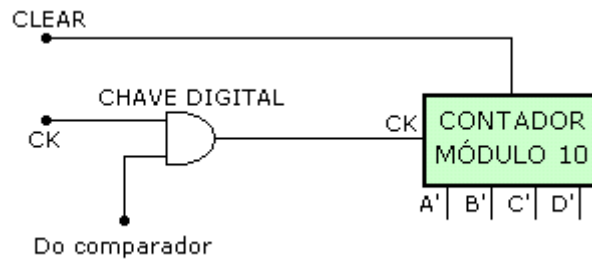
O amplificador operacional funciona como um comparador das tensões V_{in} e V_a , e na sua saída aparecerá uma tensão que dependerá das amplitudes de V_{in} e V_a .

Quando essas tensões forem rigorosamente iguais, teremos como resultado uma tensão zero na saída S.



Se $V_a < V_{in}$, teremos em S nível lógico 1 ($S = 1$)

Se $V_a > V_{in}$, teremos em S nível lógico 0 ($S = 0$)

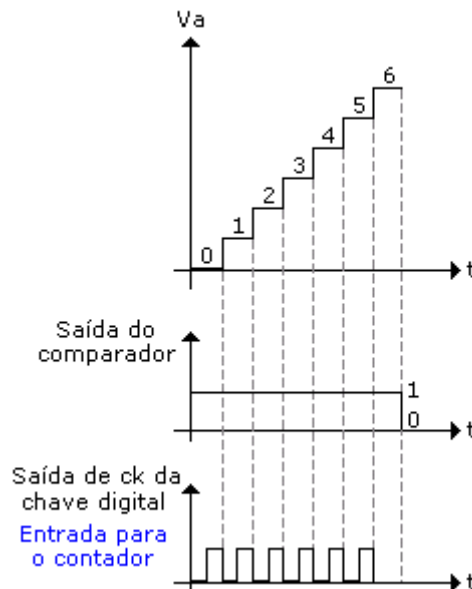


O clock somente comandará o contador quando o sinal de saída do comparador tiver nível lógico 1 ($V_a < V_{in}$).

O contador continuará operando até que V_a seja maior do que V_{in} .

Nesse instante a saída do comparador será 0 (zero), bloqueando a chave digital e conseqüentemente o clock, fazendo com que o contador permaneça em seu estado, que é numericamente igual a tensão de entrada analógica (V_{in}).

A figura a seguir ilustra os gráficos do que foi acima explicado, considerando uma tensão de entrada (V_{in}) = 6V.



Quando V_a superar V_{in} , o comparador bloqueia o contador, pois na saída do comparador termos nível lógico 0.

A diferença entre V_a e V_{in} para bloquear o contador é tão insignificante, que na prática podemos considerar $V_a = V_{in}$ p/ $S = 0$.

A saída do comparador atua também como clock dos FFs tipo D da saída.

Quando a saída "S" passa de 1 para 0, as informações contidas em A', B', C' e D' serão armazenadas pelos FFs.

Essa informação nada mais é do que a tensão analógica da entrada codificada em binário.

Obviamente, considerando-se $V_{in} = 6V$, a tensão binária codificada será 0110.

Para zerar a saída e reiniciar a conversão, basta aplicar um pulso na entrada CLS do contador; como consequência teremos:

$$V_a = 0 \rightarrow S = 1$$

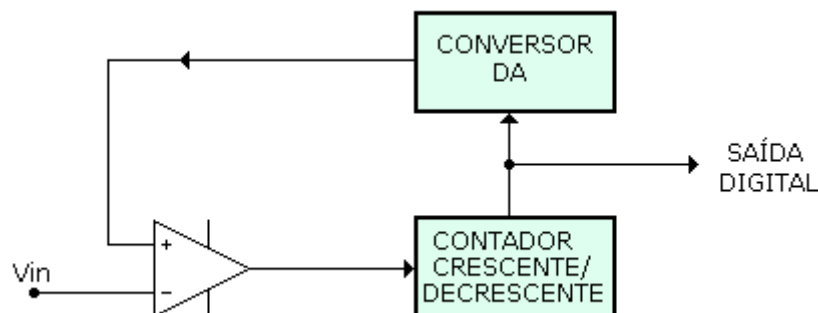
Isto fará com que a chave digital libere os pulsos de clock até o contador, permitindo a conversão para outro valor analógico qualquer.

O conversor AD visto é do tipo "Contagem Ascendente".

A desvantagem desse tipo de conversor é que para cada ciclo de conversão o contador deve ser zerado, iniciando sempre sua contagem a partir de zero; isto ocasiona uma baixa velocidade de conversão.

Para minimizar esse inconveniente, utiliza-se um conversor AD do tipo "Conversor AD por rastreamento", cujo diagrama de bloco básico é ilustrado na figura a seguir.

Observa-se a presença de um contador crescente/decrescente, podendo ser incrementado ou decrementado, a partir de uma determinada entrada analógica (V_{in}).



Se a entrada V_{in} estiver acima de um valor precedente, o contador é incrementado a partir do ponto onde havia parado, sem ter que retornar a zero.

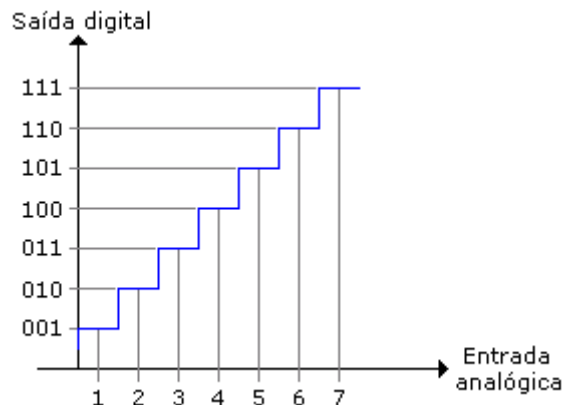
Por outro lado, se a entrada V_{in} estiver em um nível inferior do precedente, o contador é decrementado.

Portanto, a principal característica do conversor AD por rastreamento é o não retorno ao zero entre dois ciclos sucessivos de conversão.

ERRO DE CONVERSÃO NOS CONVERSORES "AD" - QUANTIZAÇÃO

Quando a entrada analógica possuir um valor fracionário, esse valor será arredondado na saída.

Dependendo do valor analógico na entrada, o erro de conversão poderá assumir percentuais elevados.



Consideremos as situações:

- a) para uma entrada analógica de 1,4V a saída será 001 (equivalente a 1V)
- b) para uma entrada analógica de 2,2V a saída será 010 (equivalente a 2V)
- c) para uma entrada analógica de 3,4V a saída será 011 (equivalente a 3V)
- d) para uma entrada analógica de 4,5V a saída será 100 (equivalente a 4V)
- e) para uma entrada analógica de 5,7V a saída será 110 (equivalente a 6V)
- f) para uma entrada analógica de 6,9V a saída será 110 (equivalente a 7V)

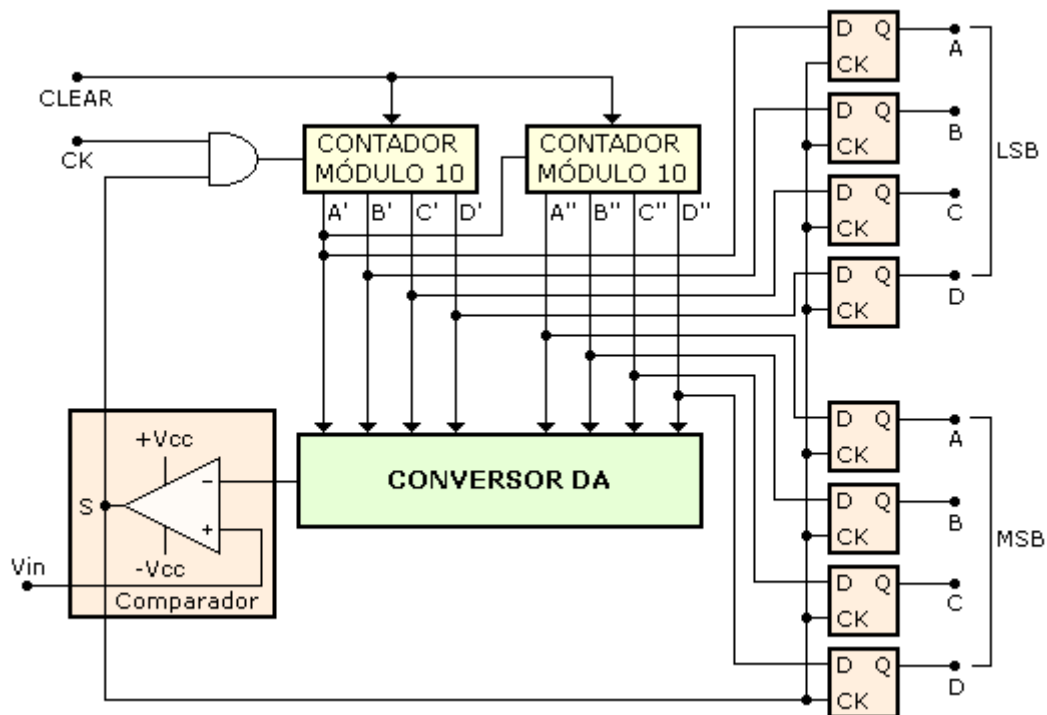
Observa-se que o erro de quantização foi menor no item " f " .

O erro de quantização ocorre em virtude da aproximação da entrada pelo valores discretos disponíveis nas saídas.

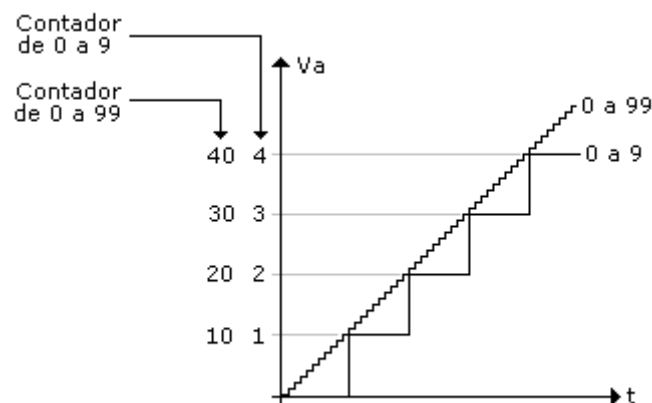
Uma das maneiras de contornar esse inconveniente é aumentar a faixa de contagem do contador.

Se no circuito visto anteriormente se adicionarmos mais um contador módulo 10, poderá ser feita a contagem de 0 a 99 ao invés de 0 a 9.

Com isto, poderemos conseguir mais um algarismo de precisão na conversão. Torna-se óbvio que à medida que adicionarmos contadores ao circuito, melhor será a precisão.



As saídas estão separadas em algarismos menos significativos (LSB) e mais significativos (MSB).



Se aplicarmos na entrada (V_{in}) 1,6V o contador de 0 a 99 irá parar em 16.

Separando-se os FFs correspondentes ao LSB e MSB, poderemos obter na saída, exatamente a tensão analógica da entrada convertida em digital.

$$\begin{aligned} 0001 &= 1 \text{ (MSB)} \\ 0110 &= 6 \text{ (LSB)} \end{aligned}$$

Inserindo-se no circuito mais um contador módulo 10, teremos mais um algarismo de precisão e assim por diante.