

Objetivos:

1. Analisar o funcionamento de Conversores DA tipo rede R-2R e de Resistores Ponderados.
2. Analisar a funcionalidade dos Amplificadores Operacionais na implementação desses conversores.

Pré-requisito: Leitura da apostila CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO do mesmo autor.

Material de apoio didático: MÓDULO PARA ENSAIOS – CONVERSORES DA



O que é o Módulo de Ensaios – Conversores DA?

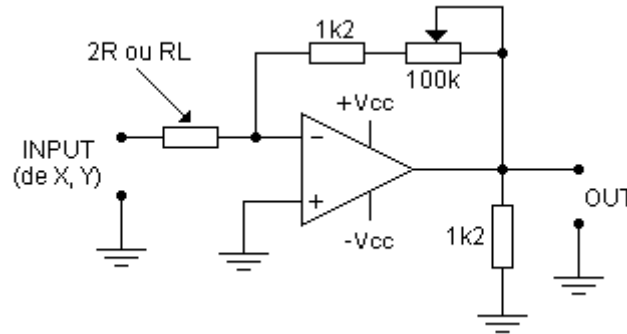
É um módulo para comprovar o funcionamento de conversores DA do tipo rede R-2R e Resistores Ponderados.

É possível simular um conversor DA do tipo rede R-2R com 4 bits e 8 bits.

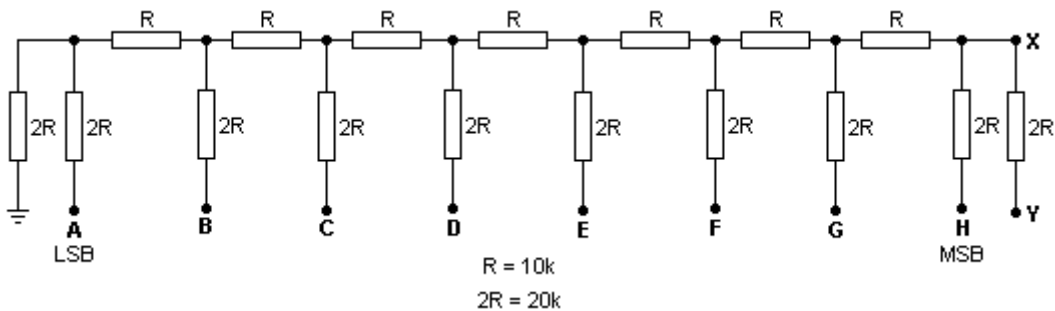
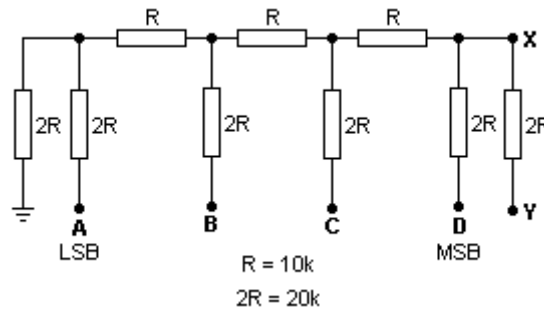
O conversor DA do tipo Resistores Ponderados somente poderá ser simulado em 4 bits, o que já permite ter uma boa ideia de funcionamento desse tipo de conversor.

É possível também ligar na saída do conversor, qualquer que seja o tipo, um amplificador operacional, polarizado como "inversor" permitindo assim o controle de ganho.

O diagrama abaixo mostra essa configuração, adotada neste Módulo de Ensaio.



As figuras abaixo mostram as rede R-2R desse Módulo de Ensaio, com 4 bits e 8 bits respectivamente.



Entre os pontos X e Y temos a saída do decodificador, onde o ponto Y deve ser ligado ao terra (GND).

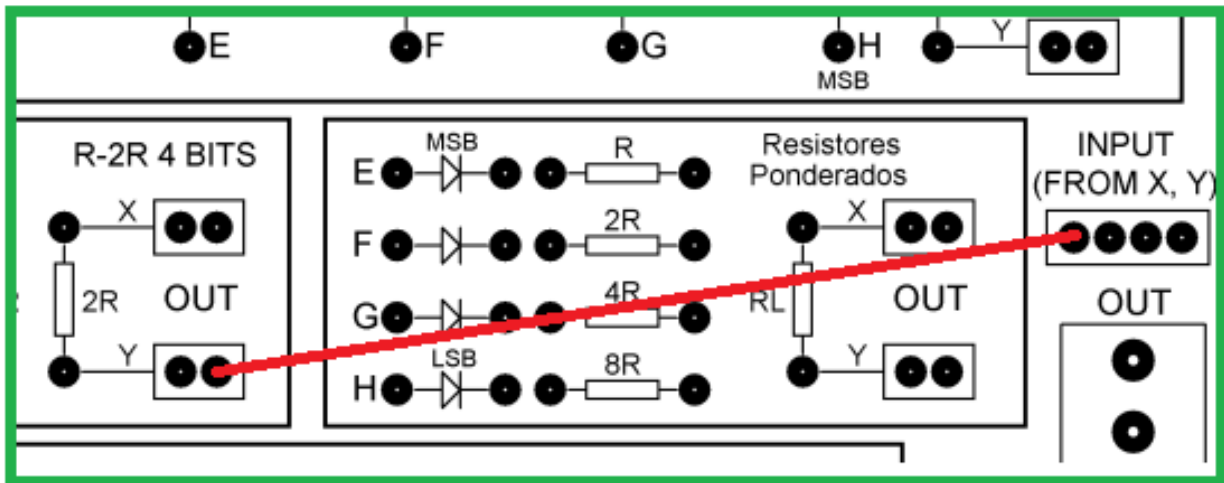
Caso se opte pela utilização do AO, o ponto Y é ligado diretamente à entrada do AO, ou seja, no pino 2 que corresponde aos terminais (INPUT – FROM X, Y).

As figuras a seguir mostram:

1. Ligação do AO em um conversor DA R-2R de 4 bits.
2. O mesmo conversor sendo simulado sem o AO.

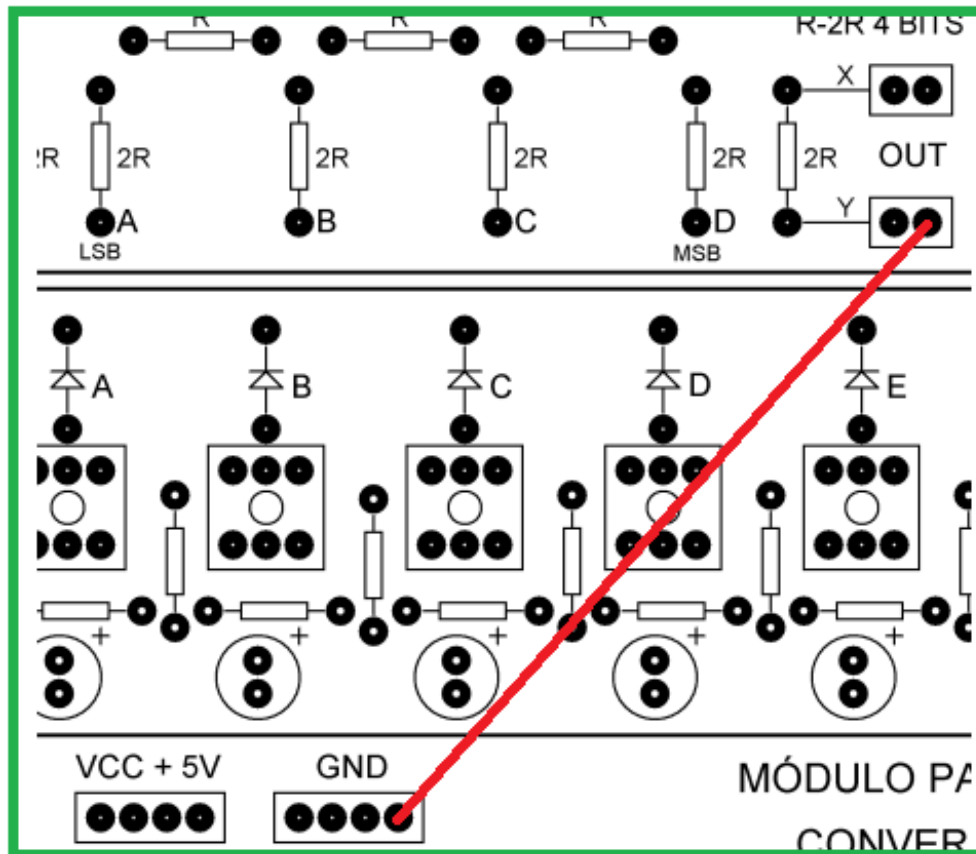
Quando não se utiliza o AO, a alimentação simétrica é dispensada (Pwr IN AO 741)

1. Conversor DA R-2R com AO



2. Conversor DA R-2R sem AO

Neste caso, as medidas são efetuadas entre os pontos X e Y, o qual deve ser ligado ao terra (GND) como referencial.



A figura a seguir mostra o conversor DA com resistores ponderados do Módulo de Ensaio.

Os resistores com pesos relativos (R, 2R, 4R e 8R) são respectivamente 7k5, 15k, 30k e 60k.

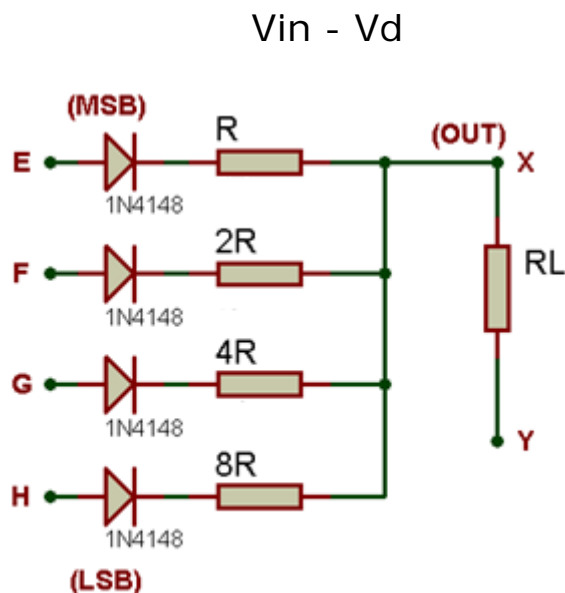
Nesse módulo foram usados resistores de precisão de 1% (7k5, 15k, 30k1 e 60k4).

A resistência de carga (R_L) é de 75 ohms, obedecendo a uma relação entre R e R_L igual a 100.

Na prática a relação entre R e R_L com valor de 100, é bastante aceitável, utilizada para a maioria dos conversores DA com resistores ponderados.

Deve ser levada em conta a queda da tensão (V_d) nos diodos.

Desta forma, teremos na entrada efetivamente:

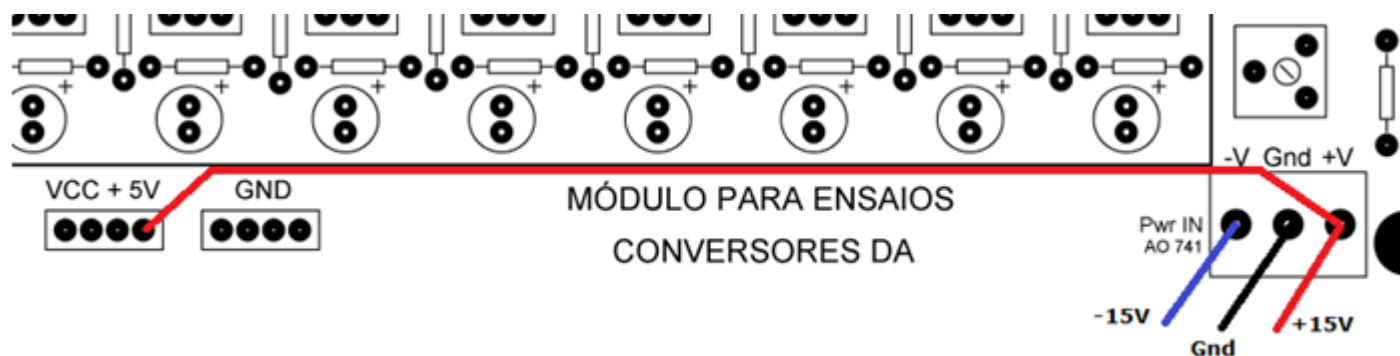


ALIMENTAÇÃO DO MÓDULO DE ENSAIOS

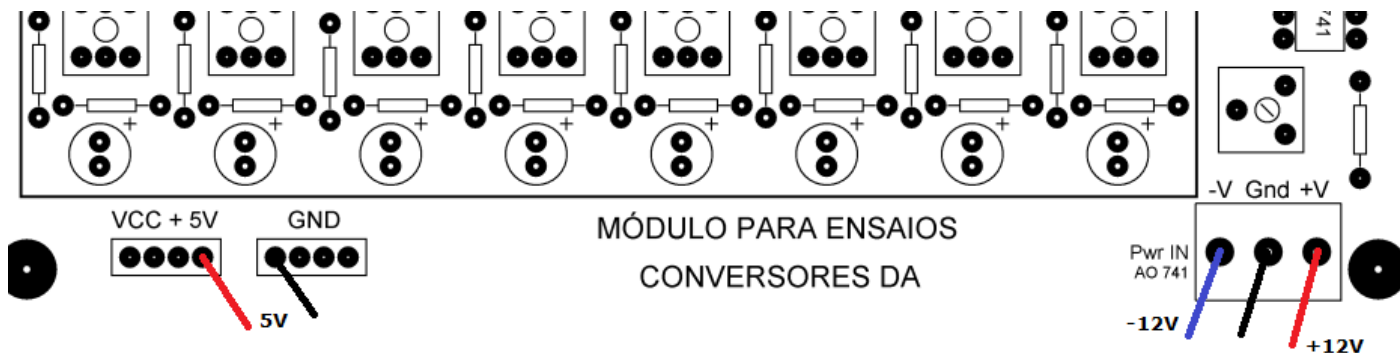
Para o AO: +12V Gnd -12V ou +15V Gnd -15V

Para as entradas: padrão TTL ou seja, +5V ou então qualquer uma das tensões que são utilizadas para alimentar o AO.

Veja o exemplo abaixo onde o AO está sendo alimentado com +15 Gnd e -15V. Mesmo alimentado, a utilização do AO é opcional.

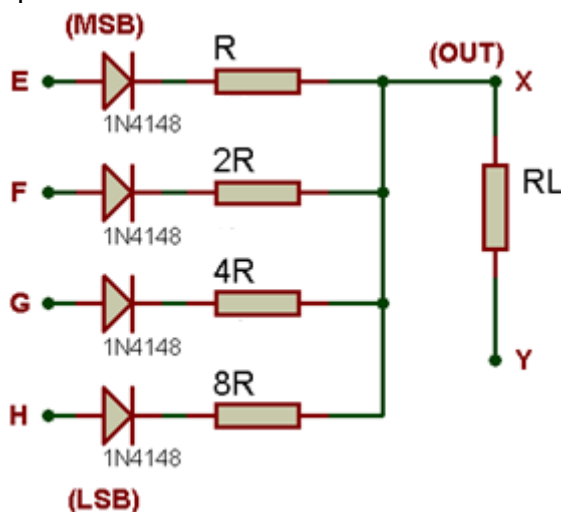


No exemplo mostrado abaixo, temos o AO alimentado com $\pm 12V$ e a tensão de entrada fixada em 5 volts.



**PARTE PRÁTICA – CONVERSOR DA – RESISTORES PONDERADOS
(Roteiro para o professor)**

1. Completar a tabela abaixo para o conversor DA:



Entrada: 12 volts

Entradas				Valor calculado (mV)	Valor medido (mV)
E	F	G	H		
0	0	0	0		0
0	0	0	1		14,2
0	0	1	0		28,2
0	0	1	1	42,487	42,3
0	1	0	0		56,6
0	1	0	1		70,6
0	1	1	0		84,5
0	1	1	1		98,4
1	0	0	0		112,4
1	0	0	1	127,46	126,1
1	0	1	0	141,62	139,9
1	0	1	1		153,6
1	1	0	0		167,6
1	1	0	1	184,11	181,3
1	1	1	0		194,9
1	1	1	1	212,44	209,1

OBS: Tensões medidas com voltímetro digital Fluke 17B+

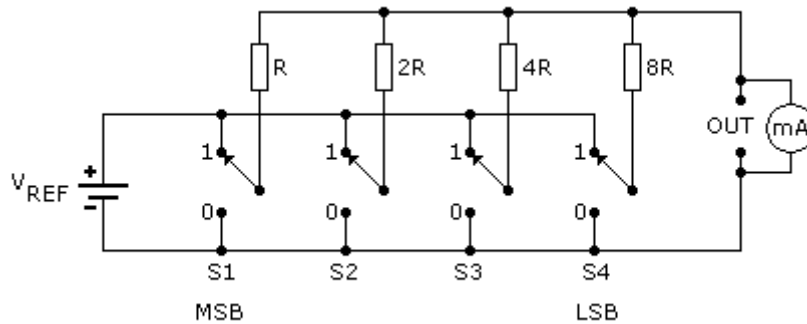
Tensão de entrada medida: ___11,94V

Queda de tensão em cada diodo: $_0,61V$

Calcular as tensões nas saídas, tomando como base a fórmula geral:

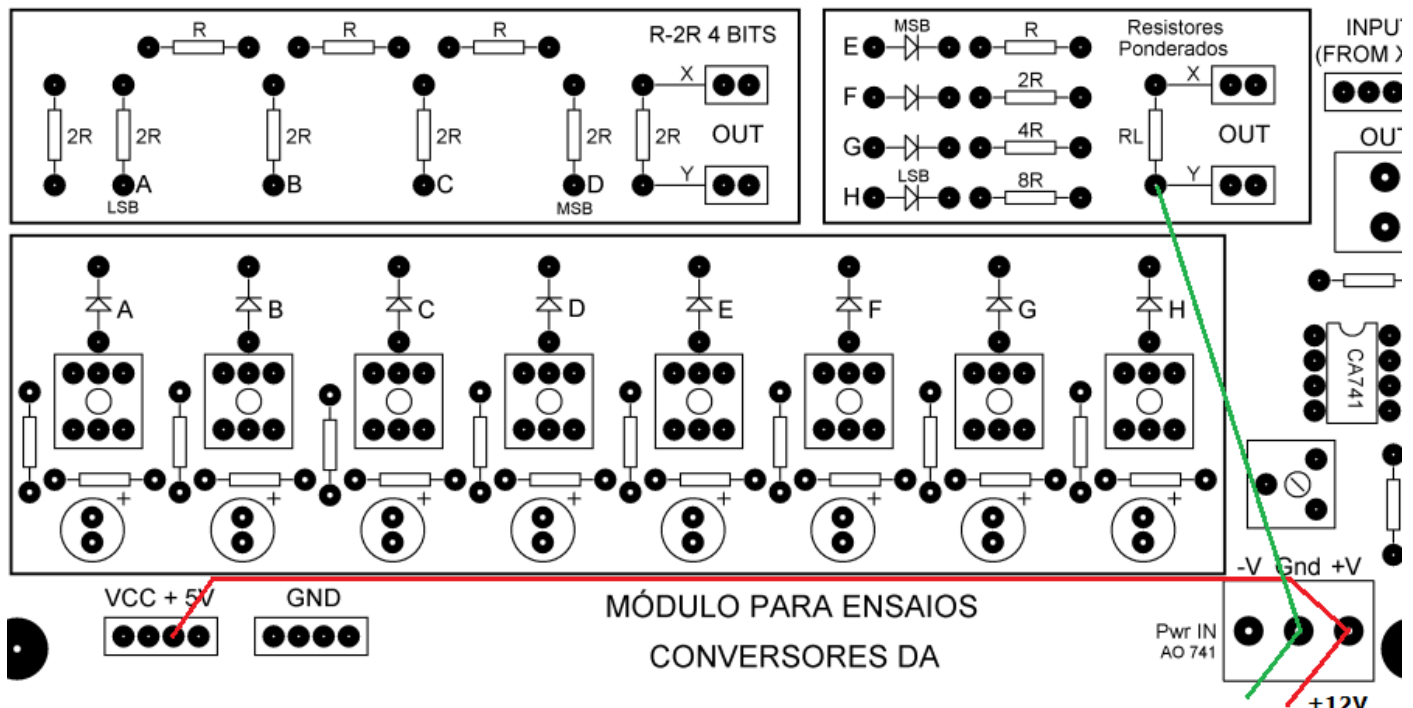
$$I = S1 \cdot \frac{V_{REF}}{2^0 \cdot R} + S2 \cdot \frac{V_{REF}}{2^1 \cdot R} + S3 \cdot \frac{V_{REF}}{2^2 \cdot R} + S4 \cdot \frac{V_{REF}}{2^3 \cdot R}$$

S1, S2, S3 e S4 correspondem as entradas E, F, G e H e podem assumir os valores 0 ou 1.



Medir entre os pontos X e Y com o ponto Y ligado ao Gnd, uma vez que a saída não será interligada ao AO.

Veja a ilustração abaixo:

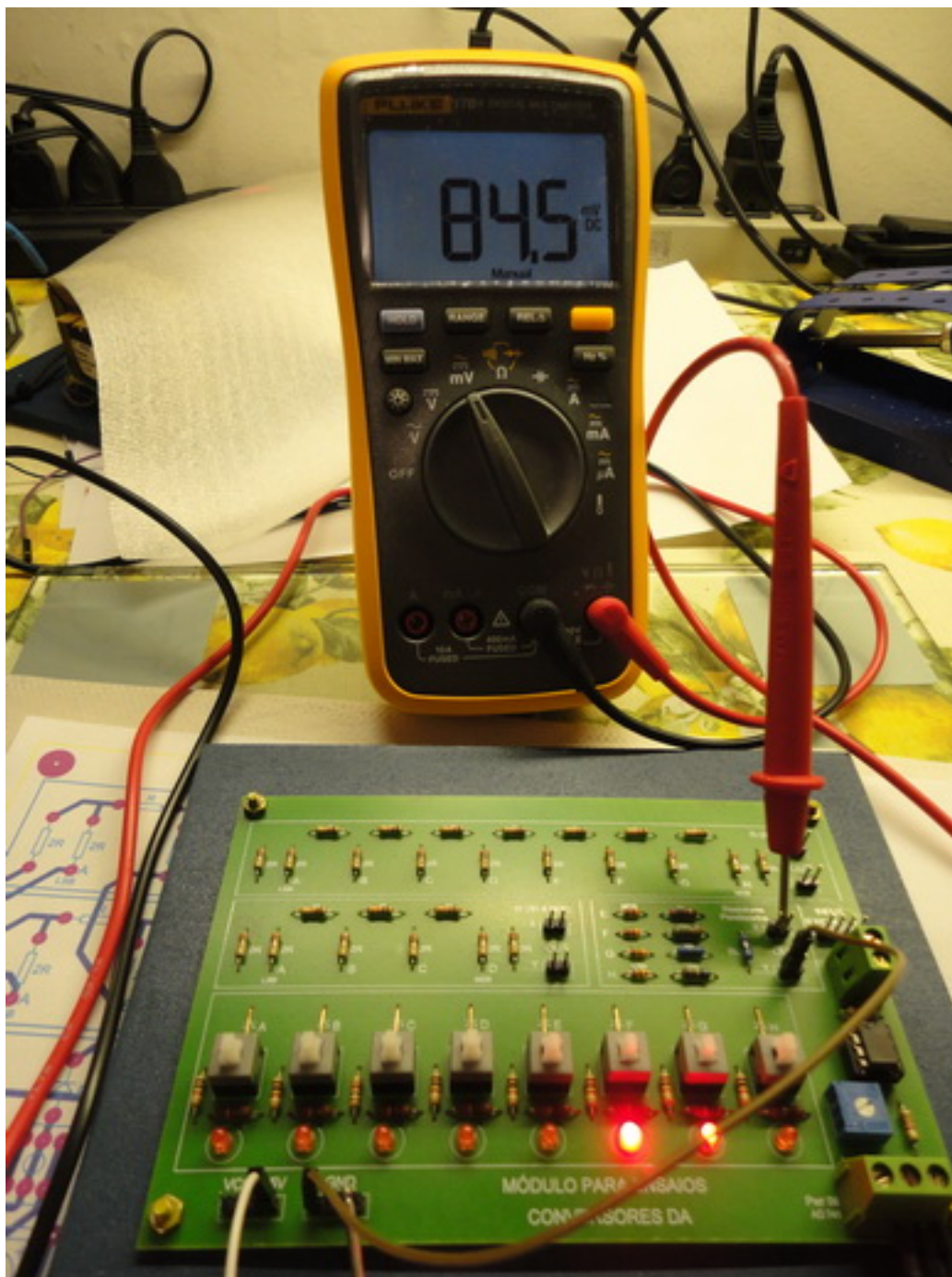


Observe que a entrada padrão é 5V (compatível TTL), no entanto, optamos por utilizar 12 volts. Os pontos de terra (Gnd) são comuns para todo o módulo de ensaios.

Calculando as tensões de saída para as linhas 1, 4, 8, 11 e 15 como exemplo.

Tensão efetiva na entrada: $11,94 - 0,61 = 11,33V$

A figura a seguir mostra a medição feita com uma entrada de 0110, comprovando assim a simplicidade das ligações.



Com base na fórmula apresentada, vamos calcular 4 linhas da tabela da verdade e comparar com as medidas obtidas.

Como exemplo vamos calcular as tensões nas linhas 3, 9, 10, 13 e 15.

$$\text{Tensão efetiva na entrada: } 11,94 - 0,61 = 11,33\text{V}$$

Linha 3 - (0011):

$$V_{out} = R_L (11,33/60k + 11,33/30k) = 75 (0,00018883 + 0,00037767)$$

$$V_{out} = 75 \times 0,0005665 = 42,487\text{mV}$$

Linha 9 – (1001):

$$V_{out} = RL (11,33/60k + 11,33/7,5k) = 75 (0,00018883 + 0,00151067)$$

$$V_{out} = 75 \times 0,0016995 = 127,46mV$$

Linha 10 – (1010):

$$V_{out} = RL (11,33/30k + 11,33/7,5k) = 75 (0,00037767 + 0,00151067)$$

$$V_{out} = 75 \times 0,00188834 = 141,62mV$$

Linha 13 – (1101):

$$V_{out} = RL (11,33/60k + 11,33/15k + 11,33/7,5k) = 75 (0,00018883 + 0,00075533 + 0,00151067)$$

$$V_{out} = 75 \times 0,00245483 = 184,11mV$$

Linha 15 – (1111):

$$V_{out} = RL (11,33/60k + 11,33/30k + 11,33/15k + 11,33/7,5k) = 75 (0,00018883 + 0,00037767 + 0,00075533 + 0,00151067)$$

$$V_{out} = 75 \times 0,0028325 = 212,44mV$$

Comparando as medidas com os valores calculados, verifica-se que as tolerâncias devido aos componentes estão por volta de 1% (bastante aceitável).

Na linha 1, foi medida uma tensão de 14,2mV que serve como referência para o incremento das demais linhas.

Observa-se que o incremento fica bem próximo de 14mV nas linhas da tabela.

Por exemplo:

- entre as linhas 7 e 8, temos um incremento de $112,4 - 98,4 = 14mV$

- entre as linhas 1 e 2, temos um incremento de $28,2 - 14,2 = 14mV$

- entre as linhas 10 e 11, temos um incremento de $153,6 - 139,9 = 13,7mV$

- entre as linhas 14 e 15, temos um incremento de $209,1 - 194,9 = 14,2mV$, a assim por diante.

PARTE PRÁTICA – CONVERSOR DA – REDE R-2R (8 bits) (Roteiro para o professor)

Vamos analisar um conversor DA com rede R-2R, com 8 bits, levando em consideração uma tensão aplicada na entrada igual a 12 volts.

A relação entre a entrada e saída se dá através dos divisores de tensão e corrente formados ao longo do circuito, tomando-se como referência os pontos A até H.

No caso do conversor com 4 bits serão tomados como referência os pontos A até D.

Através dos cálculos chegamos a uma tabela, conforme mostrada a seguir, onde o valor de R é igual a 12k e por isso, 2R equivalerá a 24k.

OBS: O procedimento dos cálculos é detalhado na apostila CONVERSOR DIGITAL-ANALÓGICO, mencionada anteriormente.

Foram utilizados resistores com 5% de precisão.

A tabela abaixo mostra a relação das tensões de entrada e saída, sendo essa relação válida para qualquer valor de tensão aplicada na entrada.

ENTRADAS								SAÍDAS
A LSB	B	C	D	E	F	G	H MSB	
0	0	0	0	0	0	0	1	Vin/3
0	0	0	0	0	0	1	0	Vin/6
0	0	0	0	0	1	0	0	Vin/12
0	0	0	0	1	0	0	0	Vin/24
0	0	0	1	0	0	0	0	Vin/48
0	0	1	0	0	0	0	0	Vin/96
0	1	0	0	0	0	0	0	Vin/192
1	0	0	0	0	0	0	0	Vin/384

Medindo e calculando:

Vamos analisar um conversor DA R-2R com 8 bits, através de medidas e cálculos de algumas linhas, conforme tabela abaixo, para uma tensão de entrada de 12 volts:

A = LSB

H = MSB

Tensão na entrada (valor medido): 11,98 volts

A	B	C	D	E	F	G	H	Calculado	Medido
0	0	0	0	0	0	1	1	5,99V	5,99V
0	0	1	0	0	1	0	0	1,123V	1,122V
0	1	0	0	1	0	0	1	4,554V	4,54V
1	1	0	0	0	0	0	1	4,086V	4,081V
0	0	0	1	1	1	1	0	3,744V	3,733V

Calculando:

$$\text{Linha 1: } V_{in}/3 + V_{in}/6 = 3,993 + 1,997 = 5,99V$$

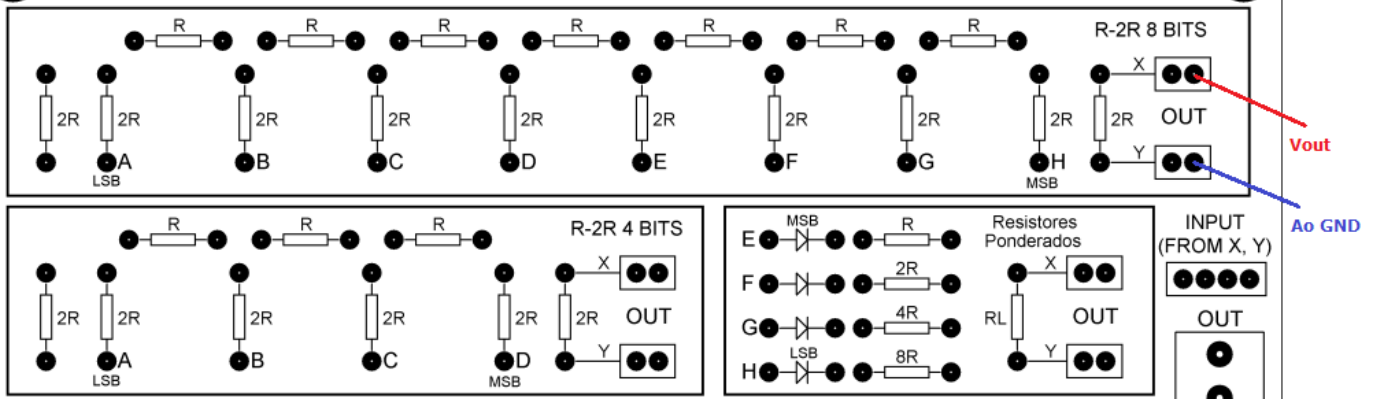
$$\text{Linha 2: } V_{in}/12 + V_{in}/96 = 0,9983 + 0,12479 = 1,123V$$

$$\text{Linha 3: } V_{in}/3 + V_{in}/24 + V_{in}/192 = 3,993 + 0,499167 + 0,062396 = 4,554V$$

$$\text{Linha 4: } V_{in}/3 + V_{in}/192 + V_{in}/384 = 3,993 + 0,062396 + 0,031198 = 4,086V$$

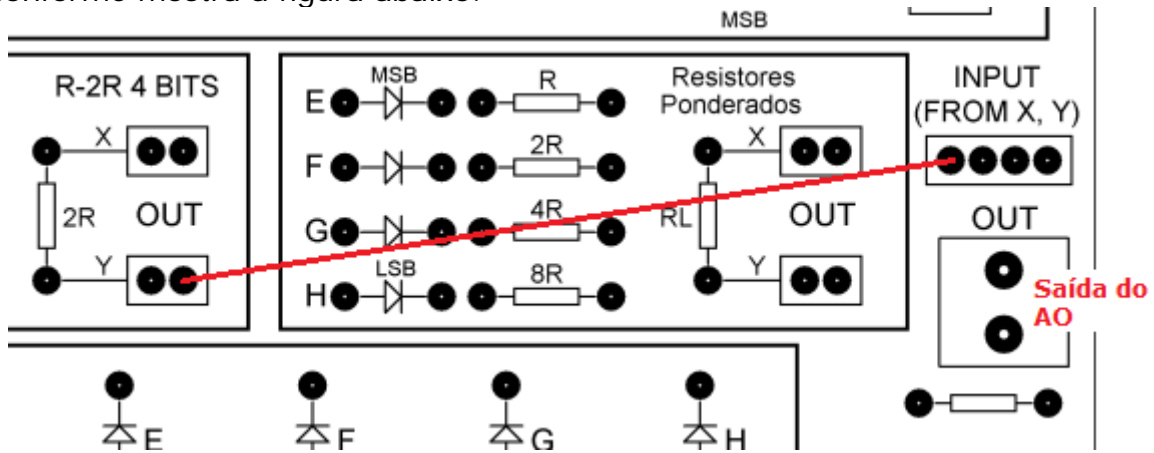
$$\text{Linha 5: } V_{in}/6 + V_{in}/12 + V_{in}/24 + V_{in}/48 = 1,9967 + 0,9983 + 0,49917 + 0,24958 = 3,744V$$

A figura a seguir ilustra a forma de ligação para a obtenção dos valores. Observe que a obtenção dos valores foi feita entre os pontos X e Y, estando o ponto Y interligado ao GND.



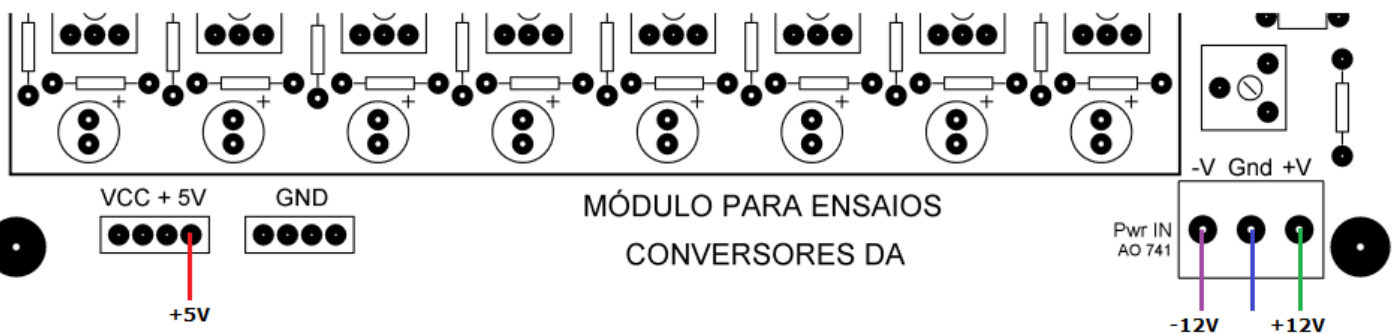
**PARTE PRÁTICA – CONVERSOR DA – REDE R-2R (4 bits)
UTILIZANDO AMPLIFICADOR OPERACIONAL
(Roteiro para o professor)**

Utilizando o AO a saída Y do conversor R-2R de 4 bits é ligada diretamente na entrada do AO conforme mostra a figura abaixo.



Alimentação do AO: ± 12 volts

Tensão na entrada: 5 volts



Exemplo: Completar a tabela a seguir:

Tensão de entrada medida: 5,09 volts

Alimentação do AO: $\pm 11,98$ volts

Procedimento:

- 1 – Inserir nível lógico 1 na entrada (0001)
- 2 – Ajustar o valor do trimpot até obter 0,5 volts na saída

Completar a tabela.

OBS: o valor de 500mV ajustado na saída é apenas um exemplo, podendo ser utilizados outros valores, desde que respeitadas as características elétricas do AO.

Entradas				Valor calculado (mV)	Valor medido (mV)
A	B	C	D		
0	0	0	0	0 (teórico)	34
0	0	0	1	medido	500
0	0	1	0	966	962
0	0	1	1	1.432	1.428
0	1	0	0	1.898	1.901
0	1	0	1	2.364	2.367
0	1	1	0	2.830	2.829
0	1	1	1	3.296	3.294
1	0	0	0	3.762	3.767
1	0	0	1	4.228	4.231
1	0	1	0	4.694	4.692
1	0	1	1	5.160	5.162
1	1	0	0	5.626	5.631
1	1	0	1	6.092	6.100
1	1	1	0	6.558	6.556
1	1	1	1	7.024	7.025

O incremento, segundo as medições é de 466mV (500mV - 34mV) linha a linha (escada). A partir daí podemos calcular os valores. Devemos levar em conta que estamos lidando com AO cujas características elétricas sofrem variações.

Então calculando a linha 2, teremos: $500 + 466 = 966\text{mV}$
Para a linha 3: $966 + 466 = 1.432\text{mV}$
Para a linha 4: $1.432 + 466 = 1.898\text{mV}$
Para a linha 5: $1.898 + 466 = 2.364\text{mV}$
Para a linha 6: $2.364 + 466 = 2.830\text{mV}$
Para a linha 7: $2.830 + 466 = 3.296\text{mV}$, e assim por diante.

Medindo o ganho de tensão:

Através do procedimento abaixo é possível calcular o ganho (teórico), com precisão bastante razoável (<10%).

1. Inserir nível lógico 1 na entrada A
2. Ajustar a tensão de saída para um valor qualquer, por exemplo, 1 volt.
3. Medir e anotar a tensão medida na saída do AO
4. Medir e anotar a tensão na saída X-Y, com Y ligado ao terra
5. Relacione a tensão medida na saída do AO com a tensão medida entre os pontos X e Y.
6. Ganho de tensão = $V_{\text{out}} / V_{\text{xy}}$

Como exemplo seguem os procedimentos a seguir:

Inserido na entrada A nível lógico 1 (0001), lembrando que A = LSB
Ajustada a tensão na saída para 1 volt, através do trimpot
Tensão medida entre os pontos X e Y (desligando Y da entrada do AO e ligando ao terra) = 210mV

$$\text{GANHO TEÓRICO: } 1.000\text{mV} / 210\text{mV} = 4,76$$

Mantendo o ajuste do trimpot, podemos calcular o ganho para outros NL aplicados à entrada:

Inserindo na entrada B nível lógico 1 mantendo as demais em 0 (0010)
Tensão medida entre os pontos X e Y = 420mV
Tensão medida na saída: 1.938mV

$$\text{GANHO TEÓRICO: } 1.938\text{mV} / 420\text{mV} = 4,61$$

Inserindo na entrada D nível lógico 1 mantendo as demais em 0 (1000)
Tensão medida entre os pontos X e Y = 1.693mV
Tensão medida na saída: 7,716 volts

$$\text{GANHO TEÓRICO: } 7.716\text{mV} / 1,693\text{mV} = 4,55$$

Inserindo nas entradas A, B e C nível lógico 1 mantendo D em 0 (0111)
Tensão medida entre os pontos X e Y = 1.693mV
Tensão medida na saída: 7,716 volts

$$\text{GANHO TEÓRICO: } 7.716\text{mV} / 1693\text{mV} = 4,56$$

Inserindo na entrada D nível lógico 1 mantendo as demais em 0 (1000)
Tensão medida entre os pontos X e Y = 1.693mV
Tensão medida na saída: 7,71 volts

$$\text{GANHO TEÓRICO: } 7.710\text{mV} / 1693\text{mV} = 4,55$$

Inserindo NL 1 nas entradas C e D mantendo as demais em 0 (1100)
Tensão medida entre os pontos X e Y = 2.537mV
Tensão medida na saída: 9,44 volts

$$\text{GANHO TEÓRICO: } 9.440\text{mV} / 2.537\text{mV} = 3,72$$

Inserindo NL 1 nas entradas A, B, C e D (1111)
Tensão medida entre os pontos X e Y = 3.166mV
Tensão medida na saída: 9,44 volts

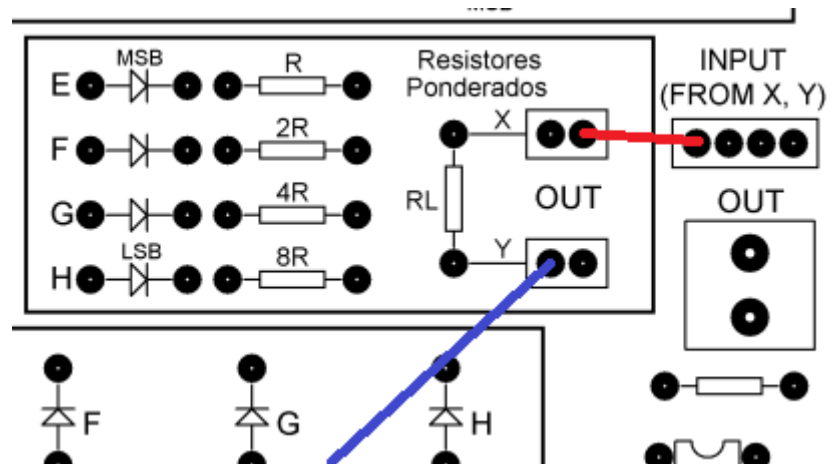
$$\text{GANHO TEÓRICO: } 9.440\text{mV} / 3.166\text{mV} = 2,98$$

Observa-se nas duas últimas medidas que o ganho do AO começa a ser reduzido devido à perda de linearidade.

Isso ocorre, pois, certamente alguns parâmetros do AO estariam fora dos padrões especificados pelo fabricante, como por exemplo, a polarização devido ao aumento da tensão/corrente na entrada.

**PARTE PRÁTICA – CONVERSOR DA – RESISTORES PONDERADOS
UTILIZANDO AMPLIFICADOR OPERACIONAL
(Roteiro para o professor)**

Vamos utilizar entrada de 5 volts e alimentação do AO com ± 12 volts



O sinal a ser enviado para o AO será obtido nos terminais do resistor RL, portanto, o ponto Y deverá estar aterrado.

Tensão lógica de entrada – valor medido: 5,08 volts

Tensão de alimentação do AO – valor medido: $\pm 11,98$ volts

Queda de tensão nos diodos – valor medido: 0,59 volts

Tensão efetiva na entrada: $5,08 - 0,59 = 4,49$ volts

Complete a tabela abaixo:

Procedimento: introduza nível lógico 1 nas entradas (1111) e ajuste o trimpot para medir 6 volts na saída do AO (metade da tensão de alimentação)

Entradas				Valor calculado (mV)	Valor medido (mV)
E	F	G	H		
0	0	0	0		145
0	0	0	1		543
0	0	1	0		936
0	0	1	1		1.344
0	1	0	0		1.738
0	1	0	1		2.148
0	1	1	0		2.535
0	1	1	1	2.933	2.947
1	0	0	0		3.288
1	0	0	1		3.701
1	0	1	0		4.089
1	0	1	1		4.492
1	1	0	0		4.872
1	1	0	1		5.275
1	1	1	0		5.668
1	1	1	1		6.050

Comparando as linhas 0 e 1 (0000 e 0001) podemos calcular o incremento com uma aproximação muito boa.

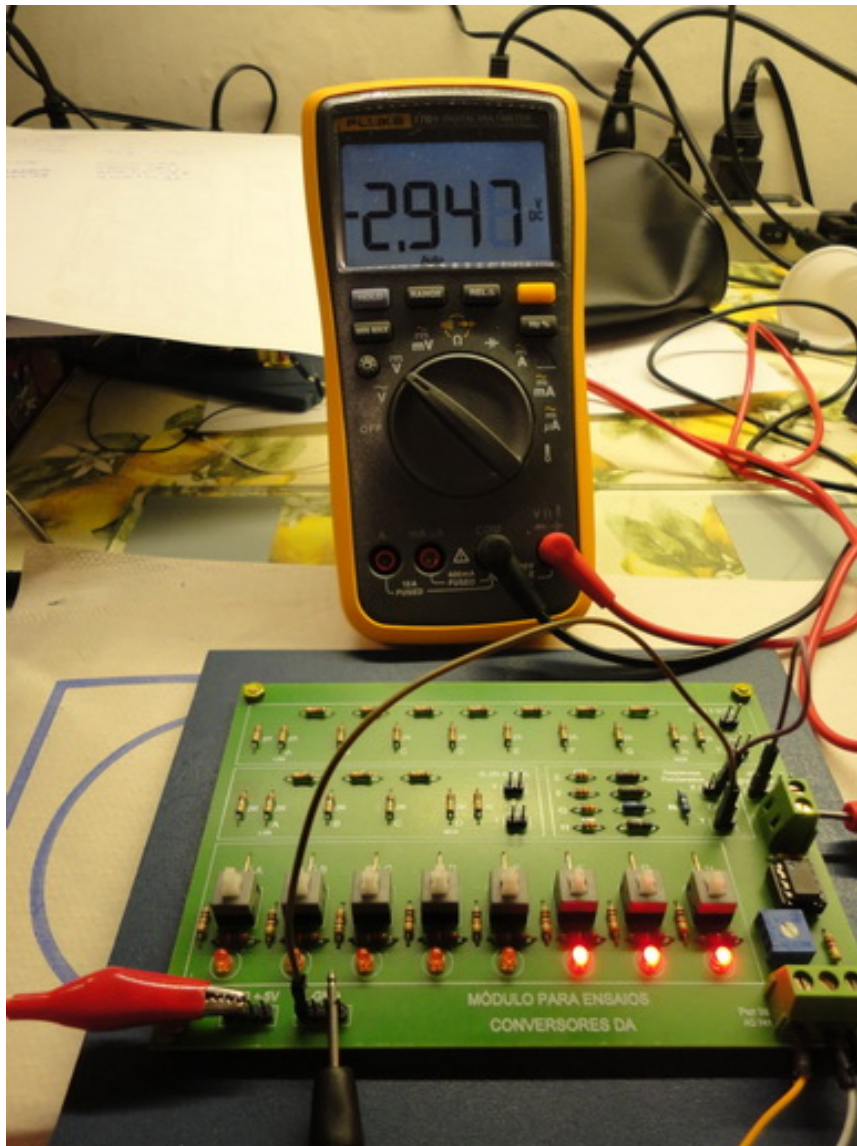
$$543 - 145 = 398$$

Por exemplo, calculando a tensão na linha 7 (0111)

Linha 6 (0110): tensão medida = 2,535 volts

Linha 7: tensão calculada = 2,535 + 0,398 = 2,933 volts

A figura abaixo mostra a tensão medida na linha 7.



Cálculo de ganho teórico:

Podemos calcular o ganho teórico, a partir da medida obtida em 1111, que na tabela acima representa 6.050mV ou 6,05 volts.

Procedimento:

1. Desconectar o fio da entrada do AO
2. Medir a tensão nos extremos de RL

Tensão medida: 82,7mV

Ganho teórico: $6.050 / 82,7 = 73$

Medindo o ganho na linha 8:

Tensão medida na saída do AO: 3.288mV

Tensão medida em RL (desconectar X) = 44,3mV

Ganho teórico = $3.288 / 44,3 = 74$

Medindo o ganho na linha 1:

Tensão medida no AO: 543mV

Tensão medida em RL (desconectar X) = 5,6mV

Ganho teórico = $543 / 5,6 = 97$

Observa-se a não linearidade do ganho, comparando as linhas 1 e 15, que se deve às características elétricas do AO, principalmente no que se refere aos parâmetros de polarização.

CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Os recursos que foram explorados neste módulo de ensaios poderão ser modificados de acordo com as necessidades de trabalho do professor, como por exemplo, modificar a impedância de saída do AO, acrescentando nos bornes um resistor, que ficará em paralelo com a carga padrão do módulo, que é de 1,2k.

As medições feitas para ilustrar este manual foram feitas com resistência de carga padrão do módulo, que é de 1,2k.

Poderá ser utilizado também para a alimentação do AO uma fonte simétrica de ± 15 volts, não sendo aconselhado ultrapassar esse limite.

As experiências deste manual foram obtidas com o AO alimentado com uma fonte simétrica de ± 12 volts.