



Experimento: Circuitos comparadores

1 Introdução

O presente relatório visa detalhar o experimento laboratorial realizado na disciplina laboratório de circuitos eletrônicos no dia 15 de outubro de 2019 onde o assunto abordado é o circuitos comparadores utilizando amplificadores operacionais (AMPOPs), mais especificamente os do circuito integrado (CI) LM741. Com o objetivo de compreender o funcionamento dos circuitos comparadores simples e com histerese (comparador regenerativo "Schmitt Trigger"). Os esquema dos circuitos analisados são mostradas abaixo.

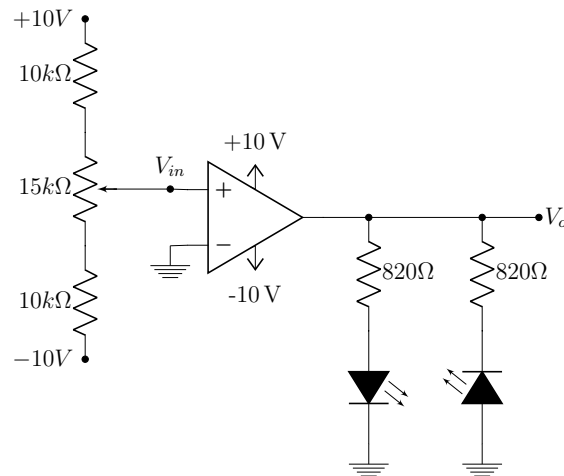


Figura 1: Comparador simples não inversor.

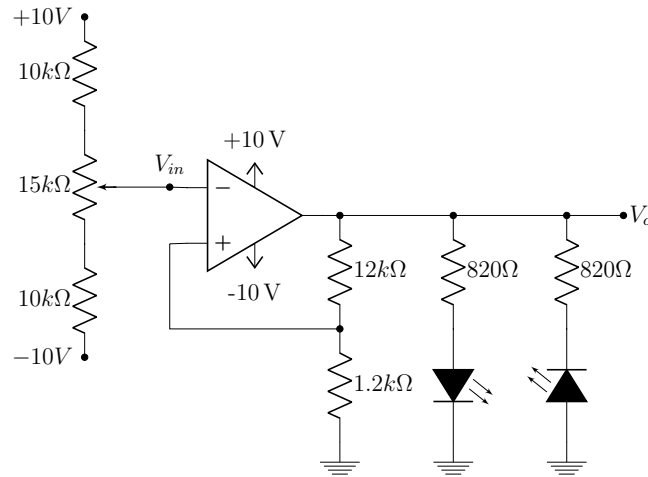


Figura 2: Comparador regenerativo "Schmitt Trigger".

Os circuitos comparadores como o próprio nome já diz, permite comparar 2 tensões de entrada, um valor de referência conhecido e outro a ser comparado V_{in} , apresentando uma única saída resultado da comparação.

A atividade nos mostra dois circuitos, um comparador não-inversor simples, figura 1, que é apenas um AMPOP com tensão de referência no terra na entrada inversora e tensão V_{in} na entrada não-inversora. O outro circuito é claramente comparador inversor com histerese, figura 2, pois apresenta realimentação positiva e V_{in} estar na entrada inversora. A partir desses dois circuitos, foi possível efetuar a medição da tensão limiar de entrada com a tensão de referência dada, ver as tensões de saturação de ambos os circuitos, além de principalmente ver a característica de transferência (CT) para o circuito comparador com histerese.

Além disso, o osciloscópio e o multímetro digital foram utilizados para medir os valores e as formas de onda na entrada e na saída dos comparadores, como forma de comparar os valores e comprovar os resultados teóricos obtidos. Vale destacar que com a medição da faixa de resistência do potenciômetro com o multímetro, verificou que este possuía um valor máximo de resistência de $15k\Omega$ ao invés de $10k\Omega$, assim justificando as mudanças realizadas nos circuitos da figura 1 e 2.

2 Análise Teórica

Antes de analisar cada um dos comparadores, vale destacar que o valor de saturação para ambos será igual, devido ao fato de que os AMPOPS estão sendo alimentados pelos

mesmos níveis de tensão (+10V e -10V), assim os valores de saturação podem ser definidos como:

$$V_{sat}^+ = +10V \quad (1)$$

$$V_{sat}^- = -10V \quad (2)$$

Já a entrada V_{in} é controlada por um divisor de tensão em ambos os circuitos, sendo este composto por dois resistores de $10k\Omega$ e um potenciômetro de $15k\Omega$, de forma que a parcela do circuito pode ser redistribuído como na figura 3.

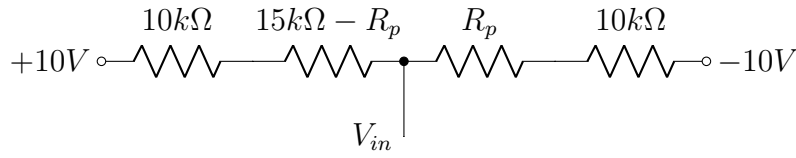


Figura 3: Divisor de tensão da entrada.

Considerando que a resistência do resistor R_p varia entre 0Ω e $15k\Omega$, tem-se que a tensão V_{in} pode ser encontrada como:

$$V_{in} = -10 + 20 \times \frac{10^4 + R_p}{(10^4 + R_p) + (10^4 + 1.5 \times 10^4 - R_p)} = -10 + 20 \times \frac{10^4 + R_p}{3.5 \times 10^4} \quad (3)$$

Assim, $V_{in} \in [-4.28, 4.28]V$.

2.1 Comparador não inversor simples

Reconhece-se o circuito da figura 1 como um comparador simples e não inversor. Isso pelo fato de possuir um valor de referência fixo ($V_{REF} = 0V$) e que a tensão a ser comparada é inserida na entrada não inversora do AMPOP.

Assim, para que a saída V_o esteja no nível positivo (+10V), basta que a tensão de entrada seja: $V_{in} > 0V$. Para que a saída assuma o nível negativo (-10V), basta que a tensão de entrada seja: $V_{in} < 0V$.

Dessa forma a característica de transferência do comparador pode ser considerada como a da figura 4.

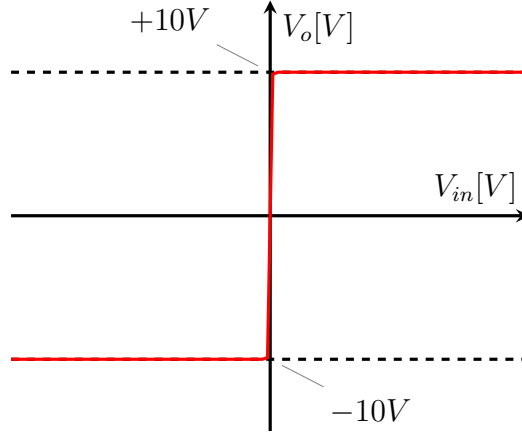


Figura 4: Característica de transferência para o comparador não inversor simples.

Finalmente, em relação aos LEDs, quando a saída assumir nível alto, o LED com catodo aterrado será ligado e o outro permanecerá apagado. Quando a saída assumir o nível baixo, o LED com catodo aterrado apagará e o outro acenderá.

2.2 Comparador inversor com histerese

Reconhece-se o circuito da figura 2 como um comparador inversor com histerese. Isso é confirmado, pois o valor de referência é criado a partir de um divisor de tensão da tensão de saída por meio de uma malha de realimentação positiva e a tensão ser comparada é inserida na entrada inversora do AMPOP. Assim, as entradas do amplificador operacional em função da tensão de entrada e saída do do circuito comparador podem ser obtidas por meio das relações 4 e 5

$$V^+ = V_{in} \quad (4)$$

$$V^- = \frac{1.2 \times 10^3}{1.2 \times 10^3 + 12 \times 10^3} \times V_o = 0.0909 \times V_o \quad (5)$$

Como é um comparador por histerese, deve-se encontrar os dois valores de transição. Dessa forma, considera-se inicialmente que para que a saída seja $V_o = +10V$, as entradas do AMPOP devem obedecer a seguinte relação: $V^+ > V^-$. Desenvolvendo essa relação com base em 4 e 5, tem-se a equação 7 que indica o primeiro valor de transição.

$$V_{in} < 0.909V \quad (6)$$

Já o outro nível de transição pode ser obtido fazendo $V_o = -10V$, as entradas do AMPOP devem obedecer a seguinte relação: $V^+ < V^-$. Desenvolvendo essa relação com base em 4 e 5, tem-se a equação ?? que indica o segundo valor de transição.

$$V_{in} > -0.909V \quad (7)$$

Por fim, a característica de transferência do comparador inversor com histerese pode ser observado na figura 5.

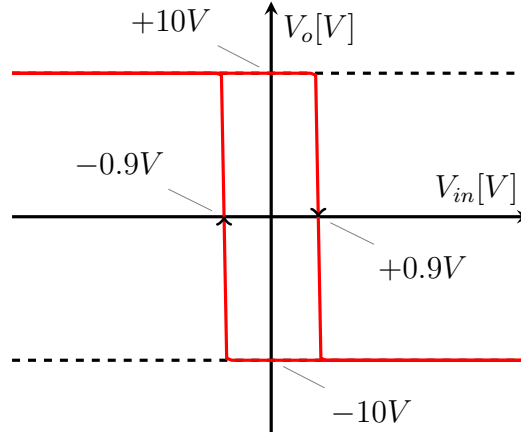


Figura 5: Característica de transferência para o comparador inversor com histerese.

Em relação aos LEDs, aquele que possui catodo aterrado só acenderá quando $V_{in} < -0.909V$, considerando que antes esteja apagado. Já o outro LED estará ligado e será apagado. Porém uma vez ligado, o LED de catodo aterrado só será apagado quando $V_{in} > 0.909V$, assim, ligando o outro LED. Dessa forma, obedecendo o ciclo de histerese da característica de transferência.

3 Resultados e discussão

Para encontrar todos os resultados necessários para comprovar a teoria, a prática foi dividida em algumas etapas, sendo elas:

- Montar o circuito da figura 1 e variar V_{in} na entrada e verificar com multímetro a tensão de saturação positiva e negativa, obtida na saída do circuito.
- Variar a entrada de modo a encontrar a tensão de offset do CI LM741;
- Repetir o primeiro passo no circuito da figura 2.
- Aplicar um $V_{in} = 2\text{sen}(2\pi \times 150 \times t)$ obter a curva de histerese (CT do circuito), com as tensões limiares do circuito.

Primeiramente foi montado o circuito comparador não-inversor simples, desse modo foram obtidos suas tensões de saturação na saída variando a tensão V_{in} na entrada de modo a obter na saída V_{sat}^+ e V_{sat}^- , a utilização dos diodos emissores de luz (LEDs), foi feita apenas para melhor entendimento e visualização do experimento.

$$V_{sat}^+ = +8.586 \text{ V}$$

$$V_{sat}^- = -8.586 \text{ V}$$

Observa-se que devido as perdas internas do próprio AMPOP (LM741), obtemos uma saída diferente da ideal que é $\pm 10V$.

A medição da tensão do *input offset* do CI LM741 é para temperatura padrão (25°C) em torno 5mV , a medição desse valor foi realizada variando a entrada de modo a se estabilizar em torno do ponto de transição das duas margens de saturação. Foi obtido o valor de aproximadamente:

$$V_{of} = 3.43 \text{ mV}$$

Assim, a característica de transferência prática pode ser observada na figura 6 com o *offset* na tensão de referência.

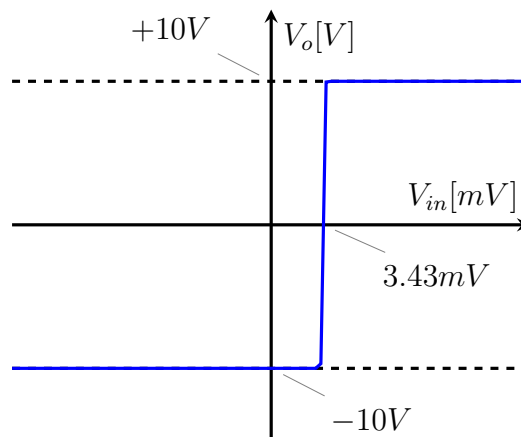


Figura 6: Característica de transferência para o comparador não inversor simples.

Esse valor é aceitável pois no *datasheet* do LM741 é previsto uma *input offset voltage* de no máximo 5mV .

Foi utilizado em ambos os circuitos o potenciômetro em série com dois resistores de $10k\Omega$, de modo a diminuir a faixa das tensões de entrada de $\pm 10V$ para em torno de $\pm 3.3333V$, de modo que o ajuste seja mais fácil e preciso.

Na segunda parte do experimento foi montado o circuito comparador regenerativo "Schmitt Trigger", que nada mais é que um comparador inversor com histerese, e que deve ser medido as tensões de saturação do circuito na saída, que por se tratar do mesmo CI e da mesma tensão V_{in} e referência de entrada (Terra) ter-se-á praticamente os mesmos valores encontrados no circuito da figura 1. Logo:

$$V_{sat}^+ = +8.73 \text{ V}$$

$$V_{sat}^- = -8.555 \text{ V}$$

Em seguida, para medição das tensões de limiar, foi necessário retirar o potenciômetro e no local colocar um onda senoidal $2V_{pico}$ e frequência de 150Hz. Com isso possível obter a onda resultante na saída, que é uma onda quadrada nos valores de V_{sat}^+ e V_{sat}^- como é mostrada na figura 7 abaixo:

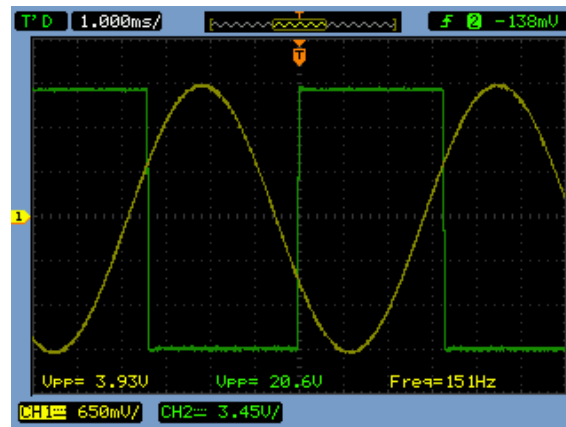


Figura 7: Comparação entre entrada e saída no tempo.

Pode-se identificar na figura 7 que a onda quadrada resultante está defasada em relação à senoide. Isso é devido a mudança de nível da onda quadrada apenas quando encontra-se com a onda senoidal em que seu valor de tensão obedeça o valor de transição.

Para a análise da CT e obtenção das tensões limiares experimentais, foram utilizados o modo X-Y do osciloscópio de modo a obter a curva da figura 8.

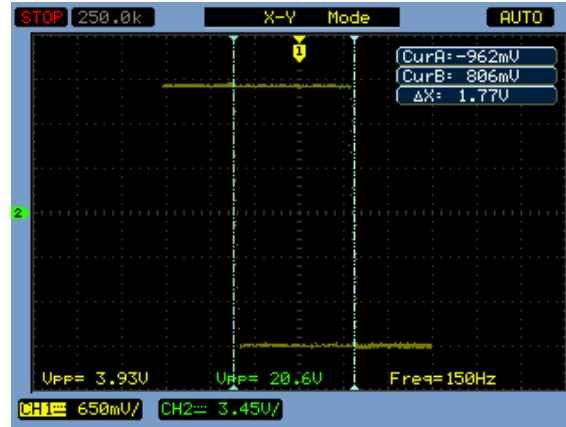


Figura 8: Característica de transferência prática.

Da figura 8 extrai-se que os valores de transição são: $V_1 = -962mV$ e $V_2 = 806mV$. Antes de inserir a onda de tensão senoidal, foi ajustado o potenciômetro para obter as tensões de transição, que foram: $V_1 = -1.058V$ e $V_2 = 966mV$. Percebe-se que, as tensões limiares encontradas na prática são muito próximas aos valores teóricos encontrados e próximas entre si, considerando que os valores encontrados no osciloscópio são mais precisos do que aqueles ajustados manualmente.

Na imagem acima, pode-se notar que quando se aumenta a tensão de entrada, a saída saturará no valor de saturação positivo quando ultrapassar o limiar superior, de forma análoga, ocorrerá a mesma coisa para quando o valor é diminuído na entrada, dessa forma, só saturará quando a entrada estiver abaixo do limiar de comparação inferior. Dessa forma, percebemos que a figura em questão é bastante parecido a CT teórica apresentada.

4 Conclusões

A prática permitiu compreender e distinguir o comparador simples do comparador com histerese, bem como ajudou a compreender o funcionamento na prática desses circuitos, permitindo entender as limitações impostas.

A prática se mostrou um desafio em quesitos de precisão para encontrar os valores de transição e *offset*, pois o ajuste do potenciômetro deveria ser cuidadoso, porém a modificação do circuito divisor de tensão de forma a permitir que a tensão V_{in} assumisse uma faixa menor de valores contribuiu para que o ajuste fosse realizado de forma mais precisa.

Dessa forma, mesmo com as dificuldades encontradas, permitiu-se encontrar uma

ótima correspondência entre os valores teóricos com os práticos, implicando que os circuitos propostos de fato possuem um valor prático de aplicação.

5 Anexos

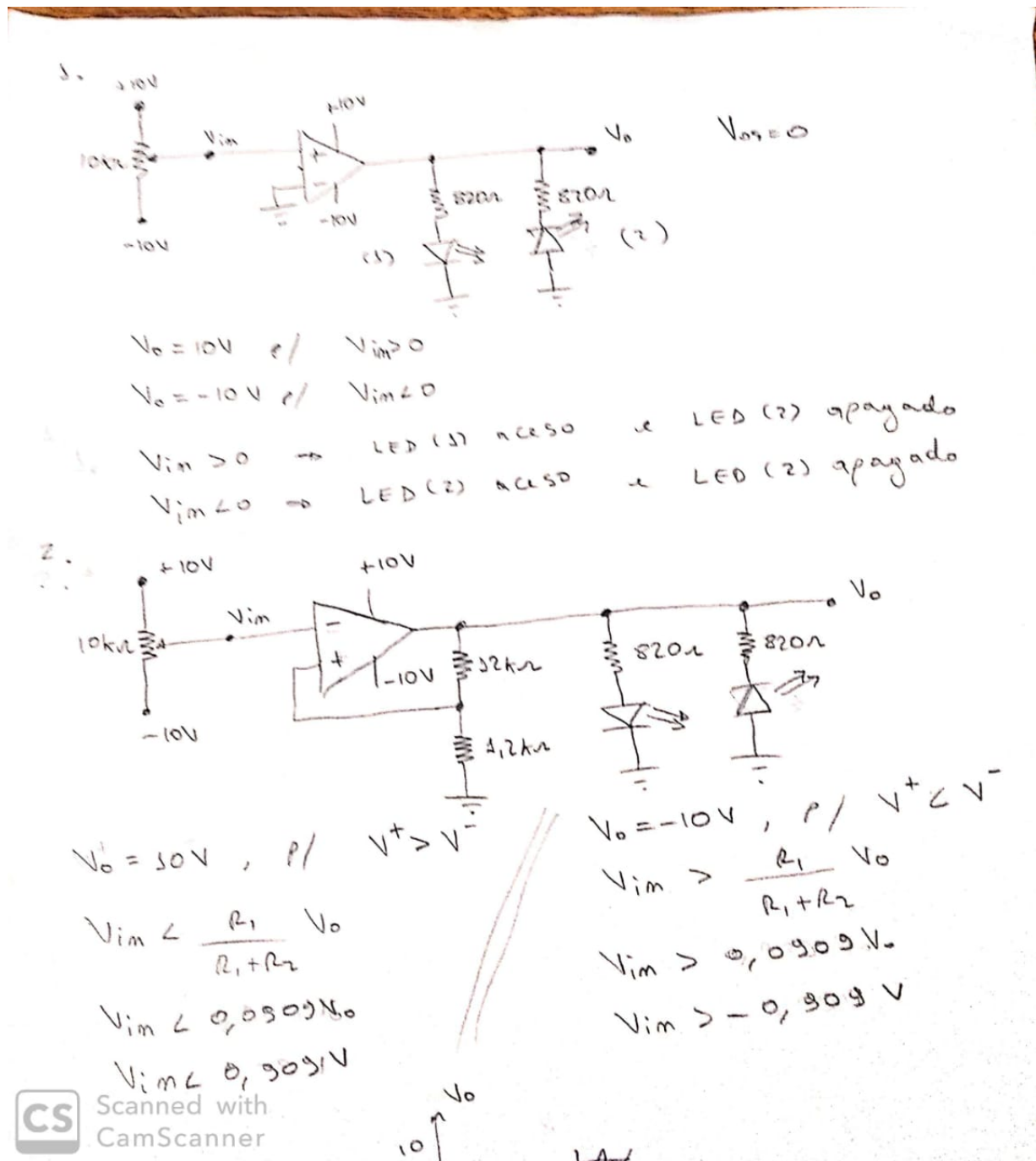


Figura 9: Folha de cálculos da prática.