

Circuitos Comparadores Usando o Amplificador Operacional

Introdução

Um circuito usando amplificador operacional é caracterizado como um circuito linear quando o mesmo opera de forma que o sinal que for introduzido na entrada do circuito não sofre alteração em suas características. Por exemplo, se na entrada do circuito for introduzida uma onda senoidal, este sinal será processado segundo a finalidade que se propõe o circuito mas não haverá a possibilidade de que o sinal na saída do circuito seja alterado.

Circuitos que não são capazes de alterar forma de onda são caracterizados como circuitos lineares. Isto é dito por que há uma série de circuitos que são modificadores de forma de onda e, portanto, são tratados como circuitos não lineares. Os circuitos comparadores são modificadores de forma de onda e, portanto, podem ser caracterizados como circuitos não lineares.

Comparadores

Em muitas situações práticas surge a necessidade de se comparar dois sinais entre si, de tal sorte que um destes sinais seja uma referência preestabelecida pelo projetista. Os circuitos eletrônicos destinados a esta função são denominados comparadores. Eles podem ser divididos em duas vertentes: comparadores sem realimentação e comparadores com realimentação também conhecidos como disparadores Schmitts.

Um exemplo de aplicação prática dos comparadores é o seguinte: através de sensores de nível, podemos detectar a situação de um reservatório de combustível líquido. Se o nível normal for tomado como referência, então devemos ajustar um sinal de tensão correspondente ao mesmo. Quando o nível estiver acima (ou abaixo) do normal (referência), o comparador deverá emitir um sinal de saída para o sistema controlador, de tal modo que a situação normal seja restabelecida automaticamente. Evidentemente, o sinal de referência é levado a uma das entradas do comparador, ficando a outra entrada para receber o sinal da variável controlada (no caso, o nível do reservatório).

Os comparadores produzem saídas sob a forma de pulsos discretos em função do nível do sinal aplicado deste que o sinal aplicado varie com o tempo.

A saída de um comparador está sempre num valor “alto”, denominado saturação positiva ($+V_{\text{saturação}}$), ou num valor “baixo”, denominado saturação negativa ($-V_{\text{saturação}}$). Existem formas de se limitar os níveis de saída de modo que os mesmos não atinjam a saturação.

A tensão de saturação está associada a tensão de alimentação do amplificador operacional ($+V_{CC}$ ou $-V_{EE}$). De forma que, se o amplificador operacional for ideal, a tensão de saturação é a própria tensão de alimentação.

Comparadores sem realimentação

Circuito básico

A forma mais simples de se construir um comparador é ligando um amplificador operacional sem resistores de realimentação como mostra a figura 1.1. Quando a entrada inversora está aterrada, a mais suave tensão de entrada (em fração de milivolts) é suficiente para saturar o amplificador operacional.

A figura 1.2 mostra a relação entre a tensão de saída em função de entrada ($V_{\text{saída}}$ versus V_{entrada}). A variação que ocorre entre a saturação negativa e saturação positiva, como aparece na figura, só é possível se supusermos que o amplificador operacional é ideal. Nos amplificadores reais esta mudança não pode ocorrer. Todo amplificador operacional possui uma taxa de inclinação (SR) que provoca uma defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada e isto será refletido nesta transição.

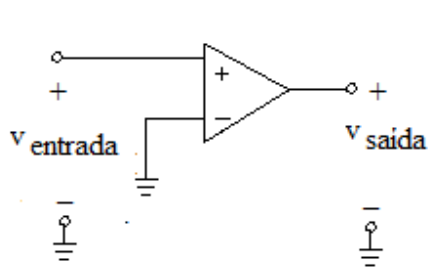


figura 1.1

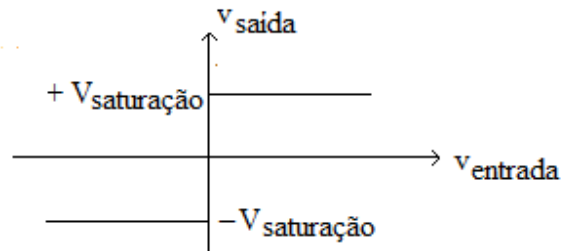


figura 1.2

Das figuras 1.1 e 1.2 pode-se concluir que a comparação ocorreu da seguinte forma:

$$\begin{aligned} v_{\text{entrada}} > 0 &\rightarrow v_{\text{saída}} = +V_{\text{saturação}} \\ v_{\text{entrada}} < 0 &\rightarrow v_{\text{saída}} = -V_{\text{saturação}} \end{aligned}$$

O ponto de desengate (também chamado limiar, ponto de referência) de um comparador é o valor da tensão de entrada para a qual a saída faz a mudança de estado (de baixo para alto, ou vice versa). Na figura 1.1, o ponto de desengate (tensão de referência) é zero, porque este é o valor da tensão para o qual a saída faz a mudança de estado. Tal circuito pode ser chamado detector de cruzamento zero.

O ponto de desengate pode ser alterado em função da necessidade do circuito comparador. As figuras 2.1, 2.2, 3.1 e 3.2 mostram situações em que os pontos de desengates foram alterados para uma tensão positiva e para uma tensão negativa.

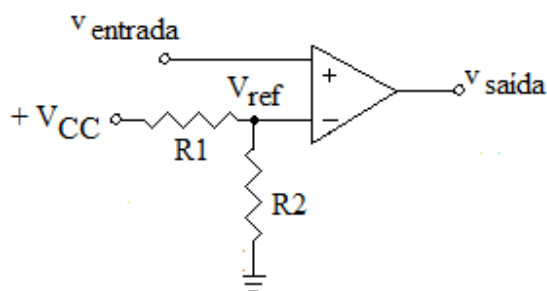


figura 2.1

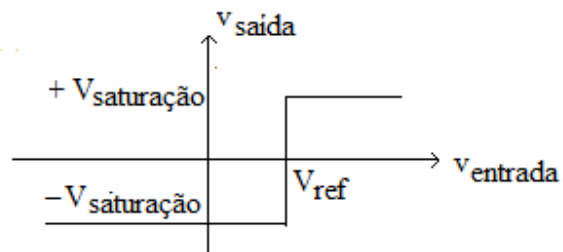


figura 2.2

Das figuras 2.1 e 2.2 pode-se concluir que a comparação ocorreu da seguinte forma:

$$\begin{aligned} v_{\text{entrada}} > V_{\text{ref}} &\rightarrow v_{\text{saída}} = +V_{\text{saturação}} \\ v_{\text{entrada}} < V_{\text{ref}} &\rightarrow v_{\text{saída}} = -V_{\text{saturação}} \end{aligned}$$

onde: $V_{\text{referência}} = [R2 / (R1 + R2)] \times (+V_{CC})$

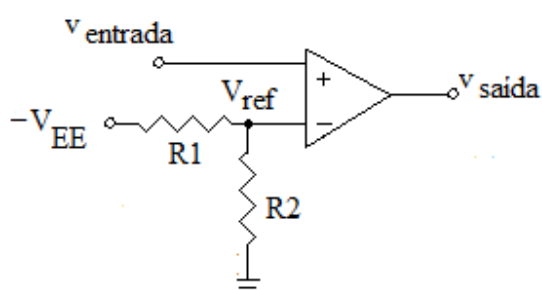


figura 3.1

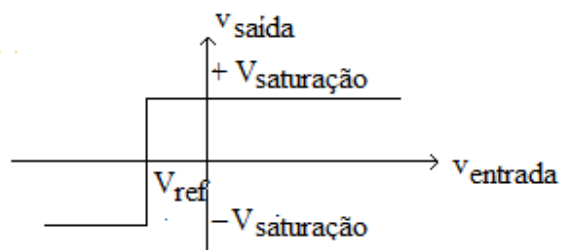


figura 3.2

Das figuras 3.1 e 3.2 pode-se concluir que a comparação ocorreu da seguinte forma:

$$\begin{aligned} v_{\text{entrada}} > V_{\text{ref}} &\rightarrow v_{\text{saída}} = +V_{\text{saturação}} \\ v_{\text{entrada}} < V_{\text{ref}} &\rightarrow v_{\text{saída}} = -V_{\text{saturação}} \end{aligned}$$

onde: $V_{\text{referência}} = [R2 / (R1 + R2)] \times (-V_{EE})$

Nos circuitos mostrados nas figuras 2.1 e 3.1 a tensão de referência pode ser feita através de um diodo zener fazendo a função do resistor R2. Tais circuitos podem ser vistos nas figuras 4.1 e 4.2.

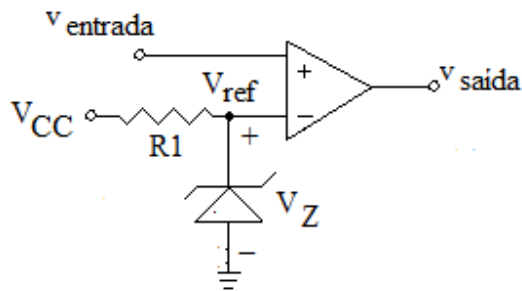


figura 4.1

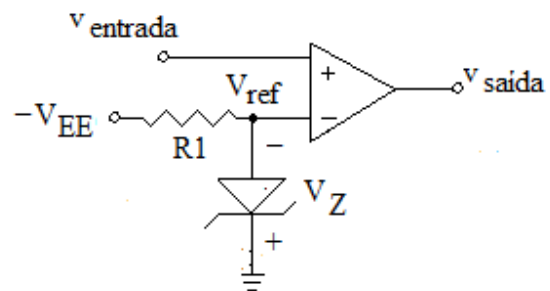


figura 4.2

Um amplificador operacional como o 741 pode ser usado como comparador, mas ele apresenta limitações quanto à rapidez. Como se sabe, a taxa de inclinação limita a taxa de variação da tensão de saída. Com um 741, a saída pode variar no máximo a uma taxa de $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$. Por isso, um 741 leva mais de $50 \mu\text{s}$ para fazer um chaveamento entre uma saída baixa de -13V e uma saída alta de $+13\text{V}$. Uma aproximação para se aumentar a velocidade de chaveamento é usar um amplificador operacional com taxa de inclinação mais rápida, como LM318 cuja taxa de inclinação é de $70 \text{ V}/\mu\text{s}$. Ele pode fazer um chaveamento de -13V para $+13\text{V}$ em $0,3 \mu\text{s}$ aproximadamente.

Existem outros amplificadores operacionais que se prestam para fazer comparadores por terem um taxa de inclinação muito elevada.

O LM339 tem a velocidade de comutação da ordem de $1,3 \mu\text{s}$ e num único encapsulamento existem quatro comparadores. Além disso, o LM339 apresenta um consumo de potência muito baixo e pode ser usado em circuitos eletrônicos alimentados por baterias comuns.

Os comparadores sob a forma de CI's apresentam uma série de vantagens que se tornam superiores aos comparadores construídos com amplificadores operacionais de aplicações gerais. Apresentam alto ganho, ampla largura de banda, grande velocidade de comutação.

Limitando a tensão de saída

Ir-se-á apresentar, a seguir, dois métodos de limitação da tensão de saída em comparadores. As figuras 5.1 e 5.2 mostram tais possibilidades.

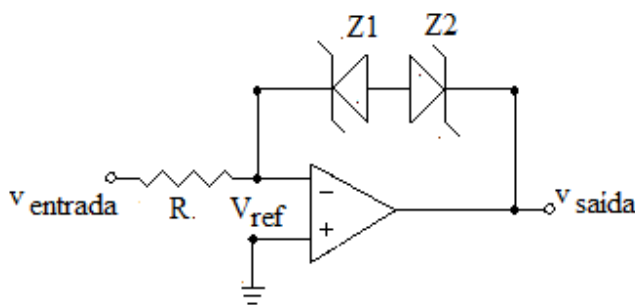


figura 5.1

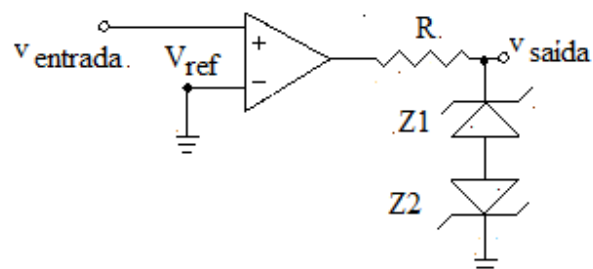


figura 5.2

No circuito apresentado na figura 5.1 a tensão de saída fica limitada pela tensão de condução direta e tensão zener. Em cada semiciclo do sinal de entrada, os diodos zener podem ser modelados por duas fontes de tensão em série. Uma com a tensão de condução direta do zener igual a $0,7 \text{ V}$ e a outro com a tensão zener do outro diodo. É possível se escolher diodos zener iguais ou diferentes. No primeiro caso, as amplitudes positiva e negativa serão iguais e no segundo caso serão diferentes.

Outro método de limitação de tensão de saída de um comparador está indicado na figura 5.2. é importante que seja tomado o cuidado de se colocar um resistor R para limitar a corrente sobre os diodos. As demais considerações são idênticas às relacionadas com o circuito mostrado na figura 5.1.

Alimentando dispositivos TTL

Frequentemente, a saída de um comparador alimenta dispositivos TTL que são os circuitos integrados em sistemas digitais e em outras aplicações de chaveamento. As tensões de entrada típicas para um dispositivo TTL situam-se entre 0 e +5 V. A figura 6.1 mostra como um LM339 pode ser ligado de modo a interfacear com dispositivos TTL. Note que a saída do coletor aberto é ligada a uma alimentação de +5 V através de um resistor de elevação de $1\text{k}\Omega$. Por isso a saída pode ser 0 V ou +5 V, como mostra a figura 6.2. Esta alimentação é ideal para dispositivos TTL.

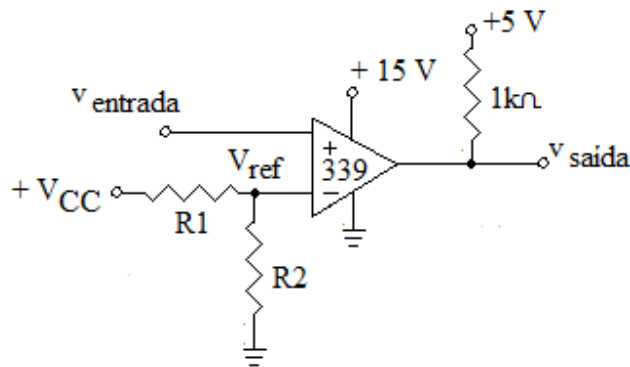


figura 6.1

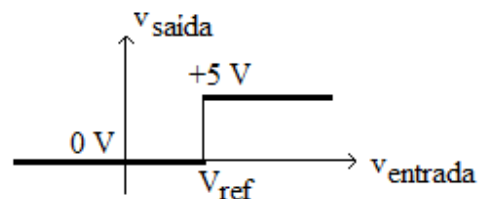


figura 6.2

Circuito que representa parte de um conversor A/D (conversor analógico digital)

A figura 7 mostra parte de um circuito conversor analógico para digital (A/D) usado em voltímetros digitais e em muitas outras aplicações. A tensão de entrada a ser medida ou convertida é aplicada à entrada não inversora. Uma tensão na forma de escada alimenta a entrada inversora. À medida que a tensão inversora aumenta, a tensão de erro torna-se menos positiva. Em algum ponto ao longo do sinal de escada, a entrada inversora torna-se mais positiva que a entrada não inversora. Quando isto ocorre, a saída do comparador muda para o estado baixo.

O intervalo de tempo que a tensão da escada leva para ultrapassar v_{entrada} é a base para se entender o funcionamento do circuito. Quanto maior v_{entrada} , mais tempo leva para a tensão da escada ultrapassar v_{entrada} ; em outras palavras, o tempo é diretamente proporcional a v_{entrada} .

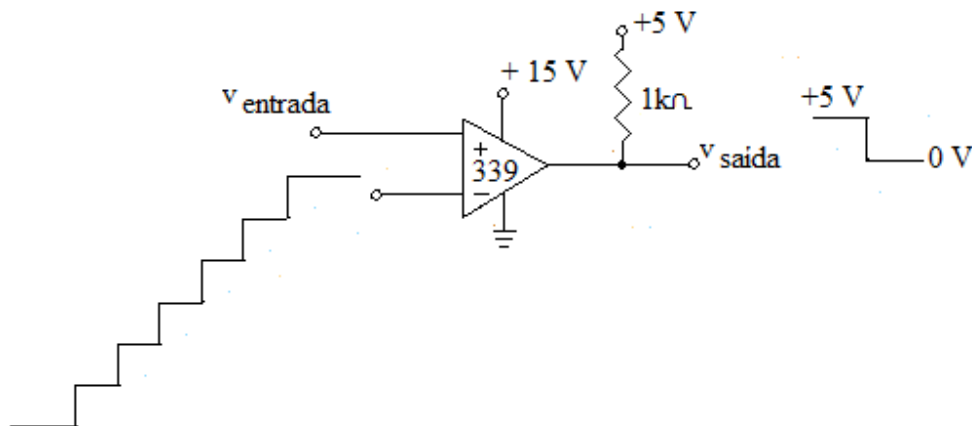


figura 7

Comparadores com realimentação – Disparador Schmitt

Podemos dizer que a palavra “regenerativo” é sinônimo de realimentação positiva. Assim sendo, é importante estudar circuitos comparadores com realimentação pois eles são capazes de evitar que sinais de ruído possam mudar indevidamente o estado da saída do comparador.

Se a entrada para um comparador sem realimentação contiver ruído, a saída poderá ser comutada indevidamente. Por exemplo, com um detector de cruzamento zero, a saída é alta quando v_{entrada} é positiva, e baixa quando v_{entrada} é negativa. Se a entrada contiver uma tensão de ruído com um pico de 1 mV ou mais, então o comparador detectará o cruzamento zero produzido pelo ruído. Podemos evitar esse disparo de ruído usando um disparador Schmitt, um comparador com realimentação positiva.

A propriedade mais importante do disparador Schmitt é a característica de Histerese apresentada pelo mesmo. O termo histerese vem do grego “Hystéresis” que significa atraso. A histerese não é um fenômeno exclusivo do magnetismo. De fato, existe histerese em alguns circuitos eletrônicos.

Um comparador sem realimentação não consegue diferenciar um sinal que deve comutar a saída do circuito com aquele que é simplesmente um sinal de ruído. O princípio básico da histerese aplicada ao disparador Schmitt é o seguinte: o projetista deverá possuir uma noção da ordem de grandeza do valor de pico a pico da tensão de ruído presentes no sinal a ser injetado no circuito. A seguir, deverá estabelecer dois níveis de referência denominados tensão de disparo superior ($+V_{\text{referência}}$) e tensão de disparo inferior ($-V_{\text{referência}}$). Estes dois níveis deverão estar separados por uma certa faixa de tensão. A qual dependerá do valor de pico a pico estimado para a tensão de ruído ou interferência sobreposta ao sinal de entrada. A diferença entre os dois níveis de referência estabelecidos pelo projetista é denominado margem de tensão de histerese.

Circuito básico do Disparador Schmitt inversor

A figura 7.1 mostra o circuito do disparador Schmitt inversor. Devido ao divisor de tensão, tem-se uma realimentação de tensão positiva. Quando a tensão de saída estiver saturada positivamente, uma tensão positiva realimentará a entrada não inversora; esta entrada positiva mantém a saída no estado alto. Por outro lado, quando a tensão de saída estiver saturada negativamente, uma tensão negativa realimentará a entrada não inversora, mantendo a saída no estado baixo. Em qualquer dos dois casos, a realimentação positiva reforça o estado de saída existente. A figura 7.2 mostra a curva de transferência (ou curva característica) para o disparador Schmitt inversor. Esta curva mostra a relação entre os sinais de entrada e de saída e permite compreender o funcionamento do circuito.

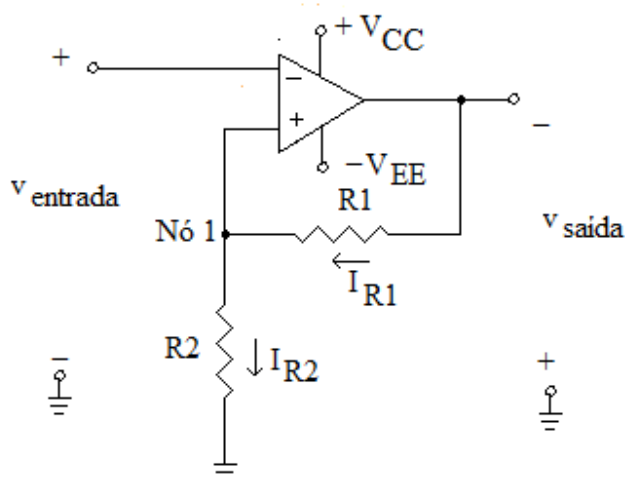


figura 7.1

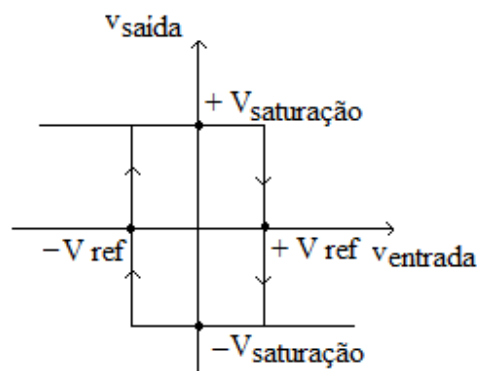


figura 7.2

A fração de realimentação é dada por:

$$B = (R_2) / (R_1 + R_2)$$

Quando a saída está saturada positivamente, a tensão de referência aplicada à entrada não inversora é dada por:

$$+V_{\text{referência}} = +BV_{\text{saturação}}$$

Quando a saída está saturada negativamente, a tensão de referência aplicada à entrada não inversora é dada por:

$$-V_{\text{referência}} = -BV_{\text{saturação}}$$

A saída permanecerá num dado estado até que a entrada ultrapasse a tensão de referência para um dado estado. Por exemplo, se a saída estiver saturada positivamente, a tensão de referência é $+BV_{\text{saturação}}$. A tensão de entrada v_{entrada} precisa aumentar para um valor ligeiramente acima de $+BV_{\text{saturação}}$. Aí então a tensão de erro se inverte e a tensão de saída muda para o estado baixo. Uma vez que a saída esteja no estado negativo, ela permanecerá aí indefinidamente até que a tensão de entrada se torne mais negativa do que $-BV_{\text{saturação}}$. Aí então a saída chaveia do negativo para o positivo.

A realimentação positiva força a tensão de referência a ter a mesma polaridade que a tensão de saída; a tensão de referência é positiva quando a saída for alta, e negativa quando a saída for baixa. É por isso que num disparador Schmitt tem-se um ponto de desengate superior e um inferior. A diferença entre os dois pontos de desengate é chamada histerese.

Circuito básico do Disparador Schmitt não inversor

A figura 8.1 mostra o circuito de um disparador Schmitt não inversor e a figura 8.2 mostra a curva de transferência (ou curva característica) para o disparador Schmitt não inversor. Esta curva mostra a relação entre os sinais de entrada e de saída e permite compreender o funcionamento do circuito.

Suponha-se que a saída está saturada negativamente. Logo a tensão de realimentação é negativa. Esta tensão de realimentação manterá a saída na saturação negativa até que a tensão de entrada se torne suficientemente positivo para tornar a tensão de erro positivo. Quando isto ocorre, a saída vai para a saturação positiva. Com a saída na saturação positiva, a tensão de realimentação é positiva. Para mudar os estados de saída, a tensão de entrada tem que se tornar negativa o suficiente para fazer a tensão de erro negativa. Quando isto se dá, a saída pode mudar para o estado negativo.

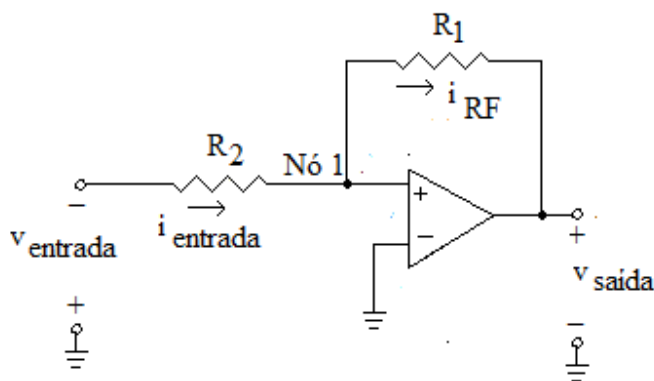


figura 8.1

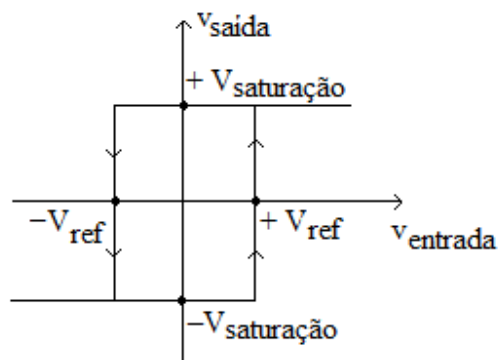


figura 8.2

A dedução dos pontos de desengate se dá através da seguinte análise: a saída muda de estado quando v_{erro} passa pelo zero. Quando v_{erro} for zero,

$$v_{\text{entrada}} = i_{\text{entrada}} R_2$$

Devido ao terra virtual, quase que toda a corrente de entrada passa através de R_1 , e

$$v_{\text{saída}} = - i_{\text{entrada}} R_1$$

$$v_{\text{entrada}} = - v_{\text{saída}} (R_2 / R_1)$$

Quando a saída está na saturação negativa, $v_{\text{saída}} = - V_{\text{saturação}}$ e

$$+V_{\text{referência}} = (R_2 / R_1) V_{\text{saturação}}$$

Quando a saída está na saturação positiva, $v_{\text{saída}} = + V_{\text{saturação}}$ e

$$-V_{\text{referência}} = - (R_2 / R_1) V_{\text{saturação}}$$