

### Bloco 3 do Projeto: Comparador com Histerese para Circuito PWM

O circuito de um PWM – Pulse Width Modulator, gera um trem de pulsos, de amplitude constante, com largura proporcional a um sinal de entrada, no nosso caso, o sinal de erro, proveniente do amplificador de erro.

O princípio de funcionamento de um circuito PWM bastante simples, e faz uso do gerador de onda triangular (já apresentado no bloco 2) e do comparador com histerese, que vamos apresentar neste bloco.

Na Figura 7 temos um op-amp com um sinal triangular em sua entrada inversora e um sinal de que chamaremos de  $V_{\text{erro}}$  em sua entrada não inversora. Na Figura 8 temos o resultado da comparação destas duas tensões (ou seja, a tensão de saída do op-amp).

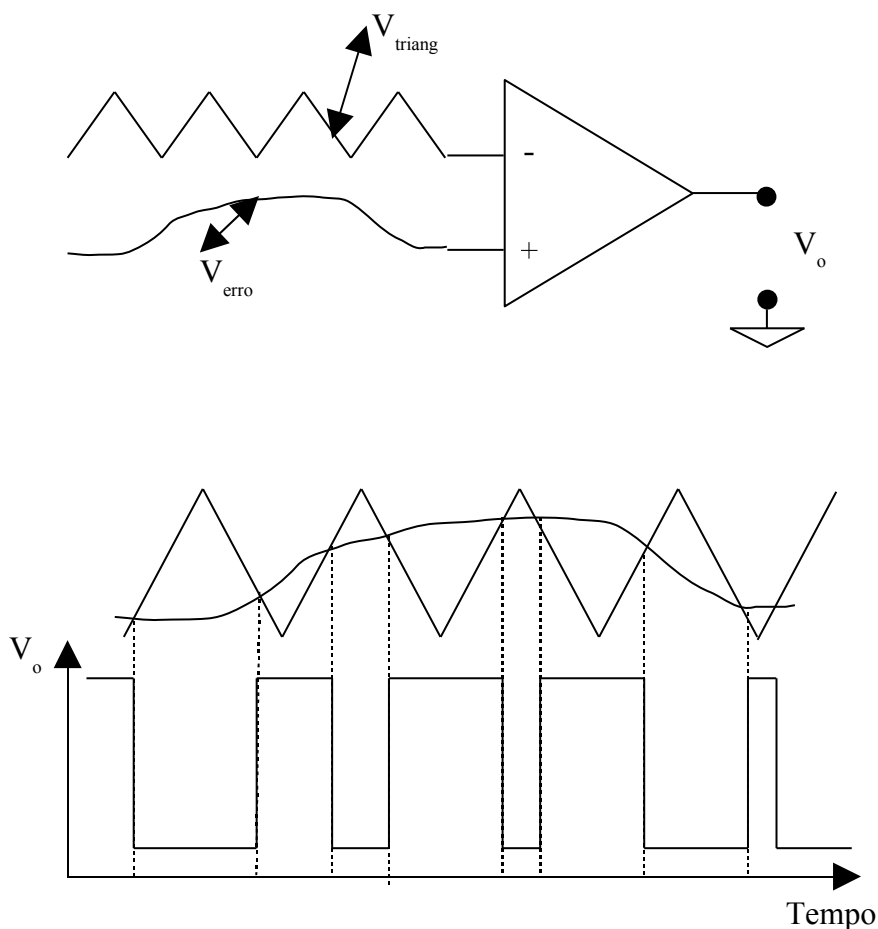


Figura 7 – Princípio de funcionamento do PWM

Como podemos facilmente observar, a largura do pulso de saída em  $V_o$  aumenta a medida que a tensão  $V_{\text{erro}}$  aumenta. Desta forma, temos em  $V_o$  um sinal que possui tempo alto proporcional ao sinal  $V_{\text{erro}}$ . Lembramos que é necessário que a frequência do sinal  $V_{\text{erro}}$  seja muito menor do que a frequência da onda triangular.

O nosso circuito do PWM é muito semelhante ao apresentado na Figura 7, sendo que a única variação é a inclusão de dois resistores, R13 e R14, que adicionam uma pequena histerese ao comparador, evitando que ele mude de estado múltiplas vezes nos pontos de cruzamento, devido a ruído nos sinais.

No circuito da Figura 8 apresentamos o circuito do comparador com histerese já acoplado ao circuito anteriormente projetado, o gerador de onda triangular.

Deve-se projetar a histerese (dada por R13 e R14) para ser algo com 1 parte em 100 ou mesmo 1 parte em 1000, já que o objetivo é apenas tornar o comparador imune a ruídos presentes nas entradas.

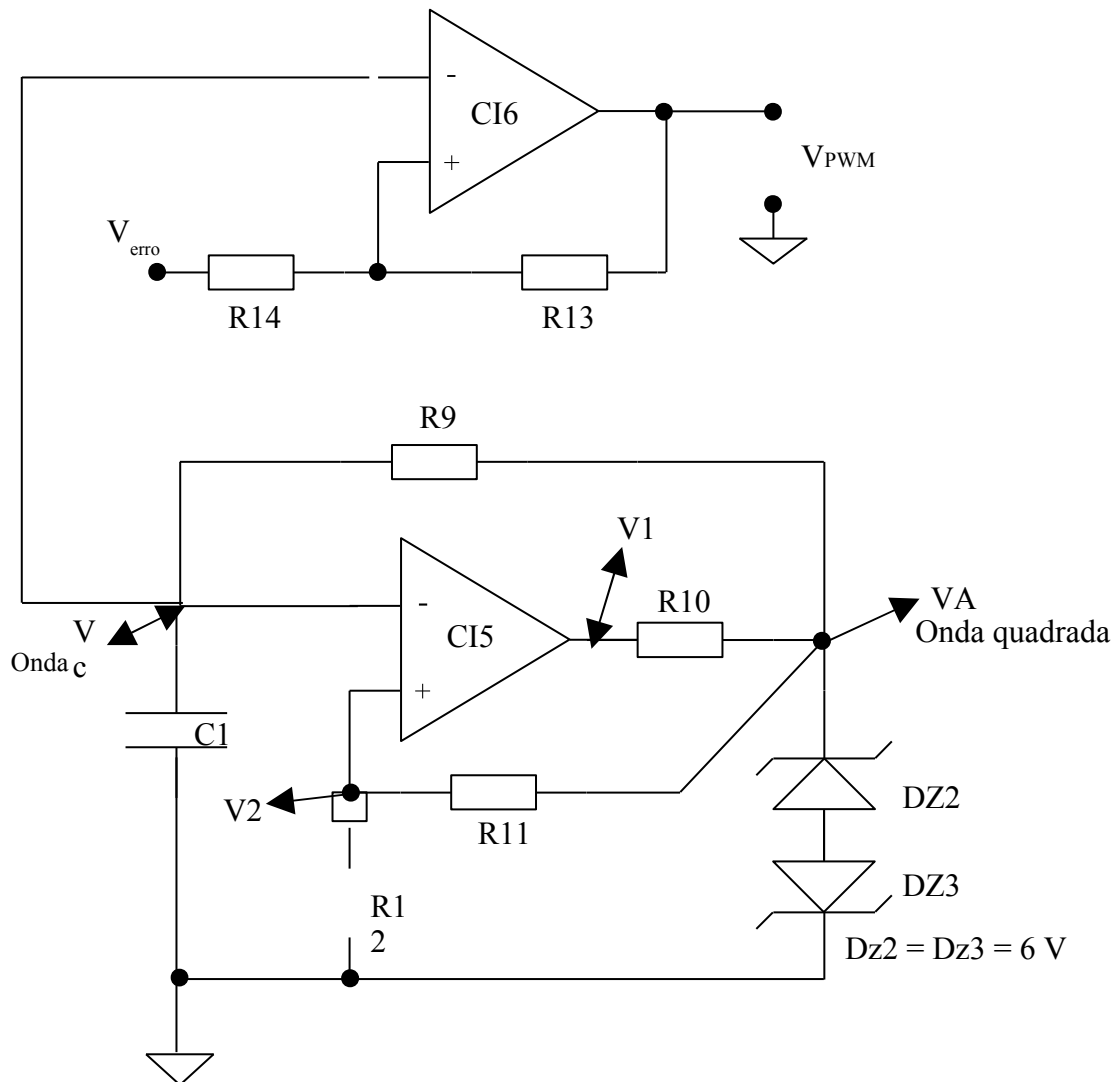


Figura 8 – Circuito do comparador acoplado ao gerador de onda triangular

Para testar o funcionamento do circuito, basta injetar, com um gerador de sinais, uma onda senoidal, com frequência bem menor do que a da onda triangular (cerca de 10 vezes menor), e com uma amplitude da ordem de grandeza da onda triangular (aproximadamente 3,3 V).

Deve ser possível ver, no osciloscópio, a saída do PWM variando de pulsos bem estreitos até pulsos bem largos. Se utilizarmos um sinal de  $V_{\text{erro}}$  maior do que a amplitude da triangular, o sinal de saída do comparador (sinal do PWM) deve “saturar”, e ficar fixo no valor alto (ou baixo), durante o período em que o sinal  $V_{\text{erro}}$  for maior(menor) do que a onda triangular.

## Bloco 4 do Projeto: Amplificador de Erro.

Quando projetamos um controlador do tipo proporcional, um dos principais parâmetros que devemos ajustar é a chamada “banda proporcional”.

A banda proporcional nada mais é do que a faixa de sinais de erro em que o controlador funciona de forma proporcional. Fora desta faixa, o controlador fornece na saída um sinal de controle com 0% ou 100% de intensidade, como se fosse um controlador *on-off*.

É justamente a largura da banda proporcional que vai determinar se o sistema responde muito lentamente ou muito rapidamente a um erro presente na sua entrada. Lembramos que o aumento do ganho, e a conseqüente redução da banda proporcional, podem levar o sistema a uma condição de oscilação. Portanto, a banda proporcional deve ser ajustada de forma a otimizar o compromisso entre velocidade de resposta do sistema e *overshoot* de temperatura aceitável, já que ao diminuirmos a banda proporcional, mesmo que o sistema não oscile, poderemos estar causando um *overshoot* muito grande na temperatura do sistema.

No nosso caso, vamos fazer a banda proporcional igual a 10 °C (ou seja,  $\pm 5$  °C em torno do ponto em que se deseja ajustar a temperatura).

O que significa, em termos de sinal elétrico, ajustarmos uma faixa de  $\pm 5$  °C em torno do ponto de operação (set-point)? Para darmos esta resposta, precisamos lembrar a amplitude da nossa onda triangular, que é de 3,3 Vp (ela atinge valores entre  $\pm 3,3$  V).

Portanto, para que o PWM tenha a sua saída em 100% (ligado o tempo todo), devemos aplicar um sinal de erro  $V_{\text{erro}} = 3,3$  V. Analogamente, para que o PWM tenha a sua saída em 0% (desligado o tempo todo), devemos aplicar um sinal de erro  $V_{\text{erro}} = -3,3$  V.

Logo, se queremos uma banda proporcional de  $\pm 5$  °C, queremos que o PWM só funcione dentro desta faixa, e fora dela a saída seja saturada em 0% ou 100%.

Um exemplo gráfico disto é apresentado na Figura 9. Note que a saída em 50% significa uma onda quadrada na saída do PWM (tempo alto igual ao tempo baixo).

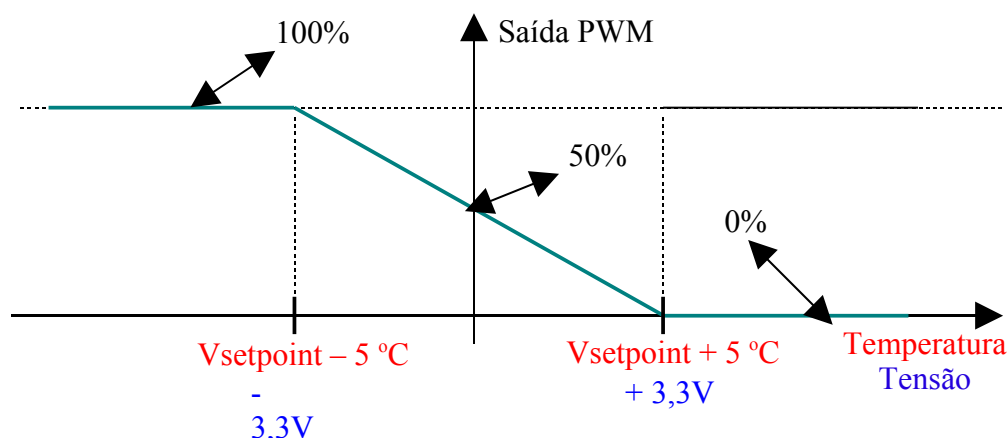


Figura 9 – Relações entre temperatura e tensões definindo a banda proporcional

Portanto, uma variação de tensão de erro entre -3,3 V e + 3,3V (6,6 V no total) deve estar relacionada a uma variação de temperatura de  $\pm 5$  °C (10 °C no total). Isso significa que devemos entrar com um

signal de erro que possua uma relação de  $(6,6V/10\text{ }^{\circ}C)$ , ou seja, aproximadamente  $660\text{ mV por }^{\circ}C$ .

Como o nosso sinal de temperatura (que vai ser comparado com o set-point, para gerar o erro), possui um comportamento térmico de  $10\text{ mV}/^{\circ}C$ , devemos dar um ganho de 66 no amplificador de erro, para que o sinal de erro resultante tenha uma variação de  $660\text{ mV}/^{\circ}C$ .

O projeto deste bloco se resume, portanto, a fazer um ajuste manual de set-point (para permitir ao operador ajustar a temperatura que deseja no controlador), e um amplificador de erro, que deve amplificar a diferença entre o valor desejado (set-point) e o valor que estamos medindo ( $V_{temp}$ ).

O circuito que executa estas duas funções é apresentado na Figura 10. O circuito é composto por um amplificador inversor com duas entradas, de forma que a tensão de saída é igual à soma (invertida) dos dois sinais na entrada:

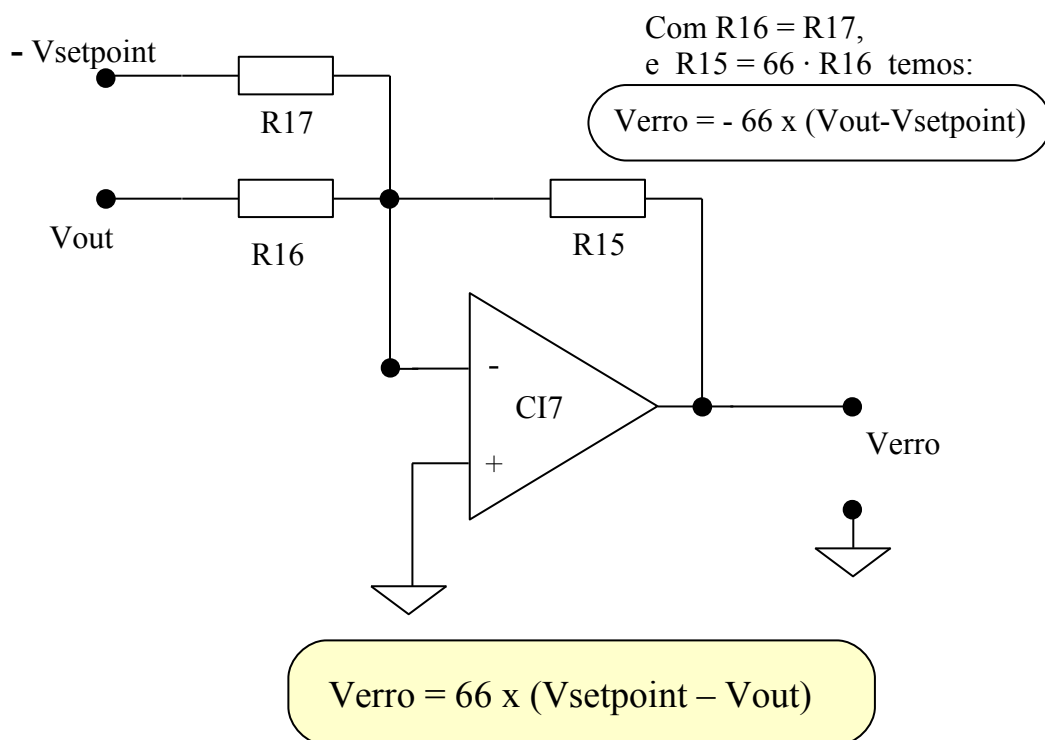


Figura 10 – Circuito do amplificador de erro

Assumindo que o controlador pode controlar temperaturas na faixa de  $20\text{ }^{\circ}C$  a  $100\text{ }^{\circ}C$ , precisamos um potenciômetro que permita ajustar o set-point entre  $-200\text{ mV}$  e  $-1000\text{ mV}$ , já que o nosso circuito de condicionamento de sinal do sensor de temperatura fornece  $10\text{ mV}/^{\circ}C$ .

O circuito que gera o set-point é apresentado na Fig. 11, e utiliza o mesmo diodo zener do Bloco 1 como referência de  $-3,3\text{ V}$ . O op-amp CI4, ligado como amplificador de ganho 1 (buffer), é necessário para que a impedância de R18 e PT1 não alterem o ganho do amplificador de erro. O op-amp que estava sobrando no Bloco 1 deve ser usado para CI4. O potenciômetro PT1 é um potenciômetro convencional, haja vista que não é necessário nenhum ajuste de precisão no set-point.

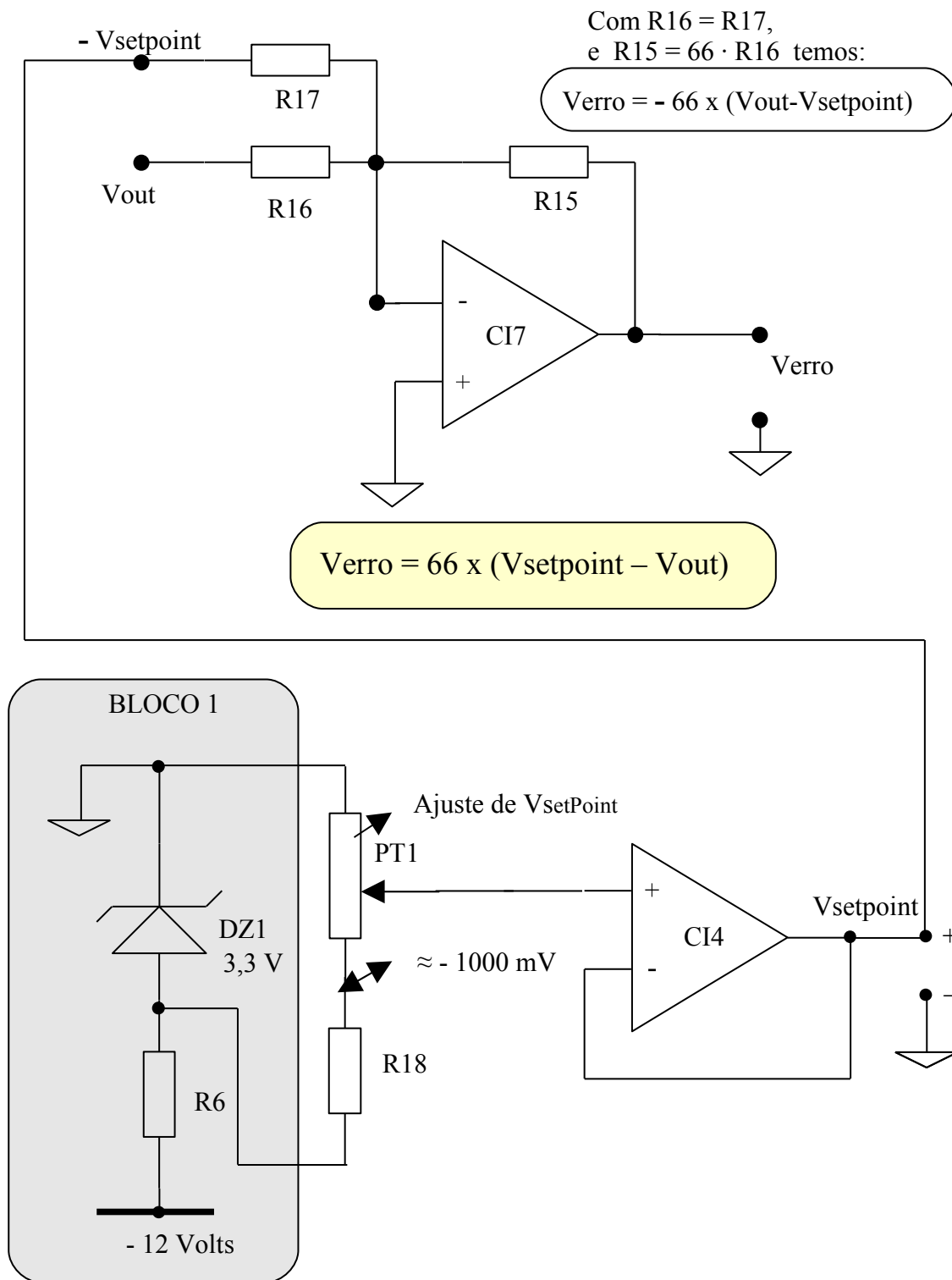


Figura 11 – Circuito de geração do *set-point* acoplado ao amplificador de erro.

Teste o circuito verificando se é possível ajustar o set-point entre 0 mV e -1000 mV. Ajuste o set point para aproximadamente - 500 mV e aplique uma tensão próxima de 500 mV em  $Vout$  (510 mV, por exemplo). Verifique se o amplificador de erro esta amplificando a diferença ( $Vsetpoint - Vout$ ) por 66.

Para finalizarmos toda a parte de processamento do sinal e obtermos o sinal do PWM, basta interligarmos os blocos da seguinte forma:

- Conectar o sinal Vout do bloco 1 (Figura 5) no resistor R16 (Fig. 11);
- Conectar o sinal de erro (Verro) obtido com o circuito da Figura 11 no resistor R14 da entrada do amplificador de erro (Fig. 8).

Feito isto, já dispomos de um sinal PWM que é proporcional ao erro medido entre o valor desejado da temperatura (Vset-point) e o valor medido da temperatura (Vout). Podemos testar o funcionamento do circuito ajustando o valor de Vset-point para cerca de 50 °C (ou seja, um valor de -500 mV em Vsetpoint) e observarmos a saída do PWM enquanto esquentamos o transistor com um ferro de solda.

Como o transistor está a temperatura ambiente, e longe da temperatura desejada (que é de 50 °C), o circuito deve estar fora da banda proporcional (que é de  $\pm 5$  °C em torno de 50 °C), e portanto deve estar saturado, fornecendo 100% da potência.

Conforme o transistor aquece, o circuito deve passar pela banda proporcional (deve-se ver o PWM fornecer pulso com pequenos intervalos de tempo no nível baixo, e, gradativamente, conforme a temperatura continua subindo no transistor, o PWM deve cada vez mais diminuir a potência que está fornecendo, com pulsos cada vez mais estreitos, até que quando a temperatura do transistor atinge 55 °C, e o PWM deve ficar cortado (0% de potência fornecida). Ao baixarmos a temperatura no transistor (removendo o ferro de solda), o processo inverso deve ocorrer.