

# CONTROLE DE TEMPERATURA DO RESISTOR DE POTÊNCIA

Emanuel de Cesaro<sup>1</sup>, Rodolfo B. Santos<sup>2</sup>, Welliton Leal<sup>3</sup>

e-mail: emanueldecesaro@hotmail.com, rodolfosantos@alunos.utfpr.edu.br, welliton@alunos.utfpr.edu.br

## NOMENCLATURA

<i>NPN</i>	Negativo-positivo-negativo
<i>BJT</i>	Transistor bipolar de junção
<i>CMRR</i>	Rejeição em modo comum
<i>mV</i>	Mili-volts

## I. INTRODUÇÃO

Este projeto tem por objetivo um controlador de temperatura que mantenha em  $333.15^{\circ}K$  o resistor de potência, baseado totalmente em métodos analógicos, ou seja, sem uso de sistemas microcontrolados.

Deve-se ressaltar que este processo dar-se-á em malha fechada, logo é necessário que o sinal de saída, temperatura em que a planta está submetida, seja comparada com uma referência e assim ações de controle são tomadas para que o valor de temperatura desejado seja alcançado, fazendo-se necessário o envolvimento de circuitos de controle, sensores e condicionamento de sinal.

Será demonstrado os métodos utilizados para obtenção da planta a ser controlada, como deu-se a validação do modelo e os circuitos utilizados.

Para execução do controlador do resistor de potência, foi utilizado um sensor, amplificadores operacionais, e demais componentes eletrônicos, que terão sua explicação detalhada no decorrer deste relatório. O sensor utilizado neste sistema é um PT100, no qual a temperatura é obtida através de um resistor alocado no seu interior, que varia a resistência conforme a temperatura aumenta ou diminui.

Comparando os sensores PT100 a termopares, algumas vantagens são observadas, tais como uma ampla faixa de temperatura abrangente (aproximadamente de  $-73.15$  a  $1123.15^{\circ}K$ ), maior precisão na medição de temperatura, boa permutabilidade e boa estabilidade e longo prazo. Pelo fato de serem extremamente precisos e estáveis, veem sendo muito utilizados em processos laboratoriais e industriais, sobretudo se tratando de motores, geradores e outros equipamentos de tensão elevada. Além disso, pode ser encontrado esse tipo de sensor em processos de refrigeração de alimentos e compostos químicos, produção de bebidas e derivados, além de aquecedores e refrigeradores domésticos.

## II. DESENVOLVIMENTO

O projeto é constituído de módulos que podem ser divididos da seguinte maneira: ponte H, módulo de instrumentação, módulo subtrator, controlador PI e acionamento da carga. Cada etapa possui características individuais que são apresentadas a seguir de forma resumida para uma maior clareza do processo descrito no decorrer do artigo.

### A. Ponte H

O circuito de ponte H tem o objetivo de enviar para o amplificador de instrumentação as saídas  $V_a$  e  $V_b$  para que possa ser calculada a diferença entre os pontos, tendo  $V_a$  com saída constante em relação a alimentação de  $5V$  e o  $V_b$  variante pelo fato da resistência do sensor PT100 alterar conforme a temperatura.

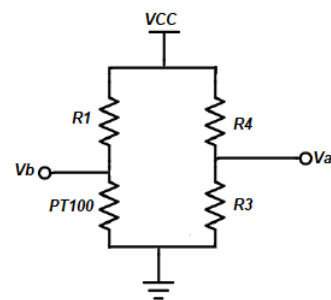


Fig. 1. Circuito ponte H

### B. Módulo de instrumentação

A saída do sensor precisa ser enviada para a malha do controlador PI, esta precisa ser tratada para adequá-la ao circuito. A primeira etapa utilizada para este tratamento é enviar o sinal de saída da ponte H para o circuito amplificador de instrumentação de dois estágios

*1) Amplificador de instrumentação:* Um problema muito relevante no uso de instrumentação analógica com amplificadores operacionais é a presença de uma tensão de modo comum nos terminais do amplificador, que é uma diferença de potencial de natureza ruidosa existente nos terminais do componente que causa alterações no sinal de entrada real. Visando corrigir este problema, foi utilizado o amplificador de instrumentação de duas etapas. Com este circuito é possível aumentar consideravelmente a rejeição de modo comum (atenuar a tensão de modo comum e amplificar o sinal real de entrada) de forma muito mais eficaz que comum amplificador de instrumentação de uma etapa. A figura abaixo mostra o circuito utilizado:

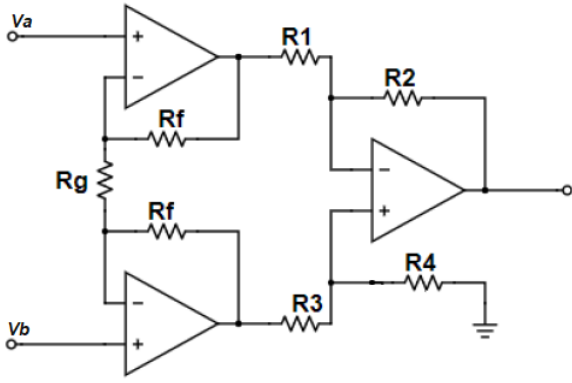


Fig. 2. Amplificador de instrumentação de dois estágios

A taxa de rejeição de tensão de modo comum (CMRR) do circuito acima é dado pela seguinte equação:

$$CMRR = \frac{\frac{1}{2} \left[ \frac{R_2}{R_1} + \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_4}{R_3}} \frac{R_4}{R_3} \right]}{\left[ \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 R_4)} \right]} \quad (1)$$

Como se pode notar pela equação acima, para que a rejeição de modo comum seja máxima,  $R_1 R_4 = R_2 R_3 = 0$ , ou seja,  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ . Assim, para tornar essa razão a mais próxima possível, foi utilizado um resistor variável (trimpot) no lugar de  $R_4$  para efetuar um ajuste na razão anteriormente mencionada. O uso de tal componente se faz necessário devido ao erro tolerado nos valores nominais dos resistores. Assim, aumentando o CMRR, o sinal de saída da instrumentação se torna mais fiel ao sinal de saída do sensor. Além da remoção da tensão de modo comum, a etapa de instrumentação também é utilizada para dar um ganho no sinal do oriunda da ponte H. Como mencionado anteriormente, a saída do sensor trabalha com sinais na ordem de alguns  $mV$ , entretanto, para ser usado na malha de controle, é necessário que ele possua amplitude na ordem de alguns Volts.

O ganho da etapa de instrumentação é dado pela equação abaixo:

$$G = \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \quad (2)$$

### C. Módulo subtrator

O módulo subtrator é necessário para definir o erro entre a saída do módulo de instrumentação e a tensão de referência, aplicadas em  $V_2$  e  $V_1$ , respectivamente.

1) *Amplificador subtrator*: Nesta configuração a tensão de saída é a diferença entre as tensões aplicadas à entrada, multiplicada pelo ganho do amplificador.

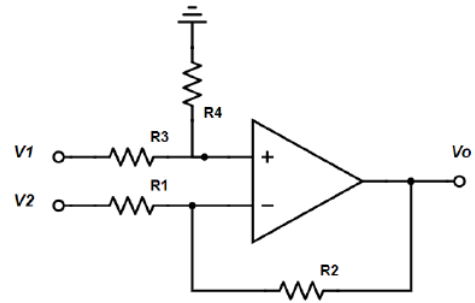


Fig. 3. Amplificador subtrator

A tensão de saída é dada pela equação:

$$V_0 = V_1 \frac{R_4 (R_1 + R_2)}{R_1 (R_3 + R_4)} - V_2 \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

### D. Controlador PI

O sistema de controle é responsável por receber o sinal de erro que é provindo do subtrator, uma dada temperatura que é proporcional à um sinal de tensão, e o sinal de saída do circuito, que é um dado valor de tensão que é proporcional à temperatura presente no copo. Este sinal de erro é a entrada do circuito de controle, qual devido a sua topologia de construção gera um sinal de controle que é utilizado para controlar o que se faz necessário, neste caso a tensão sobre o transistor, que é responsável pelo aumento de tensão no resistor de potência.

A topologia de controle utilizada para o desenvolvimento do projeto é denominada de controle proporcional e integral, conhecido também como controlador PI. Este controlador possui duas ações sobre o sinal de erro, quais são a ação proporcional, que age de forma instantânea no sistema, qual gera um sinal diretamente proporcional ao erro, e a ação de controle integral, que como o próprio sugere, atua sobre a integral do erro, portanto sua ação no sistema não é imediata. [1], [2].

A tensão de saída é dada pela equação:

$$V_0 = \left( -\frac{R_2}{R_1} \right) V_i - \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{R_2 C} \int_0^t V_{in}(t) dt \quad (4)$$

### E. Acionamento da carga

Etapla em que a tensão de alimentação do resistor de potência é controlada pelo transistor, o qual é alimentado pela saída do controlador PI.

1) *Transistor TIP29C*: O Transistor bipolar de junção - BJT (NPN), Seu princípio de funcionamento básico, quando o mesmo é acionado através da tensão de alimentação, é permitir que passe uma corrente por um resistor em sua base, desta forma o próximo componente do circuito é alimentado, no nosso caso uma carga com uma corrente máxima de 0,5A. Para que isso aconteça o transistor necessariamente deve receber uma tensão em sua base, o resistor citado está presente para proteger o transistor de correntes e tensões de surto. Algumas de suas aplicações são em Fontes de alimentação lineares e chaveadas, inversores, controles de potência e amplificadores de áudio.

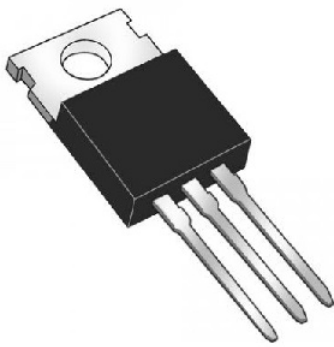


Fig. 4. Transistor TIP29C

### III. CONCLUSÕES

Durante e após a implementação do projeto, verificou-se na sua totalidade que em 3 etapas do circuito haviam parâmetros determinantes que se alterados afetavam direta ou indiretamente alguns fatores como a tensão da carga, velocidade e temperatura em que o sistema estabilizava, os mesmos foram considerados importantes na qualidade dos resultados finais, parâmetros identificados:

#### A. O Equilíbrio da Ponte

O Equilíbrio das resistências da ponte afetava a diferença de tensão entre  $V_a$  e  $V_b$  que saíam de cada ramo, a mesma após o ganho e comparação no circuito de instrumentação, quando era comparada no subtrator com a referência, influenciava no erro de saída do subtrator e foi verificado que:

- Quanto mais próximo porém sempre menor a resistência  $R_3$  estiver da resistência do sensor, menor será a diferença entre as tensões  $V_a$  e  $V_b$ , menor será a saída do circuito de instrumentação que quando comparada com a referência, maior vai ser o erro inicial na saída do subtrator assim que o circuito é ligado, enquanto uma tensão bem alta será mandada pra carga nos segundos iniciais aquecendo-a mais rápido, tornando o sistema mais rápido no início, porém gerando um overshoot tornando-o também mais oscilatório o que ocasiona uma demora um pouco maior para o sistema alcançar a estabilidade na tensão na carga x temperatura final.
- Quanto maior a diferença de  $R_3$  com a resistência do sensor, maior será a diferença entre as tensões  $V_a$  e  $V_b$ , maior será a saída do circuito de instrumentação que quando comparada com a referência, menor vai ser o erro inicial na saída do subtrator, gerando uma tensão inicial mais baixa e controlada na carga, aquecendo-a com mais lentidão porém tornando o sistema menos oscilatório e alcançando a estabilidade da tensão na carga x temperatura final com mais facilidade.

Para obtermos o controle sobre esse fator, adicionarmos uma resistência variável em série com a resistência  $R_3$  da ponte para ser possível alterar esse parâmetro e equilibrarmos a ponte da forma desejada.

#### B. Tensão de Referência e Janela de Operação do Erro no Subtrator

Buscando melhorar nossa resposta na tensão de saída, observamos que o erro na saída do subtrator podia ser melhorado, inclusive determinando uma janela de uma tensão máxima até uma tensão mínima em que ele ia operar até que estabilizasse a temperatura, primeiro foi notado que a tensão de referência no circuito subtrator tem efeito diretamente proporcional há tensão final na carga, quanto maior a tensão de referência, maior a tensão na carga, outro ponto foi que o erro inicia em um valor máximo e vai diminuindo até atingir um valor mínimo o qual se mantém estável, ou seja, existe uma janela em que esse erro vai operar, o valor das tensões máxima e mínima podem ser definidos a partir do ganho no circuito de instrumentação de duas etapas e do valor da referência, a diferença desses dois valores que vai gerar essa janela ao longo do tempo, sua variação altera a tensão na carga da seguinte forma:

- O Valor máximo do erro, significa início do aquecimento e tensão máxima na carga.
- O Valor mínimo do erro, significa temperatura e tensão na carga estáveis.

Um problema identificado que pode ocorrer é quando a saída do circuito de instrumentação for grande suficiente para se aproximar do valor da referência, essa diferença de tensão vai ser pequena ao ponto de que a tensão da carga não vai ser o suficiente nem pra aquecer mais e muito menos manter a temperatura atual na carga, por isso é necessário tomar cuidado com a saída do subtrator ou com os ganhos possíveis seguintes no Controlado PI.

Por limitações de projeto e componentes mesmo com um ganho variável de até 210 vezes no circuito de instrumentação a tensão que chegava no subtrator não podia ser aumentada mais, para obtermos o controle sobre esse fator da janela de operação, adicionamos um potenciômetro para controlarmos a tensão de referência tornando possível aumentar e diminuir a mesma de acordo com o nosso desejo, quanto maior a tensão de referência, maior o erro e maior a tensão de na carga, a referência foi alterada para 5.5V, a nossa janela de operação do erro teve valores máximos aproximados de até 2.5/3V e seu valor mínimo quando alcançado a temperatura desejada estabilizava em exatamente 1V, ou seja, obtivemos uma janela de operação do erro controlável de até 2V mantendo a referência nesse valor.

#### C. Tensão na Carga

Foi identificado como o parâmetro mais importante responsável no controle da temperatura, seu controle indireto ocorreu nas duas etapas mencionadas acima e seu controle direto ocorreu no Controlador PI o qual foi testado com pelo menos 3 valores de ganhos iguais de 3, 4 e 5 vezes tanto no Controle Integral quanto no Controle Proporcional afinal a tensão que chegava nessa etapa era bem baixa, o resultado mais aproximado da temperatura desejada de 330.15°K foi com o ganho  $K = 4$ , atingindo um pico de tensão de pouco mais de 9V, não excedendo a limitação de projeto com corrente máxima de  $I = 0,5A$  na carga, e estabilizando a tensão entre 6.5/7V.

Por meio de um termômetro digital com interface pelo

computador, a variação de temperatura em função do tempo foi medida a cada 2s, até o valor em regime que em todos os testes foi encontrado com até 200 amostras coletadas pelo software do multímetro. Os ajustes e os resultados obtidos podem ser verificados abaixo:

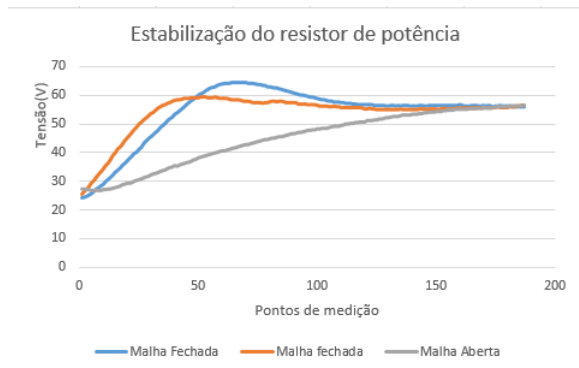


Fig. 5. Gráfico de estabilização do resistor de potência com o tempo

#### REFERÊNCIAS

- [1] P. J. Antonio, *Eletronica Analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos*, 6nd ed., Bookman, Porto Alegre, R.S, 2003.
- [2] N. S. Nise, *Engenharia de sistemas de controle*, 6nd ed., LTC, Rio de Janeiro, R.J, 2012.
- [3] A. P. Malvino, *Eletrônica*, 2nd ed., Ed.McGraw-Hill, São Paulo, S.P., 1986.