

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CONTROLE ELÉTRICO DA TEMPERATURA DO FLUIDO DE UM
TROCADOR DE CALOR**

Área de Engenharia Elétrica

por

Hélcio Benedito Rodrigues de Moraes

Prof. Dr. João Roberto Moro
Orientador

Itatiba (SP), Novembro de 2004

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTROLE ELÉTRICO DA TEMPERATURA DO FLUIDO DE UM TROCADOR DE CALOR

Área de Engenharia Elétrica

por

Hélcio Benedito Rodrigues de Moraes

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Prof. Dr. João Roberto Moro

Itatiba (SP), Novembro de 2004

SUMÁRIO

2. OBJETIVOS.....	10
3. Objetivo Geral.....	10
4. Objetivos Específicos.....	10
5. METODOLOGIA.....	11
6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	11
8. SENSORES DE TEMPERATURA.....	11
9. Termopares.....	12
14. Termistores.....	16
15. Bimetálico.....	18
16. RTD.....	18
17. Semicondutor.....	20
18. AMPLIFICADOR OPERACIONAL.....	21
19. CONCEITO BÁSICO.....	21
20. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	22
21. O AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO COMPARADOR.....	23
22. TEMPORIZADOR 555.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparador básico: (a) Termopar de uma simples junção ; (b) Circuito de termopar para medida da diferença de temperatura T1-T2.....	12
Figura 2. Intervalo de temperatura e diferença de potencial de saída para alguns termopares [1]. Fonte: Adaptado de Ferreira (2001).....	14
Figura 3. Curva característica de um termistor tipo NTC [3]. Fonte: Adaptado de Bosch (2002).....	17
Figura 4. Características de tensão e corrente do sensor de temperatura LM135. Fonte: Adaptado de National (2002).....	20
Figura 5. Representação simbólica de um amplificador operacional. Fonte: Adaptado de Malvino (1995).....	21
Figura 6. Comparador básico: (a) Amplificador operacional como comparador ; (b) característica de transferência do comparador.....	24
Figura 7. Comparador com alimentação simples: (a) Amplificador operacional como comparador ; (b) característica de transferência do comparador.....	24
Figura 8. Comparador regenerativo Schmitt Trigger: (a) Comparador não inversor ; (b) função de transferência do comparador mostrando pontos de comutação - histerese.....	25
Figura 9. Comparador regenerativo Schmitt Trigger inversor. Fonte: Adaptado de Malvino (1995).....	26
Figura 10. Diagrama simplificado do circuito integrado 555. Fonte: Adaptado de Malvino (1995).....	27
Figura 11. Características do 555: (a) Circuito integrado 555 configurado como temporizador; (b) Formas de onda do circuito integrado 555.....	27
Figura 12. Utilização do pino 4 do CI 555 para reset.....	29
Figura 13. Sistema hidráulico montado para refrigeração de um reator de filamento quente utilizado para produção de diamante.....	30
Figura 14. Modelo do termistor NTC utilizado.....	31

Figura 15. Curva de transferência do termistor utilizado.....	31
Figura 16. Esquema elétrico do circuito de controle de temperatura.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns tipos de termopares.....	13
Tabela 2. Custo de sensores de temperatura e acessórios necessários.....	37
Tabela 3. Custo do conjunto radiador/ventoinha.....	37

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	19
Equação 2.....	22
Equação 3.....	23
Equação 4.....	25
Equação 5.....	25
Equação 6.....	28

RESUMO

MORAES, Hélcio Benedito Rodrigues de,. Controle Elétrico da Temperatura do Fluido de um Trocador de Calor. Itatiba, 2004. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2004.

Na síntese de filmes de diamante pelo processo de deposição por vapor químico (CVD – do inglês Chemical Vapor Deposition) através de reator a filamento quente, é necessário fazer um controle da temperatura para garantir a uniformidade dos filmes crescidos, assim o controle da temperatura do fluido de refrigeração é um fator decisivo. Dentre as várias formas de controle de temperatura, podem ser usados vários tipos de transdutores, objetivando o melhor custo/benefício. Para o desenvolvimento do controle elétrico da temperatura do fluido de refrigeração de um reator para produção de diamante, foi utilizado um termistor tipo NTC, como sensor de temperatura, acoplado ao circuito projetado.

Palavras-chave: Sensor. Controle. Temperatura.

ABSTRACT

In the synthesis of diamond films for CVD - Chemical Vapor Deposition through reactor to hot filament, it is necessary to do a control of the temperature to guarantee the uniformity of the grown films, like this the control of the temperature of the cooling fluid is a decisive factor. Among the several forms of temperature control, several transducers types can be used, aiming at the best cost/benefit. To the development of the electric control of the temperature of the fluid of cooling of a reactor for diamond production, was used a thermistor type NTC, as sensor of temperature, coupled to the projected circuit.

Keywords: *Sensor. Control. Temperature.*

1. INTRODUÇÃO

O controle da temperatura é um tópico importante de pesquisa e desenvolvimento nas indústrias e centros de pesquisa. Esse controle nos ambientes industriais e de laboratórios de pesquisa tem sido de importância predominante em aplicações práticas e torna-se mais relevante com o avanço da tecnologia.

O controle da temperatura da água de refrigeração de um reator a filamento quente é muito importante para o crescimento de filmes de diamante, pois pode auxiliar no controle da temperatura de crescimento dos filmes. Para este controle foi implementado um protótipo similar a um sistema de refrigeração com água utilizando um trocador de calor automotivo, pois o mesmo é de baixa complexidade e confiável. Para o controle da temperatura desejada foi projetado um circuito de baixo custo para acionamento e temporização de uma ventoinha, a qual refrigera o líquido de arrefecimento do sistema. Inicialmente foi realizada uma comparação entre os vários tipos de sensores de temperatura existentes no mercado, e a seguir foi feita a elaboração do projeto do circuito.

2. OBJETIVOS

3. Objetivo Geral

Fazer um controle elétrico da temperatura do fluido de saída de um trocador de calor a fim de conseguir maior estabilidade da temperatura de um reator de filamento quente para produção de diamante.

4. Objetivos Específicos

Para o controle da temperatura do reator em questão, foram traçados alguns objetivos de relevância para o projeto.

- Montar um sistema hidráulico simples, viável e confiável para arrefecimento de um reator de filamento quente utilizado para crescimento de diamante;
- Pesquisar sensores de temperatura confiáveis, de baixo custo e disponíveis no mercado que atendam as características do projeto;

- Projetar um circuito elétrico para o controle de temperatura da água de refrigeração do sistema de arrefecimento.

5. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base em pesquisas de livros, catálogos, revistas e internet. Após desenvolvimento de um sistema hidráulico, de menor custo, para refrigeração da água de um reator para crescimento de diamante, foram pesquisados vários tipos de sensores de temperatura e seus respectivos preços. Tendo determinado o tipo de sensor a ser utilizado e analisado os requisitos para controle da temperatura, foi projetado o circuito elétrico para atender as características desejadas.

6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido tem a seguinte estrutura:

- Fundamentação teórica
- Montagem do sistema hidráulico simples
- Projetar e construir o circuito elétrico para o controle de temperatura da água de refrigeração

7. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Alguns conceitos, tipos, tamanhos e outras características sobre sensores de temperatura devem ser abordados antes da elaboração de um projeto em que se pretende fazer o controle de temperatura. Assim sendo, é apresentado a seguir um breve estudo sobre sensores de temperatura e alguns tipos.

8. SENSORES DE TEMPERATURA

Há vários tipos, formas, tamanhos, utilizações e preços de transdutores. Para a realização do projeto o interesse está nos transdutores de temperatura. Através desses transdutores a temperatura pode ser convertida para a forma de tensão, corrente ou luz. A escolha do sensor pode ser direta ou não, depende de várias características como, por exemplo, a faixa de temperatura de trabalho, a precisão da medida da temperatura ou a tolerância que o sensor oferece. Também deve ser levado em consideração se o objeto o qual será feita a medida da temperatura pode ou não ter contato com o sensor, pois dependendo do tamanho do objeto o sensor pode trocar calor com este. Dependendo do sensor são necessários recursos, como equipamentos ou computadores, para se fazer a aquisição da informação enviada pelo sensor. Alguns tipos de sensores foram estudados, pois para o desenvolvimento do projeto vários tipos poderiam ser utilizados.

9. Termopares

Um termopar é um sensor simples de temperatura que consiste de dois materiais diferentes em contato térmico. O contato térmico, chamado de junção, pode ser feito pela fusão ou solda de dois materiais diferentes. A figura 1a mostra um termopar de uma simples junção. A operação de um termopar é baseado na combinação de efeitos termoelétricos que produzem uma diferença de potencial de circuito aberto quando duas junções são mantidas em temperaturas diferentes. O diagrama clássico de um circuito de um termopar de duas junções é mostrado na figura 1b, onde as junções J1 e J2 são mantidas nas temperatura T1 e T2 respectivamente. A diferença de potencial termoelétrica (V_o) é uma função não linear com a temperatura.

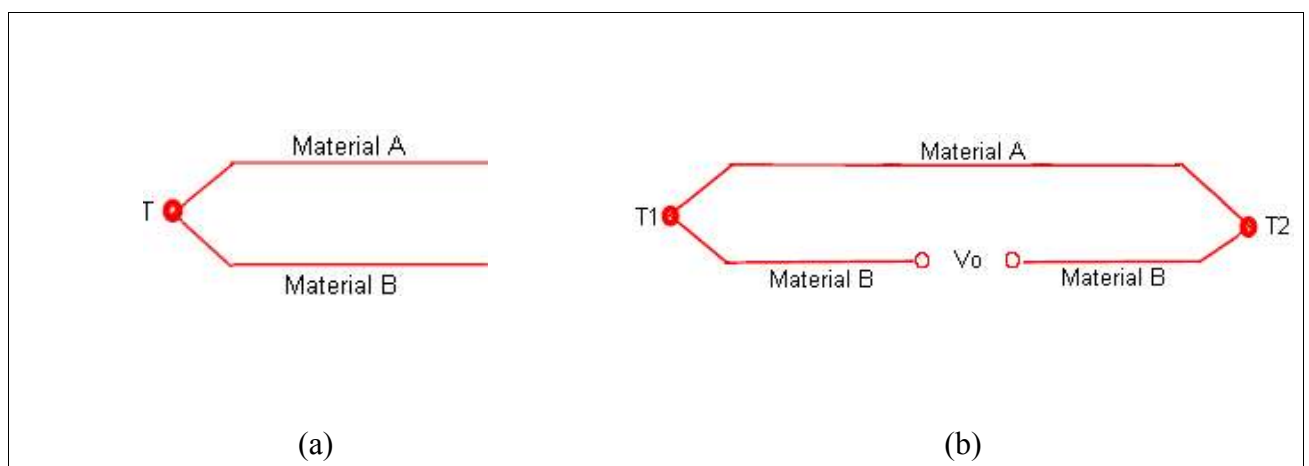


Figura 1. Comparador básico: (a) Termopar de uma simples junção ; (b) Circuito de termopar para medida da diferença de temperatura T1-T2.

A geração da diferença de potencial V_o é devido ao efeito Seebeck [1], que é produzido pela difusão de elétrons através da interface entre os dois materiais. O potencial do material aceitador de elétrons torna-se negativo na região de interface e o material doador torna-se positivo. Assim um campo elétrico é formado pelo fluxo de elétrons na interface. A difusão continua até que uma condição de equilíbrio seja alcançada pela ação do campo elétrico. Desde que as forças de difusão são dependentes da temperatura, o potencial elétrico desenvolvido na junção fornece uma medida desta temperatura.

Os tipos de termopares mais comumente utilizados estão representados por letras. As letras E, J, K, N, R, S, e T são projetadas pelo padrão ANSI (American National Society Instrument - PADRÃO MC 96.1-1975) [2] e os pares de materiais usados nestes termopares são definidos na tabela 1.

Tabela 1. Alguns tipos de termopares.

Tipo	Material positivo	Material negativo
E	Cromel	Constantan
J	Ferro	Constantan
K	Cromel	Alumel
N	Nicrosil	Nisil
R	Platina 13% Ródio	Platina
S	Platina 10% Ródio	Platina
T	Cobre	Constantan

Fonte: Adaptado de Mit Exacta (2004)

A diferença de potencial de saída V_o em função da temperatura para vários tipos mais comuns de termopares é mostrado na figura 2.

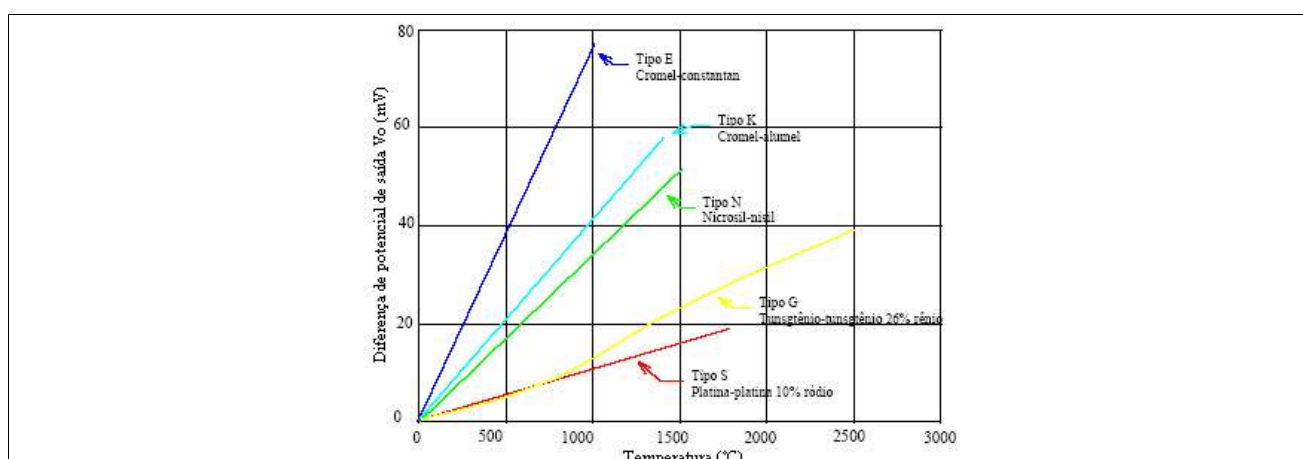


Figura 2. Intervalo de temperatura e diferença de potencial de saída para alguns termopares [1].
Fonte: Adaptado de Ferreira (2001)

Os termopares são fáceis de usar, mas deve-se tomar cuidado com sua simplicidade aparente, pois eles têm alguns detalhes importantes. Eles necessitam de calibração e de um aparelho de leitura preciso das tensões geradas, que não é muito barato. Devem também serem considerados os erros na medida de temperatura. Para cada tipo de termopar existe uma tolerância.

Freqüentemente o termopar convencional é montado dentro de um tubo de proteção com a finalidade de proteger os termoelementos do ataque da atmosfera, do meio em que é introduzido ou ainda por condições de segurança da planta industrial. Usualmente os tubos de proteção são metálicos ou cerâmicos, dependendo das características da atmosfera e da faixa de temperatura.

A seguir serão apresentados alguns tipos de termopares com suas características.

10. Termopar tipo E (Cromel – Constantan)

- 1• Termoelemento positivo (EP): Ni90% Cr10%
- 2• Termoelemento negativo (EN): Cu55% Ni45%
- 3• Faixa de utilização: -270°C a 1000°C
- 4• f.e.m. produzida: -9,835 mV a 76,373 mV

Características: pode ser utilizado em atmosferas oxidantes, inertes ou vácuo, não devendo ser utilizado em atmosferas alternadamente oxidantes e redutoras. Dentre os termopares usualmente utilizados é o que possui maior potência termoelétrica, bastante conveniente quando se deseja detectar pequenas variações de temperatura.

11. Termopar tipo J (Ferro – Constantan)

- 1• Termoelemento positivo (JP): Fe99,5%
- 2• Termoelemento negativo (JN): Cu55% Ni45%
- 3• Faixa de utilização: -210°C a 760°C
- 4• f.e.m. produzida: -8,096 mV a 42,919 mV

Características: pode ser utilizado em atmosferas neutras, oxidantes ou redutoras. Não é recomendado em atmosferas com alto teor de umidade e em baixas temperaturas (o termoelemento

JP torna-se quebradiço). Acima de 540°C o ferro oxida-se rapidamente. Não é recomendado em atmosferas sulfurosas acima de 500°C.

12. Termopar tipo K (Cromel – Alumel)

- 1• Termoelemento positivo (KP): Ni90% Cr10%
- 2• Termoelemento negativo (KN): Ni95% Mn2% Si1% Al2%
- 3• Faixa de utilização: -270°C a 1200°C
- 4• f.e.m. produzida: -6,458 mV a 48,838 mV

Características: pode ser utilizado em atmosferas inertes e oxidantes. Pela sua alta resistência à oxidação é utilizado em temperaturas superiores a 600°C, e ocasionalmente em temperaturas abaixo de 0°C. Não deve ser utilizado em atmosferas redutoras e sulfurosas.

O tipo de termopar apresentado a seguir é denominado termopar nobre, por ter como elemento básico a platina.

13. Termopar tipo S

- 1• Termoelemento positivo (SP): Pt90%Rh10%
- 2• Termoelemento negativo (SN): Pt100%
- 3• Faixa de utilização: -50°C a 1768°C
- 4• f.e.m. produzida: -0,236 mV a 18,693 mV

Características: Pode ser utilizado em atmosferas inertes e oxidantes, apresentando uma estabilidade, ao longo do tempo em altas temperaturas, muito superior à dos termopares não constituídos de platina. Seus termoelementos não devem ficar expostos a atmosferas redutoras ou com vapores metálicos. Nunca devem ser inseridos diretamente em tubos de proteção metálicos, mas sim primeiramente em um tubo de proteção cerâmico, feito com alumina (Al₂O₃) de alto teor de pureza (99,7%), comercialmente denominado tipo 799 (antigo 710). Existem disponíveis no mercado tubos cerâmicos com teor de alumina de 67%, denominados tipo 610, mas sua utilização para termopares de platina não é recomendável. Para temperaturas acima de 1500°C utilizam-se tubos de proteção de platina. Não é recomendada a utilização dos termopares de platina em temperaturas abaixo de 0°C devido à instabilidade na resposta do sensor. Em temperaturas acima de 1400°C ocorre um fenômeno de crescimento dos grãos, tornando-os quebradiços.

14. Termistores

Os *termistores* são resistores termicamente sensíveis, cujas características exibem grandes mudanças na resistência com uma pequena mudança na sua temperatura, devido à alteração na concentração de portadores de carga. Esta mudança da resistência com a temperatura pode resultar em um coeficiente negativo da resistência, onde a resistência diminui com um aumento na temperatura (*termistor NTC – Negative Temperature Coefficient*). Quando a resistência aumenta com um aumento na temperatura, o resultado é um coeficiente positivo da temperatura (*termistor PTC – Positive Temperature Coefficient*). A maioria dos metais têm um coeficiente positivo de temperatura. Os termistores são fabricados depositando-se uma pequena quantidade de pasta semicondutora sobre fios de liga de platina. Posteriormente, as unidades são revestidas com um epoxi para a proteção e a estabilização. A natureza do material do termistor possibilita que mudanças mínimas na sua temperatura gerem uma grande mudança na resistência medida, e esta relação é exponencial. Os termistores servem para medições, controle e compensação de variações de temperaturas nas faixas mais baixas. Em geral, são utilizados em uma faixa de -70 até 300°C [3]. São amplamente utilizados como sondas de temperatura em aplicações industriais, em aparelhagem médica, em eletrodomésticos, em instrumentação para investigação científica, no setor automobilístico, em telecomunicações e em aplicações militares. Os termistores PTC são normalmente empregados na proteção de motores elétricos (contra superaquecimentos), em termostatos auto-reguláveis, em detectores de níveis de líquidos, na desmagnetização de cinescópios de televisão em cores e em outras aplicações. Os termistores NTC são utilizados em sistemas de amplitude em osciladores, na supressão de pulsos de corrente produzidos por transiente de comutação, na medição de temperatura de líquidos e outras aplicações. A especificação de um termistor deve incluir seu tipo (NTC ou PTC), sua resistência à temperatura ambiente, que geralmente é 25°C , a tolerância sobre o valor de resistência nominal e a dissipação máxima suportada pelo componente em regime de funcionamento contínuo. Normalmente, os fabricantes fornecem dados sobre a variação da resistência de seus termistores com a temperatura sob a forma de gráficos. Na figura 3 temos um exemplo de uma curva característica de um termistor tipo NTC [4].

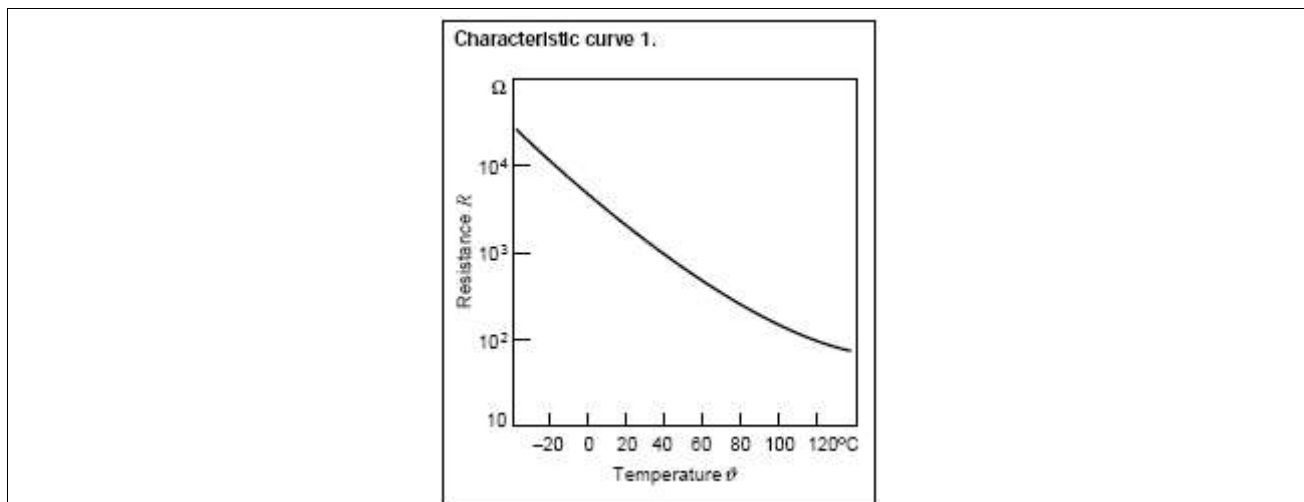


Figura 3. Curva característica de um termistor tipo NTC [3].

Fonte: Adaptado de Bosch (2002)

Atualmente existem no mercado termistores em formato de gota, tubo, disco, anilha ou circuito integrado, e com diâmetros que podem variar entre 0,1 mm a vários centímetros [5].

Termistores trabalham tipicamente dentro de uma faixa de temperatura relativamente pequena, comparada a outros sensores de temperatura, e podem ser muito precisos e estáveis dentro dessa faixa. A estabilidade de um termistor é a habilidade que ele tem para reter as características especificadas depois que este é submetido a condições de testes ambientais ou elétricos.

Em algumas aplicações uma precisão de 1 °C na medição da temperatura é suficiente, ao passo que em outros se exige uma precisão da ordem do décimo ou, até mesmo, do centésimo de grau. Por outro lado, o circuito que faz a leitura do sinal proveniente do termistor pode ser mais ou menos complexo, por vezes envolvendo mesmo condicionadores de sinal e placas de aquisição de dados para digitalização da informação e processamento em computador.

A temperatura de referência padrão para um termistor quando ele está sem carga (potência zero), é normalmente 25°C. Os fabricantes de termistores sempre informam o valor da resistência para uma certa temperatura.

A temperatura máxima operacional de um termistor, é a temperatura máxima do corpo desse termistor à qual ele operará em um período de tempo com estabilidade aceitável de suas características. Esta temperatura é o resultado de aquecimento interno ou externo, ou ambos, e não deve exceder o valor máximo especificado pelo fabricante.

15. Bimetálico

O bimetálico, ou par bimetálico, é o nome dado ao conjunto de duas lâminas metálicas de materiais diferentes, unidas uma sobre a outra. Cada material possui um coeficiente de dilatação diferente. Portanto, quando o bimetálico é aquecido, um dos materiais do qual ele é composto dilatará mais do que o outro. Isso fará com que ocorra uma pequena envergadura no bimetálico. Este pode ser constituído com lâminas paralelas ou enroladas (em forma de espiral ou helicoidal) dependendo da aplicação. São geralmente utilizados em termostatos para geladeira, ferro automático de passar roupa, alarmes contra incêndio, termômetros para altas temperaturas entre outras aplicações. Uma limitação desse tipo de sensor é que quando este é usado como chave, ele não possui uma faixa de temperatura grande para trabalho.

Os termostatos feitos com bimetálicos são sensores de baixo custo, simples, seguros e não necessitam de uma fonte de tensão ou corrente elétrica para que possam atuarem no controle de temperatura de um determinado sistema.

16. RTD

A distinção entre termo-resistência e termistor prende-se ao tipo de material utilizado na sua construção. A diferença é que as termo-resistências (RTD – Resistance Temperature Detector) utilizam materiais condutores como o ouro, a prata, a platina, o cobre e o níquel, enquanto que os termistores utilizam misturas semicondutoras de magnésio, níquel, cobalto, ferro, cobre, titânio [6]. A platina, entretanto, é o metal mais utilizado na construção de RTDs. Uma película fina da platina ou de um fio de platina é depositada em um material cerâmico e selado. A resistência mais baixa praticamente usada de RTDs é 100 ohm em 0°C. A faixa de temperatura de operação é de -220°C a 850°C. RTDs têm um erro de autoaquecimento que depende da potência elétrica dissipada [7].

RTDs trabalham no princípio físico do coeficiente de temperatura de resistência elétrica de metais. Eles são quase lineares dentro de uma faixa extensiva de temperaturas e podem ser feitos pequeno o bastante para terem tempos de resposta de uma fração de segundo. RTDs necessitam que circule por eles uma corrente elétrica para produzir uma diferença de potencial no sensor para que seja possível medir a temperatura por meio de um dispositivo.

De uma forma aproximada, mas nem por isso muito longe do real, a variação da resistência elétrica de um metal em função da temperatura pode ser representada pela expressão:

$$R(t) = R_0 (1 + at)$$

Equação 1

onde:

R(t): Resistência elétrica à temperatura "t";

R₀: Resistência elétrica à temperatura de 0°C;

a: Coeficiente de variação da resistência elétrica em função da temperatura;

t: Temperatura, medida em °C;

Um estudo mais detalhado mostra que o coeficiente "a" varia em função da temperatura, e esse fato deve ser considerado nos termômetros de resistência, principalmente quando os mesmos são utilizados para medição em um intervalo de temperatura acima de 100°C. Dentre os metais, aqueles que se mostraram mais adequados para a utilização na termometria de resistência são:

- Liga de Rh99,5% x Fe0,5%: utilizado para medição de temperatura na faixa de 0,5K a 25K (-272,65°C a -248,15°C);
- Cobre: utilizado para medição de temperatura na faixa de 193,15K a 533,15K (-80°C a 260°C). Possui uma linearidade de 0,1°C em um intervalo de temperatura de 200°C. Entretanto, sua baixa resistência à oxidação limita a sua faixa de temperatura de utilização.
- Níquel: utilizado para medição de temperatura na faixa de 213,15K a 453,15K (-60°C a 180°C). Os principais atrativos na sua utilização são seu baixo custo e alta sensibilidade. Sua principal desvantagem é a baixa linearidade.
- Platina: utilizado para medição de temperatura na faixa de 25K a 1235K (-248°C a 962°C). É o metal mais utilizado na construção de termômetros de resistência, pela sua ampla faixa de utilização, boa linearidade e melhor resistência à oxidação. Suas características serão apresentadas com mais detalhes a seguir.

As termo-resistências por apresentarem excelentes características tornaram-se um dos mais utilizados sensores de medição de temperatura em uma ampla faixa de utilização em processos industriais. São também um dos principais sensores padrões em laboratórios de calibração.

Atualmente existem alguns tipos de resistências de platina como: PT 25,5Ω; PT100Ω; PT 130Ω; PT 500Ω .O mais conhecido e usado industrialmente, e em laboratórios é o PT 100Ω a 0°C.

Para melhor compreensão de seu funcionamento é citado a seguir um exemplo muito simples e de fácil raciocínio. Para uma termo-resistência PT 100, resistência de 100 ohm na temperatura de 0°C, para a variação de 2,6°C a resistência varia 1 ohm. Ou seja, quando a temperatura do PT 100 estiver a 26°C, sua resistência estará com 110 ohm.

17. Semicondutor

Existem sensores de temperatura que estão na forma de circuitos integrados e alguns possuem configurações para uso em aplicações específicas. Existem tipos analógicos com saída de tensão ou saída de corrente e os de saída digital para uso com microcontroladores.

O sensor semicondutor de temperatura mais simples é o diodo de silício. Este funciona como um resistor cuja resistência varia com a temperatura. Há diodos específicos para serem utilizados como sensor de temperatura. Estes podem ser utilizados como sensor de temperatura onde não é requerida boa sensibilidade. O diodo polarizado diretamente exibe uma queda de tensão de aproximadamente 0,1 V para cada grau Celsius de aquecimento. Como desvantagem ele requer um bom milivoltímetro para a leitura direta, ou então de um amplificador linear.

Fazendo uma comparação entre vários fabricantes, percebe-se que os sensores semicondutores de temperatura trabalham tipicamente numa faixa de temperatura de -50 a 150 °C podendo em alguns casos atingir 200 °C. A figura a seguir mostra a relação entre a tensão e a corrente para três temperaturas distintas do circuito integrado LM135 fabricado pela National[8].

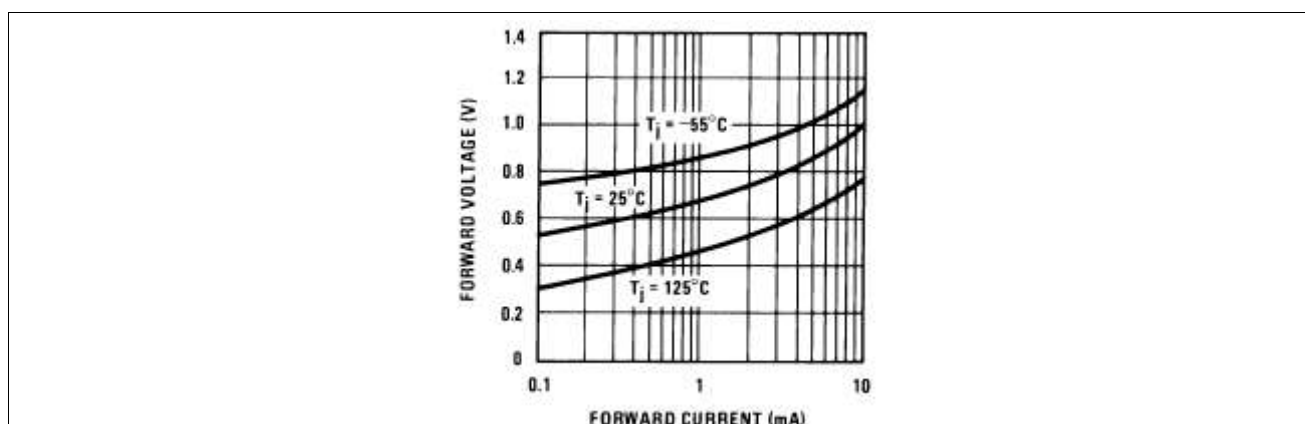


Figura 4. Características de tensão e corrente do sensor de temperatura LM135.
Fonte: Adaptado de National (2002)

O sensor de temperatura integrado é ideal para aplicações remota desde que ele age como fonte de corrente constante e como resultado, a resistência dos fios de ligação não afeta a medida. Eles podem ter extensivos circuitos processadores de sinais. Isso elimina a necessidade de circuitos de compensação ou linearização. Também com a integração é eliminada a utilização de comparadores ou conversores A/D para conversão de sinais analógicos em saídas digitais.

A tecnologia de CIs semicondutores possibilita que esses dispositivos sejam produzidos eficazmente, com baixo custo e tenham propriedades de se conectarem facilmente com muitos outros tipos de dispositivos semicondutores, como amplificadores, reguladores de potência e microcomputadores. Estes sensores têm faixas de medida de temperatura que são pequenas comparadas a termopares e RTDs, mas eles são bastante precisos.

18. AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Amplificadores operacionais são circuitos bastante utilizados em instrumentação analógica, permitindo a execução de uma série de operações matemáticas como soma, multiplicação, comparação e integração entre outras, com elevados níveis de precisão. A sua construção é feita em circuitos integrados, como o LM741, e serão considerados como blocos neste trabalho, uma vez que sua implementação interna não é o objetivo, mas sim as suas características e uma das aplicações.

19. CONCEITO BÁSICO

Um amplificador operacional tem a representação simbólica dada pela figura 5 abaixo.

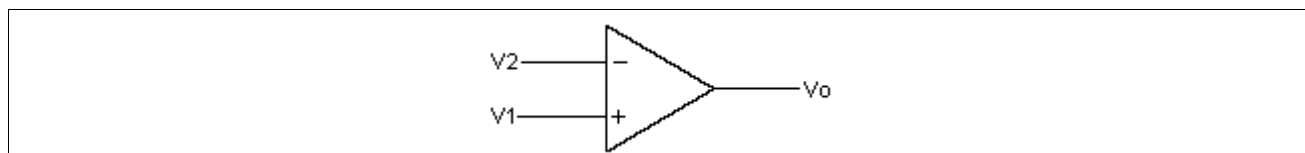


Figura 5. Representação simbólica de um amplificador operacional.
Fonte: Adaptado de Malvino (1995)

Como observado na figura, os amplificadores operacionais possuem basicamente uma entrada inversora $V2(-)$, uma entrada não inversora $V1(+)$ e uma saída (V_o).

Considerando **A** o ganho, a relação entre as tensões V_2 e V_1 aplicadas nas entradas e a saída V_o é dada por:

$$V_o = A (V_1 - V_2) \quad \text{Equação 2}$$

Ou seja, é um amplificador linear cuja tensão de saída é proporcional à diferença entre as tensões aplicadas nas entradas.

20. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Um amplificador operacional ideal teria alguns parâmetros nulos e outros infinitos. Como isto não se consegue na prática, alguns são bastante baixos e outros são bastante altos para uma aproximação com o ideal. Alguns desses parâmetros estão relacionados a seguir:

- **Ganho (A):** no amplificador operacional ideal seria infinito. Na prática, valores como 200 000 são usados.
- **Impedância de entrada:** infinita no amplificador operacional ideal. Na prática, valores como 10 M Ω são possíveis (isto significa que o amplificador não consome corrente pelas entradas).
- **Impedância de saída:** nula no amplificador operacional ideal. Valores como 75 Ω são usados na prática, significando ausência de queda de tensão interna na saída.
- **Resposta de frequência:** de zero ao infinito no amplificador operacional ideal. Na prática escolhem-se tipos com resposta bastante acima da frequência na qual irão operar para dar uma aproximação do ideal.
- **Relação de rejeição em modo comum:** este parâmetro é mais conhecido pela sigla CMRR (do inglês - Common Mode Rejection Ratio). Conforme igualdade apresentada na equação 2, um amplificador operacional ideal tem saída nula se as entradas são iguais. Nos circuitos práticos, há sempre uma pequena saída com as entradas iguais, condição esta chamada de modo comum. A condição usual, isto é, com tensões de entrada diferentes, é chamada modo diferencial. E o parâmetro é dado pela relação, expressa em decibéis, dos ganhos em ambas condições por $CMRR = 20 \log (\text{ganho modo diferencial} / \text{ganho modo comum})$. Um circuito ideal teria CMRR infinito.

21. O AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO COMPARADOR

O amplificador operacional é sem dúvida um componente valioso na construção de diversos circuitos lineares, dentre os quais podem ser destacados os amplificadores somadores e os amplificadores de instrumentação.

Sua versatilidade permite que seja utilizado para outras aplicações também importantes na engenharia, que são os circuitos de funcionamento não linear. O mais simples destes circuitos é o comparador, um dispositivo que comuta sua saída para um entre dois níveis de tensão, baseado na comparação entre as tensões nos seus terminais de entrada.

Os comparadores são bastante utilizados como conversores de sinais analógicos para sinais digitais, servindo de ponte entre os circuitos digitais e os analógicos.

Quando ligamos um amplificador operacional sem resistores de realimentação, como mostra a figura 6a, obtem-se um comparador na sua forma mais simples. Quando a entrada inversora está aterrada, uma pequena tensão de entrada é suficiente para saturar o amplificador operacional. Se A é o ganho de tensão diferencial do amplificador operacional, a tensão mínima de entrada que produz a saturação é dada pela equação:

$$V_{in} = V_{sat} / A \qquad \text{Equação 3}$$

Se as tensões de alimentação forem de $\pm 15V$, então a variação de saída é de aproximadamente $-13,5V$ a $13,5V$. Como para o amplificador operacional LM741 o ganho de tensão de malha fechada é tipicamente de 100.000, a tensão de entrada necessária para produzir a saturação positiva é $V_{in} = 135 \mu V$ [9]. Esse valor é tão pequeno que o gráfico da figura tem quase uma transição vertical. Como pode ser visto, uma pequena tensão de entrada satura o amplificador operacional. Com isso, a transição entre a saturação negativa e a positiva pode ocorrer na presença de um ruído elétrico quando a tensão de entrada estiver próxima da tensão de transição, neste caso com valor igual a zero.

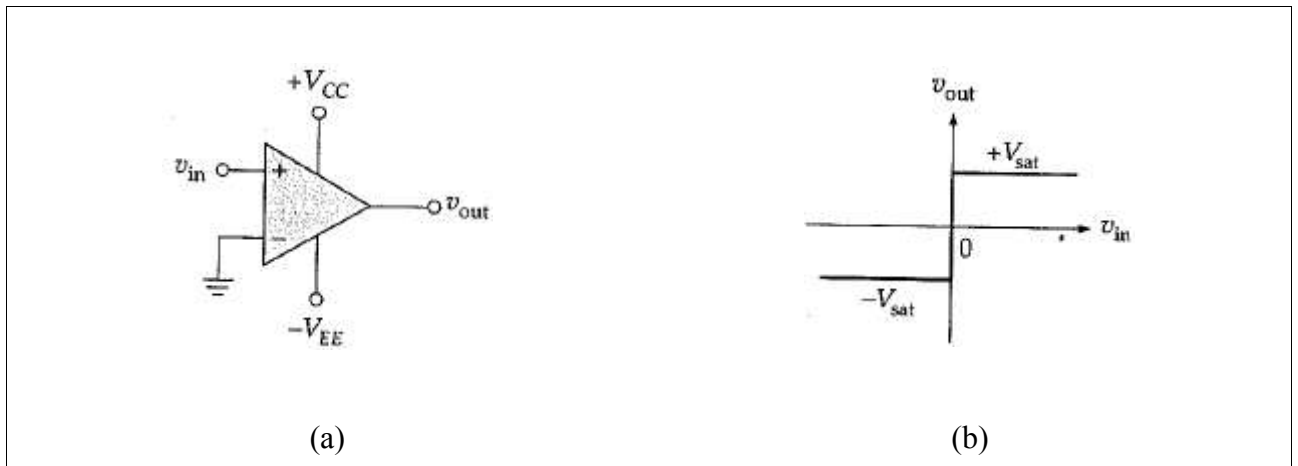


Figura 6. Comparador básico: (a) Amplificador operacional como comparador ; (b) característica de transferência do comparador.

O amplificador operacional LM741 pode funcionar sem a fonte de alimentação negativa, bastando referenciá-la ao ponto comum (terra) como mostra a figura. Assim, para uma tensão de alimentação V_{CC} igual a 15 V, a saída varia aproximadamente de 1,5 V até aproximadamente 13,5 V. A figura 7b mostra a característica de transferência para um comparador com tensão de referência V_{ref} diferente de zero, neste caso um valor positivo.

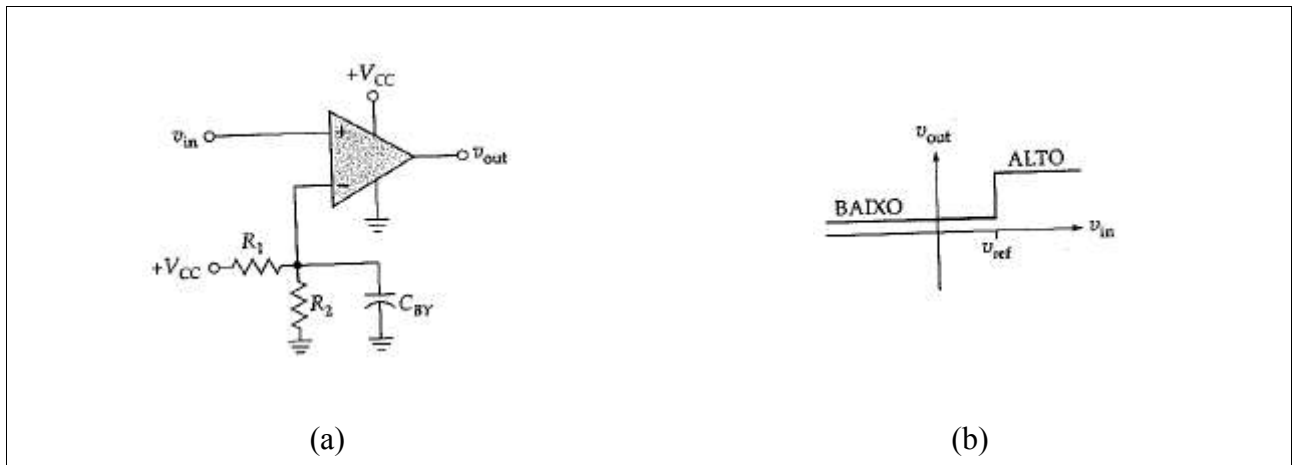


Figura 7. Comparador com alimentação simples: (a) Amplificador operacional como comparador ; (b) característica de transferência do comparador.

A tensão de referência pode ser modificada alterando-se o valor dos resistores R_1 ou R_2 , adequando o nível de tensão desejado para as características de projeto.

Embora o circuito da Figura 7a realize a comparação entre dois sinais, ele possui pouca imunidade a ruídos, podendo ser inadequado para aplicações digitais. Uma solução para este problema é alcançada com o circuito da Figura 8a, o comparador regenerativo Schmitt Trigger, pois

este foi concebido com base no princípio da histerese. O Schmitt Trigger é um tipo especial de comparador que altera abruptamente o nível de tensão de saída conforme alteração na tensão de entrada V_{in} em dois níveis distintos.

A histerese define para este circuito uma faixa de tensões dentro da qual não pode haver chaveamento do sinal de saída, ainda que a tensão de entrada oscile ligeiramente acima e abaixo do valor da tensão de referência. Há portanto um ponto de comutação inferior (LTP – do inglês Lower Trip Point) ao nível de referência e um ponto de comutação superior (UTP – do inglês Upper Trip Point). Esses pontos de comutação são níveis de tensões de entrada em que a tensão de saída muda de estado. A função de transferência para um comparador Schmitt Trigger com alimentação simétrica é mostrada na Figura 8b.

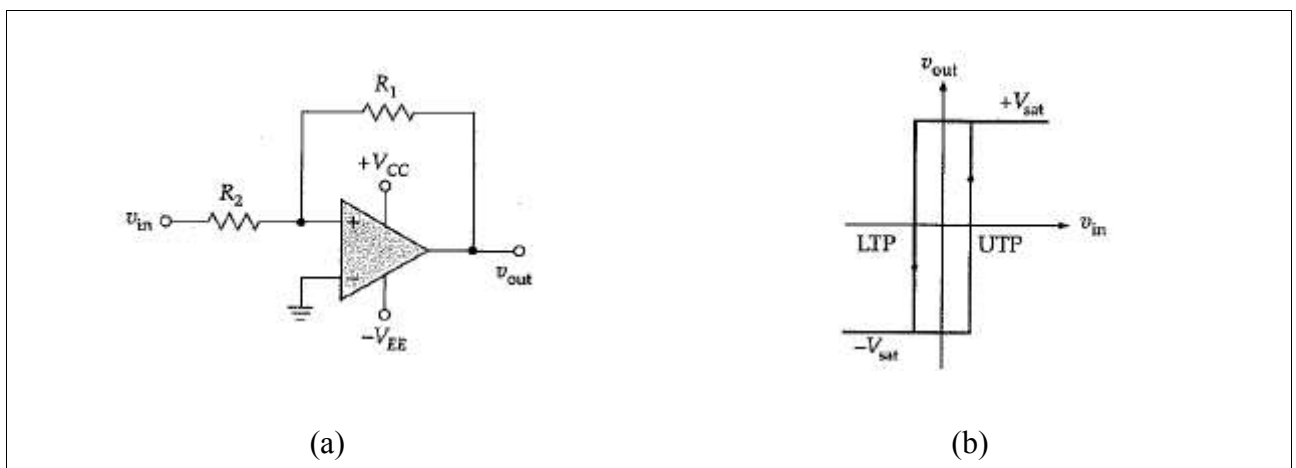


Figura 8. Comparador regenerativo Schmitt Trigger: (a) Comparador não inversor ; (b) função de transferência do comparador mostrando pontos de comutação - histerese.

Os pontos de comutação inferior e superior podem ser calculados através da equação abaixo, e o valor em módulo de ambos são iguais, sendo UTP positivo e LTP negativo [10]. Portanto, para UTP tem-se:

$$UTP = (R2/R1) \times V_{sat} \quad \text{Equação 4}$$

A equação anterior faz referência ao comparador não inversor da figura 8a. Para o caso do comparador inversor apresentado na figura 9, a equação para se calcular os pontos de comutação é apresentada a seguir:

$$UTP = [R2/(R1+R2)] \times V_{sat} \quad \text{Equação 5}$$

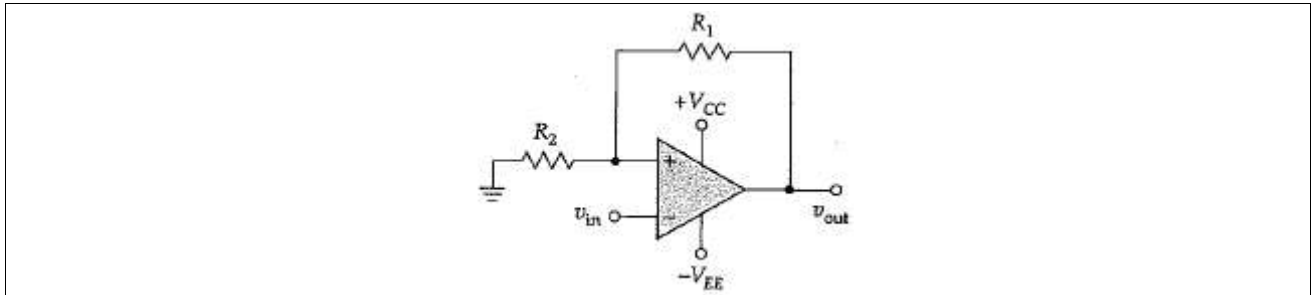


Figura 9. Comparador regenerativo Schmitt Trigger inversor.
Fonte: Adaptado de Malvino (1995)

22. TEMPORIZADOR 555

O temporizador 555 é um circuito integrado que serve para gerar pulsos com duração controlada por uma constante de tempo formada por um capacitor e um resistor externo, ou seja, opera como um oscilador. Ele pode funcionar configurado como astável ou monoestável. A função de um oscilador monoestável é estabelecer intervalos regulares de tempo para ser utilizado como temporizador (timer). Na configuração astável também é estabelecido intervalos regulares de tempo, mas são utilizados como gerador de onda quadrada (por exemplo, clock para estabelecer sincronismo em sistemas digitais), modulador por largura de pulso (PWM – do inglês Pulse Width Modulation), gerador de rampa linear e outras aplicações (Anexo I).

Como o interesse é o uso do circuito integrado 555 configurado como temporizador, serão apresentados a seguir somente detalhes do funcionamento para esta configuração.

Na figura 10, pode-se ver o diagrama interno simplificado de um temporizador com o circuito integrado 555, seus respectivos pinos de ligação e o resistor R e capacitor C, componentes externos, responsáveis pela constante de tempo.

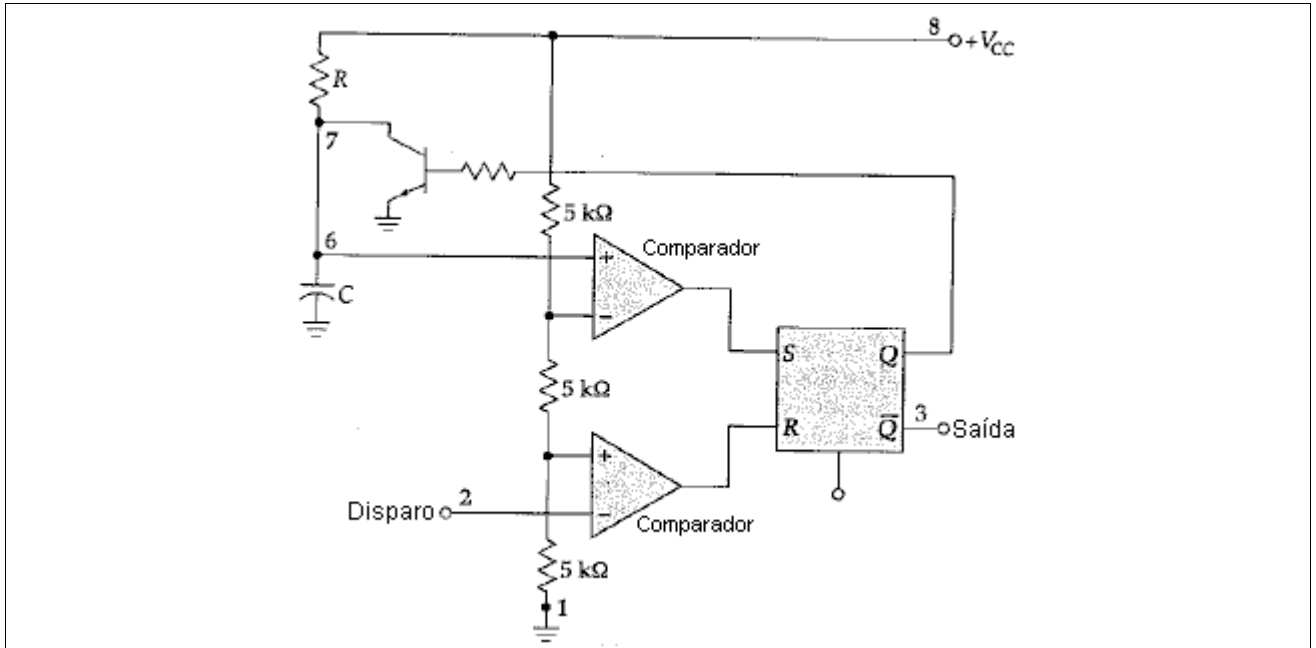


Figura 10. Diagrama simplificado do circuito integrado 555.
 Fonte: Adaptado de Malvino (1995)

A figura a seguir mostra o circuito temporizador e as formas de onda características para esse circuito.

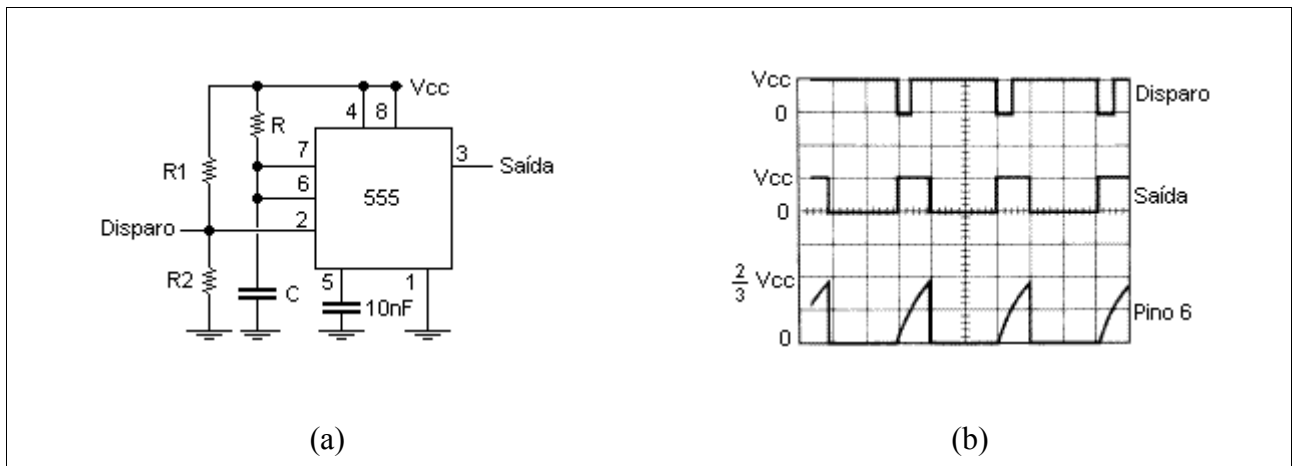


Figura 11. Características do 555: (a) Circuito integrado 555 configurado como temporizador; (b) Formas de onda do circuito integrado 555.

Na condição de espera (em inglês "stand by"), o circuito integrado encontra-se em repouso. É nesta condição que o circuito apresentará menor consumo de energia e é nesta condição também que o pino de disparo (pino 2) ficará com nível lógico alto e o pino 3, com nível lógico baixo. No instante em que o pino 2 for posto em nível lógico baixo, o pino 3 passará ao nível lógico alto

instantaneamente e assim permanecerá enquanto se mantiver o nível lógico baixo no pino 2, pois o comparador inferior da figura 10 faz com que a saída Q do flip-flop deixe o transistor em corte ocorrendo o carregamento do capacitor. Ocorrendo uma nova transição de nível lógico do pino 2, ou seja, retornando ao nível lógico alto, o circuito continuará apresentando o nível lógico alto no pino 3 mas durante o tempo determinado pelo resistor R e o capacitor C. Esgotado este tempo, o pino 3 retornará ao nível lógico baixo e o circuito entrará novamente em espera, pois o capacitor terá se carregado até $2/3$ de V_{cc} ativando o transistor em coletor aberto do pino [11]. O tempo em segundos obtido com a relação entre o resistor R e o capacitor C pode ser calculado através da equação abaixo, considerando o valor do resistor em Ohm e do capacitor em Farad.

$$T = 1,1RC \qquad \text{Equação 6}$$

Ao manter o pino 2 no nível lógico baixo indefinidamente, o pino 3 praticamente se mantém em nível lógico alto, portanto, o conjunto RC só entra em atividade após a transição do nível lógico no pino 2 (de baixo para alto). Impondo ao pino 2 do circuito integrado 555 o nível lógico baixo por um período de tempo superior ao determinado pelo conjunto RC, o pino 3 se mantém no nível lógico alto.

O resistor de polarização R1 mostrado na figura é responsável por manter o pino 2 do circuito integrado 555 sempre em nível lógico alto na ausência do sinal de disparo (nível lógico baixo). Este resistor evita uma possível sobrecarga no circuito gerador do sinal de disparo. Um valor muito alto para R1, tornaria o circuito instável, já um valor muito reduzido, resultaria em consumo elevado de energia e, dependendo das características do circuito gerador de sinal de disparo, o circuito integrado 555 poderia não "reconhecer" os sinais enviados impossibilitando o correto funcionamento deste.

O pino 4 tem a função de "reset". Quando o nível lógico neste pino for alto, o circuito funciona normalmente porém, se o nível lógico for baixo, o circuito fica bloqueado apresentando o nível lógico baixo no pino 3 independentemente do nível lógico presente no pino 2. Desejando utilizar este recurso, deve-se executar a ligação conforme figura abaixo.

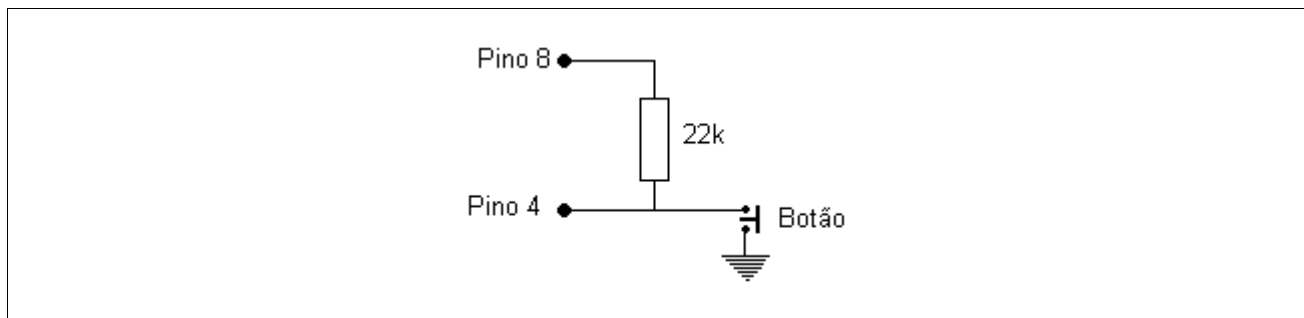


Figura 12. Utilização do pino 4 do CI 555 para reset.

Com o botão normalmente aberto (N.A.), o resistor de 22k mantém o pino 4 em nível lógico alto. Nestas condições, o circuito integrado está funcionando normalmente. Ao pressionar o botão, o pino 4 é conectado ao terra da alimentação (nível lógico baixo) bloqueando assim o funcionamento do circuito integrado sem que seja necessário interromper a alimentação. Nada impede que o acionamento do CI 555 seja feito por um circuito a parte. Deste circuito apenas se exige que os níveis lógicos de saída sejam compatíveis com a alimentação do CI 555.

A conexão do pino 5, nesta configuração, é opcional. Conecta-se um capacitor de 10 nF entre este pino e o terra (nível baixo) a fim de dar mais estabilidade ao circuito, mantendo-o livre de ruídos presentes na fonte de alimentação. Esta é a recomendação do fabricante. Quando se adota a configuração "astável", este pino 5 do circuito integrado 555 é utilizado para promover pequenas variações na frequência de saída.

Existem limites tanto para os resistores R e R1 como para o capacitor C. Os resistores R e R1 não devem ser menores que 1 k Ω e nem maiores que 1 M Ω . O valor limite superior na verdade é determinado pela qualidade do capacitor C. Capacitores com pequenas fugas permitem que este valor seja ampliado. O capacitor que faz parte do conjunto RC não deve ser inferior a 100 pF e nem superior a 1000uF. A tensão de alimentação do circuito integrado 555 pode ser qualquer uma dentro da faixa de 3 a 18 Volts. Outras características podem ser observadas no anexo I.

23. PROJETO

Para elaboração do projeto do circuito elétrico foi considerado que a ventoinha deve ser acionada quando a temperatura da água de refrigeração atingir 40 °C e, a partir disso, um temporizador de 4 minutos desacionará a ventoinha. Com a água nessa temperatura cria-se no reator boas condições para o crescimento de filmes de diamante em substratos de silício. Porém, se a temperatura da água se mantiver na faixa de 35°C a 50°C, é possível obter amostras de filmes de diamante com boas características. Se ocorrer uma falha no acionamento da ventoinha e a temperatura da água de refrigeração continuar aumentando e atingir 60 °C, o circuito desligará a fonte quente (filamentos) não permitindo causar qualquer tipo de dano no reator. A figura 13 representa todo o sistema necessário para a refrigeração do reator, onde o trocador de calor utilizado foi um radiador [12] do automóvel modelo Gol.

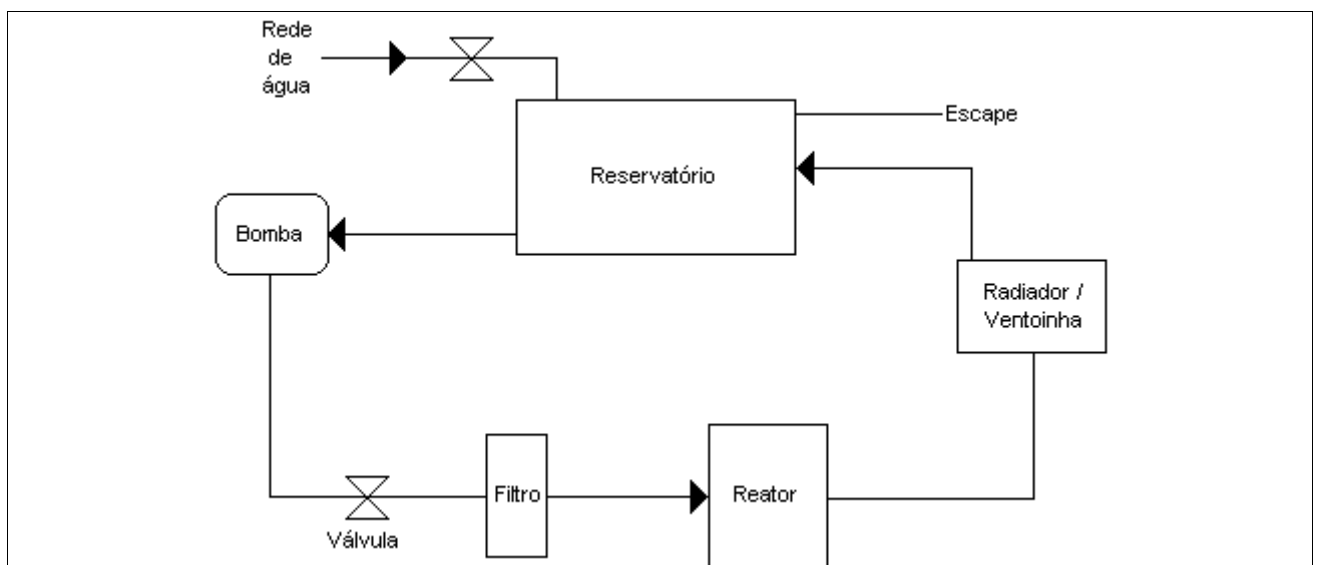


Figura 13. Sistema hidráulico montado para refrigeração de um reator de filamento quente utilizado para produção de diamante.

As figuras 14 e 15 mostram a curva de transferência e o modelo do termistor NTC que foi escolhido como o sensor de temperatura adequado, ou seja, fácil de encontrar, de baixo custo e confiável. Também optou-se por fazer o circuito de controle da temperatura nessas condições e, portanto, decidiu-se por não utilizar circuitos que dependessem de outros equipamentos como computadores, ou de softwares. Uma análise econômica de custo foi feita para realização desse projeto (apêndice A). O esquema elétrico do circuito de controle da temperatura pode ser observado na figura 16.

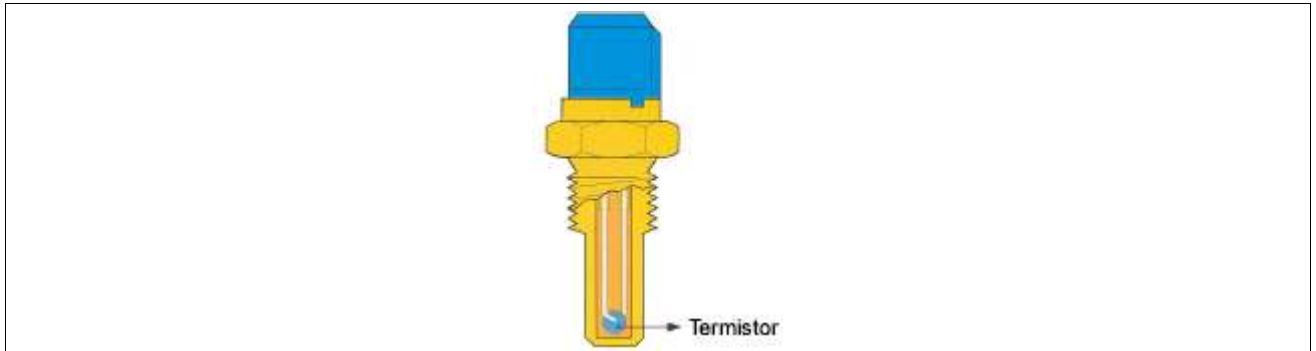


Figura 14. Modelo do termistor NTC utilizado.

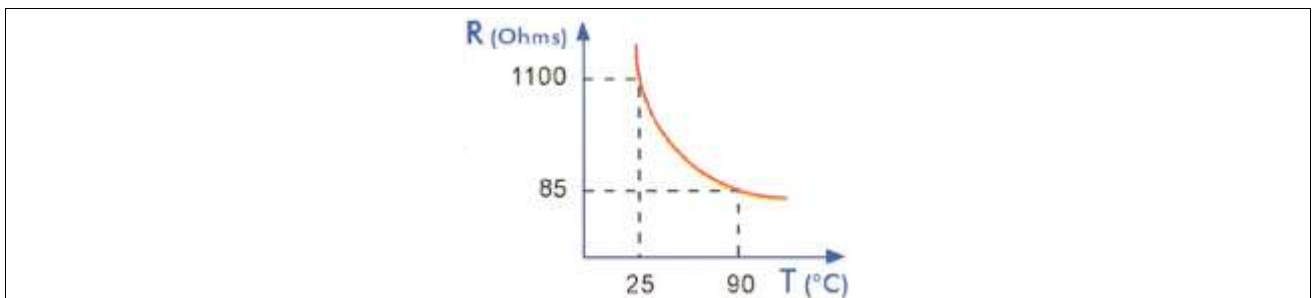


Figura 15. Curva de transferência do termistor utilizado.

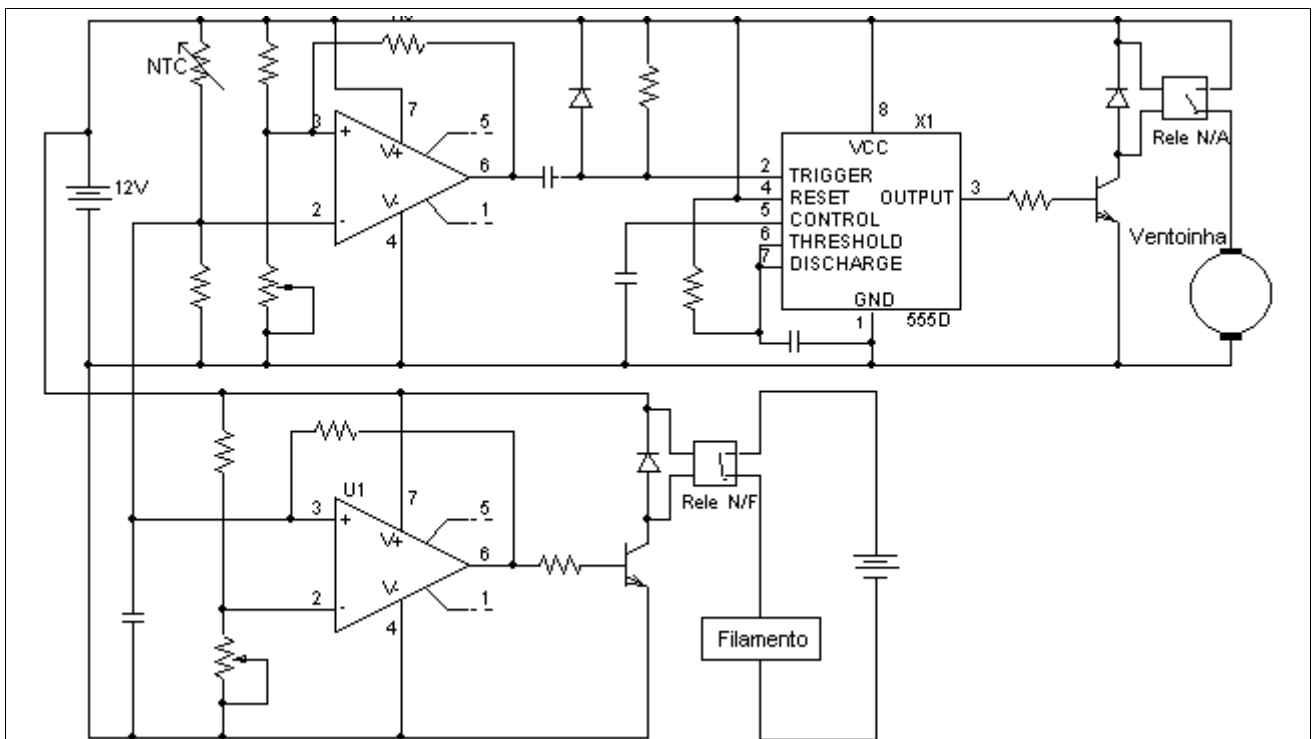


Figura 16. Esquema elétrico do circuito de controle de temperatura.

O circuito foi montado em etapas. Foi utilizado um amplificador operacional configurado como comparador regenerativo Schmitt Trigger que apresentou uma histerese na saída do

amplificador, ou seja, a histerese definiu para este circuito uma faixa de tensões dentro da qual não ocorreu chaveamento do sinal de saída ainda que a diferença entre os sinais de entrada e de referência variasse. Observou-se que a tensão de entrada para chavear a saída do comparador de $+V_{sat}$ para zero apresentou uma tensão de 4,12 V, e para chavear de zero para $+V_{sat}$ apresentou um valor uma tensão de 4,08 V, ou seja, esta diferença da tensão de entrada fez com que não ocorresse intermitência no chaveamento.

O sinal de referência foi aplicado na entrada não inversora do amplificador e o sinal de entrada proveniente do NTC na entrada inversora. O sinal de referência foi obtido por uma malha divisora de tensão com dois elementos, composta de um resistor fixo e um resistor variável (trimpot). O resistor variável permitiu ajustar o nível de tensão com o qual a saída chaveasse quando a temperatura estivesse em 40 °C. O sinal de entrada foi obtido de forma similar ao sinal de referência, mas com o NTC desempenhando a função do trimpot.

Um outro amplificador operacional foi utilizado também como comparador, porém o sinal de entrada foi colocado na porta não inversora. Este comparador foi configurado para ter sua saída chaveada quando a temperatura da água do sistema hidráulico atingisse 60 °C, acionando assim, um relé que por sua vez desliga os filamentos que aquecem o reator de crescimento de diamante.

O primeiro comparador, quando teve sua saída chaveada, disparou o temporizador configurado com um circuito integrado LM555 com um pulso de nível alto para baixo. Esse pulso foi conseguido através de um capacitor que liga a saída do amplificador operacional ao pino de disparo do temporizador. Enquanto a temperatura da água do sistema hidráulico esteve abaixo de 40°C, a saída do comparador permaneceu em nível lógico alto (10,8 V). Nesse momento, é como se o capacitor ligado ao pino de disparo estivesse carregado com zero, pois ele tem aproximadamente o mesmo nível de tensão entre os seus terminais. No momento em que a temperatura ultrapassa 40°C, o terminal do capacitor que está ligado à saída do comparador, fica com tensão próxima de zero volts, fazendo com que por um momento o outro terminal do capacitor também fique com tensão próxima de zero volts. Então, o capacitor começa a se carregar através do resistor conectado entre o pino de disparo e a fonte de 12 V, evitando que o circuito de temporização seja acionado novamente antes que este tenha sido desacionado após o tempo determinado. Pois, para cada chaveamento do comparador, o temporizador seria “resetado” e não faria a temporização.

Quando a saída do temporizador (pino 3) está acionada, a ventoinha do radiador é ligada através de um relé e desligada assim que o tempo de 4 minutos transcorra. Esse tempo pode ser alterado com modificações somente no resistor, somente no capacitor ou em ambos. Inicialmente, o

tempo estimado de temporização foi de 4 minutos. Com o decorrer das pesquisas sobre diamante esse tempo poderá ser alterado de acordo com as necessidades de refrigeração do reator.

24. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os sensores de temperatura são fabricados e fornecidos com limites de erro permissíveis, denominados faixa de tolerância. Na aplicação desse projeto, a tolerância não foi um fator crítico. Levando-se também em consideração o custo, tamanho, estabilidade e simplicidade, decidiu-se utilizar o termistor NTC como sensor de temperatura.

O projeto do circuito montado com o sensor de temperatura NTC, teve um bom desempenho, fazendo o acionamento da ventoinha e a temporização da mesma, e apresentou um bom custo/benefício. Ainda serão feitos experimentos para melhor avaliação do circuito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Chagas Ferreira, Sensores e Condicionamento de Sinais Disponível em: <<http://www.demic.fee.unicamp/~elnatan/ie763/IE763.pdf>> Acesso em: 13 set. 2004.
- [2] MIT EXACTA INDUSTRIA E COMERCIO DE INSTRUMENTOS E SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO LTDA (São Paulo, SP). Sensores de temperatura: catálogo. São Paulo, 2002. 128 p.
- [3] U. S. SENSOR, What is a Thermistor? Disponível em: <http://www.ussensor.com/technical_data.html> Acesso em: 14 set. 2004.
- [4] BOSCH Sensors: Datasheet. Disponível em: <<http://iis4-0.web.legend.net.uk/preview/bosch/sensoren/sensoren.pdf>> Acesso em: 20 set. 2004.
- [5] ELETRICAZINE, Termistores e Fotorresistores. Disponível em: <http://www.eletricazine.hpg.ig.com.br/apo_eletronica_termfototes.htm> Acesso em: 18 set. 2004
- [6] MY SPACE Medidas de Temperatura I. Disponível em: <<http://myspace.eng.br/eng/proc/tp1.asp.html>> Acesso em: 23 set. 2004
- [7] GERSTENHABER, MOSHE Eliminated RTD Self-Heating Errors. Electronic Design. Disponível em: <<http://elecdesign.com/Articles/ArticleID /1260/1260.html>> Acesso em: 13 set. 2004.
- [8] NATIONAL, Datasheet Disponível em: <<http://www.national.com/pf/LM/LM135.html>> Acesso em: 25 set. 2004.
- [9] Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth C., Microeletrônica, 4. ed. São Paulo, Makron Books, 2000.
- [10] Gruiter, Arthur François de, Amplificadores operacionais, São Paulo, McGraw-Hill, 1988.
- [11] Malvino, Albert Paul, Eletrônica, 2. ed., v. 2, São Paulo, McGraw-Hill, 1987. tradução Aracy Mendes da Costa; revisão técnica Rodrigo Araês Caldas Farias.
- [12] VOLKSWAGEN do Brasil, catálogo comercial.

GLOSSÁRIO

Borda de descida	É a parte do sinal digital no momento em que ocorre a transição do nível lógico alto para o nível lógico baixo.
f.e.m.	Uma diferença de potencial gerada pela conversão de outras formas de energia em energia elétrica.
Nível lógico baixo	Em um sinal digital é o período em que o sinal apresenta amplitude mínima.
Nível lógico alto	Em um sinal digital é o período em que o sinal apresenta amplitude máxima.
Reset	O mesmo que reinicializar. É a ação que faz com que o circuito volte ao estado inicial e recomeça o processo de inicialização.
Sinal digital	Sinal que possui apenas dois níveis lógicos conhecidos normalmente como nível alto e nível baixo.
Termistor	Um dispositivo de dois terminais que exhibe uma variação de resistência com uma variação na temperatura de um corpo.

APÊNDICE A – ANÁLISE ECONÔMICA DE CUSTO

A análise econômica de custo apresentada abaixo se refere à média dos preços praticados atualmente no mercado. Dentre os vários tipos de sensores de temperatura pesquisados, estão apresentados na tabela os valores não somente dos sensores mas também dos acessórios, dispositivos ou circuitos necessários para interpretar o sinal proveniente de tais sensores.

Tabela 2. Custo de sensores de temperatura e acessórios necessários.

Tipo de sensor	Preço em Real (R\$)
Termopar de isolamento mineral tipo “J”	1.100,00
Termo-resistência RTD (PT100)	900,00
Termistor NTC	40,00
Bimetálico	35,00
Circuito integrado	90,00

Apesar do sensor bimetálico apresentar menor custo, o termistor NTC apresenta maior estabilidade, tem menor tempo de resposta às variações de temperatura e é mais versátil quanto a possíveis mudanças na faixa de temperatura prevista em projeto.

No caso dos termopares e RTDs, a grande diferença nos custos se deve aos preços dos dispositivos para leitura dos sinais enviados pelos sensores. Chegam a custar em média dez vezes mais do que os próprios sensores.

Como mostrado na tabela 3, estão apresentados os valores dos conjuntos radiador/ventoinha para automóveis populares. Estes foram os três conjuntos com menor preço encontrado.

Tabela 3. Custo do conjunto radiador/ventoinha.

Automóvel utilizado	Preço em Real (R\$)
VW Gol 1000	283,00
Fiat Uno	320,00
GM Corsa	367,00

ANEXO I – DATASHEET LM555

Absolute Maximum Ratings (Note 2)		Soldering Information			
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.		Dual-In-Line Package			
Supply Voltage	+18V	Soldering (10 Seconds)	260°C		
Power Dissipation (Note 3)		Small Outline Packages (SOIC and MSOP)			
LM555CM, LM555CN	1180 mW	Vapor Phase (60 Seconds)	215°C		
LM555CMM	613 mW	Infrared (15 Seconds)	220°C		
Operating Temperature Ranges		See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.			
LM555C	0°C to +70°C				
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C				
Electrical Characteristics (Notes 1, 2)					
(T _A = 25°C, V _{CC} = +5V to +15V, unless otherwise specified)					
Parameter	Conditions	Limits			Units
		LM555C			
		Min	Typ	Max	
Supply Voltage		4.5		16	V
Supply Current	V _{CC} = 5V, R _L = ∞ V _{CC} = 15V, R _L = ∞ (Low State) (Note 4)		3 10	6 15	mA
Timing Error, Monostable					
Initial Accuracy	R _A = 1k to 100kΩ, C = 0.1μF, (Note 5)		1		%
Drift with Temperature			50		ppm/°C
Accuracy over Temperature			1.5		%
Drift with Supply			0.1		%/V
Timing Error, Astable					
Initial Accuracy	R _A , R _B = 1k to 100kΩ, C = 0.1μF, (Note 5)		2.25		%
Drift with Temperature			150		ppm/°C
Accuracy over Temperature			3.0		%
Drift with Supply			0.30		%/V
Threshold Voltage			0.667		x V _{CC}
Trigger Voltage	V _{CC} = 15V		5		V
	V _{CC} = 5V		1.67		V
Trigger Current			0.5	0.9	μA
Reset Voltage		0.4	0.5	1	V
Reset Current			0.1	0.4	mA
Threshold Current	(Note 6)		0.1	0.25	μA
Control Voltage Level	V _{CC} = 15V	9	10	11	V
	V _{CC} = 5V	2.6	3.33	4	V
Pin 7 Leakage Output High			1	100	nA
Pin 7 Sat (Note 7)					
Output Low	V _{CC} = 15V, I _L = 15mA		180		mV
Output Low	V _{CC} = 4.5V, I _L = 4.5mA		80	200	mV

Electrical Characteristics (Notes 1, 2) (Continued)

($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = +5\text{V}$ to $+15\text{V}$, unless otherwise specified)

Parameter	Conditions	Limits			Units
		LM555C			
		Min	Typ	Max	
Output Voltage Drop (Low)	$V_{CC} = 15\text{V}$				
	$I_{SINK} = 10\text{mA}$		0.1	0.25	V
	$I_{SINK} = 50\text{mA}$		0.4	0.75	V
	$I_{SINK} = 100\text{mA}$		2	2.5	V
	$I_{SINK} = 200\text{mA}$		2.5		V
	$V_{CC} = 5\text{V}$				
Output Voltage Drop (High)	$I_{SOURCE} = 8\text{mA}$				V
	$I_{SINK} = 5\text{mA}$		0.25	0.35	V
Output Voltage Drop (High)	$I_{SOURCE} = 200\text{mA}$, $V_{CC} = 15\text{V}$		12.5		V
	$I_{SOURCE} = 100\text{mA}$, $V_{CC} = 15\text{V}$	12.75	13.3		V
	$V_{CC} = 5\text{V}$	2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100		ns
Fall Time of Output			100		ns

Note 1: All voltages are measured with respect to the ground pin, unless otherwise specified.

Note 2: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which guarantee specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not guaranteed for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.

Note 3: For operating at elevated temperatures the device must be derated above 25°C based on a $+150^\circ\text{C}$ maximum junction temperature and a thermal resistance of 106°C/W (DIP), 170°C/W (SO-8), and 204°C/W (MSOP) junction to ambient.

Note 4: Supply current when output high typically 1 mA less at $V_{CC} = 5\text{V}$.

Note 5: Tested at $V_{CC} = 5\text{V}$ and $V_{CC} = 15\text{V}$.

Note 6: This will determine the maximum value of $R_A + R_B$ for 15V operation. The maximum total ($R_A + R_B$) is $20\text{M}\Omega$.

Note 7: No protection against excessive pin 7 current is necessary providing the package dissipation rating will not be exceeded.

Note 8: Refer to RET555X drawing of military LM555H and LM555J versions for specifications.