AMPLIFICADOR OPERACIONAL E O CONTROLE DE TEMPERATURA EM AMBIÊNTE FECHADO

OPERATIONAL AMPLIFIER AND TEMPERATURE CONTROL IN A CLOSED ENVIRONMENT

GUERRA, Mauricio Vilela[1]
NÓBREGA, Marcelo de Jesus Rodrigues da[2]

Resumo: Este é um trabalho cujo objetivo é ratificar um dimensionamento de baixo custo utilizando para tanto um amplificador operacional, que por ser um circuito integrado de elevado grau de confiabilidade e ter uma diversidade de aplicações lineares e não-lineares, possibilita que determinadas características de projeto tais como boa funcionabilidade e ampla capacidade de acionamento sejam atingidas. Outro objetivo deste trabalho é implementar um circuito controlador analógico com maior precisão, procurando com isso constatar maior abrangência em termos de aplicação e contribuir no desenvolvimento de outros projetos de mesma natureza. Seguindo uma sequência lógica, detalhamos os principais estágios do controlador possibilitando assim melhor compreensão do circuito que está sendo proposto.

Palavras-chave: Amplificador Operacional. Circuito de Controle. Conjunto Acionador.

Abstract: This is a work whose objective is to ratify a low-cost design using an operational amplifier, which, being an integrated circuit with a high degree of reliability and having a diversity of linear and non-linear applications, allows that certain design characteristics such as good functionality and wide actuation capacity are achieved. Another simultaneous objective of this work is to implement an analog controller circuit with greater precision, seeking to achieve greater scope in terms of application and contribute to the development of other projects of the same nature. Following a logical sequence, we detail the main stages of the controller, thus enabling a better understanding of the circuit being proposed.

Keywords: Operational Amplifier. Controller Circuit. Trigger Assembly.

[1] Doutor em Engenharia Elétrica (PUC/RJ) – email:mauricio.guerra@cefet-rj.br
[2]Pós-Doutor em Engenharia (UERJ), Doutor em Engenharia Mecânica (PUC/RJ) – email:engmarcelocefet@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Em controle de processos industriais, de forma geral, é de grande importância a utilização de um dispositivo denominado Controlador Eletrônico Analógico. Sua função básica é avaliar os erros ou desvios das variáveis controladas no processo e enviar um sinal elétrico aos dispositivos diretamente relacionados com elas, visando atuar no sistema corrigindo os erros ou desvios encontrados. Como exemplo a destacar temos o controlador eletrônico. Este dispositivo faz a deteção de um determinado desvio no valor da temperatura e produz como resposta um sinal elétrico correspondente para o relé. O objetivo deste circuito controlador é manter a temperatura de um determinado meio desejado constante, independente até de pequenas variações que dimensões deste ambiente que está sendo controlado possam sofrer.

Utilizando a equação (1) a seguir, verificamos o controle de processo básico proposto.

$$E = Cm - Csp \quad (1)$$

Neste caso E é o erro ou desvio encontrado quando se mede o valor Cm da variável em relação ao seu valor de SET-POINT (Csp). Note-se que o valor de E está relacionado com a variável dinâmica do processo (Vazão, Nível, Temperatura, ...), e através da malha de controle é processada uma ação corretiva necessária para garantir a estabilidade sistêmica. Através de um medidor, onde se tem um transdutor adequado ao processo, é fornecido o valor de Cm. O dispositivo que efetivamente converte uma determinada grandeza Não-Elétrica (normalmente) em outra grandeza Elétrica (normalmente) é o transdutor. Seguindo o critério adotado em (GUERRA, 2021), foi utilizado o mesmo dispositivo transdutor NTC (Network Temperature Coeficient), que tem como principal objetivo converter um valor de temperatura qualquer em um valor de tensão correspondente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentação Teórica

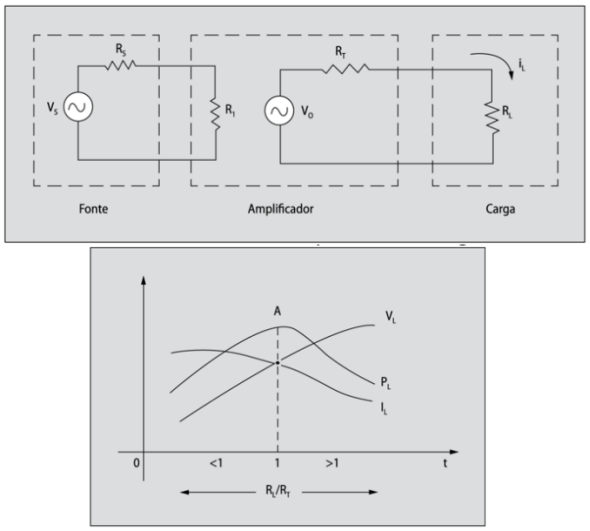
Nessa seção serão abordados alguns conceitos iniciais relacionados ao Projeto. A partir dos dados de dimensionamento tais como, dispositivos de fonte de alimentação, elemento de transdução, conjunto de acionamento transistor-relé, AOP comparador acionador,

foram realizados cálculos onde a partir da deteção de algum desvio de temperatura produz-se como resposta um sinal elétrico de acionamento correspondente. O objetivo do circuito controlador implementado é manter constante a temperatura do meio desejado, considerando margens a nível de dimensionamento que permitam eventuais alterações causadas por oscilações ou fatores externos que possam interagir a nível de carga.

2.2 Modelo de Fonte, Amplificação e Carga

Levando-se em conta que num projeto certas margens a nível de cálculo permitem algum tipo de flexibilidade na aplicação final, o modelo ilustrado na Figura 1 joga luz sobre esse tema, estabelecendo limites ao se considerar um dimensionamento de baixo custo. Analisar, constatar e contabilizar possíveis variações nas dimensões do ambiente que está sendo controlado é um dos objetivos deste trabalho.

Figura 1 – Bloco Fonte, Amplificador e Carga



Fonte: (Pertence, 2015)

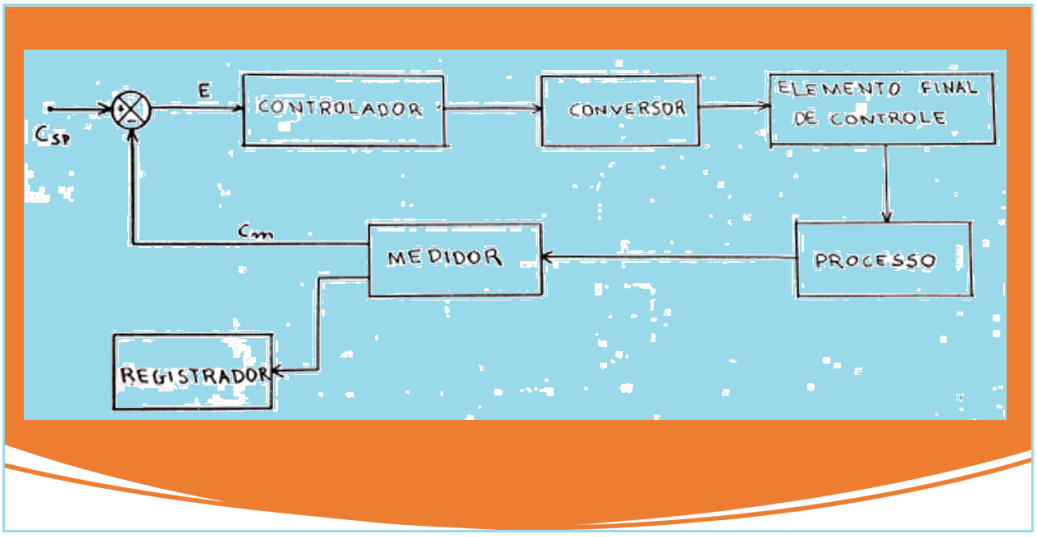
O modelo representa uma fonte alimentando um amplificador, o qual, por sua vez, alimenta uma carga. O gráfico da Figura 1 também nos mostra as variações de corrente, tensão e potência sobre a carga RL do circuito. O ponto A é o ponto onde se tem a máxima transferência de potência entre o amplificador e a carga, todavia, qualquer flexibilidade na aplicação final do controlador impõe que esta situação não é a que mais nos interessa. Considerando o controlador utilizado em (GUERRA, 2021), no caso, o amplificador operacional 741, sua corrente IL de carga é limitada em função do valor da carga RL que foi dimensionada, e evidentemente, existe um valor máximo de corrente que pode ser fornecido

pelo amplificador. Esta corrente máxima é denominada corrente de curto-circuito de saída e seu valor típico é 25mA. Portanto, não estamos mais preocupados com a máxima transferência de potência, mas sim com a máxima transferência de sinal sobre a carga (RL), uma vez que na maioria das aplicações com amplificadores operacionais esta situação é mais útil, trazendo simultaneamente ao projeto flexibilidade, abrangência e maior precisão nos cálculos.

2.3 Descrição em Blocos do Circuito Controlador

Temos na Figura 2 uma descrição em blocos da configuração do circuito controlador.

Figura 2 – Circuito Controlador em Blocos



Fonte: (Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2)

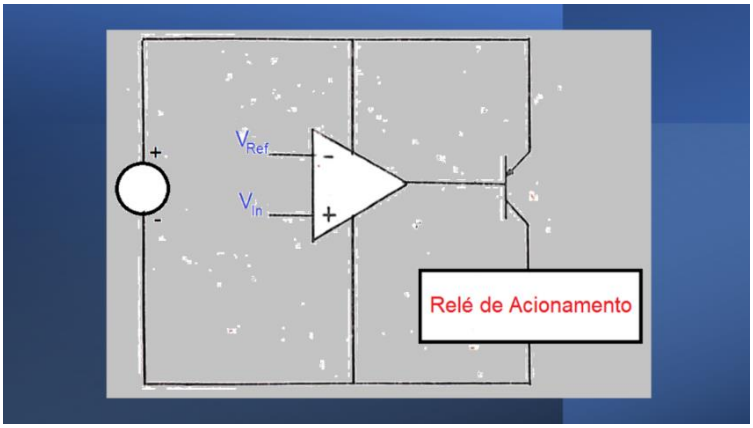
No quesito transdução, foi utilizado um termistor NTC como medidor, mas que na realidade é um resistor com coeficiente negativo de temperatura. Segundo (CICAPELLI, 1982), este tem como objetivo primário monitorar a temperatura a qual se deseja controlar.

As variações de tensões, que verdadeiramente correspondem as variáveis de temperatura, ao serem aplicadas na entrada do controlador são simultaneamente comparadas com a uma tensão, ou seja, sua tensão de referência pré-estabelecida. Neste contexto, (PERTENCE, 2015) aborda o tema com ênfase e abrangência de forma a contabilizar possíveis variações nas dimensões do ambiente sendo controlado.

Através dos blocos discriminados no circuito controlador da Figura 2 é possível observar que a diferença entre as entradas corresponde ao erro (E), citado na equação (1) e

evidenciado nas entradas do comparador. Segundo (OGATA, 2003) e conforme evidenciado através da Figura 3, com base no erro, o circuito controlador acionará ou não o bloco conversor, e este, por sua vez, atuará sobre o elemento final de controle. Note-se que a temperatura é o processo em si e o termômetro (registrador) evidenciará o seu valor.

Figura 3 – Controlador Comparador



Fonte: (Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2)

2.4 Dimensionamento do Controlador

Com o objetivo de avaliar e viabilizar um projeto de dimensionamento de baixo custo, com mais de abrangência de aplicação, utilizando para tanto, como principal elemento, um circuito integrado de elevado grau de confiabilidade que é capaz de implementar simultaneamente boa funcionabilidade e ampla capacidade de acionamento, cálculos foram então realizados de forma a atender a viabilidade técnica deste projeto, sendo que, por questões mercadológicas, alguns componentes foram alterados em função da oferta do mercado de componentes e dispositivos eletrônicos.

2.4.1 Cálculos

Cabe aqui lembrar que margens foram contabilizadas ao longo dos cálculos realizados neste dimensionamento de baixo custo, permitindo com isso certa flexibilidade no volume do espaço do ambiente no qual a temperatura deve ser constante.

2.4.2 A Fonte de Alimentação

A tabela 1 reúne de forma abrangente os cálculos realizados no dimensionamento da fonte de alimentação. Note-se que as premissas focam na ampla capacidade de acionamento do circuito, onde margens foram também consideradas de forma a contabilizar possíveis variações nas redes de distribuição de energia elétrica.

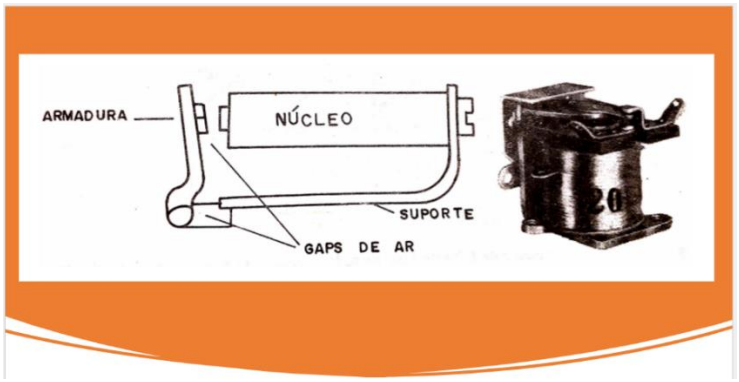
Tabela 1 – Parâmetros de Dimensionamento da Fonte

TRANSFORMADOR	PARÂMETROS
Tensão, Corrente e Potência	$I_{ef2} = 0{,}5A$ $V_{ef} = 12V$ $P = V_{ef} I_{ef} = 6W$
Seção do Núcleo	$S = 1{,}2P = 2.94mm^2$
Nº de Espiras por Volt	$n = \frac{10^8}{4{,}44fBS} = 15{,}96\ Espiras/Volt$ Sendo B = 8.000 Gauss e f = 60Hz
Primário	$N_1 = nV_1 = 15{,}96.110 = 1755{,}6\ Espiras$
Secundário	$N_2 = nV_2.1{,}15 = 220{,}25\ Espiras$
Seção dos Fios (Primário)	$S_{fio} = I_1/J = 79{,}39.10^{-3}/3{,}5 = 0{,}0210mm^2$ Sendo $J = 3{,}5\ A/mm^2$
Seção dos Fios (Secundário)	$S_{fio} = I_2/J = 0{,}5/3{,}5 = 0{,}1429mm^2$
DIODOS	$V_{P1} = 16{,}9\ Volts$ $I_{dc} = V_{dc}/R_L = 12/24 = 0{,}5A$ $I_{Pico} = \sqrt{V_{máx}/2.4{,}16}\,.I_{dc} = 0{,}78A$
CAPACITORES	$\Delta v = 2(V_{máx} - V_{dc}) = 2(16{,}97 - 12) = 9{,}94Volts$ $C = V_{dc}/2Rf\Delta V = 12/2.24.60.\Delta V$ $C_1(\Delta V = 9{,}94V) = 420\mu F(1000\mu F/35V)$ $C_2(\Delta V = 4{,}16V) = 100\mu F(Supressor)$

2.4.3 Circuito Relé

Abordamos este bloco trazendo luz inicialmente sobre o dispositivo de acionamento de um projeto focado para dimensionamento de baixo custo. Na realidade, a constituição do relé possui toda uma nomenclatura específica que pode ser acessada em (SARAIVA, 1988). Nesta, lâminas são subdivididas em dois grupos principais, cada qual com características intrínsecas e específicas, mas sendo apenas um destes aquele que estará submetido as forças de deslocamento oriundas da bobina integrante do circuito relé. Para ilustrar melhor, temos na Figura 4 o circuito magnético do relé.

Figura 4 – O Relé e seu Circuito Magnético



Fonte: (Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2)

Note-se os caminhos através dos quais ocorre a circulação do fluxo magnético resultante e a presença das peças magnéticas do referido dispositivo. O comprimento do circuito magnético em termos de utilização será tanto menor na medida que se tem baixa relutância do referido circuito. Dentre os requisitos normais do circuito relé podemos citar o ferro de elevada permeabilidade e os gaps (intervalos) de ar pequenos.

O Funcionamento do Relé se resume em uma corrente definida pelo fabricante e uma subsequente excitação da bobina do relé por esta corrente. Como resultado, um fluxo magnético será induzido no circuito magnético ilustrado na Figura 4, e este, por sua vez, implementa a atração da armadura pelo núcleo fixo. Na verdade, trata-se de um movimento de atuação mecânica no sentido de fechar ou abrir os contatos do relé. Lâminas de trabalho se posicionarão de forma encurvada, interrompendo seu contato com a lâmina de comutação, ou contatando as lâminas fixas.

Um relé excitado por corrente contínua (Tipo cc) através de um transistor foi o componente de melhor conformação para este dimensionamento. Tal fato decorre em razão do circuito acionador ser também alimentado por uma tensão contínua (12Vcc). A relutância do circuito magnético bem como o que foi dito anteriormente a Tabela 2 fundamenta.

Tabela 2 – Parâmetros do Circuito relé

RELÉ TIPO CC	**PARÂMETROS**
Relutância do Circuito Magnético	$R_m = \ell/\mu S$ Sendo ℓ = comprimento do circuito (m), μ = Permeabilidade do material, S = Área da seção transversal (m^2)
Força Magnética	$F_{mm} = NI\ (ampére - Espira)$
Fluxo magnético induzido	$\phi = F_{mm}/R$
A força de atração, ou atração do relé, será tanto maior quanto maior for o fluxo induzido	$F_{atração} \sim \phi$
Montagem / Encapsulamento	Base / 8 pinos
Tensão de Trabalho da Bobina	12Vcc
Impedância da Bobina	600 ohms
Ampacidade nos Contatos do Relé	2A
Número / Tipo de Contato	My2-0-US DC 12 / Contato duplo
Formato e Tamanho	2,5 x 2,0 x 3,5 (cm)

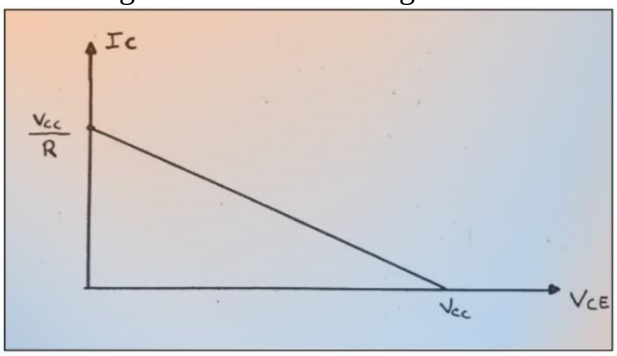
2.4.4 Transistor Aplicado como Chave

Nosso projeto pode contar com a utilização de um transistor na configuração PNP, onde este atuava como uma chave aberta no momento que a saída do amplificador operacional aplicava 90% de Vcc na base deste transistor. Por outro lado, quando a tensão da

base do transistor PNP era de 0 volts, tínhamos um transistor atuando como uma chave fechada. Portanto, através do referido conjunto relé-transistor tornou-se possível e a baixo custo controlar o acionamento das lâmpadas, e consequentemente estabelecer controle de temperatura em um ambiente fechado.

Como todos sabem, a forma mais simples de se utilizar um transistor é como uma chave. Tal fato implica que apenas operamos, ou na saturação, ou no corte, e em nenhum outro lugar ao longo da linha de carga seu funcionamento será viável. A Figura 5 ilustra este processo.

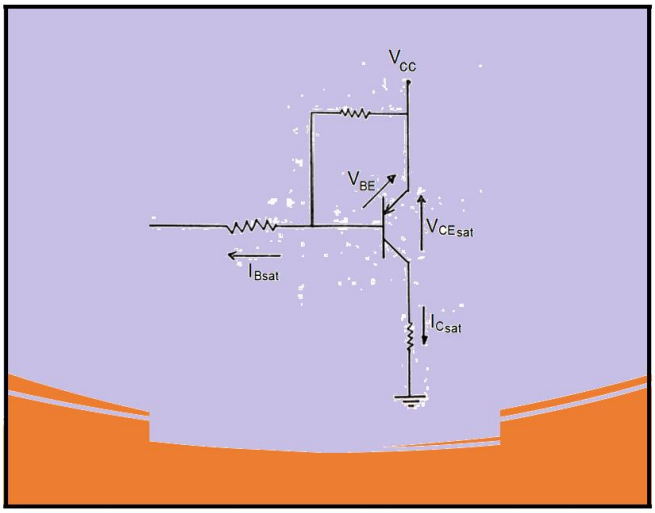
Figura 5 – Linha de Carga



Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

A Figura 6 bem como a Tabela 3 expõem respectivamente a condição de saturação do transistor e a forma numérica do seu real funcionamento.

Figura 6 – Saturação do Transistor



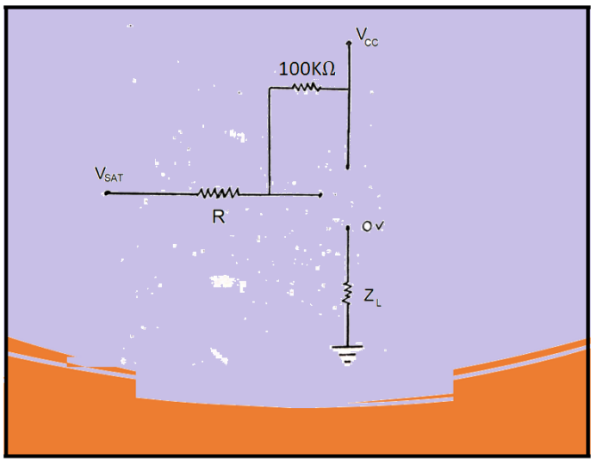
Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

Tabela 3 – Parâmetros de Dimensionamento do Transistor - Saturação

TRANSISTOR-CHAVE	PARÂMETROS
Resistência da Bobina do relé (Prática)	Rc = 600Ω
Corrente de Saturação	$I_{Csat} = \frac{V_{cc}}{R_c} = \frac{11,7}{600} = 19,5mA$
Corrente de Base de Saturação Mínima	$I_{\substack{bsat \\ Min.}} = \frac{I_{csat}}{H_{FEMáx}} = \frac{19.5mA}{250} = 78\mu A$
Corrente de Base de Saturação Máxima	$I_{\substack{bsat \\ Máx.}} = \frac{I_{csat}}{H_{\substack{fe \\ Min}}} = \frac{19.5mA}{40} = 487,5\mu A$
Resistência de Base Máxima	$R_{B_{Máx.}} = \frac{10,8\,Volts - 0,7\,Volts}{I_{\substack{bsat \\ Min.}}} = \frac{10,1\,Volts}{78x10^{-6}} = 129k\Omega$
Resistência de Base Mínima	$R_{Min.} = \frac{10,8\,Volts - 0,7\,Volts}{I_{\substack{bsat \\ Máx.}}} = \frac{10,1\,Volts}{487,5x10^{-6}} = 20,7k\Omega$

A Figura 7 expõem o transistor numa condição de corte ou aberto.

Figura 7 – Transistor em Corte



Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

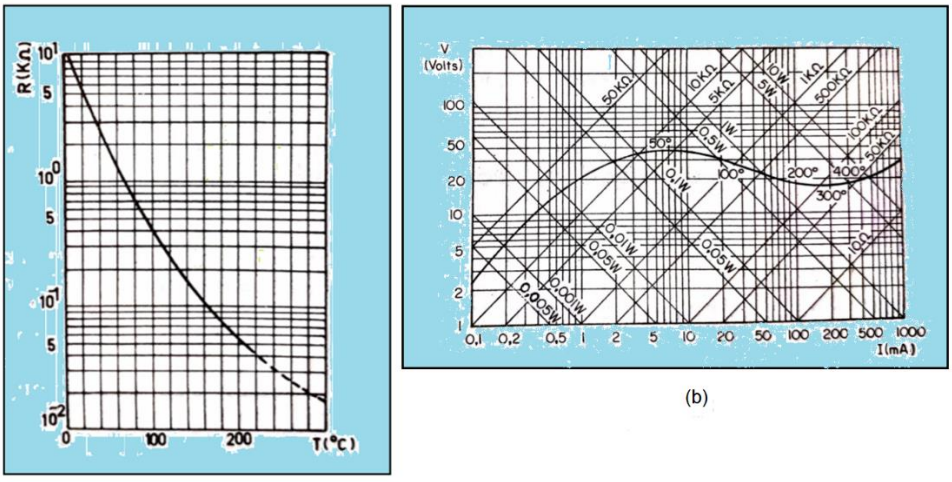
Quando o transistor está em estado de corte, a resistência de 100K entre coletor e base tem como função limitar a corrente que chega da base do transistor, vinda do coletor.

2.4.5 Transdução

Identificamos um dispositivo com razoável compatibilidade para um dimensionamento de baixo custo que na realidade desempenha a função de um resistor, porém tendo como característica principal apresentar um coeficiente negativo de temperatura (Negative Temperature Coeficiente – NTC). São estes também denominados de termistores aos quais são elementos cuja resistência decresce com o aumento da temperatura (CICAPELLI, 1982).

Considerando o projeto, a escolha deste dispositivo teve como objetivo estabelecer controle de temperatura fornecendo simultaneamente abrangência, confiança e precisão aos resultados. Dependendo da temperatura ambiente ou do volume do espaço do ambiente no qual a temperatura deve ser a mesma, o resultado esperado foi obter variação de corrente em função da variação da resistência intrínseca do próprio dispositivo. Ao contrário dos metais cuja temperatura aumenta na medida que a resistência cresce, a variação do coeficiente de temperatura no termistor decresce e gira entre 3 e 6% / ºC. O gráfico (a) da Figura 8 ilustra a curva característica do termistor.

Figura 8 – Termistor



Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

A dependência da resistência de um termistor pela temperatura pode ser descrita através de uma expressão. Esta, bem como outros parâmetros pertinentes ao projeto estão discriminados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do Termistor

TEMISTOR (NTC)	PARÂMETROS
Expressão que relaciona resistência e temperatura do dispositivo	$R = R_o E^K$ Sendo R = Resistência do NTC numa temperatura T, $R =$ Resistência do NTC numa temperatura T_o, $K = C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)$ e C = Constante do material empregado na construção do NTC.
Expressão para calcular C medindo resistência em duas temperaturas diferentes.	$C = ln\left[\frac{R'}{R''}\right]\frac{1}{\left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right]}$
Valores Práticos Aplicados R' – T1 ≈ 230 – 23º R'' – T1 ≈ 200 – 36º	$C = ln\left[\frac{230}{200}\right]\frac{1}{\left[\frac{1}{\frac{1}{230} - \frac{1}{200}}\right]} = -214{,}6$

Conforme discriminado na Tabela 4, medindo o valor da resistência de um termistor em duas diferentes temperaturas pode-se chegar a uma relação que possibilita o cálculo do valor da constante C do material empregado na construção do dispositivo.

A relação resistência-tensão-corrente associados a um termistor ocorre da seguinte forma. Ao aplicarmos uma tensão sobre o dispositivo, fluirá corrente sobre o mesmo que por sua vez produzirá uma dissipação interna no próprio componente transdutor. Como consequência deste processo verificar-se-á elevação da temperatura e uma subsequente diminuição da resistência do termistor. O gráfico (b) da Figura 8 ilustra essa variação da resistência em função da tensão x corrente.

Por se tratar do projeto de um controlador de temperatura para um ambiente fechado, levou-se em consideração o coeficiente de temperatura que o termistor deveria apresentar, o valor da sua resistência, e finalmente sua potência dissipada. Outro dado importante para escolha do dispositivo transdutor mais adequado refere-se ao local de aplicação e o quanto de variação de corrente o componente estará submetido. O tipo de termistor utilizado baseou-se naquele que trouxe uma melhor eficiência na aplicação.

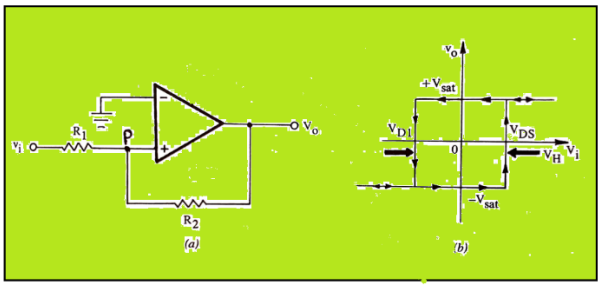
Apesar deste trabalho analisar a eficácia e abrangência do projeto original (GUERRA,2021) em termos de uma eventual demanda adicional de corrente, neste caso, do

dispositivo termistor, e mais especificamente, no que tange a intensidade desta corrente, não foram observadas alterações ou mudanças significativas, quando o volume do espaço do ambiente no qual a temperatura deveria permanecer constante foi flexibilizado. Note-se neste caso, que durante a fase de testes em época, a estufa onde o conjunto de lâmpadas aquecedoras estava inserido passou a ter dimensões circulares, e não mais retangulares. Esta constatação adicional não relatada em (GUERRA, 2021) confirmam a robustez e eficiência do projeto, principalmente em termos de sua precisão, abrangência e flexibilidade de aplicação.

2.4.6 Comparador Schmitt Trigger

Em razão do circuito de acionamento ser implementado através de um relé cujo processo de atracamento é uma fonte de ruído constante, a comparação entre variável de controle e sinal de referência foi unicamente possível utilizando uma característica de histerese apresentada por um circuito comparador regenerativo do tipo Schimitt Trigger. A necessidade de atraso na mudança do seu estado de saída (efeito), apesar das condições de entrada (causas) serem continuamente alteradas devido ao sinal aplicado (Vi) apresentar forte interferência ou ruído, trouxe a eficiência esperada ao projeto.

Figura 9 – Comparador não-inversor



Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

Conforme a Figura 9, estando na configuração não-inversora, a menor diferença de tensão entre as entradas diferenciais deste comparador (≈1mV), leva o circuito a comutar sua condição de saída para + Vsat ou – Vsat.

2.5 Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos ao aplicarmos a metodologia desenvolvida visando um dimensionamento de baixo custo, onde foi possível confirmar resultados obtidos no trabalho original (GUERRA, 2021) e adicionalmente constatar maior flexibilidade do projeto, em termos de abrangência e eficácia de aplicação

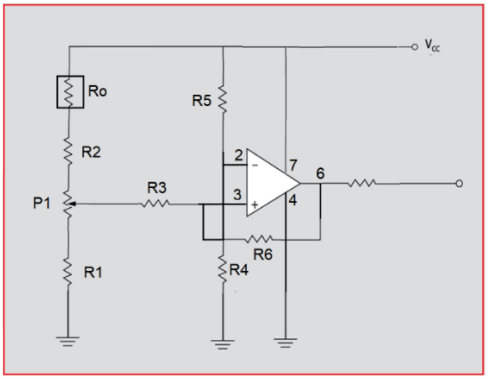
2.5.1 Circuito Acionador do Conjunto Transistor-Relé

Na entrada inversora do conjunto acionador aplica-se uma tensão de referência equivalente a 6 Volts, utilizando para tanto o divisor de tensão constituído pelos resistores R4 e R5. Este sinal de referência é comparado com a tensão da entrada não-inversora que é obtida através de outro divisão de tensão formado por R1, R2, P1 e o termistor.

A lógica de funcionamento da estrutura proposta é que quando a temperatura está abaixo do valor estabelecido por P1, o termistor apresentará uma resistência elevada. Com isso a diferença de tensão entre as entradas diferenciais é a tensão de Histerese (Vds), dada por R3 e R6, que não é suficiente para o 741 comutar o seu estado de saída. Nestas condições, a saída do comparador 741 estará em nível baixo, levando o transistor de saída a entrar em estado de saturação, e consequentemente isso energizará o relé.

Na medida em que a temperatura continua aumentando, o termistor diminui sua resistência, ao ponto de termos entre as entradas diferenciais do 741, uma tensão superior a tensão de histerese. Neste instante a saída do 741passará para um nível alto de tensão (+Vsat), e isso consequentemente conduzirá o transistor ao corte. A Figura 10 ilustra o circuito controlador acionador obtido.

Figura 10 – Circuito Comparador-Acionador



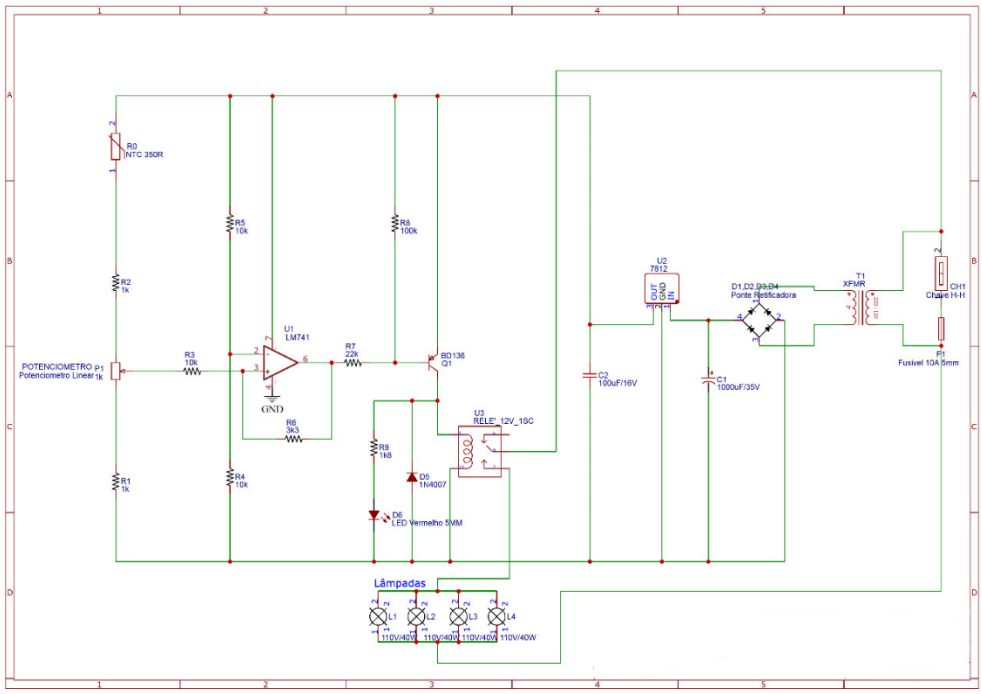
Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

Vide a Tabela 3, a Tabela 5 expõe a forma numérica do real funcionamento do circuito controlador-acionador e a Figura 11 o esquema elétrico do circuito.

Tabela 5 – Parâmetros de Dimensionamento do Comparador-Acionador

COMPARADOR 741	PARÂMETROS
Entrada Inversora	$V_2 = \frac{R_4}{R_4 + R_5} V_{cc} = \frac{10k}{10k + 10k} 12 = 6V$
Tensão de Disparo Superior	$V_{ds} = \frac{R_6}{R_3} V_{sat} = \frac{10k}{10k + 3300k} 10{,}8 = 0{,}03263V = 32{,}63mV$

Figura 11 – Esquema Elétrico do Circuito



Fonte: Gerada pelo autor usando o software Paint da Microsoft Windows V22H2

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho destaca-se fundamentalmente a ratificação do projeto de um controlador de temperatura, implementado através de um amplificador operacional configurado como um circuito comparador-acionador, para controlar temperatura no interior de um ambiente fechado.

A fim de justificar a relevância do trabalho, foram analisadas a eficácia e abrangência do projeto original em termos de uma eventual demanda adicional de corrente através do dispositivo termistor, onde não foram observadas alterações ou mudanças significativas, quando o volume do espaço do ambiente no qual a temperatura deveria permanecer constante foi flexibilizado.

Constatou-se, entretanto, que qualquer flexibilidade na aplicação final do controlador impõe imperativa observância sobre os níveis da corrente de carga IL (corrente de curto-circuito de saída) intrinsecamente associada ao valor da carga RL dimensionada no projeto. Existe um valor máximo desta corrente cujo valor típico é de 25mA para o operacional 741.

Na fase de testes, a estufa onde o conjunto de lâmpadas aquecedoras estava inserido passou a ter dimensões circulares. Apesar de uma pequena variação de tempo ter ocorrido até que a temperatura imposta pelo circuito controlador fosse atingida, não foram observadas alterações na intensidade da corrente demandada pelo conjunto acionador na saída do operacional 741, ficando a mesma também inferior ao limite máximo previsto para corrente de curto-circuito de saída (IL).

Finalmente, devido ao fato de o transistor de saída não precisar de tensão negativa para saturar em razão do projeto do conjunto acionador, a confecção da fonte simétrica se tornou desnecessária, compatibilizando o projeto com um dimensionamento de baixo custo.

REFERÊNCIAS

CICAPELLI, Antonio. Teoria e Desenvolvimento de Projetos e Circuitos Eletrônicos, São Paulo: Érika, 1982.

GUERRA, M. V. Controlador de Temperatura. Revista Projectus [on line]. v. 4, n.2, Abr. 2021, p. 48-65. ISSN 2525-4146. DOI:https://doi.org/10.15202/25254146.2019v4n2p48>.

OGATA, K., Engenharia de Controle Moderno: São Paulo: Prentice Hall, 2003.
PERTENCE, Antonio. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos. Porto Alegre: Bookman, 2015.

SARAIVA, Delcyr. Materiais Elétricos. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.