



# Protótipo de fonte de tensão regulável com controle digital para fins didáticos

## *Dimmable voltage source prototype with digital control for educational purposes*

Alex de Araujo Regazzo (orientado) \*, Alessandro do Nascimento Vargas (orientador) †

### RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma fonte de alimentação de baixo custo para fins didáticos. A fonte tem duas características que a diferenciam das demais: (1) controle digital de tensão e (2) controle digital da temperatura no transistor de potência. O objetivo principal do projeto é o de garantir que a tensão aplicada sobre uma carga siga uma referência de tensão. O objetivo secundário é manter a temperatura do transistor de potência abaixo de um valor máximo determinado pelo usuário. Mostra-se os circuitos de medição e controle de tensão e de temperatura, além dos projetos dos dois controles proporcional-integral (PI) embarcados em um microcontrolador Arduino.

**Palavras-chave:** Fonte de alimentação. Arduino. Controle. Embarcados.

### ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost power supply for teaching purposes. The power supply has two features that differentiate it from the others: (1) digital voltage control and (2) digital temperature control in the power transistor. The main design objective is to ensure that the voltage applied to a load follows a voltage reference. The secondary objective is to keep the power transistor temperature below a maximum value determined by the user. It shows the voltage and temperature measurement and control circuits, in addition to the designs of the two proportional-integral (PI) controls embedded in an Arduino microcontroller.

**Keywords:** Power supply. Arduino. Control. Embedded.

## 1 INTRODUÇÃO

No ensino de engenharia, a tarefa prática com experimentos em laboratório é um facilitador no processo ensino-aprendizagem. Para o ramo de eletrônica, é imprescindível que haja uma fonte de alimentação que forneça energia regulada para os equipamentos (PALI; VADHERA, 2019) e que isso, além de outros dispositivos, acabam por ter um custo elevado, esbarrando em dificuldades financeiras (WALKINGTON; PEMBERTON; EASTWELL, 1994). Cabe, portanto, a proposição de estudos para amenizar o dilema da necessidade de se promover realismo na educação e ao mesmo tempo com um custo acessível (GOODWIN et al., 2011).

A ideia deste trabalho é projetar um controlador que garanta a tensão desejada na carga. Utiliza-se da técnica de controle PI empírico baseado no modelo contínuo da planta no qual o sinal de controle é dado como um sinal PWM gerado pelo Arduino UNO. Além disso, deseja-se garantir que a temperatura do transistor de

\* DAELE-CP, Engenharia de Controle e Automação; alex\_regazzo@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1670-0696>.

† DAELE-CP; avargas@utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-1548-6299>.

potência código TIP122 mantenha-se dentro de um limite máximo definido, sem usar qualquer equipamento de resfriamento ativo, atuando contra o superaquecimento do transistor, situação que poderia levar a queima do dispositivo.

Em suma, as contribuições desse trabalho são: o desenvolvimento de um circuito de medição e controle digital de ambas as variáveis analisadas, além da proposição do controle do sistema com duas entradas e uma saída. O produto deste estudo será mostrado na forma de um kit cujo projeto utiliza conceitos abordados em disciplinas da área de Eletrônica e Controle de Sistemas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Um transformador abaixador de tensão é conectado ao circuito do regulador de tensão com LM317 — esquemático da Figura 1 — cuja tensão de saída é mantida, pela configuração do potenciômetro, em seu máximo de  $15 V_{CC}$  para este projeto. Esta tensão, é, por sua vez, conectada ao circuito de medição e controle de tensão e temperatura que é mostrado na Figura 2. Note que o circuito considera o microcontrolador Arduino, pois este tem a tarefa de processar as informações e controlar a tensão de saída. A saída é representada como uma carga no circuito e tem tensão controlada pelo microcontrolador dentro de uma faixa de 0 a  $15 V_{CC}$ .

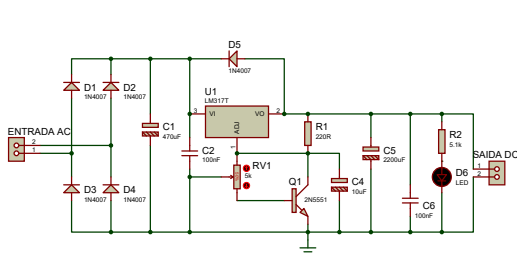


Figura 1 – Circuito do kit do regulador de tensão LM317.

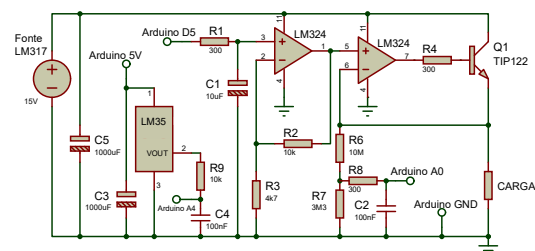


Figura 2 – Circuito de medição e controle de tensão e temperatura.

### 2.1 Detalhes de implementação

Primeiramente, vale destacar que a temperatura é aferida pelo pino A4 do Arduino, e a tensão pelo pino A0. A tensão da carga é controlada através do pino D5 do Arduino.

Construção do circuito de acionamento: utiliza-se o amplificador operacional LM324 para fechar uma malha entre a sua saída (pino 7 do LM324), resistor R4, emissor do transistor de potência TIP122 e de volta ao LM324 no pino 6 – essa configuração segue sugestão de (HISCOCKS, 2011; BRAGA, 2006) – com isso o amplificador fica com a configuração de buffer e serve para linearizar o comportamento do transistor Q1. O amplificador operacional LM324 com os pinos 1, 2 e 3 está configurado como não inversor e tem o objetivo de amplificar a tensão do Arduino (5V) para o máximo da fonte (15V), aproximadamente. Anterior a ele, tem-se um filtro RC passa-baixa (R1 e C1) com frequência de corte de 53 Hz para que o sinal PWM seja filtrado e passe a ser algo próximo a uma tensão contínua. O autor (BRAGA, 2006), em particular, discorre sobre a necessidade de dissipador de calor acoplado ao transistor de potência, sugestão que vem de encontro ao proposto neste trabalho: controle de temperatura do transistor de potência.

Controle de tensão disponibilizada na carga: para que o Arduino leia a tensão na carga sem risco de dano, foi necessário fazer um abaixador de tensão usando um divisor de tensão resistivo simples (R6 e R7) (HISCOCKS,

2011). Nesta medição resistiva, para eliminar ruídos de alta frequência que poderiam prejudicar o controle, pode-se utilizar filtros passa-baixa (CARLIN et al., 2010; SANTOS, 2010). Implementou-se então um filtro passa-baixa (resistor R8 e capacitor C2 da Figura 2, com frequência de corte de 5,3 kHz).

Controle de temperatura sobre o transistor de potência: foi fixado o sensor de temperatura LM35 no dissipador de calor que, por sua vez, foi acoplado ao transistor TIP122 (onde se deseja medir a temperatura), como mostra a Figura 3. O sinal proveniente do sensor LM35 passa por dois filtros passa-baixa: um em hardware-analógico e outro em software. O primeiro filtro é composto pelo resistor (R9) e o capacitor (C4) com frequência de corte de 159 Hz, no qual os componentes são mostrados na Figura 2. Para diminuir ainda mais o ruído, o filtro digital da Eq. (1) foi implementado no Arduíno com frequência de corte de 15,9 mHz (STARR, 2006) — para todas discretizações a função 'c2s' do MATLAB com os parâmetros padrões e tempo de amostragem de 0,005 s foram utilizados

$$G_{filtro} = \frac{1}{10s + 1} \quad (1)$$

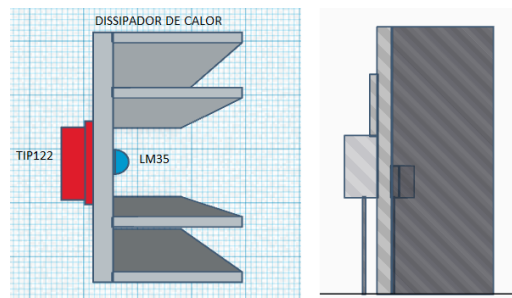


Figura 3 – Posição de fixação do sensor de temperatura LM35. À esquerda, vista superior 3D. À direita, vista lateral.

## 2.2 Identificação dos sistemas: tensão e temperatura

A identificação do sistema é realizada em malha aberta e utiliza a técnica conhecida como modelagem caixa-preta (AGUIRRE, 2004). Para realizar a identificação, aplica-se um degrau na entrada do sistema (dado pelo terminal digital Pino 5 (PWM) do Arduíno) e verifica-se a curva de resposta do sistema e obtém-se os parâmetros para construção de uma função de transferência (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2004).

Para o sistema de tensão, definiu-se uma referência fixa e sem carga. Já para o de temperatura foi feita com uma simples carga resistiva — o controle de tensão mostrado nas próximas seções já está em funcionamento e garante que a tensão siga sua referência estabelecida. Em ambos os casos, verificou-se que as curvas registradas tem característica de um sistema de primeira ordem (COELHO, A. A. R.; COELHO, L. D. S., 2016).

## 2.3 Controle

A Figura 4 mostra como ocorre a organização das malhas de controle. Uma das variáveis sofre saturação: o controle de tensão tem como restrição um limitante superior que é dado pelo controlador de temperatura. Assim, consegue-se atingir ambos os objetivos: controlar a tensão mantendo a temperatura dentro de seu limite.

Após a modelagem dos sistemas em malha aberta, tem-se as funções de transferência dos sistemas de tensão e temperatura. Com o auxílio do software MATLAB, adicionamos um integrador para que o erro de regime

permanente seja nulo. Após, realizamos o posicionamento de um zero de modo que os polos sejam levados para o semiplano esquerdo, via controlador PI (NISE, 2017; OGATA, 2010). Para o sistema de tensão definimos o tempo de acomodação em 500 ms. Já para a malha de temperatura, decidimos por um tempo maior para assentamento, devido a característica mais lenta do sistema.

O controlador de temperatura funciona limitando o máximo de tensão que o controlador deste pode disponibilizar. Dessa forma, esse máximo é calculado a cada iteração do controlador e é dada pelo mínimo entre o valor de referência de tensão definida e o que o controlador de temperatura assume como máxima tensão.

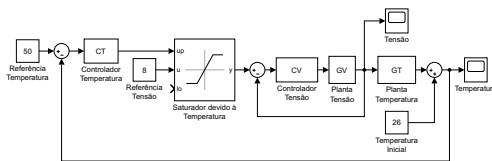


Figura 4 – Esquémático dos sistemas de controle.

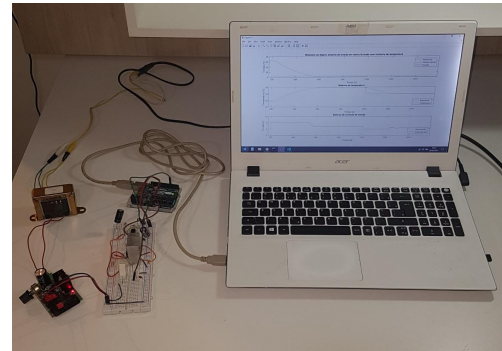


Figura 5 – Foto do experimento.

### 3 RESULTADOS

A Figura 5 mostra o circuito completo (na forma de kit): a etapa do transformador e abaixador de tensão, circuitos das Figs. 1 e 2 e o Arduino. Relembramos que o Arduino tem a tarefa de executar o controle digital e coletar os dados experimentais que serão interpretados no computador. O computador é um elemento passivo: serve somente para visualizar os dados em tempo real.

A partir de um degrau em malha aberta, sem carga, obteve-se a curva mostrada na parte superior da Figura 6. Esta curva nos possibilita obter os parâmetros  $Ref = 8 \text{ V}$ ,  $V_{inicial} = 0$ ,  $V_{final} = 8,04 \text{ V}$ ,  $t_0 = 8,5620 \text{ s}$ ,  $\tau = 0,1687 \text{ s}$ . Com esses parâmetros, pode-se obter uma função de transferência adequada descrita por

$$G_{tensao} = \frac{1,005}{0,1687s + 1} \quad (2)$$

Usando a Eq. (2), é possível projetar um controlador cuja função de transferência é descrita por

$$C_{tensao} = \frac{1,3284(s + 7,273)}{s} \quad (3)$$

#### 3.1 Modelagem e controle de temperatura

A partir de um degrau descendente no controle em malha fechada de tensão com carga de  $22 \Omega$  (10 Watts), mas com o sistema de temperatura em malha aberta, obteve-se a curva mostrada na Figura 7. A curva nos possibilita encontrar os parâmetros  $Ref = -5 \text{ V}$ ,  $V_{inicial} = 57,34 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{final} = 28,83 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 2,9973 \times 10^3 \text{ s}$ ,  $\tau = 366,23 \text{ s}$ . A partir destes parâmetros, a função de transferência torna-se

$$G_{temperatura} = \frac{5,918}{348,1s + 1} \quad (4)$$

Note na Figura 7 que a curva experimental parece semelhante a curva teórica. Utilizando a função de transferência da Eq. (4), obtemos o controlador de temperatura

$$C_{temperatura} = \frac{2,9908(s + 0,01186)}{s} \quad (5)$$

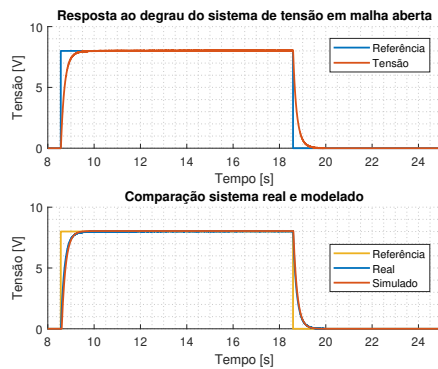


Figura 6 – Comparação dados reais e teóricos de tensão.

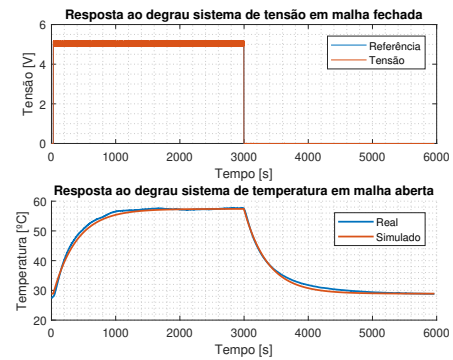


Figura 7 – Curva de temperatura em malha aberta devido a aplicação do degrau de tensão

### 3.2 Controle do sistema completo

Com ambos os controladores implementados, é realizado uma demonstração do sistema com carga de  $22 \Omega$  (10 Watts). A Figura 8 mostra que com a aplicação de um degrau de entrada, a tensão rapidamente sobe e estabiliza, enquanto a temperatura sobe gradativamente. Esta é limitada quando chega ao seu máximo para prevenir o superaquecimento. Posteriormente, com a redução do máximo de temperatura, é reduzida a tensão para que a temperatura estabilize em seu novo patamar. Em seguida, há o aumento do limite de temperatura, permitindo que a tensão aumente seu valor.

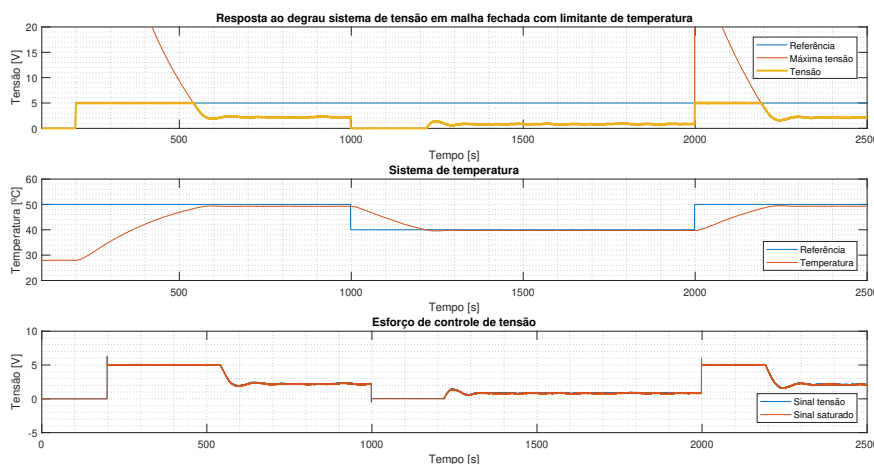


Figura 8 – Teste dos controladores em malha fechada e com carga.

O fato da linha de máxima tensão baseado na temperatura aparece descendo próximo aos 550 s se dá porque no início da demonstração a temperatura estava bem abaixo da referência, dessa forma o controlador permite uma tensão bem alta.

Durante o teste, analisando o esforço de controle de tensão, pode-se observar que o sistema mantém-se praticamente dentro de seus limites definidos por software que provém de limitações do circuito.



#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo mostra a construção de um protótipo de fonte de tensão regulável para fins didáticos com custo aproximado de R\$ 200,00. Duas características se destacam: (1) controle digital da tensão e (2) controle digital da temperatura sobre o dissipador de calor.

O controle da temperatura sobre o dissipador de calor garante sobrevida ao transistor de potência (evitando a eventual queima do mesmo por excesso de calor). Note que a construção do kit possibilita a alunos e instrutores trabalharem com conceitos normalmente estudados em cursos de Eletrônica e Controle de Sistemas.

Do ponto de vista de teoria de controle, o kit representa um sistema de duas entradas e uma saída. Através dele foi possível a aplicação de técnicas de controle PI sob saturação. Os esquemáticos são detalhados neste artigo, assim como os circuitos de controle e medição. A motivação em apresentar os esquemáticos está em proporcionar o acesso completo desse kit a alunos e instrutores, visando disseminar conceitos de engenharia.

#### REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas–Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. [S.l.]: Editora UFMG, 2004.
- BRAGA, Newton C. **Circuitos & Soluções**. São Paulo - SP: Editora Saber LTDA, 2006. v. 6, p. 57.
- CARLIN, N. et al. Estudo de filtros RC para baixas e altas frequências por meio de um circuito para superposição de sinais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, 2010.
- COELHO, Antonio Augusto Rodrigues; COELHO, Leandro Dos Santos. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Florianópolis: Edufsc, 2016.
- GOODWIN, Graham C. et al. Emulation-Based Virtual Laboratories: A Low-Cost Alternative to Physical Experiments in Control Engineering Education. **IEEE**, 2011.
- HISCOCKS, Peter D. **Analog Circuit Design**. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2011.
- NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle, 7ª Ed**. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2017.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. [S.l.]: Pearson Universidades, 2010.
- PALI, Bahadur Singh; VADHERA, Shelly. A novel solar photovoltaic system with pumped-water storage for continuous power at constant voltage. **IEEE**, 2019.
- SANTOS, Carlos Filipe Gonçalves. Simulação de filtro passa-baixa de quinta ordem com análise de sensibilidade. **Revista Ilha Digital**, v. 2, p. 75–80, 2010.
- SEBORG, Dale E.; EDGAR, Thomas F.; MELLICHAMP, Deuncan A. **Process Dynamics and Control**. Estado Unidos da América: John Wiley & Sons, 2004.
- STARR, Gregory P. **Introduction to Applied Digital Control**. Albuquerque - Novo México: The University of New Mexico, 2006. P. 49. <http://www.me.unm.edu/~starr/teaching/me581/textbook.pdf>.
- WALKINGTON, Jackie; PEMBERTON, Peter; EASTWELL, John. Practical work in engineering: A challenge for distance education. **Distance Education**, Routledge, v. 15, n. 1, p. 160–171, 1994.