

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM *DRIVER* PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR CC

Matheus Henrique da Cunha¹
Carlos Matsumi²
Janderson Duarte³

Resumo

O artigo aborda o projeto e a implementação de um *driver* com o intuito de acionar e controlar a velocidade de um motor de corrente contínua (CC) presente em um dos laboratórios do IFSC. Inicialmente, apresenta-se o motor CC utilizado, incluindo os dados técnicos e o modelo do circuito elétrico. Em seguida, explora-se o *encoder* óptico, que envia pulsos ao microcontrolador conforme a velocidade do motor. Além de calcular a velocidade e apresentar dados no *display* de cristal líquido (LCD), o microcontrolador também é responsável pelas saídas *PWM* (*Pulse Width Modulation*), que controlam a tensão na armadura e no campo do motor CC. O LCD, além de exibir a velocidade desejada e a lida, permite variar a velocidade desejada através de seus botões. Um circuito contendo o TCA785 recebe um *PWM* do microcontrolador e é responsável por disparar os tiristores. Para o comando do campo, um *driver* recebe um *PWM* do microcontrolador e tem por função acionar o *mosfet*. Na etapa de potência, foi desenvolvido um retificador controlado à tiristor para controlar a armadura, e para acionar o campo foi utilizado um retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo somado a um conversor do tipo *buck* para ajustar o nível de tensão. Os esforços nos componentes são apresentados, além do cálculo térmico. O circuito *snubber* foi projetado para evitar disparos involuntários dos tiristores. O controle da velocidade foi realizado em malha fechada, utilizando um controlador PI. Por fim, o protótipo e os resultados são apresentados.

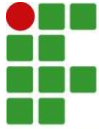
Palavras-Chave: Retificador. Motor. *Buck*. *PWM*. Tiristores.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DRIVER TO CONTROL THE SPEED OF A DC MOTOR

Abstract

This article covers the design and implementation of a driver to drive and control the speed of a direct current (DC) motor in one of the IFSC laboratories. Initially, the DC motor used is presented, including technical data and the electrical circuit model. Next, the optical encoder is explored, which sends pulses to the microcontroller according to the motor's speed. As well as calculating the speed and displaying data on the liquid crystal display (LCD), the microcontroller is also responsible for the PWM (*Pulse Width Modulation*) outputs, which control the voltage in the armature and field of the DC motor.

1 Acadêmico do curso Bacharel em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina. matheus.hc26@aluno.ifsc.edu.br



As well as displaying the desired speed and the read speed, the LCD allows the desired speed to be varied using its buttons. A circuit containing the TCA785 receives a PWM from the microcontroller and is responsible for firing the thyristors. To control the field, a driver receives a PWM from the microcontroller and is responsible for triggering the mosfet. In the power stage, a thyristor-controlled rectifier was developed to control the armature, and a single-phase full-wave rectifier with a capacitive filter was used to drive the field, along with a buck-type converter to adjust the voltage level. The stresses on the components are presented, as well as the thermal calculation. The snubber circuit was designed to prevent unintentional tripping of the thyristors. The speed was controlled in a closed loop using a PI controller. Finally, the prototype and results are presented.

Keywords: Rectifier. Motor. Buck. PWM. Thyristors.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fornecida em corrente alternada, principalmente por ser possível aumentar ou diminuir a tensão com o uso de transformadores. A conversão de corrente alternada para contínua pode ser realizada através de circuitos retificadores. Esses circuitos podem ser controlados (utilizando tiristores) ou não controlados (utilizando diodos), monofásicos ou trifásicos e meia ponte ou ponte completa (POMILIO, 2014).

Sabe-se que muitas aplicações exigem corrente contínua, como, por exemplo, a alimentação de motores CC, que foram os primeiros a serem utilizados na indústria (FUENTES). Os motores CC podem ter sua velocidade controlada, e uma das maneiras é alterando a tensão média aplicada na armadura (POLI-USP). Este controle é extremamente útil em diversas aplicações, como em elevadores, prensas, bobinadeiras, etc. (SIEMENS, 2006). Desta forma, pode-se utilizar circuitos retificadores controlados para variar a velocidade de motores CC, como por exemplo o conversor CTW900 da WEG.

O objetivo deste artigo é apresentar o projeto e a implementação de um retificador controlado de onda completa em ponte, um retificador monofásico não controlado de onda completa com filtro capacitivo e um conversor *buck* com o intuito de controlar um motor de corrente contínua presente em um dos laboratórios do IFSC. Também serão dimensionados e ilustrados o circuito de comando da armadura e o circuito *snubber*, além dos esforços nos componentes, cálculo térmico e controle em malha fechada.

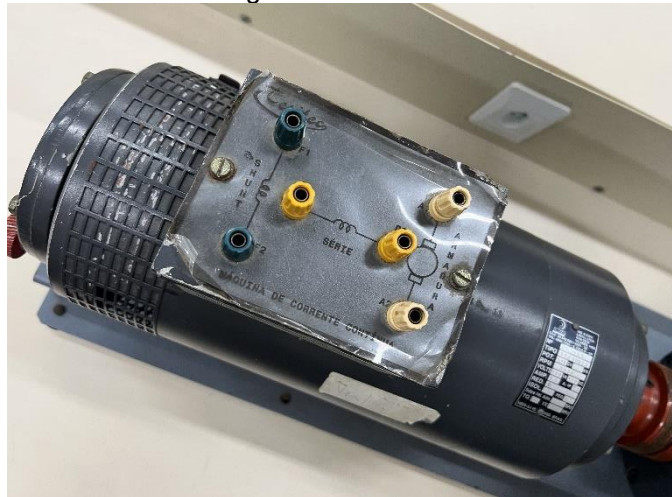
2 DESENVOLVIMENTO

Neste tópico explora-se o motor CC, *encoder* e microcontrolador utilizado, *display LCD shield* com teclado, circuitos de potência e comando, esforços nos componentes, controle em malha fechada e o protótipo desenvolvido.

2.1 MOTOR CC

O motor de corrente contínua é composto pela bobina de campo e de armadura. Ele pode ser ligado de diversas formas, de modo que a armadura e o campo possam ser ligados em série, em paralelo ou de forma independente (SIEMENS, 2006). Neste projeto a armadura e o campo são alimentados de forma independente. A Figura 1 mostra o motor utilizado para este projeto:

Figura 1 – Motor CC



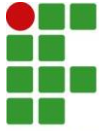
Fonte: O autor (2024).

A seguir, são apresentados alguns dos dados técnicos do motor. Esses dados são necessários para o dimensionamento e seleção de componentes para os circuitos de potência.

$$\begin{aligned}R_a &= 3,2 \Omega \\I_a \text{ nom.} &= 6 A \\R_f &= 600 \Omega \\I_f \text{ nom.} &= 300 mA \\U_a &= 180 V \\U_f &= 180 V \\L_a &= 31,8 mH \\L_f &= 6,7 H \\\mu &= 0,005 \\J &= 0,226 kg.m^2\end{aligned}$$

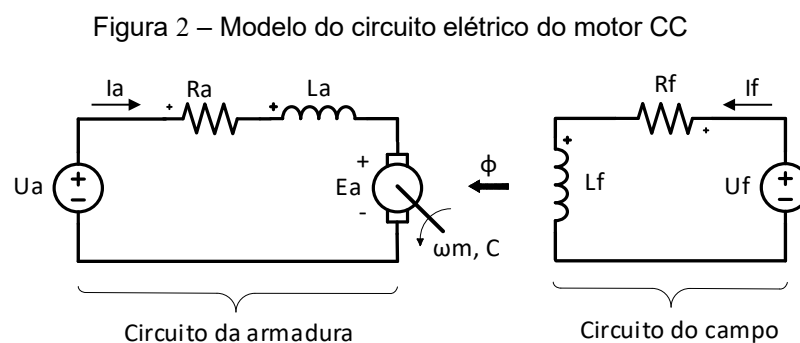
Onde:

R_a é a resistência da armadura;
 $I_a \text{ nom.}$ é a corrente na armadura;
 R_f é a resistência do campo;
 $I_f \text{ nom.}$ é a corrente no campo;
 U_a é a tensão de alimentação da armadura;



U_f é a tensão de alimentação do campo;
 L_a é a indutância da armadura;
 L_f é a indutância do campo;
 μ é o coeficiente de atrito dos rolamentos;
 J é o coeficiente de inércia.

O modelo do circuito elétrico do motor CC é ilustrado na Figura 2 (SIEMENS, 2006):



Fonte: O autor (2024).

Onde:

E_a é a força contra eletromotriz na armadura;
 ϕ é o fluxo magnético por polo;
 k é uma constante que depende do tamanho do motor, do número de polos do rotor e como esses polos são conectados;
 ω_n é a velocidade de rotação do motor.

A Lei de Kirchhoff aplicada ao circuito da armadura resulta em (SIEMENS, 2006):

$$U_a = E_a + R_a \cdot I_a \text{ nom.} \quad (1)$$

O torque produzido é proporcional a intensidade do campo magnético e a corrente na armadura, dado pela equação (POLI-USP):

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a \text{ nom.} \quad (2)$$

Pela lei de indução de Faraday, a força contra eletromotriz é proporcional ao fluxo magnético por polo e a velocidade de rotação, dado por (SIEMENS, 2006):

$$E_a = k \cdot \phi \cdot \omega_n \quad (3)$$

Nota-se que, com o aumento da corrente na armadura, o torque aumenta e assim a velocidade de rotação também aumenta, sendo a corrente no campo constante.

2.2 ENCODER

O *encoder* óptico tem a função de converter movimento mecânico em um sinal elétrico, na forma de pulsos (Alpes Automação). O *encoder* é instalado no eixo do motor, e o sinal gerado é enviado ao microcontrolador, permitindo calcular a velocidade do motor. O modelo utilizado foi o H40-8-1000VL, que possui uma resolução de 1000 pulsos por rotação (Shape Solutions). Porém, também possui uma saída com resolução de 1 pulso por rotação.

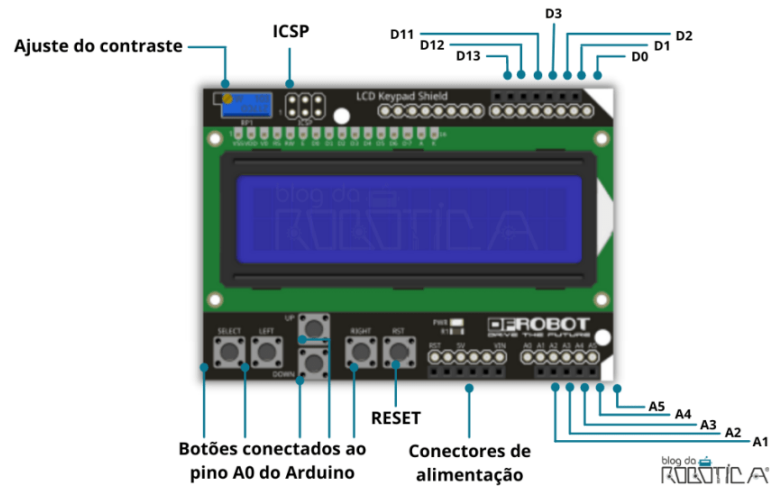
2.3 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador utilizado é o Arduino UNO, que possui 14 pinos de entrada/saída digitais (Blog da Robótica, 2020). O pino digital 2 é utilizado como interrupção externa, recebendo os sinais do *encoder*. Já os pinos 10 e 11 são saídas *PWM* para controle da armadura e do campo do motor CC. O pino *GND* é a referência. A entrada analógica A0 é utilizada pelo *display LCD shield* com teclado para receber as informações dos botões quando pressionados.

2.4 DISPLAY LCD SHIELD COM TECLADO

O *display LCD shield* com teclado dispõe de um *display* 16 x 2 (16 colunas x 2 linhas) que exibe até 16 caracteres por linha (Blog da Robótica, 2021), sendo alimentado pelo microcontrolador. Este *LCD* tem por objetivo apresentar a velocidade lida e a velocidade definida. Além disso, o teclado possui 6 botões do tipo *push-button* (*SELECT*, *LEFT*, *UP*, *DOWN*, *RIGHT* e *RESET*), que são utilizados para iniciar a alimentação do campo do motor CC e variar a velocidade do motor. A Figura 3 ilustra o *display* e seu circuito:

Figura 3 – *Display LCD shield* com teclado



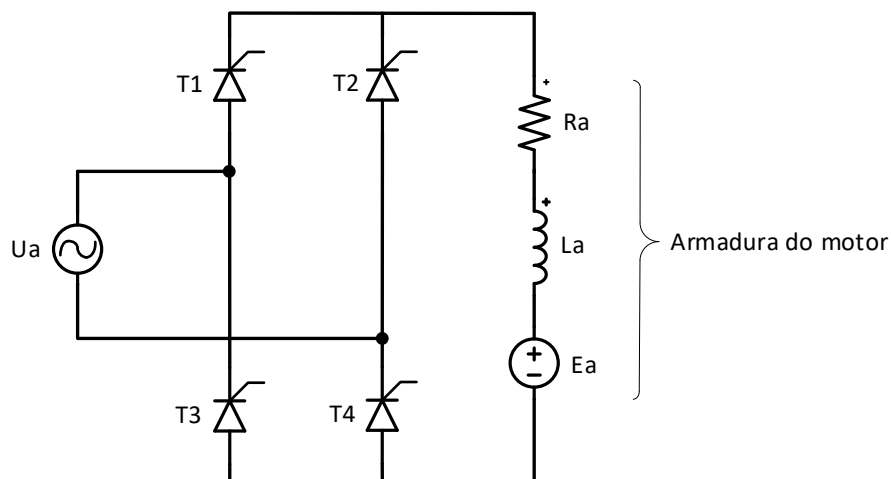
Fonte: Blog da Robótica (2021).

2.5 ACIONAMENTO DA ARMADURA

2.5.1 Retificador controlado de onda completa em ponte

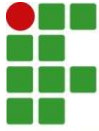
A estrutura utilizada para acionamento da armadura compõe-se do circuito retificador controlado de onda completa em ponte, conforme apresentado na Figura 4 (BARBI, 2000):

Figura 4 – Retificador controlado de onda completa



Fonte: O autor (2024).

Para seleção do tiristor adequado a ser utilizado, deve-se calcular os esforços exercidos por este componente.



2.5.2 Esforços nos tiristores

Os tiristores estão sujeitos a esforços elétricos e térmicos durante seu funcionamento. Dessa forma, é necessário calcular os esforços que serão exercidos sobre este componente, para que sua eficiência e durabilidade não sejam comprometidos. Através da simulação do circuito no *software* PSIM®, foi retirado as informações dos esforços. Dentre eles destacam-se a corrente média, corrente eficaz e a tensão reversa máxima, que são apresentados abaixo:

$$\begin{aligned} I_{Tmed} &= 4,921 A \\ I_{Tef} &= 6,442 A \end{aligned}$$

Onde:

I_{Tmed} e I_{Tef} são, respectivamente, os valores médio e eficaz da corrente conduzida no tiristor.

A tensão reversa máxima que pode ser aplicada sobre o tiristor é a própria tensão de pico da entrada (PUC GOIÁS, 2017), que é dada por:

$$U_{T_Rmáx} = U_a \cdot \sqrt{2} \quad (4)$$

Onde:

U_a é a tensão eficaz de entrada.

Como a tensão de entrada é 220 V:

$$U_{T_Rmáx} = 220 \cdot \sqrt{2} = 311V \quad (5)$$

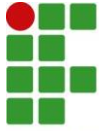
Dessa forma, o tiristor escolhido é o BT151, que atende todas as especificações necessárias.

2.5.3 Circuito *snubber*

O circuito *snubber* consiste de uma combinação em série de uma resistência e um capacitor, ambos em paralelo com um tiristor. Seu objetivo é evitar disparos involuntários que possam ocorrer devido a variações na tensão ou corrente (ENGINEERING TUTORIAL, 2015).

Para dimensionar o circuito *snubber*, foi utilizado o manual de aplicação de semicondutores de potência (*application manual power semiconductor*). Dessa forma, primeiramente calcula-se o valor do capacitor usando a equação abaixo:

$$C = \frac{700 \cdot I_{Tmed}}{V_T^2 \cdot 1 \cdot 10^6} \quad (6)$$



Onde:

C é o capacitor do circuito *snubber*;

I_{Tmed} representa o valor eficaz da corrente conduzida no tiristor (obtido através de simulações);

V_T é a tensão sobre o tiristor.

Os dados são listados abaixo:

$I_{Tmed} = 6,442 A$ (obtido através de simulações)

$V_T = 220 V$ (tensão eficaz da rede)

Assim:

$$C = \frac{700 \cdot 6,442}{220^2 \cdot 1 \cdot 10^6} = 93,17 nF \quad (7)$$

O capacitor comercial escolhido é de $100 nF$.

A resistência do circuito *snubber* é determinada por:

$$R = \frac{9000}{C \cdot V_T \cdot 1 \cdot 10^6} \quad (8)$$

Portanto:

$$R = \frac{9000}{100 \cdot 10^{-9} \cdot 220 \cdot 1 \cdot 10^6} = 409,09 \Omega \quad (9)$$

O resistor comercial escolhido é de 470Ω . Também é necessário calcular a potência dissipada sobre o resistor, que é apresentada abaixo:

$$P_R = 3 \cdot C \cdot V_T^2 \cdot f \quad (10)$$

Onde:

f é a frequência, que neste caso é de $60 Hz$.

Adicionando os dados na Eq. 10:

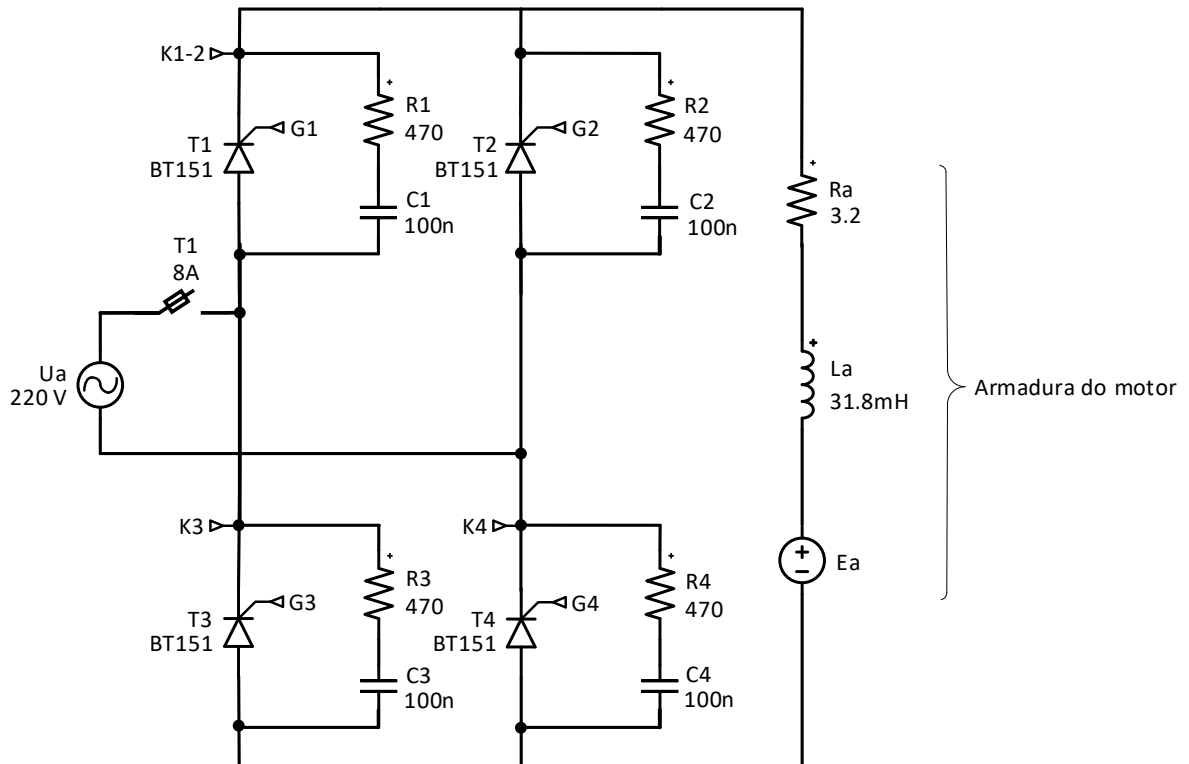
$$P_R = 3.100.10^{-9}.220^2.60 = 871,2 \text{ mW} \quad (11)$$

Dessa forma, deverá ser escolhido o resistor com potência de 1 W.

2.5.4 Circuito de acionamento da armadura

O circuito de acionamento da armadura do motor CC compõe-se do circuito retificador controlado de onda completa em ponte e do circuito *snubber*, além de um fusível para proteção dos componentes. A Figura 5 apresenta o circuito em questão:

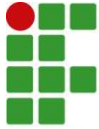
Figura 5 – Circuito de acionamento da armadura



Fonte: O autor (2024).

2.5.5 Circuito de comando da armadura

Nos retificadores controlados, o circuito de disparo dos tiristores deve ser sincronizado com a rede, para que cada disparo não ocorra em um instante diferente da tensão da rede. A forma mais comum é identificar o ponto de cruzamento do zero das ondas da rede, que ocorre aproximadamente a cada 8,33 ms em uma rede de 60 Hz.



Para esta aplicação, pode-se utilizar o TCA785. Este é um circuito integrado analógico com 16 pinos, desenvolvido para gerar pulsos e controlar o ângulo de disparo de tiristores. Ele é alimentado com tensão contínua (8-18 V) nos pinos 16 e 1, sendo o pino 1 a referência. O circuito interno é alimentado pela fonte de tensão interna regulada em 3,1V, que é levado ao pino 8. A sincronização é obtida através de um detector de zero (pino 5) altamente sensível, conectado a um registrador de sincronismo, que gera um pulso de sincronismo toda vez que a tensão da rede passa por zero. O registrador de sincronismo controla um gerador de rampa. Essa rampa é gerada a partir de uma fonte interna controlada de corrente constante que carrega linearmente um capacitor (C10), sendo a corrente desta fonte determinada por um resistor (R9). O tempo de subida da rampa é determinado pela combinação entre R9 e C10 (PUC GOIÁS). O dimensionamento é apresentado abaixo:

$$R_9 = \frac{V_{REF} \cdot K \cdot t}{C_{10} \cdot V_{10}} \quad (12)$$

Onde:

R_9 é a resistência da rampa;
 V_{REF} é a tensão de referência interna;
 K é uma constante;
 t é o tempo de subida da rampa;
 C_{10} é o capacitor da rampa;
 V_{10} é a tensão na rampa.

Os dados conhecidos são apresentados abaixo:

$V_{REF} = 3,1 V$
 $K = 1,1$
 $t = 8,33 ms$
 $C_{10} = 100 nF$

Primeiramente, é necessário encontrar $V_{10 máx}$:

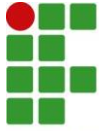
$$V_{10 máx} = V_S - 2 \quad (13)$$

Onde:

$V_{10 máx}$ é a tensão máxima da rampa;
 V_S é a tensão de alimentação do TCA785.

Assim:

$$V_{10 máx} = 12 - 2 = 10V \quad (14)$$



Agora é possível dimensionar a resistência R_9 :

$$R_9 = \frac{3,1.1,1.8,33m}{100n.10} = 28,4 \text{ k}\Omega \quad (15)$$

A resistência R_9 é formada por um resistor e um potenciômetro em série:

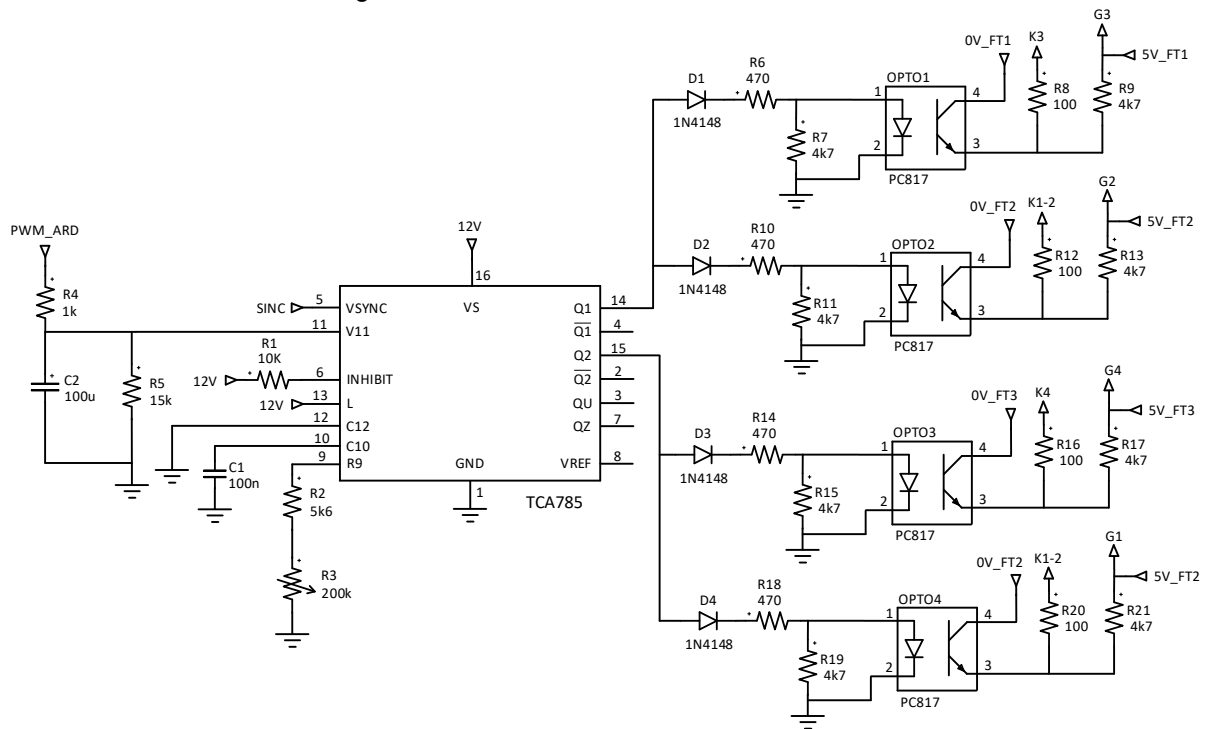
$$R_9 = R_3 + RV_1 \quad (16)$$

$$R_9 = 5,6k + 200k \quad (17)$$

O comparador compara a tensão da rampa com a tensão de controle e, quando a tensão da rampa é maior que a tensão de controle, pulsos são enviados nas saídas, via unidade lógica. Obtêm-se, então, no pino 15, pulsos positivos no semiciclo positivo da tensão de sincronismo, e no pino 14, pulsos positivos no semiciclo negativo da tensão de sincronismo, defasados entre si de 180° (PUC GOIÁS). A tensão de controle vem de um sinal *PWM* gerado pelo arduino. Este sinal é tratado por um filtro RC e então levado ao pino 11. Dependendo da tensão de controle, o ângulo de disparo pode ser deslocado numa faixa de 0° a 180° . Esses pulsos têm suas larguras determinadas pela conexão de um capacitor externo (C12) entre o pino 12 e o terra (caso não utilize o capacitor C12, a duração dos pulsos será de aproximadamente $30 \mu\text{s}$) e amplitudes iguais à tensão de alimentação do pino 16 (PUC GOIÁS).

Os pinos 2 e 4 fornecem pulsos invertidos em relação aos pinos 15 e 14. O pino 7 fornece um pulso correspondente à soma lógica *NOR* dos pulsos dos pinos 14 e 15. O pino 6 pode ser usado para desabilitar os pinos 2, 4, 14 e 15. O pino 13 pode ser usado para estender os pulsos dos pinos 2 e 4 para um pulso completo cujo comprimento é a diferença entre 180° e o ângulo de disparo. Um sinal com o ângulo de disparo mais 180° , que pode ser usado para controle de lógica externa, está disponível no pino 3 (PUC GOIÁS). A Figura 6 apresenta o circuito de comando da armadura:

Figura 6 – Circuito de comando da armadura



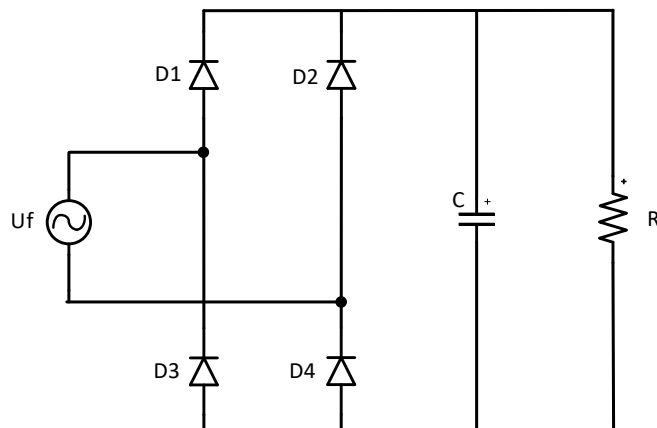
Fonte: O autor (2024).

2.6 ACIONAMENTO DO CAMPO

2.6.1 Circuito retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo

A estrutura utilizada para acionamento do campo compõe-se do circuito retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo, conforme apresentado na Figura 7 (BARBI, 2000):

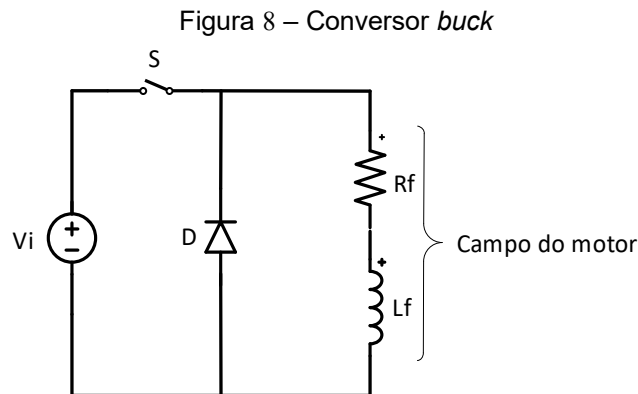
Figura 7 – Retificador com filtro capacitivo



Fonte: O autor (2024).

2.6.2 Conversor *buck*

O circuito de acionamento do campo também compõe-se do conversor *buck*, que é um circuito abaixador de tensão, conforme ilustrado na Figura 8 (PETRY, 2001):



Fonte: O autor (2024).

2.6.3 Esforços nos componentes

Assim como os tiristores, o diodo e o *mosfet* também estão sujeitos a esforços elétricos e térmicos durante seu funcionamento. Dessa forma, é necessário obter os esforços que serão exercidos sobre estes componentes, para que a eficiência e durabilidade não sejam comprometidos. Através da simulação do circuito no *software* PSIM®, foi retirado as informações dos esforços. Dentre eles destacam-se a corrente média, corrente eficaz e a tensão reversa máxima, que são apresentados abaixo:

$$I_{Dmed} = 89,93 \text{ mA}$$

$$I_{Def} = 155 \text{ mA}$$

$$I_{Mmed} = 144 \text{ mA}$$

$$I_{Mef} = 196 \text{ mA}$$

$$U_{D_Rm\acute{a}x} = 0 \text{ V}$$

Onde:

I_{Dmed} e I_{Def} são, respectivamente, os valores médio e eficaz da corrente conduzida no diodo do conversor *buck*;

I_{Mmed} e I_{Mef} são, respectivamente, os valores médio e eficaz da corrente conduzida no *mosfet*;

$U_{D_Rm\acute{a}x}$ é a tensão reversa máxima no diodo.

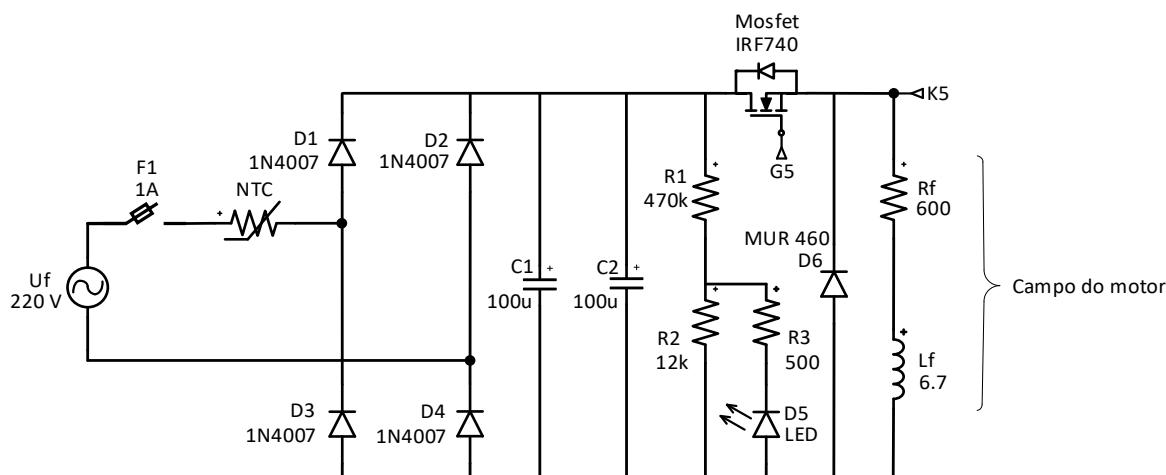
Assim, os modelos utilizados do diodo e do *mosfet* são respectivamente o

MUR460 e o IRF740.

2.6.4 Circuito de acionamento do campo

O circuito de acionamento do campo compõe-se do circuito retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo e do conversor *buck*, além de um fusível para proteção dos componentes, um *NTC* para limitar a corrente de partida, um *LED* de indicação de placa energizada e um *driver* para acionamento do *mosfet*. A Figura 9 apresenta o circuito em questão:

Figura 9 – Circuito de acionamento do campo



Fonte: O autor (2024).

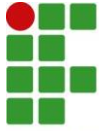
Na etapa de comando, um *driver* isolado recebe o *PWM* do Arduino e gera um sinal que é enviado ao *gate* do *mosfet*. Assim, a tensão na carga aumenta com o aumento do *PWM*.

2.7 CONTROLE EM MALHA FECHADA

O sistema de controle em malha fechada pode ser resumido em manter a saída em torno da resposta desejada. Para isso, é necessário que haja uma realimentação da saída para a entrada. Com essa realimentação, é possível calcular o erro, que é utilizado para corrigir a resposta de saída (GOMES, 2000).

Existem diversos tipos de controladores, e neste projeto foi implementado um controlador Proporcional-Integrativo (PI) para garantir que a velocidade do motor fosse a desejada. É importante mencionar que como o controle em malha fechada não é o foco deste trabalho, não será apresentada a dedução de cada equação.

A ação de controle PI é dada por (VARGAS, 2015):



$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (18)$$

Onde:

K_p é o ganho proporcional;

K_i é o ganho integral.

Assim a função de transferência é dada por:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (19)$$

Como o controlador PI é um controlador contínuo, é necessária a discretização para implementação no Arduino. A transformada Z é dada por:

$$G(z) = \frac{(K_p + K_i T) - K_p z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (20)$$

Dessa forma, a equação à diferença simplificada é dada por:

$$u(k) = u(k - 1) + K_p e(k) - K_i e(k - 1) \quad (21)$$

Com o auxílio da ferramenta *sisotool*, disponível no *software Matlab®*, foi realizado o projeto do controlador com o modelo do circuito elétrico do motor. Porém, foram obtidos resultados satisfatórios nos testes com a equação dada abaixo, sendo $K_p = 0,05$ e $K_i = 0$:

$$u(k) = u(k - 1) + 0,05 \cdot (veloc_{defin} - veloc_{lida}) \quad (22)$$

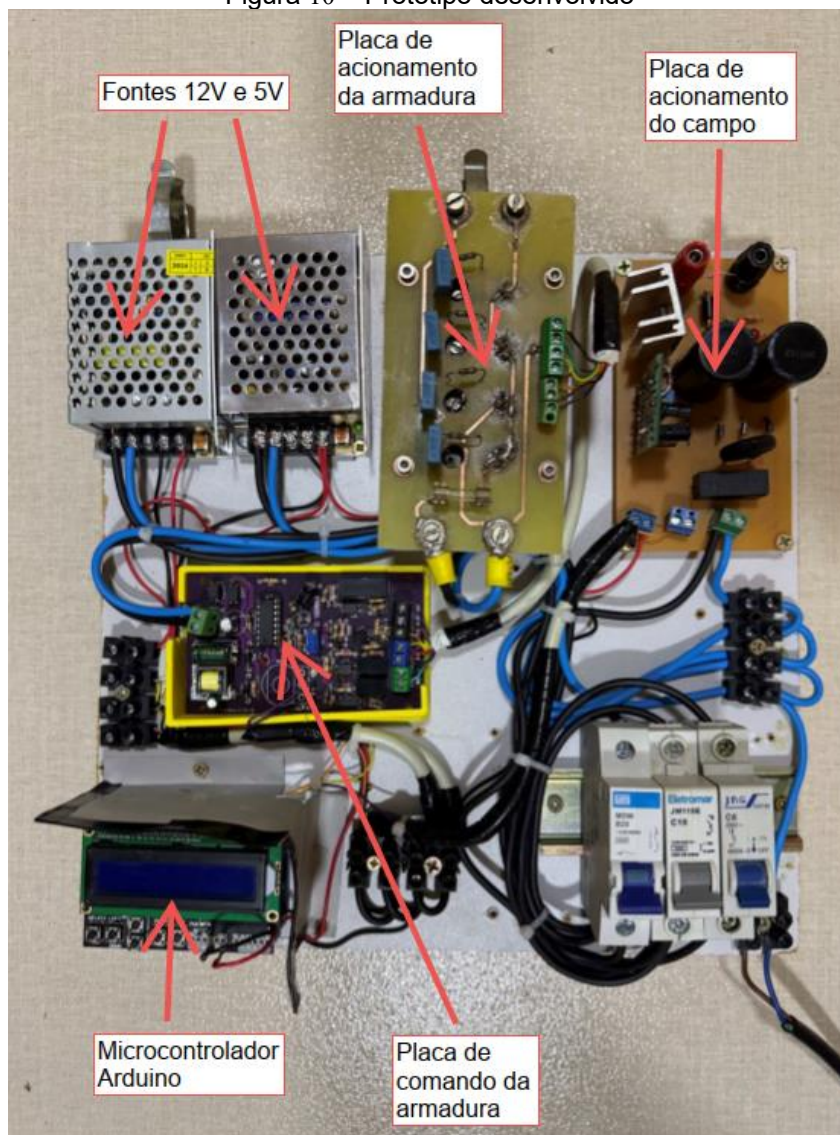
Esta equação foi implementada no código para realizar o controle da velocidade do motor.

2.8 PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Os circuitos apresentados foram inicialmente simulados no *software* PSIM®. Posteriormente, os esquemáticos foram desenhados no *software* Microsoft Visio® e os *layouts* para confecção das placas de circuito impresso foram desenhados no *software* Proteus®. Por fim, as placas foram fixadas em uma chapa de madeira. O

protótipo é apresentado na Figura 10:

Figura 10 – Protótipo desenvolvido

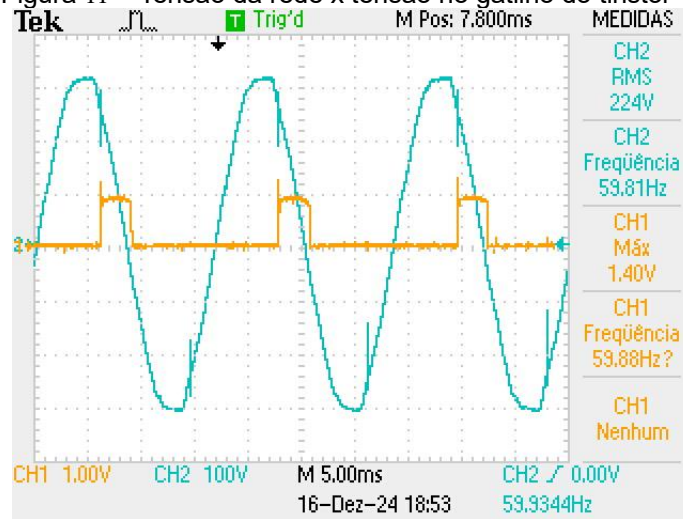


Fonte: O autor (2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar e apresentar os resultados obtidos com o protótipo, serão exibidas as formas de onda obtidas com o osciloscópio. A Figura 11 mostra as formas de onda da tensão da rede no CH2 (em azul) e da tensão no gatilho do tiristor T1 no CH1 (em amarelo):

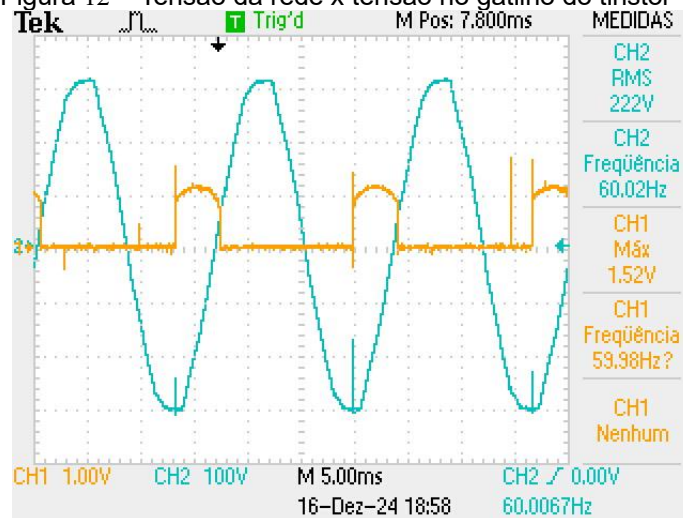
Figura 11 – Tensão da rede x tensão no gatilho do tiristor T1



Fonte: O autor (2024).

A Figura 12 apresenta as formas de onda da tensão da rede no CH2 (em azul) e da tensão no gatilho do tiristor T3 no CH1 (em amarelo):

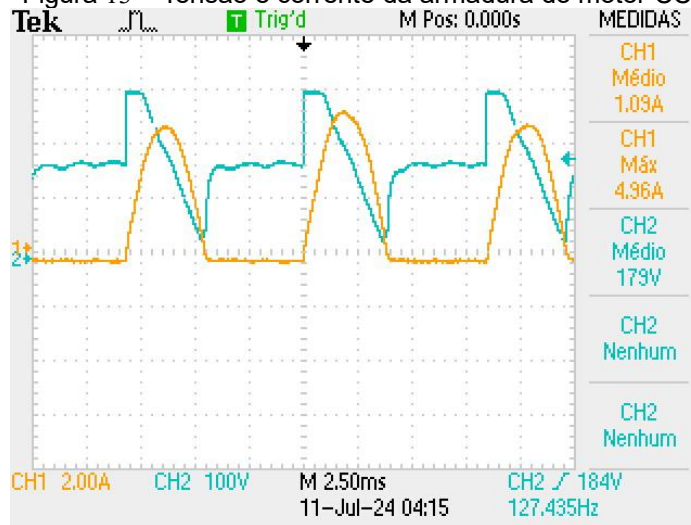
Figura 12 – Tensão da rede x tensão no gatilho do tiristor T3



Fonte: O autor (2024).

A Figura 13 apresenta as formas de onda da tensão no CH2 (em azul) e corrente no CH1 (em amarelo) da armadura do motor CC:

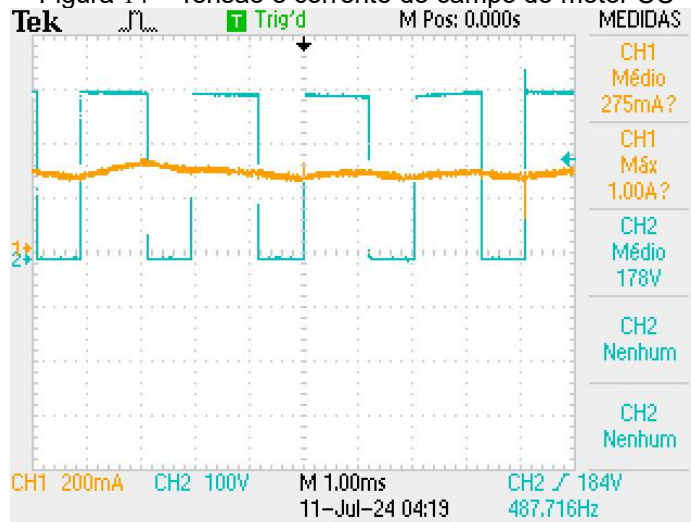
Figura 13 – Tensão e corrente da armadura do motor CC



Fonte: O autor (2024).

A Figura 14 apresenta as formas de onda da tensão no CH2 (em azul) e corrente no CH1 (em amarelo) do campo do motor CC:

Figura 14 – Tensão e corrente do campo do motor CC

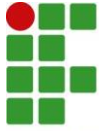


Fonte: O autor (2024).

Assim, pode-se afirmar que os resultados medidos são satisfatórios, pois as formas de onda e valores obtidos estão coerentes com os resultados esperados. Além disso, o funcionamento prático do protótipo evidencia essa afirmação. Por fim, o controle PI mostrou-se eficiente nos testes práticos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou o projeto e a implementação de um protótipo para acionamento de um motor CC. Foram ilustrados circuitos retificadores, um conversor



buck, circuito de comando de tiristores, além de dimensionamentos de circuitos, cálculo dos esforços e cálculo térmico nos componentes. Também foram abordados o *encoder*, o microcontrolador, o *display LCD shield* com teclado e o controle em malha fechada.

O desenvolvimento do projeto foi obtido com êxito em todas as etapas: dimensionamentos, cálculos, simulações e montagem do protótipo. Os resultados obtidos com o osciloscópio se mostraram satisfatórios, pois são coerentes com os cálculos e simulações realizadas e, principalmente, com o funcionamento prático do protótipo. O controle PI mostrou-se eficiente nos testes práticos.

É importante mencionar que dificuldades foram encontradas. As principais foram ruídos que afetaram a leitura da velocidade pelo Arduino. Como solução, utilizou-se cabos com malha e gaiolas de Faraday para evitar interferências eletromagnéticas, além de filtros digitais no código para a leitura correta da velocidade do motor.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se desenhar um novo *layout* da placa de acionamento do campo e adicionar um filtro *EMI*, com o objetivo de eliminar ruídos.

REFERÊNCIAS

Alpes Automação. **O QUE É ENCODER? UM GUIA PROFUNDO SOBRE SENSORES DE MOVIMENTO**. Alpes Automação, 19 jun. 2023. Disponível em: <https://www.alpesautomacao.com.br/encoder/o-que-e-encoder-um-guia-profundo-sobre-sensores-de-movimento/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

BARBI, Ivo *et al.* **Eletrônica de potência**. 3ª Edição. Florianópolis: Do autor, 2000.

CAP. 4 – RETIFICADORES DE ONDA COMPLETA. Goiânia - GO: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2017.

Circuito integrado TCA - 785. Goiânia - GO: Universidade Católica de Goiás.

Encoder H40-8-1000-VL1. Shape Solutions Ltda. Disponível em: <https://www.shapesolutions.com.br/product-page/encoder-h40-8-1000-vl1-8-26vcc>. Acesso em: 10 set. 2024.

Engineering Tutorial. **HOW SNUBBER CIRCUITS WORKS ?**. Engineering Tutorial, 2016. Disponível em: <https://engineeringtutorial.com/snubber-circuit-works/amp/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

FUENTES, R. C. **CONTROLE DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA**. Santa Maria - RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

GOMES, João Manoel. **CONTROLE EM MALHA FECHADA**. UFRGS. Disponível em: <https://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node6.html>. Acesso em: 15 nov. 2024.

HONDA, F. **MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA: Guia rápido para uma especificação precisa.** Siemens, 2006.

MORAES, Caio. **DISSIPADOR DE CALOR – O GUIA COMPLETO.** Eletrônica de Potência. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/dissipador-de-calor-o-guia-completo/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

Motor de Corrente Contínua. São Paulo - SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PETRY, C. A. **DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO DE SEMICONDUTORES.** Florianópolis - SC: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2013.

PETRY, C. A. **ESPECIFICAÇÃO DE SEMICONDUTORES E CÁLCULO TÉRMICO.** Florianópolis - SC: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2013.

PETRY, C. A. **INTRODUÇÃO AOS CONVERSORES CC-CC.** Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

POMILIO, J. A. **CONVERSORES CA-CC - RETIFICADORES.** Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 2014.

REIMANN, Tobias *et al.* **Application Manual Power Semiconductors.** Nuremberg: SEMIKRON, 2010.

VARGAS, A. N. **PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE.** Curitiba - PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

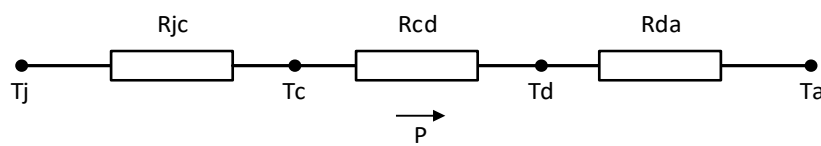
VIANA, Carol Correia. **Como Utilizar o Shield Display 16×02 LCD com Teclado no Arduino.** Blog da Robótica, 12 mai. 2021. Disponível em: <https://www.blogdarobotica.com/2021/05/12/como-utilizar-o-shield-display-16x02-lcd-com-teclado-no-arduino/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

VIANA, Carol Correia. **Conhecendo a placa Arduino UNO.** Blog da Robótica, 17 set. 2020. Disponível em: <https://www.blogdarobotica.com/2020/09/17/conhecendo-a-placa-arduino-uno/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

APÊNDICE A – Cálculo térmico dos tiristores

Os semicondutores de potência apresentam perdas por condução e comutação, que são dissipadas em forma de calor sobre o componente, podendo danificá-lo. Assim, os dissipadores de calor são utilizados como solução (MORAES, 2021). A escolha do dissipador é feita usando um modelo térmico simplificado para determinar a resistência térmica entre a junção do semicondutor e o ambiente (PETRY, 2013), conforme mostrado na Figura 15:

Figura 15 – Modelo térmico de um semicondutor



Fonte: O autor (2024).

Onde:

- P é a potência média dissipada pelo semicondutor (W);
- T_j é a temperatura na junção ($^{\circ}\text{C}$);
- T_c é a temperatura na cápsula ($^{\circ}\text{C}$);
- T_d é a temperatura no dissipador ($^{\circ}\text{C}$);
- T_a é a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);
- R_{jc} é a resistência térmica entre junção e cápsula ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$);
- R_{cd} é a resistência térmica entre cápsula e dissipador ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$);
- R_{da} é a resistência térmica entre dissipador e ambiente ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

A potência média dissipada pelo tiristor em condução é dada pela equação:

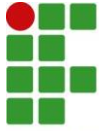
$$P = V_{T(TO)} \cdot I_{Tmed} + r_T \cdot I_{Tef}^2 \quad (23)$$

Onde:

- $V_{T(TO)}$ é a queda de tensão;
- I_{Tmed} e I_{Tef} são, respectivamente, os valores médio e eficaz da corrente conduzida;
- r_T é a resistência interna.

Os dados são listados abaixo:

- $V_{T(TO)} = 1,4 \text{ V}$ (obtido através do *datasheet*)
- $I_{Tmed} = 4,921 \text{ A}$ (obtido através de simulações)
- $r_T = 10 \text{ m}\Omega$ (típico de diodos e tiristores)
- $I_{Tef} = 6,442 \text{ A}$ (obtido através de simulações)



Adicionando os dados na Eq. 23:

$$P = 1,4 \cdot 4,921 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 6,442^2 = 7,3 \text{ W} \quad (24)$$

A temperatura na junção é dada por:

$$T_j = R_{ja} \cdot P + T_a \quad (25)$$

Onde:

$$R_{ja} = 60 \text{ }^\circ\text{C/W} \text{ (obtido através do datasheet)}$$

$$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Adicionando os dados na Eq. 25:

$$T_j = 60 \cdot 7,3 + 40 = 478 \text{ }^\circ\text{C} \quad (26)$$

Como T_j calculado é maior que o $125 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_j máximo suportado pelo tiristor apresentado no *datasheet*), o uso do dissipador é necessário. Assim, a potência dissipada sobre o tiristor irá provocar um aumento de temperatura. Os dados são listados abaixo:

$$T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (obtido através do datasheet)}$$

$$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Assim pode-se determinar a resistência térmica total entre a junção e o ambiente:

$$R_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P} \quad (27)$$

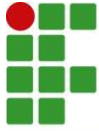
Nota-se que esta potência (P) é a dissipada em cada tiristor. Como o objetivo é utilizar um dissipador para os quatro tiristores, a potência total de dissipação é calculada a partir da Equação 28:

$$P_T = P \cdot 4 \quad (28)$$

Adicionando os dados na Equação 28:

$$P_T = 7,3 \cdot 4 = 29,2 \text{ W} \quad (29)$$

Adicionando os dados na Eq. 27:



$$R_{ja} = \frac{478 - 40}{29,2} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (30)$$

Agora determina-se a resistência térmica entre dissipador e ambiente:

$$R_{da} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cd} \quad (31)$$

Os dados são listados abaixo:

$$R_{jc} = 2,4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \text{ (obtido através do } \textit{datasheet})$$

$$R_{cd} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \text{ (típico de diodos e tiristores)}$$

Assim:

$$R_{da} = 14,49 - 2,4 - 1 = 11,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (32)$$

Com este dado define-se o modelo de dissipador utilizando um catálogo de dissipadores.

APÊNDICE B – Cálculo térmico do conversor *buck*

Conforme já apresentado no Apêndice A, os semicondutores de potência apresentam perdas por condução e comutação, o que torna necessário o uso de dissipadores em alguns casos. Assim, é apresentado o cálculo térmico do diodo do conversor *buck*. Os dados são listados abaixo:

$$V_{D(TO)} = 1,05 \text{ V} \text{ (obtido através do } \textit{datasheet})$$

$$I_{Dmed} = 89,93 \text{ mA} \text{ (obtido através de simulações)}$$

$$r_D = 10 \text{ m}\Omega \text{ (típico de diodos e tiristores)}$$

$$I_{Def} = 155 \text{ mA} \text{ (obtido através de simulações)}$$

Onde:

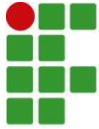
$V_{D(TO)}$ é a queda de tensão;

I_{Dmed} e I_{Def} são, respectivamente, os valores médio e eficaz da corrente conduzida;

r_D é a resistência interna.

A potência média dissipada pelo diodo em condução é dada pela equação:

$$P = V_{D(TO)} \cdot I_{Dmed} + r_D \cdot I_{Def}^2 \quad (33)$$



Adicionando os dados na Eq. 33:

$$P = 1,05 \cdot 0,08993 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,155^2 = 94,67 \text{ mW} \quad (34)$$

A temperatura na junção é dada na Eq. 25, onde:

$$R_{ja} = 50 \text{ }^\circ\text{C/W} \text{ (obtido através do datasheet)}$$
$$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Adicionando os dados na Eq. 25:

$$T_j = 50 \cdot 0,09467 + 40 = 44,73 \text{ }^\circ\text{C} \quad (35)$$

Como T_j calculado é menor que o $175 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_j máximo suportado pelo diodo apresentado no *datasheet*), o uso do dissipador neste diodo não é necessário. Já os dados do *mosfet* são apresentados abaixo:

$$V_{M(TO)} = 2 \text{ V} \text{ (obtido através do datasheet)}$$
$$I_{Mmed} = 144 \text{ mA} \text{ (obtido através de simulações)}$$
$$r_M = 0,55 \text{ } \Omega \text{ (obtido através do datasheet)}$$
$$I_{Mef} = 196 \text{ mA} \text{ (obtido através de simulações)}$$

Onde:

$V_{M(TO)}$ é a queda de tensão;
 I_{Mmed} e I_{Mef} são, respectivamente, os valores médio e eficaz da corrente conduzida;
 r_M é a resistência interna.

A potência média dissipada pelo *mosfet* em condução é dada pela equação:

$$P = V_{M(TO)} \cdot I_{Mmed} + r_M \cdot I_{Mef}^2 \quad (36)$$

Adicionando os dados na Eq. 36:

$$P = 2 \cdot 0,144 + 0,55 \cdot 0,196^2 = 0,309 \text{ W} \quad (37)$$

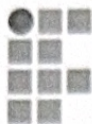
A temperatura na junção é dada na Eq. 25, onde:

$$R_{ja} = 62 \text{ }^\circ\text{C/W} \text{ (obtido através do datasheet)}$$
$$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Adicionando os dados na Eq. 25:

$$T_j = 62 \cdot 0,309 + 40 = 59,16 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (38)$$

Como T_j calculado é menor que o $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ (T_j máximo suportado pelo *mosfet* apresentado no *datasheet*), o uso do dissipador no *mosfet* também não é necessário.



MATHEUS HENRIQUE DA CUNHA

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM DRIVER PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR CC

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 06 de Fevereiro de 2025.

Prof. Janderson Duarte, Dr
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Joinville

Prof. Carlos Matsumi, Dr.
Coorientador

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Joinville

Prof. Michael Klug, Dr

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Joinville

Prof. Jeferson Luiz Curzel, Dr

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Joinville