

# Relatório - Trabalho de Microprocessadores e Microcontrolares

Universidade Federal de Ouro Preto

1<sup>st</sup> Grazielle de Cássia Rodrigues  
Discente Engenharia De Computação  
Universidade Federal de Ouro Preto  
ICEA  
21.1.8120

2<sup>nd</sup> Matheus Fernandes Gomes  
Discente Engenharia de Computação  
Universidade Federal de Ouro Preto  
ICEA  
17.2.5941

**Index Terms**—pwm, adc, timer, interrupção, encoders, usart, rs232, ponte h, opto-acopladores, PID

## I. MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)

A Modulação por Largura de Pulsos (PWM) é uma técnica digital que desempenha um papel fundamental na transmissão de informações por meio da variação da duração dos pulsos de um sinal. Ela é particularmente relevante quando se trata de sinais de controle analógico digitalmente. Enquanto os sinais analógicos variam continuamente e podem ser difíceis de definir com precisão, os sinais digitais alternam de forma previsível entre dois estados lógicos, ligado (0) e desligado (1). Portanto, o controle PWM é uma técnica amplamente aplicada em microcontroladores, oferecendo uma maneira eficiente de manipular sinais analógicos por meio de abordagens digitais. O PWM possui três sinais muito importantes que são:

- Sinal Modulante: Este é o sinal que contém a informação que desejamos transmitir.
- Sinal Portador: O sinal que serve como veículo para transportar a informação do sinal modulante.
- Sinal Modulado: Este é o sinal resultante da combinação do sinal modulante com o sinal portador.

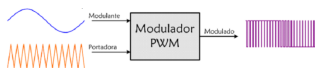


Fig. 1. Modulação PWM

Na Figura 1, você pode ver um exemplo de modulador PWM com esses os 3 tipos de sinais citados acima. Nesse cenário, o sinal modulante é uma onda senoidal, enquanto o sinal portador é uma onda triangular ou dente-de-serra. O resultado da modulação é um sinal de onda quadrada com uma frequência igual ao sinal portador e uma largura de pulso controlada pelo sinal modulante.

Outro caso em que se utiliza a técnica de de PWM é a conversão de informações analógico em digitais (figura 2), que consiste em um simples Amplificador Operacional

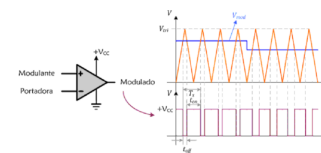


Fig. 2. Amplificação com modulação

na configuração Comparadora. Assim, o sinal modulante é conectado na entrada não-inversora, enquanto a portadora triangular é conectada na entrada inversora. Neste caso, sempre que o sinal modulante for maior que o sinal portador, a saída do modulador será um nível lógico alto e quando o contrário, um nível lógico baixo e o Vmod é definido como ciclo de trabalho, ou duty cycle (D).

O PWM encontra aplicação em diversas situações, como controle de velocidade de motores, ajuste de intensidade luminosa em LEDs, criação de sinais analógicos e geração de sinais de áudio. Essa tecnologia desempenha um papel crucial em muitos dispositivos que usados diariamente e é amplamente empregado na indústria, tanto para acionar máquinas por meio de controladores quanto para sistemas de controle e automação.

### A. PWM no STM32

O módulo PWM nos microcontroladores STM32 é uma ferramenta poderosa para gerar sinais digitais com diferentes larguras de pulso. Eles normalmente oferecem múltiplos canais PWM, permitindo o controle independente de várias saídas. Os STM32 também permitem configurar a resolução do PWM para precisão personalizada, escolher entre modos de contagem ascendente, descendente ou bidirecional e aplicar recursos avançados, como configuração de tempo morto evitando possíveis curtos-circuitos. Além disso, a configuração de saída pode ser adaptada às necessidades da aplicação, com opções de push-pull ou open-drain. Esses detalhes técnicos tornam os microcontroladores STM32 ideais para diversas aplicações que do controle de sinais PWM.

## II. CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL

O Conversor Analógico-Digital (ADC), também conhecido como A/D, é um dispositivo que converte informações de um formato analógico, como uma tensão ou corrente elétrica, em dados digitais compreensíveis por dispositivos digitais, como microcontroladores, DSPs e microprocessadores. Esses conversores desempenham um papel essencial na comunicação entre dispositivos digitais e analógicos, sendo usados para leitura de sensores, digitalizar sinais de áudio e vídeo, entre outras aplicações.

### A. Conversor Analógico-Digital no STM32

O ADC (Conversor Analógico-Digital) nos processadores STM32 é responsável por converter sinais analógicos em valores digitais. A abordagem usada pelo STM32 ADC é a aproximação sucessiva, onde o ADC gera um conjunto discreto de tensões e compara-as com a tensão de entrada, realizando uma pesquisa binária para encontrar a melhor correspondência. Para alcançar uma precisão de 12 bits, o STM32 requer pelo menos 14 ciclos do clock ADC, incluindo dois ciclos extras para amostragem, o que resulta em uma velocidade de amostragem rápida, por exemplo, em torno de 1 microssegundo com um clock de ADC de 12 MHz.

O STM32 VL apresenta apenas uma entrada ADC, porém ele pode acomodar várias entradas analógicas utilizando a multiplexação de algumas entradas, como PA0-PA7, PB0-PB1 e PC0-PC5 na Discovery Board. O ADC pode ser configurado para amostrar qualquer subconjunto dessas entradas em sucessão. É importante salientar que o microcontrolador possui 2 modos de operação principal:

- Modo de conversão única: nesse modo, o ADC é acionado para converter uma única entrada e armazena o resultado no seu registro de dados (DR), podendo ser acionado por software ou por um sinal externo, como um temporizador.
- Modo de conversão contínua: no contínuo, o ADC inicia uma nova conversão assim que conclui a anterior. Além disso, o ADC pode operar em modo de varredura, onde um conjunto de entradas é configurado para ser digitalizado em sucessão, podendo ser configurado para operação contínua de varredura. Essas características tornam o ADC dos STM32 versátil e adaptável a uma variedade de aplicações.

1) *Resolução*: No contexto do Conversor Analógico-Digital (ADC) nos microcontroladores, a resolução refere-se à precisão com a qual o ADC pode representar um sinal analógico em um valor digital. A resolução é expressa em bits e determina o número de valores discretos que o ADC pode distinguir em sua faixa de entrada. Para calcular a resolução, você utiliza a fórmula:

$$\text{Resolução} = 2^n \quad (1)$$

- Resolução: número de bits da saída digital
- n: número de bits que representa a faixa de valores possíveis

Uma resolução maior significa uma capacidade de representação mais precisa, mas também pode aumentar a complexidade do ADC e exigir mais tempo para converter um sinal analógico em um valor digital. Portanto, a escolha da resolução depende das necessidades específicas da aplicação e dos compromissos entre precisão e velocidade.

2) *Frequência de amostragem*: A frequência de amostragem em um Conversor Analógico-Digital (ADC) representa a taxa na qual o ADC realiza simulação e converte sinais analógicos em valores digitais, geralmente medidos em amostras por segundo (Sa/s). A escolha adequada da frequência de amostragem é crucial para capturar com precisão as informações do sinal analógico, evitando perda de dados e distorções.

3) *Teorema de Nyquist-Shannon*: O Teorema de Nyquist-Shannon estabelece que a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima do sinal para evitar as características de aliasing. Portanto, a frequência de amostragem deve ser selecionada considerando a largura de banda do sinal para garantir uma representação adequada dos dados. No STM32 o circuito de amostragem e retenção em um conversor analógico-digital (ADC) envolve o carregamento de um capacitor interno. A resistência externa pode desempenhar um papel importante, já que uma fonte de tensão externa com "alta impedância" pode carregar o capacitor lentamente, enquanto uma fonte de "baixa impedância" o carrega rapidamente. Portanto, o tempo necessário para capturar uma tensão de entrada depende das características do circuito externo. O tempo de captura no microcontrolador é ajustável de 1,5 a 239,5 ciclos. Em aplicações de alta velocidade, um amplificador operacional externo pode ser necessário. Em situações menos críticas de velocidade, um ritmo de amostragem mais longo é preferível.

## III. TIMERS

Os timers (ou temporizadores) são dispositivos eletrônicos que fornecem funcionalidades de medição e controle do tempo. Os microcontroladores, como o STM32, empregam recursos de temporização em hardware para criar sinais em diversas frequências, produzir saídas moduladas por pulsos (PWM), mensurar pulsos de entrada e acionar eventos em intervalos ou atrasos conhecidos.

A família STM32 disponibiliza diversos tipos de periféricos de temporização com diferentes capacidades de configuração. Os temporizadores mais simples (TIM6 e TIM7) são principalmente utilizados para gerar sinais em frequências predefinidas ou pulsos com largura fixa. Por outro lado, temporizadores mais avançados incorporam hardware adicional para gerar sinais com larguras de pulso específicas, independentemente da frequência base, ou para realizar medições desse tipo de sinal.

Um exemplo de um temporizador simples é ilustrado na Figura 3. Esse temporizador é composto por quatro elementos:

- controlador
- prescaler
- registrador - "auto-reload":

- contador

O prescaler tem a função de reduzir a frequência do relógio de referência, tornando-a mais baixa. Nos microcontroladores STM32, os registradores de prescaler possuem 16 bits e podem dividir o clock de referência por valores entre 1 e 65535. Por exemplo, o clock do sistema de 24MHz do STM32 VL Discovery pode ser limitado para uma frequência de interrupção de 1MHz usando um divisor (prescaler) de 23. O registrador de contagem pode ser configurado para contar de forma crescente (Up), decrescente (Down) ou de forma alternada (Up/Down), e pode ser recarregado pelo registrador de carregamento automático sempre que ocorrer um "estouro" (um "evento de atualização") ou pode ser parado. O temporizador básico gera um evento de saída (TGRO) que pode ser programado para ocorrer durante um evento de atualização ou quando o contador é ativado, por exemplo, por meio de um sinal de entrada GPIO.

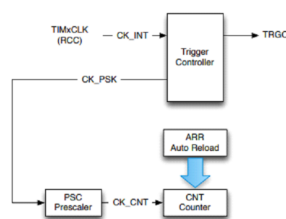


Fig. 3. Temporizador

#### IV. INTERRUPTUÇÕES

Interrupções são componentes essenciais de hardware que possibilitam que os dispositivos periféricos informem o software sobre eventos críticos. Por exemplo, quando desejamos gerar um sinal analógico em intervalos precisos para reproduzir um arquivo de áudio, podemos configurar um temporizador para gerar interrupções em momentos específicos. Quando a interrupção programada ocorre, o processador muda a execução do programa principal para um tratador de interrupção especial, que pode processar o evento de interrupção, como a transferência de dados para a saída de áudio. Após a conclusão das tarefas do tratador de interrupção, o processador retoma a execução do programa principal. As interrupções também desempenham um papel crucial na comunicação, por exemplo, notificando o processador quando um caractere chega a uma porta UART.

As interrupções podem ser acionadas por diversos eventos, como o temporizador do sistema, erros de acesso à memória, resets externos e pelos diversos periféricos disponíveis no processador STM32. É útil pensar em cada possível origem de interrupção como um sinal independente monitorado pelo núcleo do processador durante a execução do programa. Quando o núcleo identifica um sinal de interrupção válido e está configurado para aceitar interrupções de interrupção, ele responde salvando o estado do programa em execução na pilha de programa e executando um manipulador (às vezes chamado de rotina de serviço de interrupção) correspondente

à interrupção recebida. Após a conclusão do manipulador, o estado do programa é restaurado, e a execução normal do programa continua.

A interrupção pode ser aplicada em temporização e controle de eventos, comunicação UART/USART, comunicação SPI e I2C, entradas/saídas GPIO, manuseio de periféricos externos entre outras.

#### V. ENCODERS

Os encoders são dispositivos utilizados para medir a posição, velocidade ou deslocamento de um eixo em rotação. Eles geram pulsos elétricos à medida que o eixo gira, e a contagem desses pulsos permite determinar a posição ou movimento. Eles podem ser de dois tipos principais os Encoders incrementais que geram pulsos em um padrão contínuo, e a posição é determinada pela contagem dos pulsos e os encoders absolutos que codificam a posição em um valor binário único, o que permite a leitura direta da posição sem a necessidade de contagem. Algumas das Técnicas de Contagem de Pulsos com o Microcontrolador STM32 são:

- Configuração do Hardware: Conecte os sinais A e B do encoder aos pinos GPIO do microcontrolador. Um dos sinais é usado como referência e o outro para contar os pulsos.
- Ativação dos Periféricos: Configure os pinos GPIO para usar as funções de controle de periférico associadas a esses sinais.
- Configuração do Timer (Temporizador): Use um timer do STM32 (por exemplo, TIM2 ou TIM3) para medir o tempo entre as transições dos pulsos do encoder.
- Ativação de Interrupções: Configure interrupções para os pinos A e B para capturar transições de borda de subida e descida.
- Programação do Software: No tratador de interrupção, compare os estados dos pinos A e B para determinar a direção do movimento (horário ou anti-horário) e atualize a contagem de pulsos.
- Utilização de Filtros: Às vezes, é útil usar filtros de software para suavizar as leituras e reduzir erros devido a ruídos.

Como já mencionado o STM32 possui timers avançados e recursos de GPIO que tornam a contagem de pulsos de encoders uma tarefa viável. É importante configurar corretamente as interrupções, timers e pinos GPIO para garantir medições precisas da posição e direção do eixo controlado pelo encoder.

#### VI. MÓDULO DE COMUNICAÇÃO USART E PADRÃO RS232

Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter (USART) é um transmissor ou receptor que pode ser usado no modo de comunicação serial síncrona ou assíncrona e é usado para comunicação de curta distância, principalmente em sistemas embarcados.

Quando USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter) é usado no modo assíncrono é

chamado de UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter).

#### A. Funcionamento

Os periféricos USART/UART enviam dados serialmente através de um fio. Existe dois tipos de comunicação, sendo:

- Comunicação síncrona: na comunicação síncrona requer uma extremidade para atuar como mestre, e fornecer um sinal de clock. Os dados fluem através do TxD e são recebidos pelo pino RxD. O pino XCK é usado para sincronizar a transferência de dados, fornecendo um sinal de relógio. O pino TxD no mestre é conectado ao pino RxD no escravo e vice-versa.

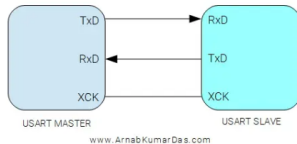


Fig. 4. Comunicação síncrona

- Comunicação assíncrona: na comunicação assíncrona não usa um sinal de clock separado, mas, exige que ambas as extremidades concordem com precisão em uma taxa de clock – conhecida como taxa de transmissão. A comunicação assíncrona começa com um bit de início e termina com um bit de parada para cada caractere transmitido ou recebido.

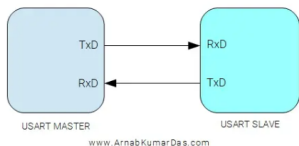


Fig. 5. Comunicação assíncrona

Para iniciar qualquer comunicação USART, o primeiro passo é configurar o gerador de taxa de transmissão do dispositivo. A taxa de transmissão dos dispositivos mestre e escravo deve ser a mesma para comunicação livre de erros. A taxa de transmissão define a velocidade de transmissão ou a taxa de dados. Algumas taxas de transmissão válidas (bps) são 2400, 4800, 9600, 14.4k, 19.2k, 28.8k, 38.4k, 57.6k, 76.8k, 115.2k, 230.4k, 250k, 0.5M, 1M. No modo mestre síncrono, o dispositivo usa o pino XCK para produzir o clock gerado usando o gerador de taxa de transmissão. No modo escravo síncrono, o pino XCK é usado para receber o relógio externo.

Um outro ponto a se comentar é o quadro serial USART que é definido como um caractere de bits de dados com bits de sincronização (bits de início e parada) e, opcionalmente, um bit de paridade para verificação de erros. Um quadro USART começa com o bit inicial seguido pelo bit de dados menos significativo (LSB). Em seguida, os próximos bits de dados, até um máximo de nove, terminando com o bit (MSB) mais

significativo. Se habilitado, o bit de paridade é inserido após os bits de dados, antes dos bits de parada. Quando um quadro completo é transmitido, ele pode ser seguido diretamente por um novo quadro ou a linha de comunicação pode ser definida para um estado ocioso (alto).

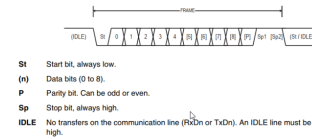


Fig. 6. Quadro Serial

#### B. Padrão RS232

RS-232 (Recommended Standard 232) é um padrão de comunicação serial utilizado para transmitir dados através de uma linha de transmissão. Ele é amplamente utilizado em sistemas de computador, equipamentos de automação industrial e equipamentos de áudio/vídeo para se comunicarem com outros dispositivos. O padrão RS-232 foi desenvolvido pela Electronic Industries Association (EIA) nos Estados Unidos nos anos 1960 como uma forma de padronizar a comunicação serial entre equipamentos eletrônicos. Os conectores utilizados para o padrão RS-232 são conhecidos como conectores DE-9 ou conectores DB-9. Esses conectores são geralmente utilizados para conectar o cabo RS-232 aos dispositivos de entrada/saída (I/O). Em microcontroladores, o Universal Asynchronous Data

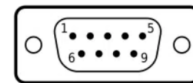


Fig. 7. Conector RS232

Receiver and Transmitter (UART) é usado em conexão com RS232 para transferir dados entre impressora e computador.

#### C. Aplicações

USART é usado para comunicação com microcontroladores, microprocessadores, módulos GPS, módulos GSM, teclado, sensores (giroscópio, etc.) e é amplamente utilizado em sistemas embarcados modernos.

### VII. PONTE H

Uma Ponte H é um circuito especial que permite realizar a inversão da direção (polaridade) da corrente que flui através de uma carga. É muito utilizada, por exemplo, para controlar a direção de rotação de um motor DC.

A carga gira para trás ou para a frente, dependendo de como você conecta e fecha as chaves. Por exemplo, ao fechar os interruptores 1 e 4, a corrente flui na carga da esquerda para a direita, fazendo com que o motor gire no sentido horário.

E se fechar os interruptores 2 e 3, a corrente flui na carga da direita para a esquerda, fazendo com que o motor gire no sentido anti-horário.

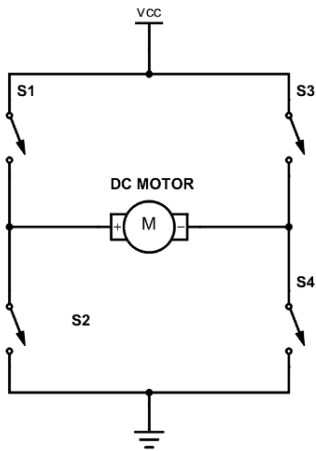


Fig. 8. diagrama ponte h

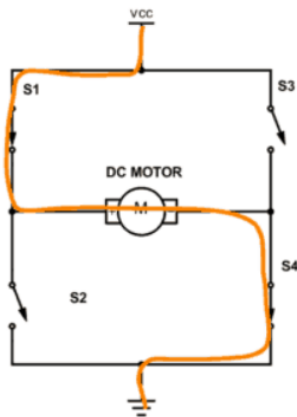


Fig. 9. Sentido horário corrente

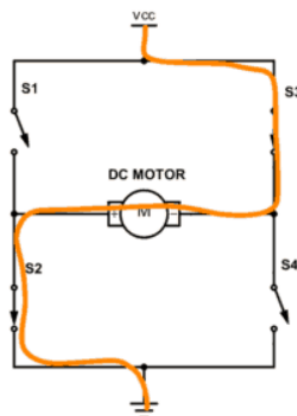


Fig. 10. Sentido antihorário corrente

E caso todas as chaves sejam acionadas, nada acontece! No entanto, possivelmente ocorrerá um curto-circuito entre os polos positivo e negativo da fonte.

Essas chaves podem ser transistores trabalhando nas regiões de corte e saturação. Logo, para fazer este acionamento das chaves é necessário um circuito que seja capaz de comandar cada uma delas. O controle pode ser feito de várias maneiras diferentes alguns exemplos são:

- L298
- L9110
- L293d
- BTS7960
- LMD18200

Para verificar as características técnicas é necessário consultar o datasheet.

É válido destacar, que na maioria desses circuitos integrados há a implementação do PWM para que seja possível controlar a tensão em cima da carga, e, assim, realizar um controle de controle da velocidade do motor dessa forma.

## VIII. OPTO-ACOPLADORES

Os optoacopladores são dispositivos eletrônicos usados para isolar eletricamente componentes de alta tensão ou frequência de componentes de baixa tensão ou sensíveis a ruídos elétricos. Os optoacopladores são compostos por dois principais elementos: um emissor de luz, geralmente um diodo emissor de luz (LED), e um detector de luz, como um fototransistor ou um fotodiodo.

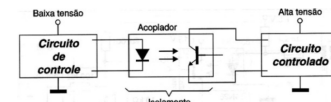


Fig. 11. Conexão opto-acoplador

### A. Funcionamento e Aplicações

Quando uma corrente elétrica é aplicada ao LED, emite uma luz que é direcionada para o detector de luz. Quando a luz incide sobre o detector, ele conduz corrente elétrica proporcional à intensidade da luz recebida.

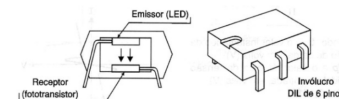


Fig. 12. optoacoplador

O optoacoplador funciona, portanto, como uma ponte entre dois circuitos elétricos, permitindo a transmissão de sinais ópticos de um circuito para o outro. Com esse funcionamento é possível ter as seguintes vantagens:

- Isolação elétrica
- Proteção de circuitos sensíveis
- Compatibilidade de sinais

- Segurança

Os optoacopladores são amplamente empregados em diversas áreas, incluindo eletrônica industrial, sistemas de automação, equipamentos médicos, telecomunicações e muito mais. Sua capacidade de fornecer isolamento elétrico eficiente e acoplamento entre circuitos torna-os uma solução versátil e confiável em muitas aplicações.

## IX. CONTROLADORES PID

O controle PID (Proporcional Integral Derivativo) é técnicas empregadas quando se deseja realizar o controle de variáveis contínuas. O controle PID consiste em um algoritmo matemático, que tem por função o controle preciso de uma variável em um sistema, permitindo ao sistema operar de forma estável no ponto de ajuste desejado, mesmo que ocorram variações ou distúrbios que afetem sua estabilidade. Algumas variáveis: Rotação; Nível; Pressão; Vazão; Temperatura; Posicionamento; Controle de tensão em fontes chaveadas.

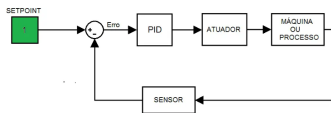


Fig. 13. Diagrama PID

### A. Ajuste (sintonia) dos Parâmetros do Controlador PID pelos Métodos de Ziegler-Nichols

Métodos para a determinação dos ganhos de controladores P, PI e PID operando em malha fechada. A escolha dos ganhos P, I e D é feita de modo a garantir que em malha fechada o sistema responda de forma oscilatória e amortecida com uma taxa de decaimento de 0,25, o que corresponde a um sistema de segunda ordem com constante de amortecimento é 0,21.

ZN- TABELA DE GANHOS PARA CURVA DE REAÇÃO

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	<b>0</b>
<b>PI</b>	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{T}{0,3}$	<b>0</b>
<b>PID</b>	$1,2 \frac{T}{L}$	<b>2L</b>	<b>0,5L</b>

$$PID = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Fig. 14. Tabela de Ganhos para curva de reação

## REFERENCES

- [1] ELT Geral. "O que é PWM." Disponível em: <https://eltgeral.com.br/o-que-e-pwm/>. Acesso em 03/11/2023.
- [2] Curto Circuito. "Conhecendo o Bluepill STM32." Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/blog/arm/conhecendo-o-bluepill-stm32>. Acesso em 03/11/2023.
- [3] Maker Hero. "Descobrimos o STM32." Disponível em: <https://www.makerhero.com/img/files/download/Descobrimos>
- [4] Arnab Kumar Das. "USART / UART Communication Concept: Arduino / ATmega328p." Acesso em 03/11/2023.
- [5] Embarcados. "RS-232 - Padrão de comunicação serial." Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/rs-232-padrao-de-comunicacao-serial/>. Acesso em 03/11/2023.

ZN- TABELA DE GANHOS PARA GANHO LIMITE

Tipo de Controlador	Kp	Ti	Td
<b>P</b>	$0,5 K_{cr}$	$\infty$	<b>0</b>
<b>PI</b>	$0,45 K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	<b>0</b>
<b>PID</b>	$0,60 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

$$PID = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Fig. 15. Tabela de Ganhos

- [6] Manual da Eletrônica. "Ponte H – O que é e como funciona!" Disponível em: <https://www.manualdaeletronica.com.br/ponte-h-o-que-e-como-funciona/>. Acesso em 03/11/2023.
- [7] Your Physicist. "Como funcionam os optoacopladores em circuitos." Disponível em: <https://www.your-physicist.com/como-funcionam-os-optoacopladores-em-circuitos/>. Acesso em 03/11/2023.
- [8] Newton C. Braga. "Chaves e Acopladores Ópticos (ART1904)." Disponível em: <https://newtonbraga.com.br/index.php/artigos/113-artigos-diversos/6317-art1904>. Acesso em 03/11/2023.
- [9] Embarcados. "Controle PID em sistemas embarcados." Acesso em 03/11/2023.
- [10] Universidade de São Paulo (USP). "Sintonia de controladores PID." Disponível em: <https://www.usp.br/ia/legado/grupos/grupo-de-instrumentacao/sintonia-de-controladores-pid/>. Acesso em 03/11/2023.