

Alarme de Proximidade Analógico com Setpoint Digital

Anderson Vitor Leoncio de Lima
CIn - UFPE
Recife, Brasil
avll@cin.ufpe.br

Iara Yasmin Batista Pereira
CIn - UFPE
Recife, Brasil
iybp@cin.ufpe.br

Lucas Fonseca Gomes do Prado
CIn - UFPE
Recife, Brasil
lfgp@cin.ufpe.br

Abstract—Este projeto apresenta o desenvolvimento de um sistema de detecção de proximidade híbrido, baseado no sensor ultrassônico HC-SR04. A alimentação do circuito é gerenciada por um regulador de tensão discreto, projetado para fornecer um barramento de tensão estável, essencial para a precisão dos estágios analógicos subsequentes. Diferentemente das abordagens convencionais baseadas apenas na medição temporal digital, este sistema implementa um condicionamento de sinal composto por filtros RC e amplificadores operacionais (LM358), convertendo o pulso de eco em uma tensão contínua proporcional à distância. A arquitetura do projeto foi otimizada pela eliminação de comparadores físicos, transferindo a lógica de decisão para o microcontrolador Arduino. O sinal condicionado é processado via conversor analógico-digital (ADC), e o acionamento do alarme visual (LED) é realizado por modulação PWM, permitindo variação de intensidade. O sistema inclui ainda uma interface de controle via botão de reset, resultando em um dispositivo compacto, com hardware simplificado e alta flexibilidade de configuração via software.

Index Terms—Sensor Ultrassônico; Condicionamento de Sinais; Arduino; Regulador de Tensão; PWM.

I. INTRODUÇÃO

A medição de distância e a detecção de obstáculos são fundamentais em diversas aplicações de automação e robótica. O sensor HC-SR04 é amplamente utilizado para esses fins, tipicamente operando através de lógica puramente digital de tempo de voo (Time of Flight). No entanto, este projeto explora uma abordagem alternativa focada no processamento de sinais, tratando o pulso de resposta do sensor como um sinal analógico a ser condicionado.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um alarme de proximidade que integre etapas de filtragem analógica com a flexibilidade do processamento digital. O circuito foi projetado para capturar o sinal do sensor, passar por um estágio de filtro RC e amplificação (LM358), gerando uma tensão média representativa da distância do objeto.

Uma modificação central na arquitetura deste projeto foi a eliminação de comparadores de tensão discretos (hardware dedicado). Em vez disso, o sinal analógico processado retorna ao microcontrolador através de uma porta analógica. O Arduino atua como o elemento central de decisão, comparando os valores lidos com limiares (setpoints) definidos em código. Essa abordagem permite não apenas uma resposta binária (ligado/desligado), mas também uma resposta gradual através da modulação PWM na saída do LED, oferecendo um feedback

visual dinâmico. Adicionalmente, foi implementado um botão de reset digital, conferindo ao usuário o controle manual sobre o estado de operação do sistema, demonstrando a capacidade do microcontrolador de gerenciar simultaneamente aquisição de dados, lógica de controle e interface de usuário.

II. DESENVOLVIMENTO

A. Overview

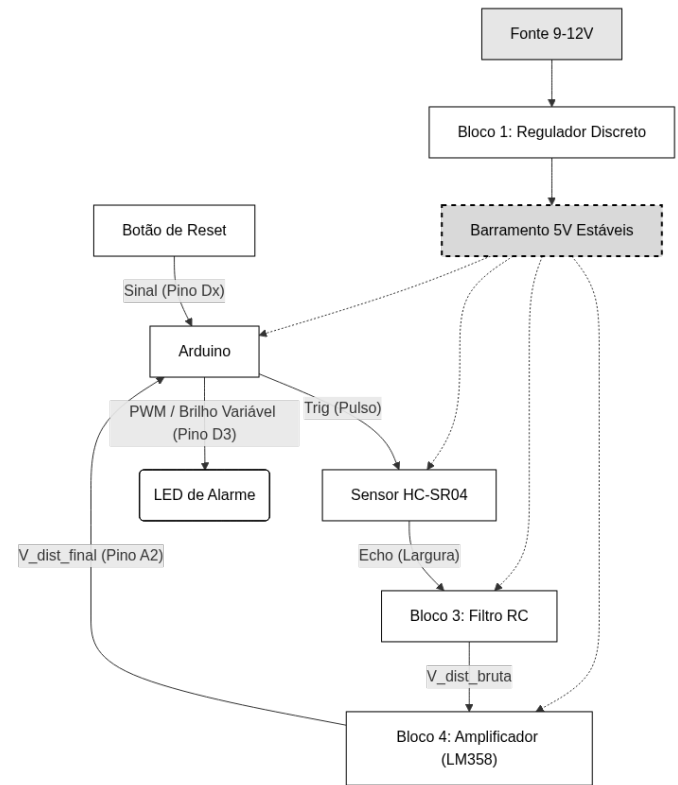


Fig. 1. Diagrama de Blocos do Sistema.

B. Regulador de tensão

O projeto utiliza um Regulador Shunt (Paralelo) Transistorizado com Feedback. Diferente do regulador série comum (onde o transistor apenas "segue" o Zener), neste circuito o transistor atua desviando o excesso de corrente para o terra para manter a tensão estável.

1) *Projeto da Fonte de Alimentação: Regulador Shunt Discreto:* Para garantir a alimentação estável de 5V necessária para o microcontrolador (Arduino) e para o sensor ultrassônico, optou-se pelo desenvolvimento de um Regulador de Tensão Shunt com Feedback, em detrimento de reguladores integrados (como a série 78XX). Essa escolha justifica-se pelo objetivo pedagógico de demonstrar o controle de tensão via semicondutores discretos e pela robustez da topologia shunt contra curtos-circuitos na saída. O circuito é composto por um resistor limitador em série (R_S), um transistor de potência (BJT) atuando como elemento de controle e um diodo Zener como referência de tensão no laço de realimentação.

2) *Definição da Tensão de Saída (V_{out}):* A topologia adotada utiliza o diodo Zener conectado entre o coletor (saída) e a base do transistor. Desta forma, a tensão de saída é definida pela soma da tensão de ruptura do Zener (V_Z) com a tensão base-emissor (V_{BE}) do transistor:

$$V_{out} = V_Z + V_{BE}$$

Considerando que a tensão V_{BE} típica de transistores de silício em condução é de aproximadamente 0,7V e a tensão alvo é 5,0V, isolou-se V_Z :

$$V_Z = 5,0V - 0,7V = 4,3V$$

Portanto, foi selecionado um Diodo Zener de 4,3V (família BZX ou 1N749).

3) *Seleção do Transistor de Controle ($Q1$):* O transistor atua desviando o excesso de corrente para o terra (GND) quando a carga (Arduino) consome menos do que o fornecido pela fonte. No pior caso (carga desconectada), o transistor deve dissipar a maior parte da potência. Optou-se pelo transistor NPN BD139 pelas seguintes características:

- Capacidade de Corrente (I_C): Suporta até 1,5A, oferecendo ampla margem de segurança para o consumo do projeto (estimado em $< 200mA$).
- Dissipação de Potência (P_D): Suporta até 12,5W (com dissipador), o que é superior aos transistores de pequeno sinal (como o BC547), garantindo que o componente não sofra superaquecimento crítico durante a operação contínua.

4) *Dimensionamento do Resistor Série (R_S):* O resistor R_S é responsável por provocar a queda de tensão necessária entre a entrada (Fonte de 9V a 12V) e a saída (5V), além de definir a corrente máxima disponível para o circuito. Considerando uma tensão de entrada média $V_{in} = 12V$ e uma corrente de projeto total $I_{total} \approx 210mA$ (suficiente para alimentar o Arduino, LEDs e manter o Zener na região de ruptura), aplicou-se a Lei de Ohm:

$$R_S = \frac{V_{in} - V_{out}}{I_{total}}$$

$$R_S = \frac{12V - 5V}{0,21A} = \frac{7V}{0,21A} \approx 33,3\Omega$$

Escolha do Componente: Foi selecionado o valor comercial de 33Ω.

5) *Cálculo de Potência do Resistor:* Como este componente dissipa uma quantidade significativa de energia na forma de calor, calculou-se a potência dissipada para evitar queima:

$$P_{RS} = \frac{(V_{in} - V_{out})^2}{R_S} = \frac{(7V)^2}{33\Omega} = \frac{49}{33} \approx 1,48W$$

Devido à dissipação calculada ser de aproximadamente 1,5W, foi especificado o uso de um resistor de fio de 2W ou 5W, garantindo a integridade térmica do componente, uma vez que resistores comuns de 1/4W seriam destruídos instantaneamente.

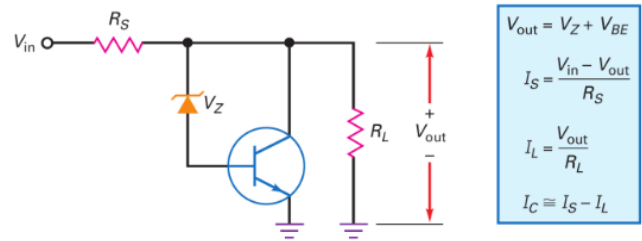


Fig. 2. Regulador Shunt (Paralelo) Transistorizado com Feedback.

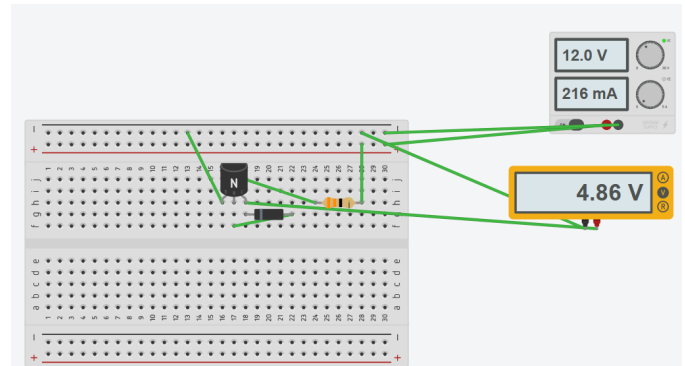


Fig. 3. Simulação do Regulador Shunt (Paralelo) Transistorizado com Feedback.

C. Sensor Ultrassônico HC-SR04

O HC-SR04 foi o componente escolhido para realizar a transdução da distância física em um sinal elétrico. Trata-se de um módulo acessível e de alta disponibilidade, composto por um emissor e um receptor ultrassônico que operam a uma frequência de 40kHz.

1) *Especificações Técnicas:* As principais características que justificam sua escolha para o projeto incluem:

- **Tensão de Operação:** 5V DC (compatível com o regulador projetado).
- **Alcance de Detecção:** Aproximadamente 2cm a 400cm.
- **Precisão:** Até 3mm.
- **Ângulo de Abertura:** $< 15^\circ$.

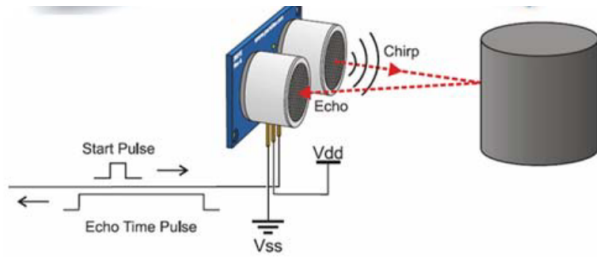


Fig. 4. Funcionamento do HC-SR04.

2) *Princípio de Funcionamento e Conexão:* O sensor opera baseado no princípio do "Tempo de Voo" (Time of Flight). O ciclo de medição inicia-se quando o microcontrolador envia um pulso de nível alto (HIGH) de pelo menos $10\mu s$ ao pino **Trig**. Em resposta, o sensor emite uma rajada (burst) de 8 ciclos de ondas ultrassônicas a 40kHz.

Assim que as ondas são emitidas, o pino **Echo** vai para nível alto. Ele permanece neste estado até que o receptor detecte o retorno do som refletido por um obstáculo. A duração (t) em que o pino Echo permanece em nível alto é proporcional à distância (d), conforme a relação física:

$$d = \frac{t \times v_{som}}{2}$$

Onde $v_{som} \approx 340m/s$.

Integração no Circuito Híbrido: Diferente da aplicação digital padrão, onde se mede o tempo t via software, neste projeto o pino Echo é conectado diretamente ao estágio de filtragem analógica (Resistor de $10k\Omega$ do Bloco 3). Dessa forma, quanto maior a distância do objeto, maior o tempo que o Echo permanece em HIGH (ciclo de trabalho variável), o que resulta em uma maior carga acumulada no capacitor do filtro RC. Assim, o sensor atua efetivamente como um modulador de largura de pulso (PWM) cuja saída é convertida em tensão média pelo filtro subsequente.

D. Filtro RC com Amplificador (LM358)

O sinal de saída "Echo" do sensor HC-SR04 consiste em pulsos digitais cuja largura (tempo em nível alto) é proporcional à distância do objeto. Para que este sinal possa ser processado como uma variável analógica contínua pelo conversor ADC do microcontrolador, foi necessário implementar um estágio de integração e condicionamento, composto por um filtro Passa-Baixas passivo seguido de um amplificador operacional.

1) *Dimensionamento do Filtro Passa-Baixas (RC):* O objetivo do filtro RC é realizar a integração do sinal PWM (Pulse Width Modulation) proveniente do sensor. Ao filtrar as componentes de alta frequência (a oscilação entre 0V e 5V), extrai-se a **tensão média** (componente DC) do sinal, que varia linearmente conforme a largura do pulso aumenta.

Para obter uma tensão de saída estável e livre de "ripple" (ondulação), optou-se por uma frequência de corte (f_c) extremamente baixa. Os componentes selecionados foram:

- **Resistor (R):** $10k\Omega$

- **Capacitor (C):** $10\mu F$ (Eletrolítico)

O cálculo da frequência de corte é dado pela equação:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

Substituindo os valores selecionados:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (10 \times 10^3) \cdot (10 \times 10^{-6})}$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,1} \approx 1,59 \text{ Hz}$$

Justificativa da Frequência ($1,59Hz$): A escolha de uma frequência de corte próxima a 1,6 Hz garante que o circuito tenha uma constante de tempo ($\tau = R \cdot C = 0,1s$) lenta o suficiente para suavizar completamente os pulsos do sensor, transformando a sequência de disparos em uma rampa de tensão contínua suave. Isso impede flutuações bruscas na leitura da porta analógica A2.

2) *Escolha do Amplificador Operacional (LM358):* A saída de um filtro RC passivo possui alta impedância. Se conectada diretamente à porta analógica do Arduino, a impedância de entrada do conversor ADC drenaria a corrente do capacitor (C), alterando a tensão lida e introduzindo erros de medição (efeito de carga).

Para solucionar isso, utilizou-se o amplificador operacional **LM358** atuando como elemento de isolamento e condicionamento. As razões para a escolha do LM358 incluem:

- **Casamento de Impedância:** O Op-Amp oferece altíssima impedância de entrada (não drena corrente do filtro RC) e baixíssima impedância de saída (pode fornecer corrente suficiente para o pino A2 do Arduino), garantindo a integridade do sinal analógico.
- **Operação em Fonte Simples (Single Supply):** O LM358 opera eficientemente apenas com a tensão positiva (+5V) e GND, sem a necessidade de uma fonte simétrica negativa, simplificando o circuito de alimentação.
- **Linearidade:** O componente assegura que a relação entre a largura do pulso de entrada e a tensão de saída entregue ao microcontrolador permaneça linear dentro da faixa de operação do sensor.

Desta forma, o conjunto Filtro RC + LM358 converte efetivamente o domínio de tempo (largura de pulso) para o domínio de tensão, permitindo a detecção analógica proposta no projeto.

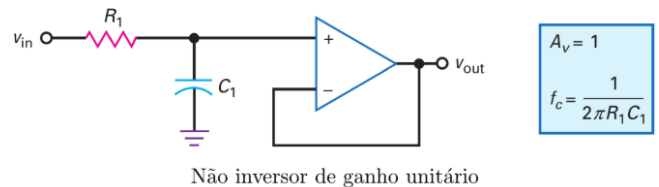


Fig. 5. Filtro RC com estágio de Amp-op.

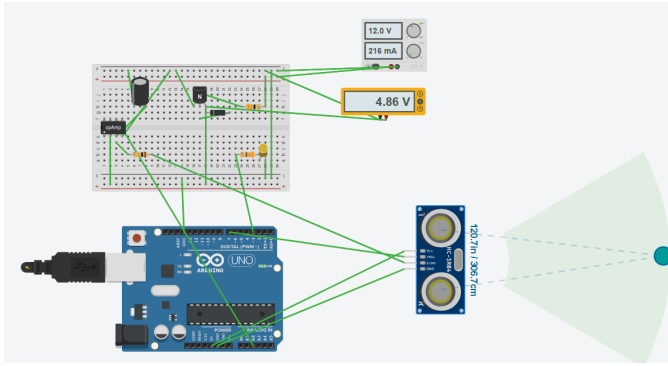


Fig. 6. Simulação Filtro RC com estágio de Amp-op.

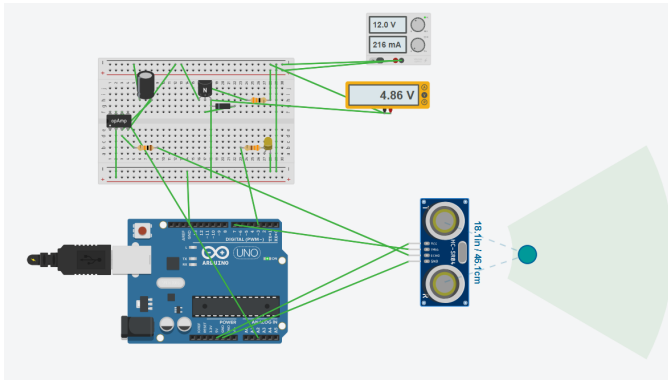


Fig. 7. Simulação Filtro RC com estágio de Amp-op.

E. Microcontrolador e Lógica de Controle

A centralização do controle foi atribuída à placa **Arduino Nano**, baseada no microcontrolador ATmega328P. A escolha deste modelo justifica-se por seu fator de forma compacto (ideal para prototipagem em protoboard), baixo consumo de energia e disponibilidade de periféricos essenciais para o projeto, especificamente o Conversor Analógico-Digital (ADC) de 10 bits e as saídas PWM.

1) *Integração e Mapeamento de Pinos:* O Arduino atua como o "cérebro" do sistema, interconectando os estágios de hardware descritos anteriormente:

- **Entrada Analógica (Pino A2):** Recebe o sinal de tensão contínua proveniente da saída do amplificador operacional LM358. O ADC converte esta tensão (0 a 5V) em um valor inteiro de 0 a 1023.
- **Saída de Controle (Pino D7):** Envia o pulso de *Trigger* para o sensor HC-SR04, iniciando o ciclo de medição físico.
- **Saída de Atuação (Pino D3):** Conectada ao LED de alarme através de um resistor limitador de corrente de 330Ω. Este pino opera em modo PWM, permitindo controlar o brilho do LED.
- **Interface de Usuário (Pino D4):** Conectada ao Botão de Reset. Utiliza-se o resistor de *pull-up* interno do microcontrolador, simplificando o hardware externo.

2) *Algoritmo de Comparação e Controle:* A lógica de funcionamento substitui o comparador de tensão analógico tradicional (como o LM339) por uma comparação via software, oferecendo maior flexibilidade. O ciclo de controle executa os seguintes passos:

1. **Aquisição:** O microcontrolador lê o valor de tensão no pino A2. Devido à constante de tempo do filtro RC (0,1s), a leitura representa a média da distância recente. 2. **Comparação:** O valor lido é comparado com uma variável de limiar (*setpoint*) definida no código.

- Se a leitura ultrapassar o limiar (indicando objeto próximo), o sistema entra em estado de alarme.
- A intensidade do LED é ajustada proporcionalmente à proximidade usando a função `map()`, convertendo a leitura do ADC para um ciclo de trabalho PWM (0-255).

3. **Reset e Rearmamento:** O botão conectado ao pino D4 atua como uma interrupção lógica. Ao ser pressionado (nível lógico LOW), o código força o reinício das variáveis de estado ou "desarma" o alarme momentaneamente, permitindo que o usuário silencie o sistema sem desligar a alimentação.

Esta arquitetura híbrida permite que o sistema mantenha a robustez do condicionamento de sinal analógico enquanto aproveita a facilidade de calibração digital do Arduino.

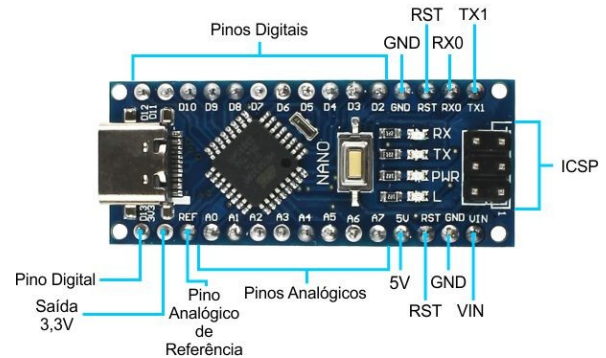


Fig. 8. Pinagem Arduino Nano.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes práticos foram realizados utilizando a plataforma Arduino IDE para monitoramento serial em tempo real. O sistema foi submetido a diferentes condições de distância para validar a linearidade da conversão Tensão-Distância e a estabilidade do filtro RC.

A. Regime de Operação Nominal

Na primeira etapa de testes, um objeto foi posicionado a distâncias variadas dentro do campo de visão do sensor. Os dados obtidos pelo Conversor Analógico-Digital (ADC) e a tensão correspondente calculada pelo microcontrolador são apresentados na Tabela I.

Observa-se uma correlação direta entre a leitura do ADC e a tensão de saída do amplificador operacional. A variação suave entre as amostras 4 a 7 (descendo de 3.52V para 3.39V) e a

TABLE I
AMOSTRAGEM DE DADOS EM FUNCIONAMENTO NORMAL

Amostra	Leitura ADC (0-1023)	Tensão Calculada (V)
1	833	4.07
2	836	4.09
3	794	3.88
4	720	3.52
5	708	3.46
6	703	3.44
7	693	3.39
8	749	3.66
9	820	4.01
10	830	4.06
11	853	4.17

posterior subida nas amostras 8 a 11 indicam que o filtro passa-baixas (RC) de 1.6Hz atuou corretamente, integrando o sinal PWM sem apresentar oscilações abruptas ou ruído excessivo, validando a escolha do capacitor eletrolítico de $10\mu F$.

A Figura 9 ilustra o comportamento dinâmico do sistema com base nos dados coletados. Nota-se que o sistema responde às variações de distância (representadas pela tensão) com um tempo de acomodação perceptível, característico da constante de tempo τ elevada do filtro.

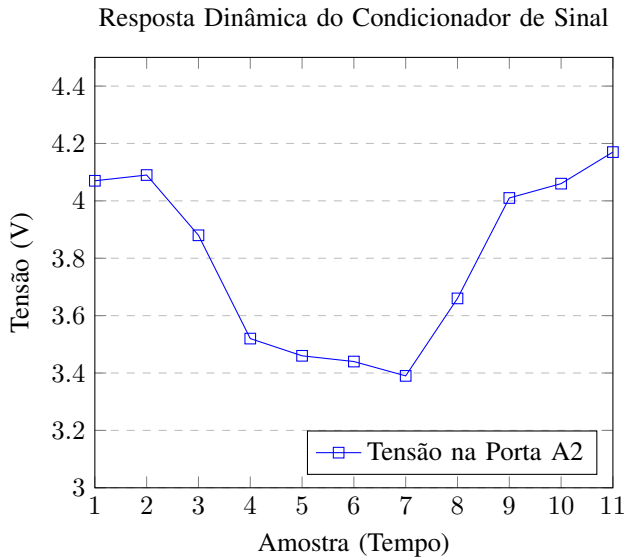


Fig. 9. Gráfico gerado a partir das leituras do Monitor Serial, demonstrando a variação de tensão conforme a movimentação do objeto.

B. Condições de Borda e Saturação

Durante os testes de estresse do sistema, foram observados comportamentos de saturação nas leituras, conforme demonstrado no trecho de log abaixo:

Leitura ADC: 1023 — Tensão: 5.00

Leitura ADC: 0 — Tensão: 0.00

Estes valores extremos indicam duas situações distintas tratadas pelo hardware:

- **Leitura 1023 (5.00V):** Ocorre quando o objeto está fora do alcance máximo ou o cabo de sinal "Echo" permanece

em nível alto por tempo excessivo, saturando o capacitor do filtro.

- **Leitura 0 (0.00V):** Indica ausência de sinal de retorno (timeout do sensor) ou objeto muito próximo, onde o pulso é tão curto que o filtro RC não consegue carregar o capacitor a uma tensão mensurável.

Esses resultados confirmam que, embora a abordagem analógica seja funcional para a faixa intermediária de medição, ela exige tratamento de software para descartar leituras espúrias (0V ou 5V cravados) que não representam distâncias válidas dentro da faixa linear de operação do filtro.

IV. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste projeto permitiu a validação prática de uma arquitetura híbrida para detecção de proximidade, demonstrando ser uma alternativa viável e educativa às soluções puramente digitais. Os resultados obtidos confirmam que é possível realizar o condicionamento de sinais de sensores baseados em tempo, como o HC-SR04, convertendo-os para o domínio analógico de tensão com precisão satisfatória.

Destaca-se a eficácia do estágio de alimentação, onde o regulador de tensão *shunt* transistorizado (BD139 + Zener) forneceu um barramento de 5V estável, suportando a demanda de corrente do microcontrolador e dos transdutores, validando a teoria de controle de semicondutores discretos.

No processamento de sinal, o conjunto Filtro RC e Amplificador Operacional LM358 desempenhou papel crucial. A frequência de corte dimensionada para aproximadamente 1,6 Hz mostrou-se adequada para suavizar os pulsos do sensor, entregando ao ADC do Arduino uma tensão contínua linearmente proporcional à distância, livre de ruídos de alta frequência.

A principal inovação do sistema, caracterizada pela substituição do comparador de tensão físico (LM339) pela lógica de software no Arduino, resultou em uma simplificação significativa do hardware (BOM reduzido). Além disso, essa abordagem expandiu as funcionalidades do sistema, permitindo a implementação de uma saída de alarme gradual (PWM) e o controle de estado via botão de reset, funcionalidades que seriam complexas de implementar apenas com componentes analógicos discretos. Conclui-se, portanto, que a integração entre a eletrônica analógica de condicionamento e o controle digital microprocessado oferece o melhor compromisso entre robustez, custo e flexibilidade de projeto.

REFERENCES

- [1] A. Malvino and D. J. Bates, *Eletrônica - Volume 1*, 8th ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016.
- [2] A. Malvino and D. J. Bates, *Eletrônica - Volume 2*, 8th ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2016.
- [3] ElecFreaks, "Ultrasonic Ranging Module HC-SR04," Datasheet, 2011. [Online]. Available: <https://www.electfreaks.com>.
- [4] STMicroelectronics, "BD135, BD137, BD139 - NPN power transistors," Datasheet, 2016.
- [5] Texas Instruments, "LM358 - Low-Power, Dual Operational Amplifiers," Datasheet SLOS068V, Revised Jan. 2017.
- [6] Arduino, "Arduino Nano Board Reference," Official Documentation. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>.