



DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR DE SINAIS PROVENIENTES DOS SENSORES DE ROTAÇÃO E FASE DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA TESTE EM BANCADA DE MÓDULO DE INJEÇÃO ELETRÔNICA

DEVELOPMENT OF A SIGNAL GENERATOR BASED ON ROTATION AND PHASE SENSORS OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE FOR BENCH TESTING OF AN ELECTRONIC FUEL INJECTION MODULE

DOI: 10.5281/zenodo.18943222



Murilo Previatti Estevanato¹

Guilherme Américo Rosa²

Jackson Tsukada³

Mauro Vanderlei de Amorim⁴

RESUMO

Os motores de combustão interna requerem gerenciamento eletrônico preciso para otimização de desempenho, economia de combustível e redução de emissões. O módulo de injeção eletrônica (ECU) utiliza sensores de rotação (virabrequim) e fase (comando de válvulas) para sincronizar a injeção e ignição. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um gerador de sinais de rotação e fase para testes em bancada de módulos de injeção eletrônica, utilizando plataforma Arduino Mega 2560 e interface touch-screen DWIN. O sistema permite seleção de sinais pré-configurados por montadora ou genéricos, com ajuste de rotação (300 a 5130 RPM), amplitude (5V ou 12V) e tipo de sinal (Hall ou

1 Graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário – UNIFEITEP.

2 Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário – UNIFEITEP. Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3 Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

4 Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo -IFSP. Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.





indutivo). A conversão do sinal Hall para indutivo foi realizada por meio de circuitos integradores com amplificadores operacionais e potenciômetros digitais para controle automático do ganho em função da frequência. Os resultados demonstraram precisão na geração de sinais Hall em toda a faixa de rotação, enquanto a conversão para sinal indutivo apresentou bom desempenho até 1000 RPM, com deformações progressivas acima dessa frequência. A interface mostrou-se eficiente para seleção e controle dos parâmetros. O protótipo atende aos objetivos didáticos e práticos, contribuindo para diagnósticos mais precisos em módulos de injeção eletrônica.

Palavras-chave: Gerador de sinais. Sensor de rotação. Sensor de fase. Arduino. Injeção eletrônica.

ABSTRACT

Internal combustion engines require precise electronic management for performance optimization, fuel economy, and emission reduction. The Electronic Control Unit (ECU) uses rotation (crankshaft) and phase (camshaft) sensors to synchronize injection and ignition. This work presents the development of a rotation and phase signal generator for testing electronic injection modules, using an Arduino Mega 2560 platform and a DWIN touch-screen interface. The system allows selection of pre-configured signals by automaker or generic signals, with adjustment of rotation (300 to 5130 RPM), amplitude (5V or 12V), and signal type (Hall or inductive). The conversion from Hall signal to inductive was performed using integrator circuits with operational amplifiers and digital potentiometers for automatic gain control as a function of frequency. Results demonstrated precision in Hall signal generation across the entire rotation range, while the conversion to inductive signal showed good performance up to 1000 RPM, with progressive deformations above this frequency. The interface proved efficient for parameter selection and control. The prototype meets didactic and practical objectives, contributing to more accurate diagnostics in electronic injection modules.

Keywords: Signal generator. Rotation sensor. Phase sensor. Arduino. Electronic injection.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna requerem gerenciamento eletrônico preciso para otimização de desempenho, economia de combustível e redução de emissões. Por meio da utilização de uma central de injeção eletrônica (ECU – *Electronic Control Unit*), é possível controlar os atuadores com base nos dados obtidos pelos sensores, permitindo ajuste preciso da relação ar-combustível, avanço de ignição e outros parâmetros fundamentais para o funcionamento do motor (Brunetti, 2018; Bosch, 2022).





O sensor de rotação (sensor de posição do virabrequim) e o sensor de fase (sensor de posição do comando de válvulas) trabalham em conjunto para informar à ECU sobre a posição dos eixos do motor, permitindo a sincronização do sistema, como tempo de injeção, avanço de ignição e identificação do ponto morto superior (Alabadalejo, 2013). Dois tipos principais de sensores são utilizados: o indutivo e o tipo Hall.

O sensor indutivo possui um ímã permanente envolvido por uma bobina e não necessita de alimentação externa. Sua operação baseia-se na Lei de Faraday: a variação do fluxo magnético, causada pela passagem dos dentes da roda fônica, induz uma tensão alternada senoidal nos terminais da bobina, cuja amplitude e frequência variam com a rotação do motor (Schiavetto, 2023; Mussoi, 2007).

Já o sensor tipo Hall depende de alimentação externa (geralmente 5V ou 12V) e contém um elemento semicondutor sensível a campo magnético. Um circuito interno converte a variação de corrente em um sinal digital de onda quadrada (Bosch, 2022; Souza, 2022).

Para a realização de testes em bancada de módulos de injeção eletrônica, é necessário injetar sinais que reproduzam fielmente o comportamento desses sensores, permitindo o acionamento dos atuadores (bicos injetores, bobinas de ignição, eletroventiladores, atuadores de marcha lenta, entre outros) sem a necessidade do motor em funcionamento. A qualidade desses sinais é fundamental para a precisão dos diagnósticos e a confiabilidade dos reparos (Rocho, 2022).

Os simuladores de injeção eletrônica disponíveis no mercado frequentemente apresentam limitações na qualidade dos sinais gerados, especialmente na conversão de sinais PWM para sinais senoidais que representem adequadamente o comportamento de sensores indutivos. Deformações no sinal, causadas por interferência eletromagnética ou dimensionamento inadequado de filtros, podem comprometer a eficácia dos testes e levar a diagnósticos equivocados.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um gerador de sinais de rotação e fase para testes em bancada de módulos de injeção eletrônica, utilizando plataforma Arduino e circuitos de condicionamento de sinais. São objetivos específicos:



estudar os princípios e funcionamento dos sensores de rotação e fase; gerar sinais de teste que reproduzam as características dos sensores reais; e elaborar uma interface amigável para seleção e ajuste dos parâmetros dos sinais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Motores de combustão interna e gerenciamento eletrônico

O motor de combustão interna é uma máquina térmica que transforma energia química (combustível) em energia mecânica por meio da combustão da mistura ar-combustível (Brunetti, 2018). No ciclo Otto (quatro tempos), as etapas são: admissão, compressão, combustão/expansão e exaustão. O movimento alternativo dos pistões é convertido em movimento rotativo pelo conjunto biela-manivela, transmitido ao virabrequim (Castro; Rahde, 2014).

O gerenciamento eletrônico do motor é realizado pela ECU (*Electronic Control Unit*), um microcomputador que processa sinais dos sensores e aciona atuadores para otimizar o funcionamento do motor em diferentes condições de operação (Bosch, 2022). A ECU contém microprocessador, memórias (ROM para programas fixos e RAM para dados variáveis), conversores analógico-digitais e circuitos de interface para comunicação com sensores e atuadores (Brunetti, 2018).

2.2 Sensores de rotação e fase

2.2.1 Sensor de rotação indutivo

O sensor de rotação indutivo opera sem alimentação externa, baseando-se na Lei de Faraday: a variação do fluxo magnético no tempo induz uma força eletromotriz nos terminais de uma bobina (MUSSOI, 2007). O sensor contém um ímã permanente envolvido por uma bobina e é posicionado próximo à roda fônica (disco metálico dentado acoplado ao virabrequim). À medida que os dentes da roda fônica passam pelo sensor, o fluxo magnético





varia, gerando um sinal senoidal cuja frequência é proporcional à rotação do motor (Albadalejo, 2013).

A amplitude do sinal também varia com a rotação, sendo maior em altas rotações. A roda fônica típica possui 60 dentes com 2 falhas (60-2), que permitem à ECU identificar a posição do virabrequim (Brunetti, 2018). A Equação 1 expressa a Lei de Faraday para uma bobina com N espiras:

$$e = -N \frac{d\varnothing}{dt} \quad (1)$$

sendo:

e = tensão induzida (V)

N = número de espiras

$\varnothing$ = fluxo magnético (Wb)

t = tempo (s)

2.2.2 Sensor de rotação hall

O sensor de rotação tipo Hall baseia-se no Efeito Hall, descoberto por Edwin Hall em 1879. Quando um condutor percorrido por corrente elétrica é submetido a um campo magnético perpendicular, surge uma diferença de potencial transversal ao condutor, denominada tensão Hall (Souza, 2022; Bosch, 2022). A tensão Hall é dada pela Equação 2:

$$U_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (2)$$

sendo:

R_H = constante Hall ($\text{m}^3/\text{A s}$)

I = corrente (A)

B = densidade de fluxo magnético (Vs/m^2)

d = diâmetro do condutor (m)





O sensor Hall requer alimentação externa (5V ou 12V) e contém um circuito integrado que amplifica e condiciona o sinal, gerando uma onda quadrada com níveis lógicos compatíveis com a ECU (Abadalejo, 2013). Diferentemente do sensor indutivo, o sensor Hall opera eficientemente em baixas rotações e até mesmo em condição estática (Bosch, 2022).

2.2.3 Sensor de fase

O sensor de fase (sensor de posição do comando de válvulas) opera com princípios semelhantes aos sensores de rotação (indutivo ou Hall). Ele fornece à ECU a informação sobre a posição do comando de válvulas, permitindo identificar em qual tempo do ciclo cada cilindro se encontra.

Em conjunto com o sensor de rotação, possibilita a sincronização precisa da injeção e ignição (Schiavetto, 2023). O sinal gerado é tipicamente uma onda quadrada (para sensores Hall) ou senoidal (para indutivos), com um pulso por ciclo do motor (duas voltas do virabrequim).

2.3 Processamento de sinais

2.3.1 Conversores analógicos-digitais

Conversores A/D transformam sinais analógicos (contínuos no tempo e amplitude) em sinais digitais (discretos), permitindo o processamento por microcontroladores (Haupt; Dachi, 2018). A resolução do conversor, expressa em bits, determina o número de níveis de quantização (2^n níveis). O Arduino Mega 2560, utilizado neste projeto, possui conversores A/D de 10 bits, permitindo 1024 níveis de quantização na faixa de 0 a 5V (Microchip, 2023).

2.3.2 Filtros





Filtros são circuitos que permitem a passagem de determinadas faixas de frequência enquanto atenuam outras. Podem ser classificados como:

- Filtros Passa-Baixa: permitem frequências abaixo da frequência de corte.
- Filtros Passa-Alta: permitem frequências acima da frequência de corte.
- Filtros Passa-Faixa: permitem uma faixa específica de frequências.
- Filtros Rejeita-Faixa: atenuam uma faixa específica de frequências.

Quanto aos componentes, os filtros podem ser passivos (apenas R, L, C) ou ativos (incluem amplificadores operacionais). Os filtros ativos oferecem vantagens como ganho, alta impedância de entrada e dispensa de indutores, sendo adequados para frequências de até cerca de 100 kHz. A frequência de corte para filtros passa-baixa e passa-alta RC é dada pela Equação 3:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (3)$$

2.3.3 Circuitos integradores

O circuito integrador com amplificador operacional realiza a operação matemática de integração no tempo do sinal de entrada. Quando um sinal quadrado é aplicado à entrada, a saída ideal é uma onda triangular; um sinal triangular resulta em uma onda senoidal (Gomes, 2015). A configuração básica utiliza um capacitor na realimentação e um resistor na entrada. A constante de tempo RC determina o comportamento do integrador: valores muito altos podem causar saturação; valores muito baixos podem resultar em derivação (diferenciação).

2.4 Microcontrolador ATmega2560 e Arduino

O ATmega2560 é um microcontrolador de 8 bits da família AVR, com arquitetura RISC, 256 KB de memória flash, 8 KB de RAM e 4 KB de EEPROM (MICROCHIP, 2023). Possui 54 pinos de entrada/saída digital (15 com capacidade PWM), 16 entradas analógicas e





4 portas seriais UART. É o componente principal da plataforma Arduino Mega 2560, amplamente utilizado em projetos de automação e instrumentação devido à sua versatilidade e facilidade de programação (Kurniawan, 2019).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Tipo de pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como pesquisa experimental, de abordagem quantitativa, envolvendo o desenvolvimento e validação de um protótipo funcional para geração de sinais de sensores automotivos. A pesquisa experimental permite o controle das variáveis envolvidas e a avaliação sistemática do desempenho do sistema desenvolvido (Marconi; Lakatos, 2017).

3.2 Materiais e componentes

Para o desenvolvimento do protótipo, foram utilizados os seguintes componentes:

- Plataforma de controle: Arduino Mega 2560, baseado no microcontrolador ATmega2560;
- Interface humano-máquina: Display touch-screen DWIN de 4,3" (resolução 480x272 pixels), comunicação UART, sistema DGUS II;
- Amplificadores operacionais: LM358, LM741;
- Potenciômetros digitais: X9C103S (10 k Ω , 99 posições);
- Transistores: BC548 (conversão 5V para 12V);
- Módulo de relés: 3 canais, 5V, para seleção de sinais;
- Componentes passivos: resistores, capacitores, conectores;
- Fonte de alimentação: Fonte chaveada 12V / 5A; fonte simétrica para amplificadores;
- Instrumentos de medição: Osciloscópio digital Hantek 6022BE; multímetro digital.



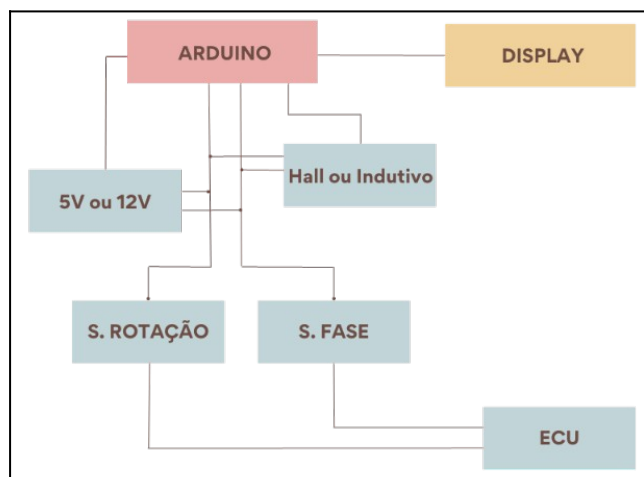


3.3 Desenvolvimento do sistema

3.3.1 Visão geral do sistema

O sistema desenvolvido é composto por três módulos principais: interface de usuário (display touch), unidade de processamento e controle (Arduino Mega), e circuito de condicionamento e conversão de sinais. A Figura 1 apresenta o fluxograma do circuito.

Figura 1 – Fluxograma do circuito.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.3.2 Interface com o usuário

A interface gráfica foi desenvolvida utilizando o software DGUS II da DWIN. As imagens foram criadas no Canva (resolução 480x272 pixels) e convertidas para formato BMP. Foram desenvolvidas telas para:

- Menu principal (seleção entre "Montadoras" ou "Sinal Genérico");
- Seleção de montadora (FIAT, GM, VW, etc.) e sistema de injeção (ex: 4GF);
- Configuração de sinal genérico (número de dentes, falhas, amplitude, tipo de sinal);
- Controle de rotação (botão deslizante) e botões ON/OFF.



A comunicação com o Arduino ocorre via protocolo UART (portas TX1/RX1). Cada botão na interface é configurado com um endereço VP (ex: 0x5500) e um valor de chave (ex: 0x0001). Quando pressionado, o display envia um vetor de bytes que é interpretado pelo Arduino para ativar as funções correspondentes. A Figura 2 apresenta o código para leitura do vetor no Arduino.

Figura 2 - Código do Arduino para ler o vetor enviado pelo display.

```
14 void loop()
15 {
16
17   if(Serial1.available())
18   {
19     for(int i=0;i<=8;i++)
20     {
21       Buffer[i]= Serial1.read();
22     }
23
24     if(Buffer[0]==0X5A)
25     {
26       switch(Buffer[4])
27       {
28
29         case 0x55: //for led
30           if(Buffer[8]==1)
31           { digitalWrite(led,HIGH);
32             Serial.println("LIGADO");
33           }
34
35           if(Buffer[8]==0)
36           {digitalWrite(led,LOW);
37             Serial.println("DESLIGADO");
38           }
39           break;
```

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.3.3 Geração de sinais hall

Os sinais Hall (onda quadrada) foram gerados diretamente pelo Arduino utilizando o Timer1 para controle preciso da frequência. A rotação (RPM) é convertida em frequência (Hz)



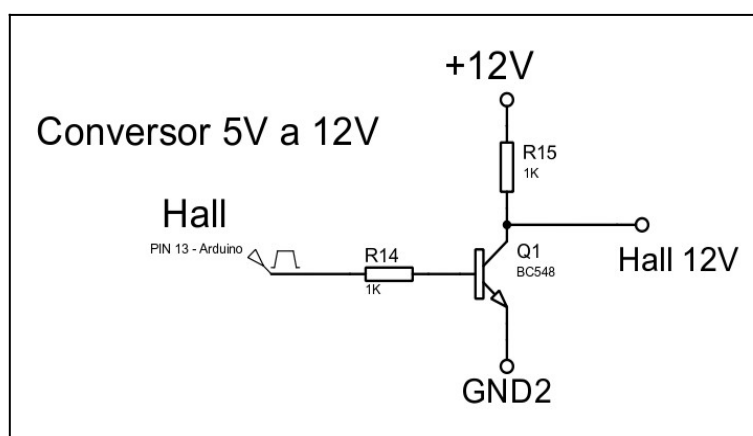


considerando o número de dentes da roda fônica. Para uma roda 60-2 com 58 dentes ativos, a relação é:

$$f(\text{Hz}) = \frac{\text{RPM} \times 58}{60} \quad (4)$$

O sinal gerado (0-5V) é disponibilizado diretamente na saída para sensores Hall de 5V. Para sensores Hall de 12V, foi implementado um circuito com transistor BC548 em configuração de amplificador de tensão (Figura 3).

Figura 3 - Circuito conversor 5V para 12V (sinal Hall).



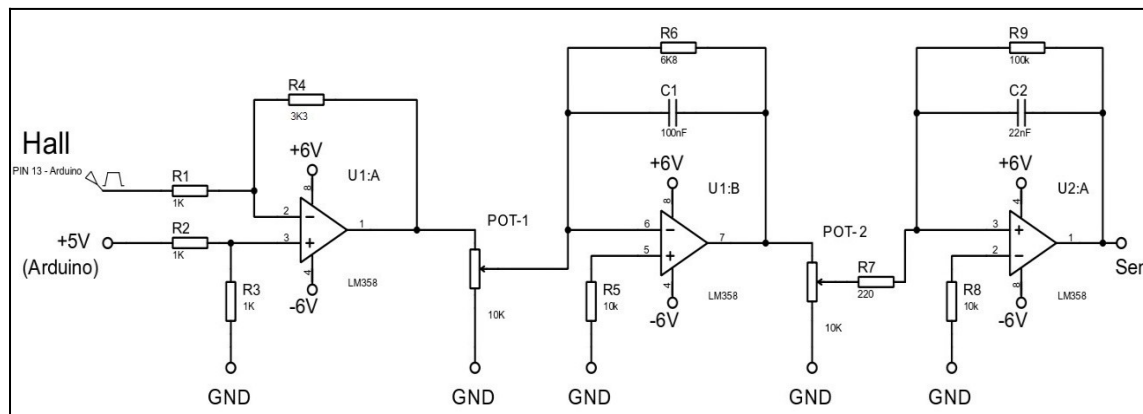
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.3.4 Conversão de sinal hall para indutivo

A conversão do sinal Hall (onda quadrada 0-5V) para sinal indutivo (senoidal) foi realizada em quatro etapas, utilizando amplificadores operacionais e potenciômetros digitais para controle automático do ganho em função da frequência. As Figuras 4 e 5 apresentam o esquemático completo do circuito de conversão implementado, compreendendo o circuito comparador, os dois estágios integradores, o inversor e os buffers de saída.

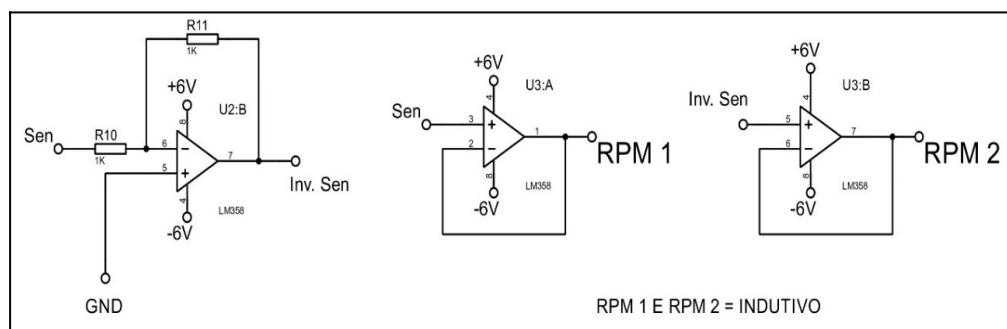


Figura 4 – Esquemático do Conversor.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 5 – Inversor e Buffers.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.3.4.1 Descrição do circuito de conversão

A primeira etapa consistiu no deslocamento do nível do sinal, realizada pelo amplificador operacional U1:A configurado como comparador. O sinal Hall original de 0V a 5V foi aplicado à entrada inversora através do resistor R1 de 1kΩ. Na entrada não inversora, um divisor resistivo composto pelos resistores R2 e R3, ambos de 1kΩ, estabeleceu uma tensão de referência de 2,5V. O resistor de realimentação R4 de 3,3kΩ definiu o ganho do circuito. Quando o sinal de entrada se situava abaixo da referência de 2,5V, a saída do



comparador assumia aproximadamente +5V; quando o sinal ultrapassava este limiar, a saída comutava para aproximadamente -5V, resultando em um sinal simétrico com excursão de -5V a +5V.

Na segunda etapa, o sinal simétrico foi submetido ao primeiro circuito integrador, implementado com o amplificador operacional U1:B. Este circuito foi responsável por converter a onda quadrada simétrica em uma onda triangular. O potenciômetro digital POT1 (X9C103S) foi conectado à entrada inversora, permitindo o ajuste automático da resistência conforme a variação da rotação. Na realimentação do integrador, além do capacitor C1 de 100nF responsável pela integração, foi adicionado em paralelo o resistor R6 de 6,8k Ω .

Este resistor teve como função acelerar a descarga do capacitor, evitando a saturação do sinal em baixas frequências, particularmente na rotação mínima de 300 RPM. O resistor R5 de 10k Ω conectado à entrada não inversora forneceu o ponto de referência necessário para a operação estável do circuito.

A terceira etapa empregou o segundo integrador com amplificador operacional U2:A para converter a onda triangular em uma onda senoidal. O potenciômetro digital POT2 (X9C103S) foi inserido na entrada inversora em série com o resistor fixo R7 de 220 Ω , que limitou a resistência mínima do conjunto. Na realimentação, o capacitor C2 de 22nF em paralelo com o resistor R9 de 100k Ω definiu a constante de tempo do circuito, determinando a frequência de corte e a qualidade da forma de onda gerada.

O resistor R8 de 10k Ω na entrada não inversora seguiu a mesma função de R5, estabelecendo o ponto de referência para o integrador.

A quarta etapa contemplou a geração do sinal diferencial característico dos sensores indutivos. O amplificador operacional U2:B foi configurado como inversor com ganho unitário, utilizando os resistores R10 e R11 de 1k Ω , para produzir uma versão invertida do sinal senoidal obtido na etapa anterior.

Desta forma, obteve-se um par de sinais defasados em 180 graus, denominados "Sen" e "Inv. Sen", simulando o comportamento de um sensor indutivo real quando medido em seus dois terminais.



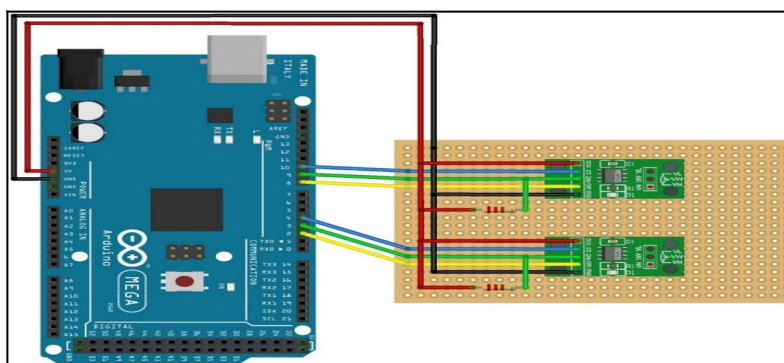


Para evitar que a conexão direta com a ECU carregasse os circuitos anteriores e degradasse os sinais, foram adicionados dois estágios buffer com os amplificadores operacionais U3:A e U3:B, configurados como seguidores de tensão. Estes buffers, caracterizados por alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, isolaram os circuitos integradores da carga representada pela ECU, preservando a integridade dos sinais gerados e garantindo a correta excitação do módulo de injeção eletrônica durante os testes.

3.3.5 Circuitos de controle: potenciômetros digitais, fonte simétrica e seleção de sinais

O controle automático do ganho dos integradores em função da rotação foi implementado com potenciômetros digitais X9C103S (10 k Ω , 99 posições, incrementos de $\approx 101 \Omega$), controlados pelo Arduino via três pinos: CS (seleção, nível baixo), U/D (direção: alto aumenta, baixo diminui resistência) e INC (pulso em borda de descida para incrementar/decrementar). A Figura 6 apresenta as conexões: POT1 (CS $\rightarrow$ 40, UD $\rightarrow$ 41, INC $\rightarrow$ 42) e POT2 (CS $\rightarrow$ 43, UD $\rightarrow$ 44, INC $\rightarrow$ 45).

Figura 6 – Ligação dos potenciômetros digitais com o Arduino.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O mapeamento entre rotação e resistência (Tabela 1) foi definido experimentalmente: maiores resistências em baixas rotações evitam saturação; menores resistências em altas



rotações preservam a forma de onda. O código calcula a resistência desejada via função `map()`, compara com o valor atual e gera pulsos no pino INC com direção definida por U/D (Figura 7).

Tabela 1 – Mapeamento rotação vs. resistência dos potenciômetros.

Faixa de Rotação (RPM)	POT1 (Ω)	POT2 (Ω)
300 – 350	2200–3300	1800–2800
351 – 400	3700–4500	3000–3800
401 – 500	4500–5200	3800–4500
501 – 1000	5200–6800	4500–5800
> 1000	6800–8200	5800–7200

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O código implementado calcula a resistência desejada com base na rotação atual (usando a função `map()`), compara com a resistência atual armazenada, e gera os pulsos necessários no pino INC com a direção apropriada no pino U/D.

A Figura 7 apresenta uma parte do código de mapeamento do potenciômetro.

Figura 7 – Parte do código do mapeamento do potenciômetro 1.

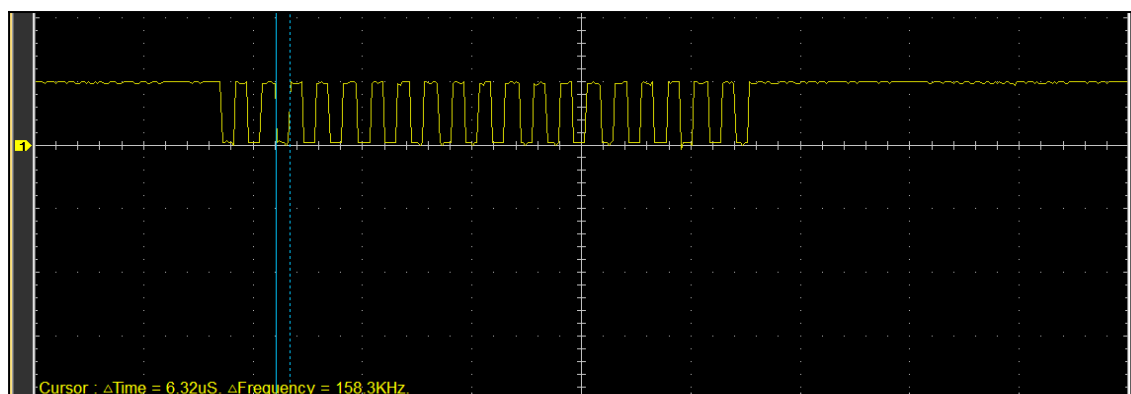
```
// Mapeia o valor da rotação para o valor do potenciômetro
if (rotacao >= 310 && rotacao <= 350) {
    targetResistance = map(rotacao, 310, 350, 2200, 3300);
} else if (rotacao > 351 && rotacao <= 400) {
    targetResistance = map(rotacao, 351, 400, 3700, 4500);
} else if (rotacao > 401 && rotacao <= 450) {
    targetResistance = map(rotacao, 401, 450, 4500, 4800);
} else if (rotacao > 451 && rotacao <= 500) {
    targetResistance = map(rotacao, 451, 500, 4800, 5100);
} else if (rotacao > 501 && rotacao <= 550) {
    targetResistance = map(rotacao, 501, 550, 5100, 5300);
} else if (rotacao > 551 && rotacao <= 600) {
    targetResistance = map(rotacao, 551, 600, 5300, 5600);
} else if (rotacao > 601 && rotacao <= 650) {
    targetResistance = map(rotacao, 601, 650, 5600, 6000);
} else if (rotacao > 651 && rotacao <= 700) {
    targetResistance = map(rotacao, 651, 700, 6000, 6200);
} else if (rotacao > 701 && rotacao <= 800) {
    targetResistance = map(rotacao, 701, 800, 6200, 6500);
} else if (rotacao > 801 && rotacao <= 900) {
    targetResistance = map(rotacao, 801, 900, 6500, 6900);
} else if (rotacao > 901 && rotacao <= 1000) {
```

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 8 mostra os pulsos gerados para controle do potenciômetro digital.



Figura 8 – Pulsos gerados pelo Arduino para controle do potenciômetro digital.

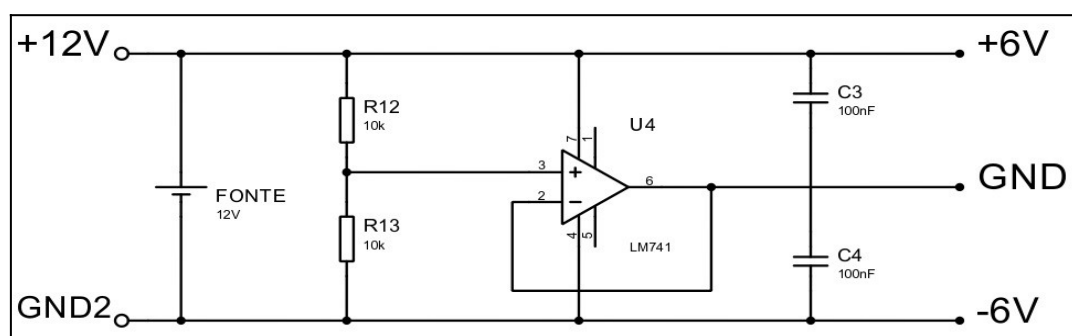


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.3.6 Fonte simétrica

Para alimentação dos amplificadores operacionais com tensões positivas e negativas, foi implementada uma fonte simétrica utilizando um amplificador operacional LM741 configurado como buffer seguidor de tensão. Um divisor resistivo (dois resistores R12 e R13 de 10 k Ω) entre 12V e GND fornece 6V à entrada não-inversora. A saída do buffer (6V) torna-se o novo ponto de referência "GND" para os demais circuitos, resultando em alimentação de +6V e -6V em relação a este novo referencial. Capacitores C3 e C4 de 100 nF foram adicionados para filtragem e estabilização. A Figura 9 apresenta o esquemático da fonte simétrica.

Figura 9 – Fonte simétrica



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).



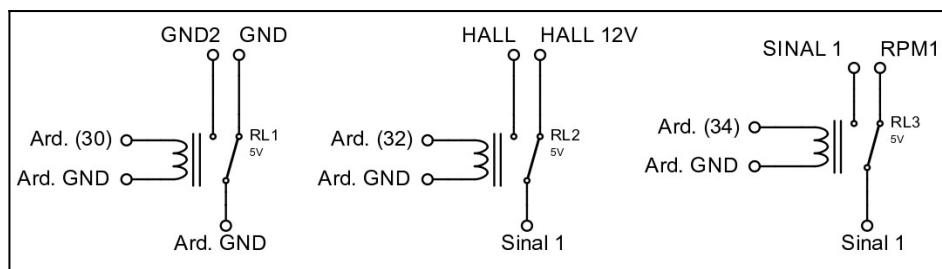
3.3.7 Seleção de sinais

Um módulo com três relés de 5V controlados pelo Arduino realiza a comutação entre os diferentes sinais:

- RL1 (pino 30): Seleciona o aterramento (GND da fonte simétrica ou GND2 da fonte 12V);
- RL2 (pino 31): Seleciona a amplitude do sinal Hall (5V ou 12V);
- RL3 (pino 32): Seleciona o tipo de sinal (Hall ou Indutivo).

A Figura 10 apresenta o circuito de relés.

Figura 10 – Relés para seleção de sinais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

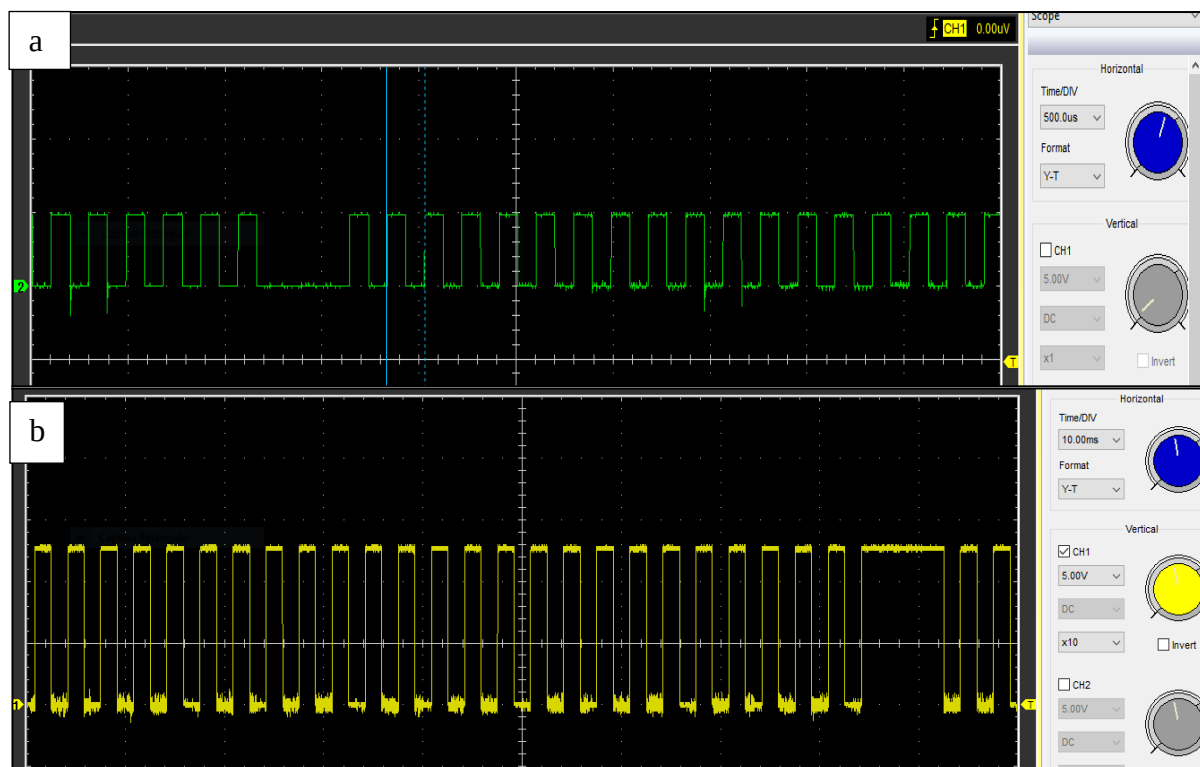
4.1 Geração de sinais Hall

A geração de sinais Hall (onda quadrada) apresentou excelente desempenho em toda a faixa de rotação testada (300 a 5130 RPM). O sinal de 5V, gerado diretamente pelo Arduino, manteve-se estável e sem distorções, com frequência precisamente controlada pelo Timer1. O sinal de 12V, obtido através do transistor BC548, também apresentou bom desempenho, com amplitude constante e tempos de subida/descida adequados.

A Figura 11 apresenta os sinais Hall gerados.



Figura 11 – Sinais Hall gerados: (a) 5V; (b) 12V.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

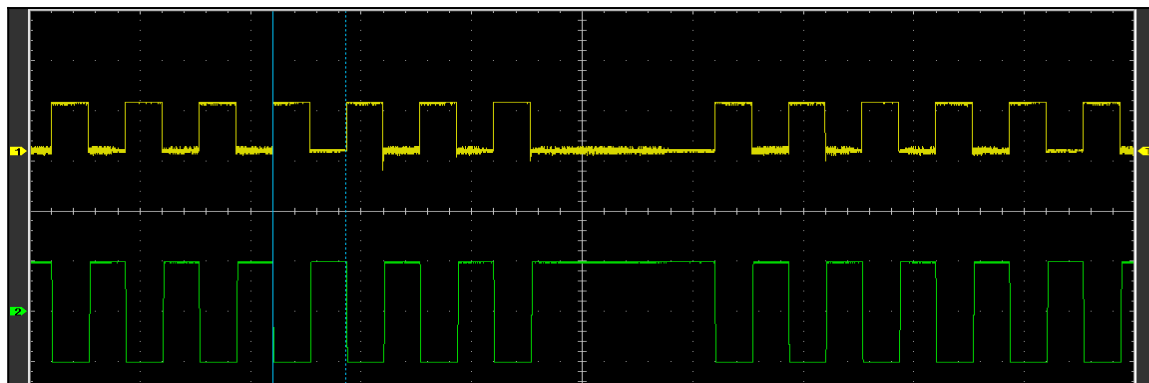
4.2 Conversão para Sinal Indutivo

4.2.1. Etapas da Conversão

A Figura 12 mostra o resultado da primeira etapa da conversão (comparador), onde o sinal Hall original (Canal 1) é transformado em um sinal simétrico de -5V a +5V (Canal 2).



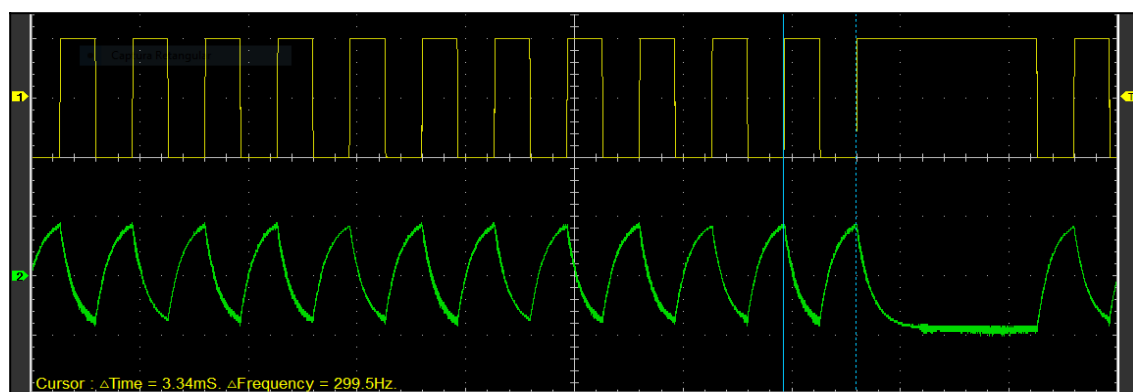
Figura 12 – Resultado circuito comparador.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 13 apresenta o resultado do primeiro integrador (U1:B), onde o sinal quadrado simétrico é convertido em onda triangular.

Figura 13 – Resultado do primeiro circuito integrador.



Fonte:

Elaborado pelos autores (2025).

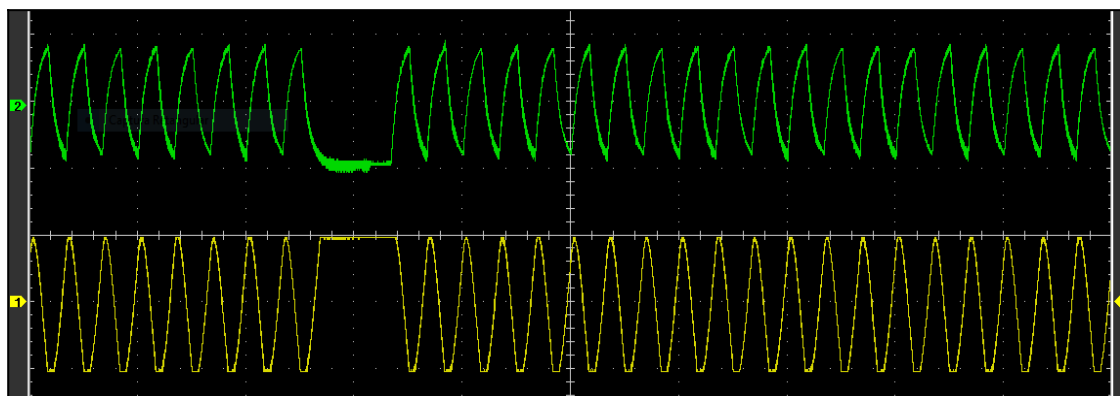
Observa-se que a onda triangular não é perfeitamente linear devido à inclusão do resistor de 6,8 k Ω em paralelo com o capacitor de 100 nF. Esta escolha foi necessária para evitar a saturação do integrador em baixas frequências (300 RPM), onde a constante de tempo RC precisaria ser muito alta. O resistor acelera a descarga do capacitor, permitindo operação



em uma faixa mais ampla de frequências, mas introduz alguma não linearidade na forma de onda.

A Figura 14 mostra o resultado do segundo integrador (U2:A), onde a onda triangular é convertida em senoidal.

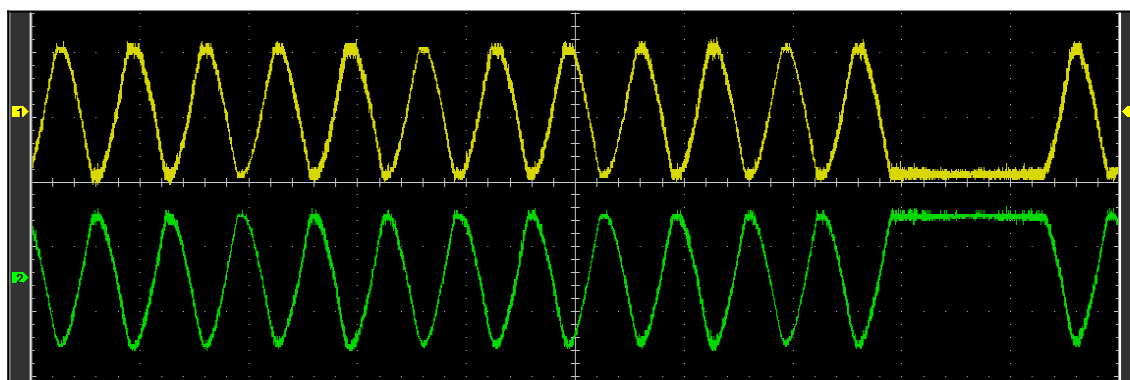
Figura 14 – Resultado do segundo circuito integrador.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Finalmente, a Figura 15 apresenta o sinal senoidal original e sua versão invertida (após U2:B), que são as saídas diferenciais que simulam o sensor indutivo.

Figura 15 – Inversão do sinal senoidal.



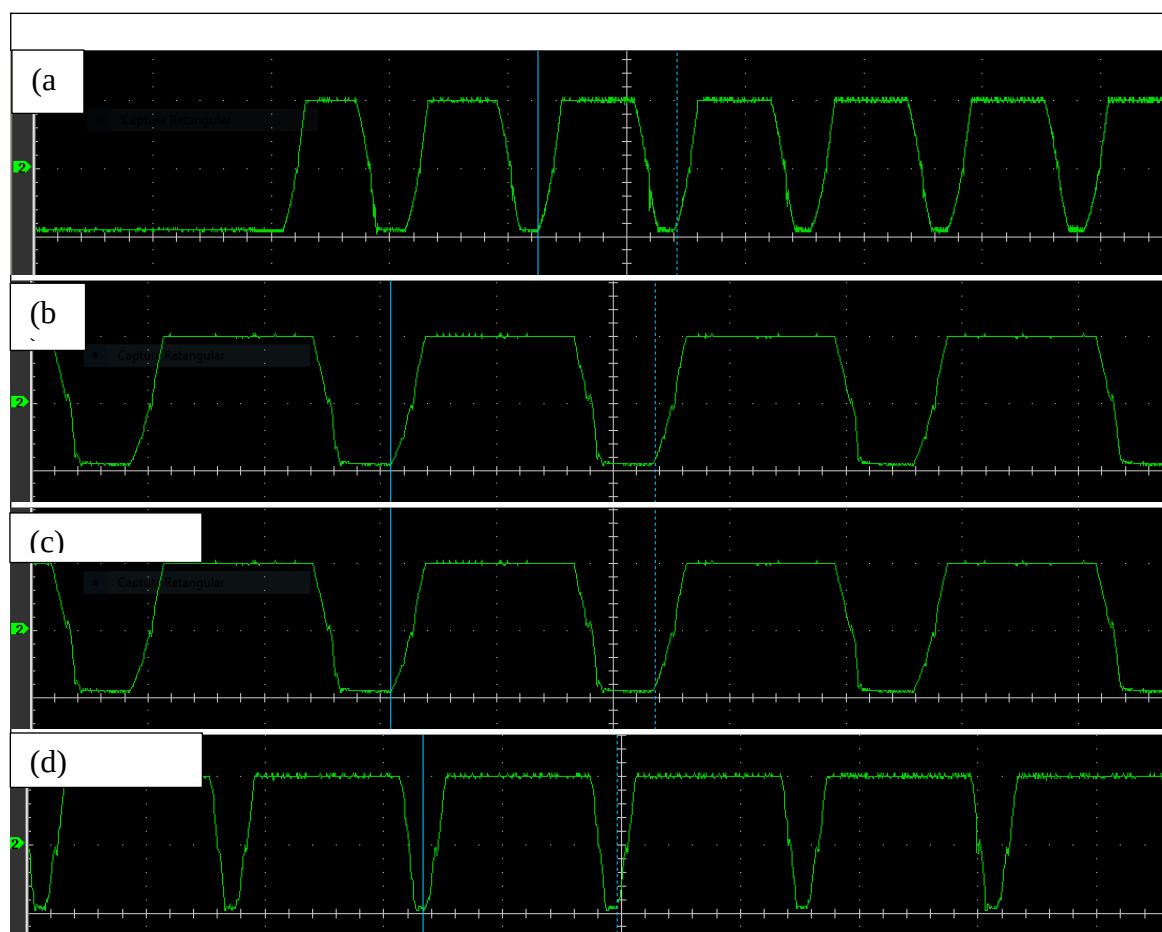
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).



4.2.2 Desempenho em diferentes rotações

A Figura 16 mostra as ondas em diferentes frequências. Esta análise mais detalhada proporciona uma compreensão aprofundada de como o sistema reage à variação da frequência, oferecendo informações cruciais sobre o desempenho do processo de conversão do sinal triangular para senoidal.

Figura 16 – Sinais senoidais em diferentes rotações: (a) 500 RPM - pequena atenuação; (b) 1700 RPM - saturação considerável; (c) 2200 RPM - deformação acentuada; (d) 3000 RPM - sinal severamente distorcido.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).



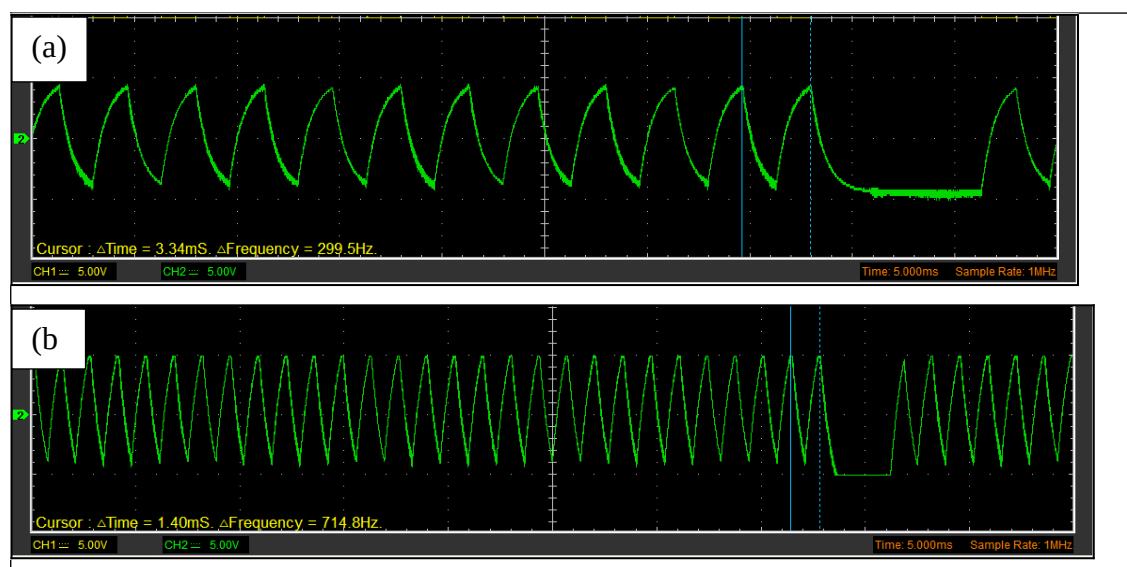
A análise da Figura 16 revela:

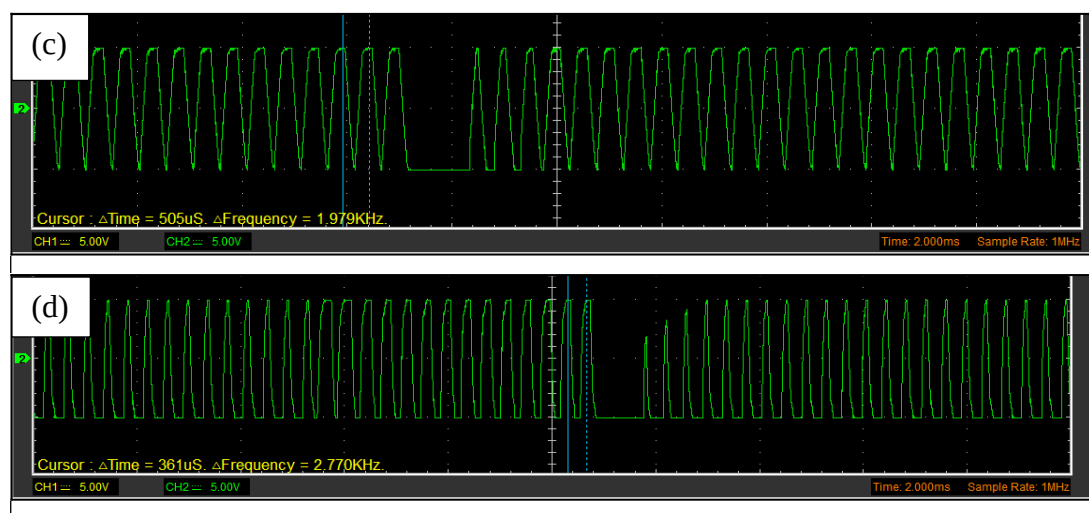
- (a): 500 RPM - Onda senoidal com pequena atenuação, mas ainda reconhecível.
- (b): 1700 RPM - Saturação considerável, com topo e base da onda truncados.
- (c): 2200 RPM - Deformação acentuada, aproximando-se de uma onda quadrada.
- (d): 3000 RPM - Sinal severamente distorcido, não reconhecido pela ECU.

A Figura 16 apresenta a evolução da forma de onda senoidal com o aumento da rotação: em 500 RPM (a) observa-se leve atenuação; em 1700 RPM (b) já há saturação significativa; e em 2200 RPM (c) e 3000 RPM (d) as deformações tornam-se progressivamente mais acentuadas. O conversor baseado em integrador mostrou-se eficiente até aproximadamente 1000 RPM; acima desse valor, a distorção cresce e o sinal tende gradativamente a uma forma próxima da onda quadrada. Ainda assim, até cerca de 2000 RPM o módulo de injeção eletrônica reconheceu adequadamente o sinal indutivo.

A Figura 17 mostra a evolução da onda triangular com a rotação.

Figura 17 – Sinais de onda triangular em diferentes rotações: (a) 300 RPM - triangular de boa qualidade; (b) 700 RPM - início de elevação dos "dentes"; (c) 2000 RPM - deformação significativa; (d) 2800 RPM - perda de amplitude durante falha.





Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Observa-se que, em 300 RPM (Figura 17a), a onda triangular tem boa qualidade. Em 700 RPM (17b), os "dentes" da onda começam a se elevar. Em 2000 RPM (17c), a deformação é significativa, com a onda se aproximando de uma forma quadrada. Em 2800 RPM (17d), durante a falha de dois dentes da roda fônica, o sinal perde amplitude temporariamente, retornando ao normal a partir do quarto dente.

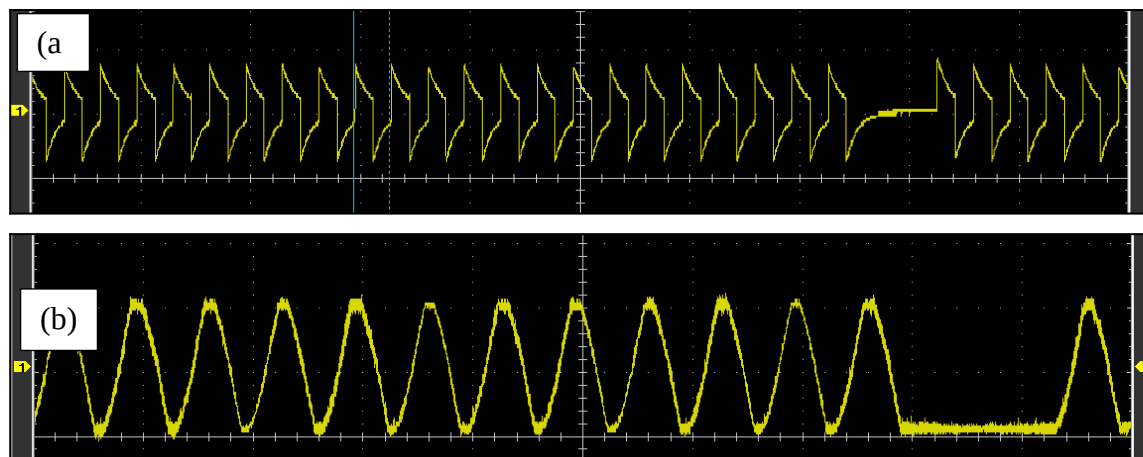
A deformação do sinal decorre da limitação do potenciômetro digital de 10 k Ω , que não fornece a faixa de resistência necessária para manter a constante de tempo RC adequada em toda a faixa de frequências. Assim, em baixas frequências a resistência exigida pode exceder o valor máximo disponível, e em altas frequências podem ser insuficientes. A inclusão de resistores em paralelo com os capacitores ampliou a faixa de operação, porém comprometeu a qualidade da forma de onda, sobretudo em frequências intermediárias e altas.

4.3 Comparação com sinais reais e referências

A Figura 18 compara o sinal gerado por este trabalho com o sinal de um simulador comercial utilizado por técnicos automotivos.



Figura 18 – Comparação: (a) sinal de simulador comercial; (b) sinal gerado neste trabalho (300 RPM).

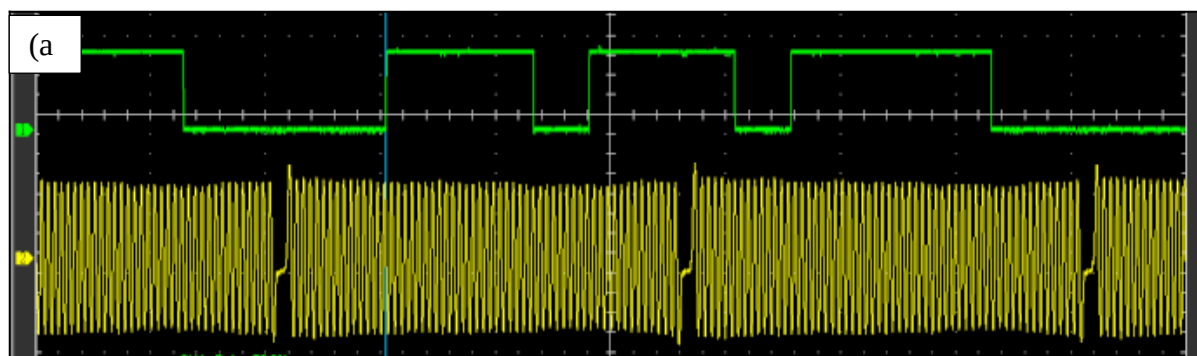


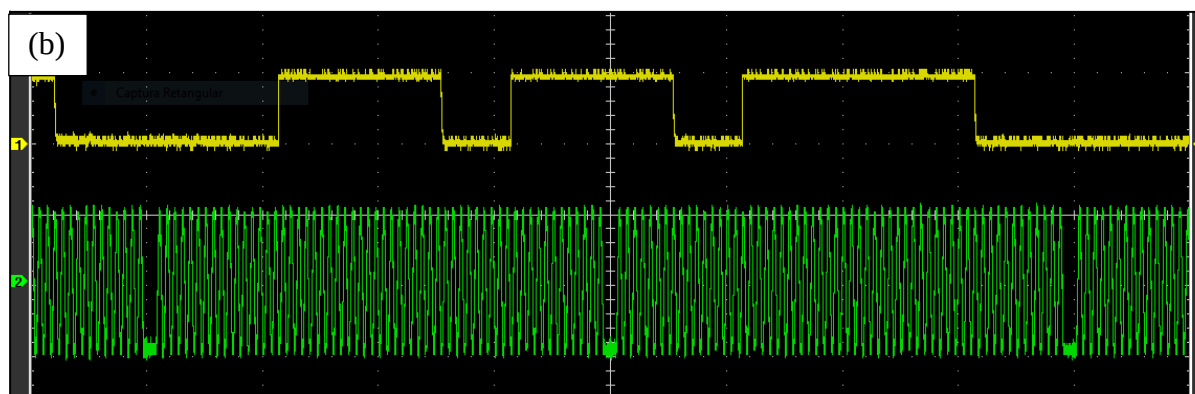
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O simulador comercial utiliza um filtro RC simples, resultando em uma onda que se afasta significativamente de uma senoide ideal. O sinal gerado neste trabalho, por meio de dupla integração com amplificadores operacionais, apresenta forma muito mais próxima da senoidal esperada para sensores indutivos.

A Figura 19 compara os sinais gerados com sinais reais obtidos de um veículo Fiat Palio Economy 1.4 2014 (sistema de injeção IAW 4GF) em marcha lenta (~800 RPM).

Figura 19 – (a) Sinal Simulador de referência; (b) Sinal gerado neste trabalho.





Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os sinais apresentam grande semelhança, especialmente na relação entre fase e rotação, com um ciclo de fase para cada dois ciclos de rotação. A principal diferença ocorre durante a falha da roda fônica, em que o sinal real apresenta transição mais suave e não retorna totalmente a -5V, enquanto o sinal gerado é mais abrupto. Já o sinal de fase gerado mostrou-se praticamente idêntico ao real, mantendo as mesmas posições de transição.

4.4 Avaliação da interface

A interface touch-screen mostrou-se intuitiva e eficiente, permitindo:

- Seleção rápida de sinais pré-configurados por montadora;
- Configuração flexível de sinais genéricos (dentes, falhas, amplitude, tipo);
- Controle preciso da rotação através de botão deslizante;
- Visualização clara do status do sistema (ON/OFF).

A comunicação UART entre display e Arduino apresentou-se estável e sem perda de dados durante todos os testes.



5. CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um gerador de sinais de rotação e fase para testes de módulos de injeção, com geração precisa de sinais Hall entre 300 e 5130 RPM e interface touch-screen para configuração. A conversão para sinal indutivo por dupla integração mostrou bom desempenho entre 300 e 1000 RPM, mas apresentou deformações acima dessa faixa, especialmente acima de 2000 RPM. A comparação com sinais reais indicou boa fidelidade até 1000 RPM e desempenho superior a simuladores comerciais com filtros RC. Como limitações, destacam-se a faixa restrita do potenciômetro digital e o impacto de resistores em paralelo na linearidade do sinal.

REFERÊNCIAS

ALBADALEJO, Felipe Serafim. **Desenvolvimento de uma unidade de gerenciamento eletrônico para motores de combustão interna do ciclo Otto**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Microeletrônica, Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

BOSCH (Alemanha). **Automotive Handbook**. 11. ed. Gerlingen, 2022. 2044 p.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 548 p.

CASTRO, Fábio Daniel de; RAHDE, Sérgio Barbosa. **Motores Automotivos: evolução, manutenção e tendências**. Porto Alegre: Edipucrs, 2014. 202 p.

GOMES, Alcides Tadeu. **Telecomunicações: transmissão e recepção**. 21. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2015. 514 p.

HAUPT, Alexandre Gaspar; DACHI, Édison Pereira. **Eletrônica Digital**. São Paulo: Blucher, 2018. 230 p.





KURNIAWAN, Agus. **Arduino Mega 2560: a hands-on guide for beginner**. Depok: Pe Press, 2019. 101 p.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia Científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MICROCHIP. **ATmega2560 datasheet**. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega2560#document-table>. Acesso em: 23 ago. 2023.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Fundamentos de Eletromagnetismo**. Florianópolis: Cefet/Sc, 2007. 142 p.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S. **Sinais e Sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2010. 568 p.

ROCHO, Rafaela dos Reis. **Projeto e Simulação de um Circuito Eletrônico para Monitoramento de Temperatura e Vibração**. 2022. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.

SCHIAVETTO, D. S. **Informativo Técnico: Sensor de Rotação e Sensor de Fase**. Rio Preto - SP, 2023.

SOUZA, Wallace Gabriel de. **Identificação de Falhas em Rolamentos Aplicados em Motores de Indução por meio de Sensores de Corrente de Efeito Hall, Técnicas de Processamento de Sinais e Sistemas Inteligentes**. 2022. 103 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP, Bauru, 2022.

Recebido em: 07/02/2026

Aprovado em: 20/02/2026

Publicado em: 10/03/2026

