DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA GERENCIAMENTO DE UMA INJEÇÃO ELETRÔNICA PROGRAMÁVEL UTILIZANDO ESP32

Murilo Morales Ariguci (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Wagner André S. Conceição (Coorientador), Jean Rodrigo Bocca (Orientador). E-mail: jrbocca@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Engenharia Mecânica/Projetos de Máquinas.

Palavras-chave: Injeção eletrônica; ESP32; Controle de motores.

RESUMO

O projeto visa ao desenvolvimento de um software de injeção eletrônica programável utilizando um microcontrolador ESP32, como alternativa de baixo custo e acessível para aplicações e customizações automotivas. A injeção eletrônica contribui para o aumento do desempenho e da eficiência energética dos motores, além da redução de emissões, em comparação aos sistemas carburados. Entretanto, soluções comerciais, como *FuelTech* e *Haltech*, apresentam custo elevado, limitando sua aplicação em pequenos projetos e ambientes educacionais. Nesse contexto, o ESP32 apresenta-se como uma alternativa viável devido ao seu poder de processamento, conectividade integrada e baixo custo. O projeto contempla a implementação de algoritmos para controle da injeção de combustível e do avanço de ignição, considerando parâmetros como RPM, abertura da borboleta, temperatura e carga do motor, além da integração com sensores Hall, TPS, MAP, temperatura e sonda Lambda. A metodologia compreende pesquisa bibliográfica, mapeamento de sinais e sensores e desenvolvimento do software em linguagem C, utilizando VS Code e PlatformIO. Como resultado, busca-se desenvolver um sistema econômico, adaptável e de código aberto, contribuindo para ampliar o acesso à tecnologia de injeção eletrônica programável em aplicações automotivas e acadêmicas.

INTRODUÇÃO

A injeção eletrônica programável constitui uma solução mais precisa e adaptável para o gerenciamento de motores de combustão interna, substituindo os sistemas carburados. Seu uso possibilita o controle da mistura ar-combustível e dos parâmetros de ignição, contribuindo para a melhoria do desempenho, a redução das emissões de poluentes e o aumento da eficiência energética dos motores (BOSCH, 2016).

Atualmente, sistemas comerciais de injeção programável, como *MegaSquirt* e *Haltech*, oferecem elevado desempenho e capacidade de configuração, porém apresentam custo elevado, o que pode limitar sua utilização em pequenos projetos e aplicações educacionais (SMITH, 2020). Nesse contexto, o ESP32 apresenta-se como uma alternativa viável devido à sua capacidade de processamento, arquitetura

de dois núcleos, conectividade integrada por Wi-Fi e Bluetooth e baixo custo (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

Este projeto tem como objetivo desenvolver um sistema de gerenciamento de injeção eletrônica programável utilizando o ESP32 como unidade de controle central. O sistema contempla algoritmos para controle da injeção de combustível e do avanço de ignição, considerando parâmetros como rotação do motor (RPM), abertura da borboleta, carga e temperatura, além da aquisição de sinais de sensores automotivos.

A proposta busca aliar baixo custo, flexibilidade e possibilidade de customização, permitindo adaptações conforme as necessidades da aplicação. Dessa forma, o sistema apresenta potencial para utilização em projetos automotivos experimentais e estudos acadêmicos relacionados ao controle de motores de combustão interna.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do sistema foi realizado a partir de pesquisa bibliográfica sobre injeção eletrônica, gerenciamento de motores de combustão interna, sensores automotivos e estratégias de controle. O funcionamento do motor de combustão interna de ciclo Otto e os princípios relacionados à conversão de energia foram considerados conforme Moran e Shapiro (2018). Com base nesse levantamento, foram definidos os principais sinais de entrada e saída do sistema, considerando sensores de pressão, posição, temperatura, rotação e concentração de oxigênio, além dos atuadores relacionados à injeção de combustível e à ignição.

O ESP32 foi definido como unidade central de controle devido à sua capacidade de processamento e aos periféricos disponíveis para aquisição e geração de sinais. Como os níveis elétricos dos sinais automotivos podem ser incompatíveis com os níveis admitidos pelos GPIOs do microcontrolador, foi adotada uma arquitetura de simulação para o desenvolvimento do software, evitando a aplicação direta de sinais incompatíveis ao ESP32.

Para estabelecer a comunicação entre o sistema de geração de sinais e o microcontrolador, foi realizado o mapeamento das entradas considerando a grandeza medida, o tipo e a faixa do sinal original e o sinal utilizado na simulação. O mapeamento e as respectivas portas de conexão são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Mapeamento dos sensores e sinais de entrada do ESP32.

Sensor	Grandeza medida	Sinal real (automóvel)	Sinal simulado	GPIO do ESP32
MAP	Pressão no coletor	0–5 V (analógico)	0–3,3 V (analógico)	GPIO 34

TPS	Abertura da borboleta	0,5–4,5 V (analógico)	0–3,3 V (analógico)	GPIO 35
CLT	Temperatura do motor	NTC, circuito de 5 V	0–3,3 V (analógico)	GPIO 32
RPM (Hall)	Rotação do motor	5/12 V (digital)	0–3,3 V (digital)	GPIO 18
Sonda Lambda	Concentração de oxigênio	0–1 V (analógico)	0–1 V (analógico)	GPIO 36

O firmware foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o ambiente Visual Studio Code integrado à plataforma PlatformIO. O software foi estruturado para realizar a aquisição e o processamento dos sinais de entrada, relacionando os parâmetros de funcionamento do motor às tabelas de calibração definidas para o sistema. A partir desses dados, são determinados os parâmetros de controle da injeção de combustível e do avanço de ignição.

Para a validação inicial do sistema, foi utilizada uma bancada de simulação na qual os sinais dos sensores são representados por meio de um sistema emissor. Os sinais são ajustados para níveis compatíveis com o ESP32 e posteriormente processados pelo firmware. A resposta do sistema é avaliada de acordo com os valores definidos nos mapas de calibração, permitindo verificar o funcionamento dos algoritmos de controle antes da integração com os sensores e atuadores automotivos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do firmware resultou na implementação de uma estrutura modular para o gerenciamento dos parâmetros de injeção eletrônica, permitindo a aquisição dos sinais dos sensores, seu processamento e a determinação dos parâmetros de controle. O sistema considera como entradas a rotação do motor (RPM), abertura da borboleta (TPS), temperaturas do líquido de arrefecimento e do ar de admissão e sinal da sonda Lambda.

Para o controle de combustível, foi implementado um mapa bidimensional em função da rotação e da abertura da borboleta, com obtenção dos valores intermediários por interpolação bilinear. Ao valor base são aplicadas correções relacionadas à temperatura e à sonda Lambda, além de uma condição específica para marcha lenta e limites de segurança para o tempo final de injeção. Dessa forma, o algoritmo permite que o tempo de acionamento do injetor varie de acordo com as condições de funcionamento simuladas.

O controle de ignição utiliza uma estrutura semelhante, empregando um mapa de avanço em função de RPM e TPS e interpolação bilinear para obtenção do valor base. Posteriormente, é aplicada uma correção em função da temperatura, além de condições específicas de operação e limites de segurança, resultando no avanço de ignição em graus antes do ponto morto superior (° APMS).

A estrutura desenvolvida permite o processamento dos sinais simulados e a apresentação, por meio do Monitor Serial, dos parâmetros de entrada e dos valores calculados de tempo de injeção e avanço de ignição. Entretanto, como os testes experimentais sistemáticos ainda não foram realizados, os resultados obtidos até o momento estão relacionados principalmente à implementação e integração das rotinas de controle. A próxima etapa consiste na aplicação de diferentes combinações de RPM, TPS, temperatura e sinal Lambda, possibilitando avaliar quantitativamente a resposta dos mapas e das correções implementadas.

CONCLUSÕES

O projeto permitiu desenvolver a arquitetura inicial e o firmware de um sistema de injeção eletrônica programável baseado no ESP32, integrando a aquisição de sinais e os algoritmos de controle de combustível e ignição. A arquitetura de simulação possibilita o desenvolvimento seguro do sistema, enquanto a validação experimental e a calibração dos algoritmos constituem as próximas etapas para avaliar seu desempenho em diferentes condições de operação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e à Universidade Estadual de Maringá (UEM) pela estrutura e suporte necessários ao desenvolvimento deste projeto. Agradeço também ao orientador e aos colaboradores que contribuíram para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BOSCH. Automotive Handbook. 9th ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2016.

ESPESSIF SYSTEMS. ESP32 Technical Reference Manual. Version 4.7, 2022.

SMITH, J. Performance Fuel Injection Systems. 2nd ed. New York: SAE International, 2020.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.