

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA BASEADA EM SISTEMA OPERACIONAL EM TEMPO REAL PARA UM MÓDULO DE GERENCIAMENTO ENERGÉTICO

Gabriel Del Monte Schiavi Noda¹ (IC), Robson Bauwelz Gonzatti¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Palavras-chave: Conversor DC-DC. Eletrônica de potência. Sistema operacional de tempo real. Sistemas embarcados.

Introdução

A pesquisa explora o desenvolvimento de um sistema otimizado para conversores DC-DC, focando na integração entre hardware e software. O conversor *buck* utilizado durante a pesquisa, que é amplamente utilizado para reduzir tensões de entrada em aplicações como fontes de alimentação, será controlado pelo microcontrolador TMS320F28379D, que possui uma arquitetura de 32 bits e suporte a multitarefas em tempo real, auxiliado pelo sistema operacional de tempo real (RTOS) freeRTOS.

Deste modo, o principal objetivo desta pesquisa é desenvolver um conversor DC-DC controlado por um controlador Proporcional-Integral (PI), implementar um sistema operacional em tempo real e realizar a integração eficaz entre ambos, criando um ambiente de teste e validação. Além disso, ocorrerá uma comunicação do tipo Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) entre o TMS320F28379D e o ESP32 para que seja possível realizar o monitoramento via *Wi-Fi* e envio de dados a um banco de dados PostgreSQL, tornando o sistema mais seguro e eficiente em relação à obtenção das medidas de corrente e tensão do circuito.

Portanto, tendo em vista o foco pela busca de fontes de energia renováveis, o projeto visa a criação de uma plataforma baseada em um sistema operacional de tempo real, capaz de integrar tecnologias atuais de hardware e software, contribuindo diretamente para o desenvolvimento de soluções inovadoras na automação e, também, no uso de energias sustentáveis. Deste modo, de maneira geral, o estudo busca ampliar o conhecimento técnico e oferecer soluções aplicáveis em sistemas embarcados e automação industrial.

Metodologia

Durante a pesquisa, foi abordado o desenvolvimento de sistemas de controle utilizando microcontroladores e sistemas em tempo real, com foco em conversores DC-DC, onde estes são essenciais para diversas aplicações, como fontes de

alimentação e sistemas fotovoltaicos, permitindo a conversão de tensão contínua. De modo geral, o conversor *buck*, representado pela figura 1, é um dos mais comuns, reduzindo a tensão de entrada através de chaveamento de componentes semicondutores. A eficiência desses conversores é garantida por componentes como indutores e capacitores, que regulam e suavizam a tensão de saída, caso seus valores estejam dimensionados da maneira correta para o circuito proposto. ^[1]

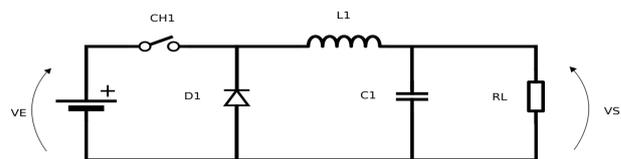


Figura 1 - conversor *buck*

Fonte: Wikipedia ^[2]

O controle de conversores DC-DC é fundamental para a estabilidade do sistema, especialmente em aplicações sensíveis. Para tanto, o controlador PI (Proporcional-Integral), demonstrado pela figura 2, é amplamente utilizado, ajustando dinamicamente o ciclo de trabalho do conversor para corrigir erros entre a tensão medida e o valor de referência. Esse controle é eficaz em manter a estabilidade mesmo sob variações de carga e de entrada, sendo bastante empregado no conversor *buck* tendo em vista sua rapidez e estabilidade. ^[3]

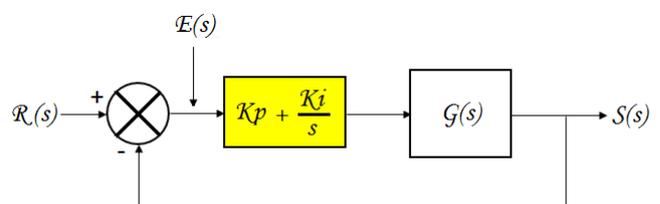


Figura 2 - controlador PI

Fonte: Embarcados ^[4]

Os microcontroladores, por sua vez, são essenciais devido à sua versatilidade e baixo consumo, de modo geral. Esses dispositivos integram CPU, RAM, ROM e periféricos como *General Purpose*

Input/Output (GPIO), Pulse Width Modulation (PWM), Analog-to-Digital Converter (ADC) e comunicação UART, facilitando o controle preciso de sistemas em tempo real. A flexibilidade dos GPIOs permite a interação com diversos sensores e atuadores, enquanto a modulação PWM é usada para controlar dispositivos analógicos, como motores e LEDs, ajustando a energia fornecida e pensando na segurança do sistema, tem-se o *watchdog*, que reseta o sistema em caso de falhas. Além disso, os sistemas operacionais de tempo real são essenciais para gerenciar múltiplas tarefas simultâneas em microcontroladores, garantindo que operações críticas sejam realizadas dentro dos limites específicos. O freeRTOS, por exemplo, é um sistema multitarefa que facilita o gerenciamento de processos e recursos, tornando os sistemas embarcados mais eficientes e previsíveis. [4] [5] [6]

Para a conectividade à internet, o ESP32 é utilizado devido à sua capacidade de comunicação *Wi-Fi* e *Bluetooth*, sendo ideal para aplicações que requerem processamento em tempo real e conexão com a internet devido suas características. A comunicação entre microcontroladores como o ESP32 e outros dispositivos permite monitoramento e controle remoto eficiente. Por fim, o sistema usa o banco de dados PostgreSQL para armazenamento e recuperação de dados, utilizando o modelo relacional para organizar informações de forma estruturada e eficiente. [7]

A partir dessas considerações, um circuito do tipo *buck*, conforme ilustrado pela figura 3, foi montado em uma bancada de testes, como mostrado na figura 6. O objetivo foi implementar o controle de um conversor DC-DC utilizando o F28379D, microcontrolador presente na figura 4, o sistema operacional freeRTOS e a comunicação com o ESP32, microcontrolador referente à figura 5, que é responsável pelo envio de dados para um banco de dados PostgreSQL. As etapas do projeto incluíram o desenvolvimento do conversor, medições de tensão e corrente, criação de controladores e integração com um sistema de banco de dados para monitoramento em tempo real, além de que sensores baseados no efeito Hall foram utilizados para garantir medições precisas de corrente e tensão, contribuindo para o controle e análise de desempenho do sistema.



Figura 4 - microcontrolador F28379D
Fonte: Texas Instruments [6]



Figura 5 - microcontrolador ESP32
Fonte: Espressif Systems [7]

O F28379D foi escolhido como o principal processador para o projeto, por sua capacidade de realizar processamento em tempo real, o que foi essencial para controlar o conversor DC-DC de maneira eficiente e adequada. Funções como *GPIO*, *PWM* e *ADC* foram configuradas no microcontrolador para controlar LEDs, ler botões, medir sinais de corrente e tensão, e ajustar dinamicamente o ciclo de trabalho do *PWM*. Além disso, a configuração de interrupções garantiu que as leituras de tensão e corrente fossem atualizadas em intervalos regulares, permitindo uma operação em malha fechada estável e eficiente.

O ESP32 foi integrado ao sistema para garantir a conectividade *Wi-Fi*, permitindo o envio de dados do conversor para um banco de dados PostgreSQL. Um script em Python foi desenvolvido para automatizar a inserção de dados no banco de dados, facilitando o monitoramento e a análise do desempenho do sistema em tempo real. Além disso, o ESP32 utilizou um display *LCD* para exibir informações de tensão e corrente em tempo real, permitindo uma visualização direta dos dados durante a operação do sistema, sem que fosse necessário visualizar o banco de dados.

O banco de dados PostgreSQL foi escolhido pela sua facilidade de uso e por ser um software de uso

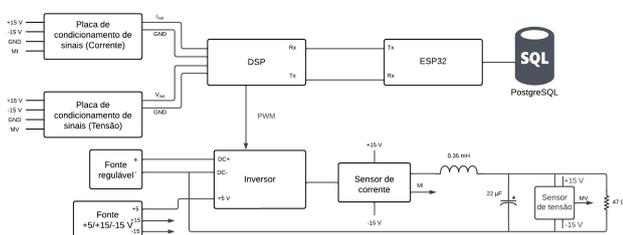


Figura 3 - diagrama do circuito proposto
Fonte: autoria própria

livre. O serviço local foi implementado para organizar os dados recebidos pelo ESP32 e armazená-los, permitindo o monitoramento contínuo do sistema. Um script de publicação automatizou o envio para o banco de dados, assegurando que as leituras fossem atualizadas em tempo real.

Assim, os testes realizados durante a pesquisa incluíram malha aberta, onde o funcionamento básico do conversor foi validado, e malha fechada, com a aplicação de controle automatizado através do controlador PI. Esses testes demonstraram a capacidade do sistema de regular a tensão de saída de acordo com a referência estabelecida e indicaram a robustez e adaptabilidade do controle implementado.

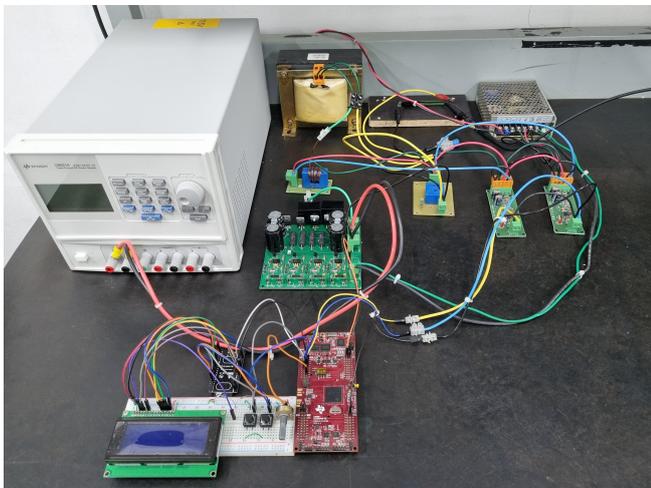


Figura 6 - bancada de testes utilizada

Fonte: autoria própria

Resultados e discussão

Os resultados obtidos durante a pesquisa demonstraram a eficácia do sistema implementado, com o RTOS gerenciando eficientemente as tarefas de controle e comunicação. A capacidade do microcontrolador de lidar com interrupções garantiu um controle preciso e rápido, essencial para o desempenho do conversor DC-DC. O uso de técnicas de PWM permitiu manter a tensão de saída estável, com respostas rápidas às variações da tensão de referência, onde a figura 7 representa o início da estabilização de um sinal e a figura 8 ilustra o funcionamento do sistema com tensão de entrada de 8,00 V, com tensão esperada, conforme o valor da referência do controlador PI, de 6,98 V e com tensão de saída, medida pelo microcontrolador F28379D, de 6,80 V.

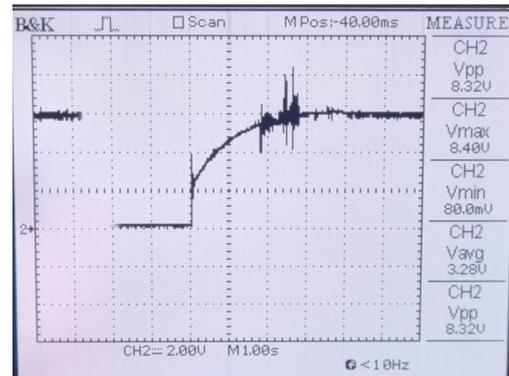


Figura 7 - início da estabilização de sinal de teste

Fonte: autoria própria

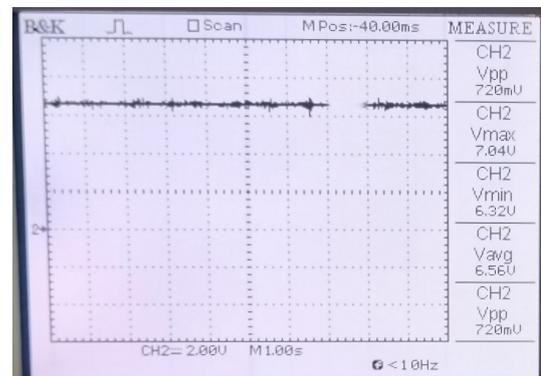


Figura 8 - visor do osciloscópio com tensão de entrada de 8,00 V, tensão esperada de 6,98 V e saída de 6,80 V

Fonte: autoria própria

Durante os testes, o sistema foi iniciado com uma tensão de entrada fixa de 8,00 V e a tensão de saída foi gradualmente reduzida, com ajustes dinâmicos feitos pelo controlador PI. A tabela 1 ilustra os resultados desses testes, de maneira simplificada, que mostraram que o sistema respondeu de forma eficaz às variações nas condições de operação, ajustando o PWM conforme necessário para garantir a estabilidade da tensão de saída. Adicionalmente, testes com redução simultânea da tensão de entrada e da tensão esperada também foram realizados, que são representados pela tabela 1, de maneira simplificada, que confirmam a capacidade do sistema de se adaptar a diferentes condições de operação.

Tabela 1 - dados obtidos após os testes

Tensão de entrada	Tensão esperada	Tensão de saída
8,00 V	3,18 V	3,00 V
6,00 V	4,96 V	5,00 V

Fonte: autoria própria

A conexão estável do ESP32 com a rede *Wi-Fi* permitiu o envio contínuo de dados para o banco de dados PostgreSQL, conforme mostra a figura 9, evidenciando a eficácia do sistema na transmissão de dados em tempo real, crucial para aplicações que exigem monitoramento contínuo.

id	expected_voltage	voltage	current	circuit_time	server_time
84	6.98 V	6.80 V	162.50 mA	2024-09-27 00:05:00	2024-09-26 22:59:27.62851
85	6.83 V	6.90 V	158.10 mA	2024-09-27 00:05:00	2024-09-26 22:59:27.784235
86	4.77 V	5.10 V	128.70 mA	2024-09-27 00:05:20	2024-09-26 22:59:47.558554
87	4.84 V	5.20 V	57.30 mA	2024-09-27 00:05:20	2024-09-26 22:59:47.634244
88	4.96 V	4.40 V	127.60 mA	2024-09-27 00:05:40	2024-09-26 23:08:07.542914
89	4.55 V	5.90 V	117.30 mA	2024-09-27 00:05:40	2024-09-26 23:08:07.945265
90	3.18 V	3.80 V	71.30 mA	2024-09-27 00:06:00	2024-09-26 23:08:27.550638
91	3.07 V	3.90 V	69.40 mA	2024-09-27 00:06:00	2024-09-26 23:08:27.859678
92	1.76 V	1.90 V	44.00 mA	2024-09-27 00:06:20	2024-09-26 23:08:47.619567
93	1.88 V	2.10 V	49.40 mA	2024-09-27 00:06:20	2024-09-26 23:08:47.691654
94	2.71 V	1.70 V	27.60 mA	2024-09-27 00:06:40	2024-09-26 23:01:07.629231
95	2.77 V	1.40 V	21.90 mA	2024-09-27 00:06:40	2024-09-26 23:01:07.704749
96	6.93 V	6.70 V	168.80 mA	2024-09-27 00:07:00	2024-09-26 23:01:27.616365
97	6.81 V	6.60 V	183.80 mA	2024-09-27 00:07:00	2024-09-26 23:01:27.699962
98	5.42 V	6.10 V	141.20 mA	2024-09-27 00:07:20	2024-09-26 23:01:47.558197
99	5.89 V	6.10 V	151.70 mA	2024-09-27 00:07:20	2024-09-26 23:01:47.826946
100	5.88 V	5.90 V	250.80 mA	2024-09-27 00:07:40	2024-09-26 23:02:07.559811
101	5.87 V	5.90 V	145.90 mA	2024-09-27 00:07:40	2024-09-26 23:02:07.843769
102	5.05 V	5.00 V	4.00 mA	2024-09-27 00:08:00	2024-09-26 23:02:27.568822
103	4.96 V	5.00 V	4.00 mA	2024-09-27 00:08:00	2024-09-26 23:02:27.870438
104	5.07 V	4.70 V	117.90 mA	2024-09-27 00:08:20	2024-09-26 23:02:47.557275
105	4.96 V	5.10 V	122.80 mA	2024-09-27 00:08:20	2024-09-26 23:02:47.83297
106	4.11 V	4.80 V	97.30 mA	2024-09-27 00:08:40	2024-09-26 23:03:07.783774
107	4.05 V	4.80 V	84.30 mA	2024-09-27 00:08:40	2024-09-26 23:03:07.838963

Figura 9 - banco de dados após a aplicação ser utilizada

Fonte: autoria própria

Por fim, os resultados confirmaram que a integração entre o F28379D, o freeRTOS e o ESP32 oferece uma solução eficiente para o controle de conversores *buck* em tempo real.

Conclusões

De modo geral, este projeto estudou o desenvolvimento de uma plataforma baseada em um sistema operacional de tempo real para controle de um conversor DC-DC do tipo *buck*, integrando um sistema de conexão à internet para envio de dados a um banco de dados local. Durante os testes, o sistema se mostrou estável e eficiente dentro dos limites de operação, destacando a escalabilidade da placa de desenvolvimento utilizada. O F28379D, junto com o freeRTOS, foi essencial para o gerenciamento de tarefas em tempo real e para a *PWM*, garantindo o controle preciso da tensão de saída em diferentes condições. Além disso, mecanismos de proteção, como o *watchdog* e botões de desligamento, adicionaram uma camada de segurança ao sistema, garantindo continuidade mesmo em casos de falha, o que é crucial em aplicações críticas.

A integração com o ESP32 facilitou a comunicação via *UART* e o envio de dados para um banco de dados PostgreSQL, assegurando a

integridade e consistência das informações monitoradas. A análise dos dados coletados permitiu identificar e corrigir pontos de melhoria tanto no software quanto no hardware, como a troca de componentes eletrônicos e ajustes na lógica de programação. Para otimizar o sistema, foram sugeridas melhorias na precisão dos componentes e na organização da bancada de testes.

Por fim, o projeto ofereceu um valioso aprendizado prático, validando o uso de sistemas operacionais de tempo real e técnicas de controle em eletrônica de potência e estabelecendo uma base sólida para futuras aplicações.

Agradecimentos

Agradeço imensamente a Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, que forneceram todo o suporte necessário para a realização desta pesquisa e também ao meu orientador Robson Bauwelz Gonzatti pelos conselhos e orientações durante o período da pesquisa.

Referências

- [1] KASSAKIAN, John G.; SCHLECHT, Martin F.; VERGHESE, George C. **Principles of power electronics**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1991. Acesso em: 04 de outubro de 2024.
- [2] WIKIPEDIA. **Wikipedia**, 2024. Disponível em: <<https://www.wikipedia.org>>. Acesso em: 04 de Outubro de 2024.
- [3] LATHI, B. P.. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. Acesso em: 04 de Outubro de 2024.
- [4] EMBARCADOS. **Embarcados**, 2024. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br>>. Acesso em: 04 de Outubro de 2024.
- [5] REAL TIME ENGINEERS LTD. **FreeRTOS Kernel Documentation**. 2021. Disponível em: <<https://www.freertos.org/>>. Acesso em: 04 de Outubro de 2024.
- [6] TEXAS INSTRUMENTS. **Texas Instruments**, 2024. Disponível em: <<https://www.ti.com>>. Acesso em: 04 de Outubro de 2024.
- [7] ESPRESSIF SYSTEMS. **Espressif Systems**, 2024. Disponível em: <<https://www.espressif.com>>. Acesso em: 04 de Outubro de 2024.