



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Plano de Trabalho de Iniciação Científica

*Fonte CC Controlada Baseada em Conversor Buck:
Modelagem, Identificação e Controle*

Aluno(a)	Kauã dos Santos Oliveira
Matrícula	202433940013
Curso	Engenharia Elétrica
Modalidade	[PIBIC / Voluntária de Iniciação Científica]
Orientador	Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira
Unidade	Faculdade de Engenharia Elétrica – Campus Universitário de Tucuruí
Projeto de pesquisa vinculado	Identificação, Estimação e Controle Baseados em Dados e Inteligência Computacional Aplicados a Conversores de Potência e Acionamentos Elétricos
Período de execução	12 meses
Carga horária	20 horas semanais

Resumo

Este plano de trabalho propõe o estudo, a modelagem, a simulação computacional e a implementação física de uma fonte CC controlada, composta por um retificador de onda completa a diodo, filtro capacitivo e conversor CC-CC Buck, com sensoramento de tensão de saída e de corrente no indutor e acionamento das chaves por circuito de gate drive. A partir

da planta implementada, será conduzida a identificação de sistemas da relação entre a razão cíclica (duty cycle) aplicada ao conversor Buck e a tensão de saída regulada, obtendo-se modelos lineares para uso em projeto de controladores. Serão então projetados, simulados e implementados três estratégias de controle em malha de tensão e de corrente: controlador Proporcional-Integral (PI) convencional, compensador PI Tipo 2 (amplamente utilizado em fontes chaveadas comerciais) e controlador preditivo baseado em modelo (MPC). O trabalho articula as etapas de estudo teórico, modelagem analítica, simulação em MATLAB/Simulink, implementação da bancada física, identificação experimental e implementação embarcada dos controladores, proporcionando ao(a) aluno(a) bolsista formação prática completa no ciclo de desenvolvimento de fontes chaveadas controladas, com aplicação direta às linhas de pesquisa do projeto de pesquisa ao qual este plano está vinculado.

Introdução e Justificativa

Fontes de alimentação CC reguladas são componentes essenciais em praticamente todos os sistemas eletroeletrônicos, sendo empregadas em carregadores, fontes de bancada, conversores para sistemas embarcados, acionamento de circuitos de controle e uma ampla gama de equipamentos industriais e de consumo. A topologia mais usual para obtenção de uma fonte CC regulada a partir da rede elétrica CA combina um estágio de retificação a diodo em ponte completa, um filtro capacitivo para redução da ondulação (ripple) de tensão, e um conversor CC-CC do tipo Buck, responsável pela regulação da tensão de saída em um valor constante e inferior ao barramento CC retificado.

O domínio do projeto e da operação dessa cadeia de conversão — da retificação até a regulação — constitui competência fundamental na formação do engenheiro eletricitista, pois reúne, em uma única aplicação, conceitos de eletrônica de potência (retificação, filtragem, comutação), instrumentação (sensoriamento de tensão e corrente), eletrônica de acionamento (gate drive) e sistemas de controle (malhas de tensão e de corrente). Adicionalmente, o conversor Buck é uma planta amplamente utilizada como referência acadêmica para o desenvolvimento e a validação de técnicas de identificação de sistemas e de controle, por apresentar dinâmica não linear bem caracterizada e por permitir implementação física de baixo custo e risco reduzido.

Do ponto de vista de controle, a tensão de saída do conversor Buck é função não linear da razão cíclica aplicada às chaves, e a planta apresenta comportamento dinâmico variável conforme a corrente de carga e o ponto de operação. A obtenção de um modelo dinâmico adequado entre a razão cíclica e a tensão de saída é etapa essencial para o projeto de controladores de alto desempenho, podendo ser realizada por via analítica, através do modelo de pequenos sinais no espaço de estados médio, ou por via experimental, através de técnicas de identificação de sistemas aplicadas a dados de entrada e saída coletados diretamente da planta física.

O controle da tensão de saída de fontes chaveadas é tradicionalmente realizado por controladores Proporcional-Integral (PI), cujo projeto pode ser conduzido por alocação de polos ou por critérios de resposta em frequência. Uma variante amplamente empregada na indústria de fontes chaveadas é o compensador PI Tipo 2, que introduz um polo na origem e um par polo-zero adicional para aumentar a margem de fase e melhorar a rejeição de perturbações de carga, sendo referência de projeto em circuitos integrados controladores comerciais de fontes chaveadas. Como alternativa de maior desempenho, o controle preditivo baseado em modelo (MPC) permite antecipar o comportamento futuro da planta e incorporar restrições operacionais — como limites de razão cíclica e de corrente no indutor — diretamente na lei de controle, sendo uma tecnologia de controle avançado com crescente adoção em conversores de potência.

A malha de corrente, obtida a partir do sensoriamento da corrente no indutor do conversor Buck, complementa a malha de tensão ao permitir limitação ativa de corrente, proteção contra sobrecarga e melhoria da resposta dinâmica frente a variações de carga, sendo estrutura de controle usual em fontes chaveadas de alto desempenho (controle em modo de corrente).

Este plano de trabalho insere-se diretamente no projeto de pesquisa "Identificação, Estimação e Controle Baseados em Dados e Inteligência Computacional Aplicados a Conversores de Potência e Acionamentos Elétricos", contribuindo especificamente para as etapas de fundamentação teórica, projeto analítico, simulação, implementação física, identificação de sistemas e controle avançado do conversor Buck previstas no projeto principal. A execução deste plano proporcionará ao(a) aluno(a) bolsista de iniciação científica experiência prática completa no desenvolvimento de uma fonte CC controlada, desde a concepção teórica até a implementação e validação experimental, consolidando conhecimentos de eletrônica de potência, instrumentação e controle aplicados.

Objetivos

Objetivo Geral

Estudar, modelar, simular e implementar uma fonte CC controlada composta por retificador a diodo, filtro capacitivo e conversor CC-CC Buck, realizando a identificação de sistemas da relação entre razão cíclica e tensão de saída e o projeto, a simulação e a implementação de controladores de tensão e de corrente do tipo PI, PI Tipo 2 e preditivo (MPC).

Objetivos Específicos

- Estudar os fundamentos teóricos da retificação de onda completa a diodo, do filtro capacitivo e do conversor CC-CC Buck, incluindo modos de condução contínua (MCC) e descontínua (MCD) e o princípio de modulação por largura de pulso (PWM);

- Realizar o projeto analítico do estágio de potência da fonte CC, contemplando o dimensionamento da ponte retificadora, do capacitor de filtro, do indutor e do capacitor de saída do conversor Buck, e a escolha do dispositivo de chaveamento (MOSFET);
- Estudar e especificar o circuito de gate drive para acionamento da chave do conversor Buck, considerando os requisitos de isolamento, velocidade de comutação e imunidade a ruído;
- Estudar e especificar os circuitos de sensoriamento de tensão de saída e de corrente no indutor, incluindo condicionamento de sinal para aquisição em microcontrolador ou DSP;
- Derivar o modelo de pequenos sinais do conversor Buck pela técnica de média no espaço de estados, obtendo a função de transferência entre razão cíclica e tensão de saída;
- Simular o sistema completo (retificador, filtro, Buck, sensores e malhas de controle) no ambiente MATLAB/Simulink, validando o comportamento estático e dinâmico em malha aberta e malha fechada;
- Implementar a bancada física da fonte CC controlada no laboratório de eletrônica de potência da FEE-CAMTUC, incluindo estágio de potência, sensores e circuito de gate drive;
- Aplicar técnicas de identificação de sistemas por mínimos quadrados (convencional e recursivo) sobre a planta física implementada, obtendo modelos lineares entre razão cíclica e tensão de saída;
- Projetar e implementar o controlador PI para a malha de tensão e para a malha de corrente, com ajuste por alocação de polos e validação experimental;
- Projetar e implementar o compensador PI Tipo 2 para a malha de tensão, avaliando o ganho de margem de fase e a rejeição a perturbações de carga em relação ao controlador PI convencional;
- Projetar e implementar o controlador preditivo baseado em modelo (MPC) para as malhas de tensão e de corrente, a partir dos modelos identificados, incorporando restrições de razão cíclica e de corrente no indutor;
- Comparar experimentalmente o desempenho das três estratégias de controle quanto a tempo de acomodação, sobressinal, erro em regime permanente e rejeição a perturbações de carga;
- Elaborar relatórios técnicos parciais e final, e produzir material para eventual submissão a evento científico ou periódico, sob orientação do coordenador do projeto.

Metodologia

O plano de trabalho será executado em oito etapas ao longo de 12 meses, em consonância com a metodologia do projeto de pesquisa ao qual este plano está vinculado.

Etapa 1 — Revisão bibliográfica e fundamentação teórica

Estudo dos fundamentos de retificação a diodo, filtro capacitivo, conversor CC-CC Buck, modulação PWM, circuitos de gate drive e técnicas de sensoriamento de tensão e corrente em conversores estáticos, com base na literatura clássica de eletrônica de potência.

Etapa 2 — Projeto analítico do estágio de potência

Dimensionamento da ponte retificadora e do capacitor de filtro a partir da corrente de carga e da ondulação de tensão admissível; dimensionamento do indutor e do capacitor de saída do conversor Buck para operação em modo de condução contínua; especificação do MOSFET de potência; especificação do circuito de gate drive; especificação dos circuitos de condicionamento dos sensores de tensão e de corrente. Derivação do modelo de pequenos sinais do conversor Buck no espaço de estados médio, obtendo a função de transferência entre razão cíclica e tensão de saída.

Etapa 3 — Simulação computacional em MATLAB/Simulink

Construção do modelo de simulação do sistema completo — retificador, filtro capacitivo, conversor Buck, sensores e circuito de gate drive — com uso da biblioteca Simscape Electrical. Validação do comportamento estático e dinâmico em malha aberta. Implementação inicial das malhas de controle de tensão e de corrente em ambiente simulado, com geração de dados de entrada (razão cíclica) e saída (tensão e corrente) para uso posterior na identificação de sistemas.

Etapa 4 — Implementação da bancada física

Montagem, no laboratório de eletrônica de potência da FEE-CAMTUC, do estágio de potência (retificador, filtro capacitivo e conversor Buck), do circuito de gate drive e dos circuitos de sensoriamento de tensão de saída e de corrente no indutor. Implementação da interface de aquisição de dados e de geração do sinal PWM em microcontrolador ou plataforma DSP, com comunicação para MATLAB ou Python. Caracterização estática e dinâmica da planta em malha aberta, com cargas resistivas.

Etapa 5 — Identificação de sistemas

Aplicação de sinais de excitação (PRBS ou degraus) na razão cíclica do conversor Buck implementado, com aquisição simultânea da tensão de saída, para identificação por mínimos quadrados convencionais (MQC), obtendo modelo ARX de baixa ordem. Aplicação do algoritmo de mínimos quadrados recursivos (MQR) com fator de esquecimento variável para acompanhamento de variações paramétricas decorrentes de mudanças de carga. Validação cruzada dos modelos identificados frente ao modelo analítico de pequenos sinais obtido na Etapa 2.

Etapa 6 — Projeto dos controladores de tensão e de corrente

A partir dos modelos identificados, projeto das seguintes estratégias de controle, em ordem crescente de complexidade:

- **Controlador PI:** projeto por alocação de polos para as malhas de tensão e de corrente, definindo estrutura de controle em cascata (malha interna de corrente e malha externa de tensão);
- **Compensador PI Tipo 2:** projeto por resposta em frequência (critério de margem de fase e de ganho na frequência de cruzamento), com posicionamento do zero e do polo adicional do compensador para otimização da rejeição a perturbações de carga;
- **Controlador preditivo (MPC):** formulação com horizonte de predição finito para as malhas de tensão e de corrente, incorporando restrições de razão cíclica (0 a 1) e de corrente máxima no indutor, a partir dos modelos ARX identificados.

Os três controladores serão inicialmente avaliados em simulação, antes da implementação física.

Etapa 7 — Implementação embarcada e testes experimentais

Implementação dos controladores PI, PI Tipo 2 e MPC em microcontrolador ou plataforma DSP, com execução em tempo real sobre a bancada física da fonte CC. Realização de testes de regulação em malha fechada frente a variações de referência de tensão e a perturbações de carga (degraus de carga resistiva), com registro de tempo de acomodação, sobressinal, erro em regime permanente e desvio de tensão frente a perturbações de carga.

Etapa 8 — Análise de resultados e redação

Análise comparativa do desempenho das três estratégias de controle implementadas, consolidação dos resultados obtidos nas etapas de simulação e de bancada física, e redação do relatório técnico final do plano de trabalho, com produção de material para eventual submissão a evento científico ou periódico.

Ferramentas computacionais

Serão utilizados o ambiente MATLAB/Simulink (Control System Toolbox, Model Predictive Control Toolbox, Simscape Electrical) para modelagem, simulação e projeto dos controladores, e a linguagem Python (pacotes numpy, scipy, matplotlib, python-control) como apoio à identificação de sistemas e à análise de dados experimentais.

Cronograma de Atividades (12 meses)

Etapa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

1 – Revisão bibliográfica	•	•											
2 – Projeto analítico do estágio de potência		•	•										
3 – Simulação em MATLAB/Simulink			•	•									
4 – Implementação da bancada física				•	•	•							
5 – Identificação de sistemas						•	•						
6 – Projeto dos controladores (PI, PI Tipo 2, MPC)							•	•					
7 – Implementação embarcada e testes									•	•	•		
8 – Análise de resultados e redação final											•	•	

Resultados Esperados

Espera-se, ao final da execução deste plano de trabalho, dispor de: (i) uma bancada física funcional de fonte CC controlada, integrando retificador a diodo, filtro capacitivo, conversor Buck, sensores de tensão e de corrente e circuito de gate drive; (ii) modelos dinâmicos identificados experimentalmente entre razão cíclica e tensão de saída; (iii) três controladores de tensão e de corrente implementados e validados experimentalmente (PI, PI Tipo 2 e MPC), com avaliação comparativa de desempenho; (iv) relatório técnico final e material para submissão a evento científico ou periódico da área; e (v) formação prática do(a) aluno(a) bolsista nas etapas de projeto, simulação, implementação e controle de conversores estáticos, contribuindo para os objetivos do projeto de pesquisa ao qual este plano está vinculado.

Referências

- AGUIRRE, Luis Antonio. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015. ISBN 978-85-423-0079-6.
- ÅSTRÖM, Karl J.; WITTENMARK, Björn. *Adaptive Control*. 2. ed. Mineola: Dover Publications, 2008.
- BALOGH, Laszlo. *Design and Application Guide for High Speed MOSFET Gate Drive Circuits*. Texas Instruments (Unitrode), Application Note SLUP169, 2001.
- BASSO, Christophe P. *Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies: A Tutorial Guide*. Norwood: Artech House, 2012. ISBN 978-1-60807-557-7.
- CAMACHO, Eduardo F.; BORDONS, Carlos. *Model Predictive Control*. 2. ed. London: Springer, 2007. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). ISBN 978-1-85233-694-3. DOI: 10.1007/978-0-85729-398-5.

- ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. *Fundamentals of Power Electronics*. 3. ed. Cham: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-43879-1. DOI: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- HAFIZ, Faizal; SWAIN, Akshya; MENDES, Eduardo M. A. M.; AGUIRRE, Luis A. Multi-objective evolutionary approach to grey-box identification of Buck converter. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, v. 67, n. 2, p. 584-597, 2020. DOI: 10.1109/TCSI.2019.2942503.
- LJUNG, Lennart. *System Identification: Theory for the User*. Upper Saddle River: PTR Prentice Hall, 1999.
- MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 978-0-471-22693-2.