



Departamento de Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico

Universidade Federal de Santa Catarina

Caixa Postal 5119, CEP: 88.040-970 - Florianópolis - SC

Tel.: (48) 3721.7436 - E.mail: denizar@inep.ufsc.br ou denizar.martins@gmail.com

PLANO DE ENSINO E EMENTA – ELETRÔNICA DE POTÊNCIA II

1. **DISCIPLINA** EEL7200 Eletrônica de Potência II (60h = 30h teoria, 30h – atividades experimentais de laboratório). Disciplina optativa.
2. **Oferecida para o curso:** Engenharia Elétrica.
3. **PROFESSORES:** Denizar Cruz Martins e Telles Brunelli Lazzarin.
4. **OBJETIVOS:**

Os principais objetivos da disciplina são:

- a) Introduzir os conceitos fundamentais dos conversores CC-CC e CC-CA;
- b) Apresentar as principais chaves eletrônicas controladas: Transistor Bipolar, MOSFET, IGBT e o GTO;
- c) Apresentar o princípio de funcionamento das principais topologias dos conversores CC-CC e CC-CA, e uma metodologia de cálculo para projeto das mesmas.

No final do curso o estudante deverá ser capaz de realizar o projeto completo de um conversor estático, incluindo seus circuitos de comando e controle.

5. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

Capítulo 1: Conversores CC-CC

- 1.1 Conversores CC-CC abaixador de tensão (Buck)
 - 1.1.1 Princípio de operação
 - 1.1.2 Funcionamento com carga RLE
 - 1.1.3 Condução contínua e descontínua
 - 1.1.4 Característica de carga
 - 1.1.5 Ondulação da corrente
 - 1.1.6 Filtragem (corrente de entrada e tensão de saída)
 - 1.1.7 Controle do conversor Buck empregando modulação PWM
 - 1.1.8 Conversor Buck isolado (Conversor Forward)
- 1.2 Conversor CC-CC elevador (Boost)
 - 1.2.1 Princípio de operação
 - 1.2.2 Condução Contínua e descontínua
 - 1.2.3 Característica de carga
 - 1.2.4 Ondulação da corrente
 - 1.2.5 Filtros de entrada e de saída
 - 1.2.6 Controle do conversor Boost empregando modulação PWM

- 1.3 Conversor CC-CC à acumulação de energia
 - 1.3.1 Conversor CC-CC à acumulação indutiva (Buck-Boost)
 - a) Princípio de funcionamento
 - b) Operação em condução contínua e descontínua
 - c) Característica de carga
 - d) Conversor Buck-Boost isolado (Conversor Flyback)
 - e) Controle do conversor Buck-Boost empregando modulação PWM
 - 1.3.2 Conversor CC-CC à acumulação capacitiva (Conversor Cuk)
 - a) Princípio de fundamento
 - b) Ondulação de corrente e tensão
 - c) Característica de carga
- 1.4 Reversibilidade dos Conversores CC-CC diretos
 - 1.4.1 Classificação dos conversores CC-CC quanto ao quadrante de operação
 - 1.4.2 Conversor CC-CC reversível em corrente
 - 1.4.3 Conversor CC-CC reversível em tensão
 - 1.4.4 Conversor CC-CC reversível em tensão e corrente
- 1.5 Noções Sobre os Conversores CC-CC Isolados
 - 1.5.1 Conversor Forward
 - 1.5.2 Conversor Flyback
 - 1.5.3 Conversores em Ponte
 - a) Conversor Push-Pull
 - b) Conversor Meia-Ponte
 - c) Conversor Ponte-Completa

Capítulo 2: Semicondutores de Potência

- 2.1 Transistor bipolar de Potência
 - 2.1.1 Estrutura
 - 2.1.2 Características do transistor bipolar para aplicações em Conversores Estáticos
 - 2.1.3 Comutação com carga resistiva
 - 2.1.4 Comutação com carga indutiva
 - 2.1.5 Perdas no transistor bipolar de potência
 - 2.1.6 Circuitos snubber
 - 2.1.7 Circuitos de comando
- 2.2 Transistor MOSFET de Potência
 - 2.2.1 Estrutura
 - 2.2.2 Características estáticas e dinâmicas
 - 2.2.3 Comutação com carga resistiva
 - 2.2.4 Comutação com carga indutiva
 - 2.2.5 Área de operação
 - 2.2.6 Perdas no MOSFET
 - 2.2.7 Circuitos de comando
- 2.3 Transistor IGBT de Potência
 - 2.3.1 Estrutura

- 2.3.2 Características estáticas e dinâmicas
- 2.3.3 Comutação com carga resistiva
- 2.3.4 Comutação com carga indutiva
- 2.3.5 Área de operação
- 2.3.6 Perdas no IGBT
- 2.3.7 Circuitos de comando

2.4 GTO de Potência

- 2.4.1 Estrutura
- 2.4.2 Características Operacionais do GTO (disparo e bloqueio)
- 2.4.3 Proteção do GTO (circuitos snubbers)
- 2.4.4 Perdas no GTO
- 2.4.5 Circuitos de comando

Capítulo 3: Conversores CC-CA (Inversores Autônomos)

3.1 Conversor CC-CA de tensão

- 3.1.1 Conversor CC-CA monofásico em ponte
- 3.1.2 Conversor CC-CA monofásico com ponto médio
- 3.1.3 Conversor CC-CA monofásico em push-pull
- 3.1.4 Conversor CC-CA trifásico
- 3.1.5 Reversibilidade dos conversores CC-CA de tensão

3.2 Conversor CC-CA de corrente

- 3.2.1 Conversor CC-CA de corrente monofásico
- 3.2.2 Conversor CC-CA de corrente trifásico

3.3 Controle de tensão nos Conversores CC-CA

- 3.3.1 Métodos empregados
- 3.3.2 Modulação por defasagem
- 3.3.3 Modulação por largura de pulso (PWM)

3.4 Filtro de Saída dos Conversores CC-CA

- 3.4.1 Resposta em Frequência
- 3.4.2 Efeitos de L e C no Filtro LC Simples
- 3.4.3 Projeto do Filtro

Atividades Experimentais de Laboratório

1. Treinamento Sobre a Utilização de Pacotes de Simulação Numérica
 - 1.1 Orcad 9.2
 - 1.2 MathCad
 - 1.3 Programa Tango – Placa de circuito impresso
 - 1.4 Projeto e montagem de um protótipo de conversor estático
 - 1.4.1 Desenho e confecção da placa de circuito impresso
 - 1.4.2 Montagem dos circuitos de potência e comando do conversor estático
 - 1.4.3 Ensaio com o protótipo (aquisição de formas de onda)
 - 1.4.4 Elaboração de um relatório técnico
 - 1.5 Apresentação pública do projeto e do protótipo

6. AVALIAÇÃO E RECUPERAÇÃO

A avaliação do curso consiste na elaboração de 2 (duas) provas, realização de projetos completos de conversores estáticos, e um relatório completo das

atividades experimentais de laboratório, realizadas durante o curso. As respectivas avaliações são obtidas a partir da média aritmética das 2 provas (M_{Provas}), mais os projetos com o relatório das atividades experimentais e uma apresentação oral em público (M_{Lab}). A média final (MF) é calculada através da expressão: $M_{Final} = \sqrt{M_{Provas} \times M_{Lab}}$

7. BIBLIOGRAFIA

7.1. Bibliografia Básica

- ✓ D. C. Martins & I. Barbi, “Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados”. Edição dos Autores, 4ª Edição Florianópolis, 2011.
- ✓ D. C. Martins, “Eletrônica de Potência: Transistores de Potência”. Edição do Autor, Florianópolis, 2018.
- ✓ D. C. Martins, “Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Isolados”. Edição do Autor, Florianópolis, 2018.
- ✓ D. C. Martins & I. Barbi, “Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA”. Edição dos Autores, 3ª Edição, Florianópolis-SC, UFSC, 2011.
- ✓ I. Barbi, “Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas”. Edição do Autor, 2ª Edição, Florianópolis-SC, UFSC, 2007.
- ✓ I. Barbi & F. P. de Souza, “Conversores CC-CC Isolados de Alta Frequência com Comutação Suave”. Edição dos Autores, Florianópolis, 1999.
- ✓ A.J. Perin, “Teoria e Aplicação de Modulação por Largura de Pulsos (PWM) com Otimização de Harmônicas para Conversores Estáticos de Frequência”. 6ª CBA – Minicursos, pp. 01-15, Belo Horizonte-MG, Novembro/1986.
- ✓ R.P.T. Bascopé & A.J. Perin, “O transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência”. Sagra Luzzato Editores, Porto Alegre, 1997.
- ✓ I. Barbi, “Eletrônica de Potência”. Edição do Autor, 7ª Edição Florianópolis, 2016.

7.2. Bibliografia Complementar

- ✓ N. Mohan, T. Undeland & W. Robbins, “Power Electronics: Converters, Applications and Design”. John Wiley & Sons, New York-USA, 2ª Edição, 1995.
- ✓ B. W. Williams, “Power Electronics – Devices, Drives, Applications and Passive Components McGraw-Hill, Inc., New York-USA, 2ª Edição, 1992.
- ✓ A. I. Pressman, “Switching Power Supply Design”. McGraw-Hill, Inc., New York-USA, 1991.
- ✓ R.G. Hoft, “Semiconductor Power Electronics”. Van Nostrand Reinhold Company. Inc., New York-USA, 1986.
- ✓ C. W. Lander, “Eletrônica Industrial Teoria e Aplicações”. McGraw-Hill, Rio de Janeiro, 1988.
- ✓ M. H. Rashid, “Power Electronics – Circuits, Devices, and Applications”. Prentice-Hall International Editions, Inc., New Jersey, 1988.
- ✓ R. W. Erickson, “Fundamentals of Power Electronics”. Editora Chapman & Hall, New York, USA, 1997.

- ✓ J. G. Kassakian, M. F. Schlecht & G. C. Verghese, "Principles of Power Electronics". Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, USA.
- ✓ S. B. Dewan, G. R. Slemon & A. Straughen, "Power Semiconductor Drives". A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1984.
- ✓ J. Vithayathil, "Power Electronics – Principles and Applications". McGraw-Hill, Inc., 1995.
- ✓ R. S. Ramshaw, "Power Electronics Semiconductors Switches". Chapman & Hall, 2nd Edition, 1993.
- ✓ B. D. Bedford & R. G. Hoft, "Principles of Inverter Circuits". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1964.

8. EMENTA DA DISCIPLINA

Introdução ao estudo dos semicondutores de potência com chaveamento controlado: Transistor Bipolar de Potência, MOSFET de Potência, IGBT e GTO. Estudo dos Conversores CC-CC: Conversor CC-CC abaixador de tensão (Buck); Conversor CC-CC elevador de tensão (Boost); Conversor CC-CC à acumulação de energia, Conversor Buck-Boost e Conversor Cúk; Reversibilidade dos Conversores CC-CC. Conversores CC-CC Isolados (Forward, Flyback, Push-Pull, Meia-Ponte e Ponte Completa). Conversores CC-CA (Inversores Autônomos): Conversores CC-CA de tensão; Conversores CC-CA de corrente; Controle de tensão dos Conversores CC-CA.

Plano de Ensino

Professor: Telles Brunelli Lazzarin (laboratório)

1. **Disciplina:** EEL7200 – Eletrônica de potência II - Laboratório
2. **Nº de semanas:** 18
3. **Total de horas:** 36 (laboratório)
4. **Turmas:** 02 turmas de laboratório
5. **Professor:** Telles Brunelli Lazzarin (teoria e laboratório)
6. **Objetivos**

Proporcionar o aprendizado de:

- 6.1- Análise, projeto e testes de um conversor estático.
- 6.2- Desenvolvimento de habilidades práticas na área de eletrônica de potência.

7. Métodos

- 7.1- Desenvolver, construir e testar um conversor.
- 7.2- Colocar o problema na forma de um desafio.

8. Sistema de avaliação:

A avaliação das atividades nas aulas de laboratório representa 50% do conceito final da disciplina.

Esta avaliação é ponderada da seguinte forma:

Média das tarefas: **MT**

Relatório final e apresentação: **RF**

Conversor não funcionou:

$$MF = \left(\frac{MT + MR}{2} \right) \cdot 0,6$$

Conversor funcionou:

$$MF = \left(\frac{MT + MR}{2} \right) \cdot k$$

Sendo $0,6 < k < 1,1$

Conversor com menor volume: $k=1,1$

Segundo conversor com menor volume: $k=1,0$

Terceiro conversor com menor volume: $k=0,95$

Quarto conversor com menor volume: $k=0,90$

Quinto conversor com menor volume: $k=0,85$

Demais conversores: $k=0,80$

Volume: consiste numa caixa imaginária (base x altura x profundidade) que envolve o conversor.

A medição de volume será feita pelo professor no dia da apresentação em laboratório do conversor funcionando.

9. Conteúdo Programático e Cronograma:

Aula	Assunto	Entrega
1	Apresentação	-
2	Apresentação da Disciplina; Simulação Numérica – PSIM Planilha de Cálculo – MathCAD Apresentação da Tarefa 1	
3	Divisão dos Grupos, Definição e Apresentação dos Projetos; Apresentação da Topologia do Conversor Apresentação da Tarefa 2	Tarefa 1
4	Metodologia de Cálculo de Transformadores e Indutores;	
5	Dimensionamento e Confeção dos Elementos Magnéticos; Apresentação da Tarefa 3	Tarefa 2
6	Dimensionamento e Simulação do Estágio de Potência do Conversor	
7	Cálculo de Perdas do Conversor e Dimensionamento do Dissipador Apresentação da Tarefa 4	Tarefa 3
8	Circuitos de Comando de Conversores Estáticos (Modulador PWM e driver) Dimensionamento e Simulação dos Circuitos de Comando Montagem do Circuito de comando do conversor Apresentação da Tarefa 5	
9	Fundamentos para Projeto de Placas de Circuito Impresso Confeção dos Layouts	Tarefa 4
10	Confeção dos Layouts. Apresentação da Tarefa 6	Tarefa 5
11	Início da Montagem do Estágio de Potência	Tarefa 6
12	Montagem do Estágio de Potência	
13	Estudos Experimentais	
14	Estudos Experimentais	
15	Estudos Experimentais e redação relatório	
16	Relatório Final e Apresentação	Relatório final
17	REC	

Tarefa	Atividades
1	Exercícios de Simulação Numérica (PSIM) e MathCad
2	Estudo da Topologia - Etapas de Operação e Equacionamento do Conversor - Cálculo de Esforços nos Componentes do Estágio de Potência - Resultados de Simulação do Conversor com a Especificação definida
3	Projeto, Construção e Medição dos Parâmetros dos Elementos Magnéticos do Conversor - Planilha de Projeto do Elementos Magnéticos
4	Dimensionamento e Simulação do Estágio de Potência: Semicondutores, Capacitores e Grampeadores - Simulação do Estágio de Potência com os Componentes Escolhidos - Lista de Materiais - Cálculo de Perdas no Estágio de Potência - Escolha do Dissipador
5	Dimensionamento e Simulação dos Circuitos de Comando - Escolha dos Componentes do Circuito de Comando - Testes e ensaios
6	Esquemático e Layout Completo do Conversor