



Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica - 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](mailto:denizar@inep.ufsc.br) ou [denizar.martins@gmail.com](mailto:denizar.martins@gmail.com)

## PLANO DE ENSINO E EMENTA – PROJETO DE FONTES CHAVEADAS

1. **DISCIPLINA:** EEL7203 Projeto de Fontes Chaveadas (60 horas/aula).  
Disciplina Optativa
2. **Oferecida para o curso:** Engenharia Elétrica e Eletrônica
3. **PROFESSOR:** Denizar Cruz Martins.
4. **OBJETIVOS:**  
Os principais objetivos da disciplina são:
  - a) Introduzir os conceitos fundamentais sobre fontes chaveadas;
  - b) Apresentar as principais chaves eletrônicas controladas;
  - c) Apresentar o princípio de funcionamento das principais topologias dos conversores CC-CC isolados, e uma metodologia de cálculo para projeto das mesmas.

No final do curso o estudante deverá ser capaz de realizar o projeto completo de uma fonte chaveada, incluindo seus circuitos de comando e controle.

### 5. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

#### Capítulo 1: Retificador e Filtro de Entrada

- 1.1 Retificadores Monofásicos Com Filtro Capacitivo
- 1.2 Operação Como Retificador Monofásico de Onda Completa
  - 1.2.1 Método simplificado de análise
  - 1.2.2 Exemplo numérico
  - 1.2.3 Análise detalhada da corrente de entrada
  - 1.2.4 Verificação por simulação
- 1.3 Análise Detalhada do Retificador Monofásico Com Filtro Capacitivo
  - 1.3.1 Cálculo dos parâmetros do circuito
  - 1.3.2 Cálculo do valor eficaz da corrente no capacitor de filtragem
  - 1.3.3 Exemplo numérico
- 1.4 Operação do Retificador Monofásico Como Dobrador de Tensão
  - 1.4.1 Descrição do funcionamento
  - 1.4.2 Exemplo de cálculo (Dobrador de Tensão)
- 1.5 Resultados Experimentais Para o Retificador Monofásico de Onda Completa

- 1.6 Retificador Trifásico com Filtro Capacitivo
  - 1.6.1 O circuito e seu funcionamento
  - 1.6.2 Análise simplificada do circuito
  - 1.6.3 Exemplo numérico
- 1.7 Limitação da Corrente de Pré-carga do Capacitor de Filtragem
- 1.8 Circuito de Disparo do Triac

## **Capítulo 2: Fontes Chaveadas do Tipo Flyback**

- 2.1 Conversor CC-CC do Tipo Buck-Boost (Flyback Não Isolado)
  - 2.1.1 Estrutura e etapas de funcionamento para condução descontínua
  - 2.1.2 Formas de onda considerando os interruptores ideais
  - 2.1.3 Análise das grandezas envolvidas
- 2.2 Conversor CC-CC do Tipo Flyback (Buck-Boost Isolado)
  - 2.2.1 Estrutura
  - 2.2.2 Descrição de funcionamento
- 2.3 Características Gerais das Fontes do Tipo Flyback
- 2.4 Filtro de Saída
  - 2.4.1 Escolha do capacitor de saída
  - 2.4.2 Exemplo de cálculo
  - 2.4.3 Corrente eficaz no capacitor
  - 2.4.4 Cálculo do diodo
- 2.5 Estudo do Transformador
  - 2.5.1 Cálculo do núcleo
  - 2.5.2 Cálculo do entreferro
  - 2.5.3 Escolha da bitola dos condutores
  - 2.5.4 Exemplo numérico

## **Capítulo 3: Fontes Chaveadas do Tipo Forward**

- 3.1 Conversor Buck
  - 3.1.1 Estrutura e etapas de funcionamento para condução contínua
  - 3.1.2 Formas de onda considerando os componentes ideais
  - 3.1.3 Análise das grandezas envolvidas
  - 3.1.4 Exemplo de cálculo
- 3.2 Conversor Forward (Buck Isolado)
  - 3.2.1 Estrutura e etapas de funcionamento para condução contínua
  - 3.2.2 Formas de onda considerando componentes ideais
  - 3.2.3 Análise das grandezas envolvidas
  - 3.2.4 Cálculo do indutor de filtragem
  - 3.2.5 Exemplo de cálculo do indutor
  - 3.2.6 Cálculo do transformador
  - 3.2.7 Exemplo de cálculo do transformador

## **Capítulo 4: Conversores Bridge, Half-Bridge e Push-Pull**

- 4.1 Conversor em Meia-Ponte (Half-Bridge)

- 4.1.1 Estrutura e etapas de funcionamento
  - 4.1.2 Relações Básicas
  - 4.1.3 O capacitor série
  - 4.1.4 Exemplo de cálculo
  - 4.1.5 Diodos de recuperação
- 4.2 Conversor em Ponte-Completa (Full-Bridge)
  - 4.3 Conversor Push-Pull
  - 4.4 Cálculo do Transformador

## **Capítulo 5: Transistores de Potência (Bipolar, MOSFET, IGBT)**

- 5.1 Introdução
- 5.2 Características dos Transistores Para Aplicações em Conversores Estáticos
- 5.3 Transistor Bipolar Bloqueado
  - 5.3.1 Tensão de avalanche coletor-emissor
  - 5.3.2 Corrente de fuga de coletor
- 5.4 Transistor Bipolar em condução
- 5.5 Comutação Com Carga Resistiva
- 5.6 Comutação Com Carga Indutiva (Condução Contínua)
  - 5.6.1 Comutação bloqueado-conduzindo
  - 5.6.2 Comutação condução-bloqueio
- 5.7 Interpretação do comportamento do Transistor Bipolar durante a comutação
- 5.8 Perdas na Comutação
  - 5.8.1 Conversor Flyback
  - 5.8.2 Exemplo de cálculo
  - 5.8.3 Conversor Forward
- 5.9 Perdas de Condução
- 5.10 Cálculo do Snubber Para Conversores Forward e Half-Bridge
- 5.11 Perdas em um Diodo
- 5.12 Cálculo Térmico
- 5.13 O MOSFET e o IGBT
  - 5.13.1 Características estáticas
  - 5.13.2 Características dinâmicas
  - 5.13.3 Comutação com carga resistiva
  - 5.13.4 Comutação com carga indutiva
  - 5.13.5 Perdas na comutação e em condução
  - 5.13.6 Cálculo térmico

## **Capítulo 6: Comando de Base do Transistor Bipolar e de Gate do MOSFET e do IGBT**

- 6.1 Introdução

- 6.2 Comando de Base Não-Isolado
  - 6.2.1 Corrente de base constante
  - 6.2.2 Corrente de base proporcional à corrente de coletor
- 6.3 Comandos de base isolados
  - 6.3.1 Corrente de base constante
  - 6.3.2 Corrente de base proporcional à corrente de coletor
  - 6.3.3 Exemplo de emprego de comando de base proporcional isolado
- 6.4 Comando de Gate do MOSFET e do IGBT
- 6.5 Circuitos de Comandos Não-Isolados
- 6.6 Circuitos de Comando de Gate Isolados

### **Capítulo 7: Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas**

- 7.1 A Questão do Isolamento
- 7.2 A Fonte Auxiliar
- 7.3 Circuitos Integrados PWM Dedicados
- 7.4 Soft-Start (Partida Progressiva)
- 7.5 Circuitos Para Limitação da Corrente
- 7.6 O Isolador Ótico
- 7.7 Regulador de Saída
- 7.8 Proteção Contra Sobretensão na Carga

### **Capítulo 8: Reposta Transitória e Estabilidade**

- 8.1 Introdução
- 8.2 Equação Característica e Função de Transferência
- 8.3 Exemplo de Obtenção de Função de Transferência
- 8.4 Diagrama de Bode
- 8.5 Critério de Estabilidade
- 8.6 Representação das Fontes Chaveadas
  - 8.6.1 Fonte tipo Forward
  - 8.6.2 Fonte tipo Flyback (condução descontínua)
- 8.7 Circuitos de Compensação Com os Amplificadores Operacionais
  - 8.7.1 Topologia de 1 pólo
  - 8.7.2 Topologia de 2 pólos
- 8.8 Método Prático Para o Cálculo do Controlador de Um Conversor Forward
- 8.9 Exemplo de Projeto

### **Capítulo 9: Supressão de Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas**

- 9.1 Introdução
- 9.2 Especificações dos níveis de interferência

- 9.3 Causas da Interferência
- 9.4 Propagação das Tensões Parasitas
- 9.5 Exemplo Numérico
- 9.6 Métodos Para Redução da Rádio-Interferência
  - 9.6.1 Redução da capacitância de acoplamento entre o encapsulamento e o dissipador
  - 9.6.2 Isolamento do dissipador em relação à massa
  - 9.6.3 Placa condutora entre o interruptor e o dissipador
  - 9.6.4 Emprego de filtros de rede
- 9.7 Influência da Capacitância Entre Enrolamentos
- 9.8 Outras Fontes de Ruído
- 9.9 Exemplo de Cálculo de Filtro de Rede

## **Capítulo 10: Exemplo de Projeto do Estágio de Potência de Uma Fonte Chaveada Baseado no Conversor Flyback**

- 10.1 Introdução
- 10.2 Especificações de Projeto
- 10.3 Arquitetura do Sistema
- 10.4 Projeto da Fonte
  - 10.4.1 Tensões nos secundários
  - 10.4.2 Potência de entrada e saída da fonte
  - 10.4.3 Projeto do transformador
  - 10.4.4 Cálculo dos capacitores
  - 10.4.5 Dimensionamento dos diodos
  - 10.4.6 Seção dos condutores
  - 10.4.7 Dimensionamento do interruptor
  - 10.4.8 Dimensionamento dos dissipadores de calor dos reguladores lineares
- 10.5 Especificações dos Componentes

## **6. AVALIAÇÃO E RECUPERAÇÃO**

A avaliação do curso consiste na elaboração de 2 (duas) provas, e na realização de 5 (cinco) projetos completos de fontes chaveadas. Os cinco projetos dão origem a uma nota parcial. A nota final é obtida a partir da média aritmética das 2 provas, mais a nota parcial dos projetos.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

### **7.1. Bibliografia Básica**

- [1] G. Chryssis, “High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and Design”. McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
- [2] I. Barbi, “Projetos de Fontes Chaveadas”. Edição do Autor, 3ª Edição, Florianópolis, SC, 2014.

- [3] D. C. Martins & I. Barbi, “Eletrônica de Potência – Conversores CC-CC Básicos Não Isolados”. Edição dos Autores, 4ª Edição, Florianópolis, SC, 2011.
- [4] D. C. Martins, “Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Isolados”. Edição do Autor, Florianópolis, SC, Agosto/2018.
- [5] I. Barbi, “Eletrônica de Potência”. Edição do Autor, 8ª Edição Florianópolis, SC, 2017.
- [6] D. C. Martins, “Eletrônica de Potência: Transistores de Potência”. Edição do Autor, Florianópolis, SC, 2018.
- [7] I. Barbi & F. P. de Souza, “Conversores CC-CC Isolados de Alta Freqüência com Comutação Suave”. Edição dos Autores, Florianópolis, 1999.
- [8] A. I. Pressman, “Switching Power Supply Design”. McGraw-Hill, Inc., New York-USA, 1991.
- [9] R. P. T. Bascopé & A. J. Perin, “O transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência”. Sagra Luzzato Editores, Porto Alegre, 1997.

## **7.2. Bibliografia Complementar**

- [1] D. C. Martins & I. Barbi, “Eletrônica de Potência – Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA”. Edição dos Autores, 3ª Edição, Florianópolis, SC, 2011.
- [2] N. Mohan, T. Underland & W. Robbins, “Power Electronics: Converters, Applications and Design”. John Wiley & Sons, New York-USA, 2ª Edição, 1995.
- [3] UNITRODE. “Power Supply Design Seminar”. Unitrode Corporation, Lexington, USA, 1986.
- [4] Boletim Técnico Informativo da ICOTRON, Junho/Julho, 2000.
- [5] Linha de Produtos Thornton – Ferrites: <http://www.thornton.com.br>.

## **8. EMENTA**

Estágio de entrada: retificador monofásico, retificador trifásico, filtro capacitivo de entrada. Topologias dos conversores para fontes chaveadas isoladas: flyback, forward, meia-ponte, ponte completa, push-pull. Comando, comutação e proteção de semicondutores de potência, com ênfase ao MOSFET e IGBT. Circuitos de comando, controle e proteção de fontes chaveadas, incluindo fontes auxiliares. Resposta transitória e estabilidade. Projeto de transformadores e indutores de alta freqüência. Análise e filtragem de radiointerferência causada por fontes chaveadas. Caracterização e especificação de capacitores para alta freqüência.