



Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica - Centro Tecnológico  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Caixa Postal 5119, CEP: 88.040-970 - Florianópolis - SC  
Tel.: (048) 3721.7436 - Fax: (048) 3234.5422 - E.mail: [denizar.martins@gmail.com](mailto:denizar.martins@gmail.com)

## PLANO DE ENSINO/SEMESTRE 2016/01

1. **DISCIPLINA** EEL7203 Projeto de Fontes Chaveadas (60 horas/aula).  
Disciplina Optativa
2. **Oferecida para o curso:** Engenharia Elétrica
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 Buck-Boost (Flyback 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: O Transistor de Potência e o Mosfet**

- 5.1 Introdução
  
- 5.2 Características do Transistor Para Aplicações em Conversores Estáticos
  
- 5.3 Transistor Bloqueado
  - 5.3.1 Tensão de avalanche coletor-emissor
  - 5.3.2 Corrente de fuga de coletor
  
- 5.4 Transistor 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 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
  - 5.13.1 Características estáticas do Mosfet
  - 5.13.2 Características dinâmicas do Mosfet
  - 5.13.3 Comutação com carga resistiva
  - 5.13.4 Comutação com carga indutiva
  - 5.13.5 Perdas no mosfet

## **Capítulo 6: Comando de Base do Transistor Bipolar e Gatilho do Mosfet**

- 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 Gatilho do Mosfet
- 6.5 Circuitos de Comandos Não-Isolados
- 6.6 Circuitos de Comando de Gatilho 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

- ✓ I. Barbi, “Projetos de Fontes Chaveadas”. Edição do Autor, 3ª Edição, Florianópolis, SC, 2014.
- ✓ D. C. Martins & I. Barbi, “Eletrônica de Potência – Conversores CC-CC Básicos Não Isolados”. Edição dos Autores, 4ª Edição, Florianópolis, SC, 2011.
- ✓ I. Barbi, “Eletrônica de Potência”. Edição do Autor, 7ª Edição Florianópolis, SC, 2012.

- ✓ G. Chryssis, "High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and Design". McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
- ✓ I. Barbi & F. P. de Souza, "Conversores CC-CC Isolados de Alta Freqüência com Comutação Suave". Edição dos Autores, Florianópolis, 1999.
- ✓ A. I. Pressman, "Switching Power Supply Design". McGraw-Hill, Inc., New York-USA, 1991.
- ✓ D. C. Martins, "Eletrônica de Potência – Semicondutores de Potência Controlados, Conversores CC-CC Isolados e Conversores CC-CC a Tiristor (Comutação Forçada)". Publicação Interna – UFSC-INEP, Florianópolis, SC, Maio/2006.
- ✓ R. P. T. Bascope & A. J. Perin, "O transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência". Sagra Luzzato Editores, Porto Alegre, 1997.

## **7.2. Bibliografia Complementar**

- ✓ N. Mohan, T. Underland & W. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications and Design". John Wiley & Sons, New York-USA, 2ª Edição, 1995.
- ✓ D. C. Martins & I. Barbi, "Eletrônica de Potência – Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA". Edição dos Autores, 3ª Edição, Florianópolis, SC, 2011.
- ✓ UNITRODE. "Power Supply Design Seminar". Unitrode Corporation, Lexington, USA, 1986.
- ✓ Boletim Técnico Informativo da ICOTRON, Junho/Julho, 2000.
- ✓ 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. 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.