



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação**  
*Departamento de Sistemas e Energia*

# **Fontes Chaveadas**

**José Antenor Pomilio**

**Publicação FEEC 13/95**

**Revisada em Setembro de 2020**

# Apresentação

Este texto foi elaborado em função da disciplina "Fontes Chaveadas", ministrada nos cursos de pós-graduação em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Este é um material que deve sofrer constantes atualizações, em função da evolução tecnológica na área da Eletrônica de Potência. Além disso, o próprio texto pode conter erros, para o que pedimos a colaboração dos estudantes e profissionais que eventualmente fizerem uso do mesmo, no sentido de enviarem ao autor uma comunicação sobre as falhas detectadas. Os resultados experimentais incluídos no texto referem-se a trabalhos executados pelo autor, juntamente com estudantes e outros pesquisadores, gerando publicações em congressos e revistas, conforme indicado nas respectivas referências bibliográficas.

Campinas, 3 de setembro de 2020

José Antenor Pomilio

**José Antenor Pomilio** é engenheiro eletricista, mestre e doutor em Eng. Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua e à Terceira Universidade de Roma, ambas na Itália. Foi presidente e membro da diretoria em diversas gestões da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência – SOBRAEP, foi membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society durante quatro anos e membro eleito do Conselho Superior da Sociedade Brasileira de Automática. Foi editor associado da Transactions on Power Electronics (IEEE) de 2003 a 2018, tendo sido editor da revista Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e editor associado de Controle e Automação (SBA) e do International Journal of Power Electronics. É professor da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp desde 1984, onde foi coordenador do curso de Engenharia Elétrica e diretor da Faculdade. Orientou 27 dissertações de mestrado e 26 teses de doutorado, publicou dezenas artigos em periódicos nacionais e internacionais e centenas de artigos em congressos internacionais e nacionais. Participou como executor ou colaborador em diversos projetos conjuntos com empresas e coordenou mais de 20 projetos com financiamento público (FAPESP, CNPq, CAPES, FINEP). É assessor ad-hoc de diversos órgãos de financiamento públicos e revisor em mais de uma dezena de publicações científicas internacionais.

# Conteúdo

## **1. Topologias básicas de conversores não isolados**

Princípios de operação de conversores comutados. Conversores buck, boost, buck-boost, Cuk, SEPIC e zeta.

## **2. Topologias básicas de conversores com isolação**

Caracterização de elementos magnéticos. Conversor Fly-back, Conversor forward, conversores Cuk, SEPIC e zeta; Conversores push-pull e ponte.

## **3. Técnicas de modulação para fontes chaveadas**

Modulação por largura de pulso, modulação em frequência, modulação por histerese, controles “one-cycle”, “charge control” e delta.

## **4. Conversores ressonantes**

Princípios de comutação suave. Conversores série e paralelo ressonantes. Regiões de comutação suave.

## **5. Conversores com outras técnicas de comutação suave**

Conversores quase-ressonantes. Conversores com circuitos auxiliares à comutação.

## **6. Componentes passivos**

Características não ideais de capacitores e de elementos magnéticos, especialmente em termos de comportamento com a frequência.

## **7. Modelagem de fontes chaveadas: método de inspeção**

Análise de estabilidade através de diagramas de Bode. Obtenção de função de transferência de circuitos comutados. Análise das características dinâmicas dos conversores básicos.

## **8. Modelagem de fontes chaveadas: método de variáveis de estado**

Método analítico para obtenção de função de transferência de conversores estáticos utilizando modelagem no espaço de estado.

## **9. Modelagem da chave PWM**

Modelagem de conversores utilizando o método da chave PWM, adequado para uso em simuladores de circuitos elétricos.

## **10. Projeto de sistema de controle linear para fontes chaveadas**

Uso do método do fator  $k$  para projeto de controladores lineares para conversores comutados.

## **11. Circuitos integrados dedicados**

Uma visão de circuitos integrados dedicados ao controle de fontes chaveadas, explorando diferentes tipos de aplicações.

## **12. Caracterização de fontes chaveadas**

Uma visão geral de testes e características que devem apresentar estes circuitos, especialmente em relação a normas de IEM.

## **13. Componentes semicondutores rápidos de potência**

Diodos de junção e Schottky, MOSFET e IGBT.

## Prefácio

A tecnologia de fontes chaveadas não é recente. Fontes de alta tensão baseadas no conversor *fly-back*, por exemplo, estão presentes em aparelhos de TV há muitas décadas. As grandes alterações tecnológicas ocorridas nos últimos 20 ou 30 anos, no entanto, estão relacionadas com o surgimento de componentes semicondutores de potência capazes de comutar em alta frequência (entendido como acima de 20 kHz, de modo a não ser audível pelo ser humano), com baixas perdas.

Principalmente devido à criação do transistor MOSFET, ao qual se seguiu o IGBT, ambos com desempenho muito superior ao transistor bipolar em aplicações de chaveamento rápido, toda uma nova área de desenvolvimento tecnológico pode se estabelecer.

A crescente demanda por fontes de alimentação compactas, de alto rendimento (baixas perdas) e rápida resposta dinâmica a transitórios de carga, decorrente da ampliação de cargas eletro-eletrônicas a serem alimentadas em tensão CC, exigiu soluções que transcendiam as fontes convencionais baseadas em retificadores (controlados ou não), seguidos por filtros passivos e reguladores série.

Em potências mais elevadas (o que pode significar alguns watts), a perda de potência em um regulador série pode ser proibitiva. O uso de transistores como chave permite minimizar as perdas de potência, desde que as transições dos estados ligado e desligado sejam muito rápidas (minimizando o intervalo no qual o componente atravessa sua região ativa). Com isso minimiza-se a necessidade de dispositivos de dissipação do calor gerado no semicondutor.

Mas ao operar como chave, estes circuitos exigem filtros passa-baixas que sejam capazes de recuperar uma tensão CC adequada aos circuitos de carga. Tais filtros utilizam indutores e capacitores. A minimização destes elementos requer que a frequência de comutação seja a mais elevada possível, de modo que valores aceitáveis de *ripple* sejam obtidos com baixas indutâncias e capacitâncias.

A elevação da frequência, no entanto, fica restrita pelas perdas devidas às comutações dos componentes semicondutores.

Além disso, os elevados valores de  $di/dt$  e  $dv/dt$  (taxas de variação de corrente e de tensão, respectivamente) são importantes fontes de interferência eletromagnética (IEM), as quais devem ser devidamente minimizadas para evitar problemas de operação do circuito e interferência em outros dispositivos alimentados pela mesma fonte (interferência conduzida) ou que esteja nas proximidades (interferência irradiada).

Apesar das muitas soluções tecnológicas já obtidas, continuam a surgir novos desafios, como a alimentação em tensões cada vez mais baixas dos circuitos digitais, com implicações sobre os valores mínimos de queda de tensão direta dos componentes, ou ainda os circuitos de eletrônica embarcada em automóveis, e tantas outras aplicações em aparelhos de tecnologia da informação e de uso médico.

O texto que se segue procura dar a seus leitores informações necessárias para o entendimento do funcionamento das principais topologias de fontes chaveadas, de seu controle e do comportamento dos componentes ativos e passivos nestas utilizados. Trata-se de um texto em constante aprimoramento, para o que sempre solicitamos a colaboração dos leitores.