

IVO BARBI

**ELETRÔNICA DE POTÊNCIA:
PROJETOS DE FONTES CHAVEADAS**

**Florianópolis
Edição do Autor
2001**

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA: PROJETOS DE FONTES CHAVEADAS

Ivo Barbi

Endereço: INEP – Instituto de Eletrônica de Potência
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Caixa Postal 5119

88.040 – 970. Florianópolis – SC

Brasil

Fone: 0(xx)48-331.92.04

Fax: 0(xx)48-234.54.22

Internet: <http://www.inep.ufsc.br>

E-mail: ivobarbi@inep.ufsc.br

FICHA CATALOGRÁFICA

B236e Barbi, Ivo

Eletrônica de potência : projetos de fontes chaveadas / Ivo Barbi. – Florianópolis : Ed. do Autor, 2001.

334p. : il.

Inclui bibliografia.

1. Eletrônica de potência. 2. Fontes chaveadas. I. Título.

CDU: 621.314.22

Catálogo na fonte por: Onélia Silva Guimarães CRB-14/071

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Tecnológico da UFSC, pelo apoio a presente edição, permitindo a distribuição deste livro para as bibliotecas das Universidades Brasileiras que possuem cursos de Engenharia Elétrica.

Ao Eng. André Snoeljer, pela sua dedicação na preparação desta edição, digitando o texto, desenhando as figuras e simulando os circuitos estudados ao longo dos capítulos.

Aos Engenheiros Clóvis Antônio Petry e Luiz Cláudio Souza dos Santos, pela cuidadosa revisão do manuscrito, formatação final e contribuições no Capítulo 10.

Ao Dr. René Torrico Bascopé, pela sua colaboração no projeto apresentado no Capítulo 10.

A todos os alunos e professores que durante anos fizeram uso do manuscrito e que muito colaboraram para o seu aperfeiçoamento, com comentários, sugestões e críticas construtivas.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Ivo Barbi nasceu em Gaspar, Santa Catarina em 1949 Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1973. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1976 e o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Institut National Polytechnique de Toulouse, França, em 1979. Fundou a Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência e o Instituto de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Catarina. Desde 1992, é Editor Associado na área de Conversores Estáticos de Potência do IEEE Transactions on Industrial Electronics.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO 1

RETIFICADOR E FILTRO DE ENTRADA

1.1 - RETIFICADORES MONOFÁSICOS COM FILTRO CAPACITIVO	7
1.2 - OPERAÇÃO COMO RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA 7	
1.2.a - MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISE	7
1.2.b - EXEMPLO NUMÉRICO	13
1.2.c - ANÁLISE DETALHADA DA FORMA DA CORRENTE DE ENTRADA.	15
1.2.d - VERIFICAÇÃO POR SIMULAÇÃO	19
1.3 - ANÁLISE DETALHADA DO RETIFICADOR MONOFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO	22
1.3.a - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO	22
1.3.b - CÁLCULO DO VALOR EFICAZ DA CORRENTE NO CAPACITOR DE FILTRAGEM	30
1.3.c - EXEMPLO NUMÉRICO	32
1.4 - OPERAÇÃO DO RETIFICADOR MONOFÁSICO COMO DOBRADOR DE TENSÃO	33
1.4.a - DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO	33
1.4.b - EXEMPLO DE CÁLCULO (DOBRADOR DE TENSÃO)	38
1.5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA O RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA	39
1.6 - RETIFICADOR TRIFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO	42
1.6.a - O CIRCUITO E O SEU FUNCIONAMENTO	42
1.6.b - ANÁLISE SIMPLIFICADA DO CIRCUITO	43
1.6.c - EXEMPLO NUMÉRICO	47
1.7 - LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PRÉ-CARGA DO CAPACITOR DE FILTRAGEM	49
1.8 - CIRCUITO DE DISPARO DO TRIAC	54

CAPÍTULO 2

FONTES CHAVEADAS DO TIPO FLYBACK

2.1 - CONVERSOR CC-CC DO TIPO BUCK-BOOST (FLYBACK NÃO ISOLADO)	57
2.2 - CONVERSOR CC-CC DO TIPO BUCK-BOOST (FLYBACK ISOLADO)	64
2.3 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS FONTES DO TIPO FLYBACK	67

2.4 - FILTRO DE SAÍDA.....	68
2.5 - ESTUDO DO TRANSFORMADOR.....	75

CAPÍTULO 3

FONTES CHAVEADAS DO TIPO FORWARD

3.1 - CONVERSOR BUCK.....	89
3.2 - CONVERSOR FORWARD (BUCK ISOLADO).....	97

CAPÍTULO 4

CONVERSOR BRIDGE, HALF BRIDGE E PUSH-PULL

4.1 - CONVERSOR EM MEIA-PONTE (HALF-BRIDGE).....	115
4.2 - CONVERSOR EM PONTE COMPLETA (FULL-BRIDGE).....	124
4.3 - CONVERSOR "PUSH-PULL".....	124
4.4 - CÁLCULO DO TRANSFORMADOR.....	126

CAPÍTULO 5

O TRANSISTOR DE POTÊNCIA E O MOSFET

5.1 - INTRODUÇÃO.....	129
5.2 - CARACTERÍSTICAS DO TRANSISTOR PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES ESTÁTICOS.....	129
5.3 - TRANSISTOR BLOQUEADO.....	130
5.4 - TRANSISTOR EM CONDUÇÃO.....	130
5.5 - COMUTAÇÃO COM CARGA RESISTIVA.....	132
5.6 - COMUTAÇÃO COM CARGA INDUTIVA (CONDUÇÃO CONTÍNUA).....	135
5.7 - INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO TRANSISTOR DURANTE A COMUTAÇÃO.....	142
5.8 - PERDAS NA COMUTAÇÃO.....	144
5.9 - PERDAS DE CONDUÇÃO.....	154
5.10 - CÁLCULO DO "SNUBBER" PARA CONVERSORES FORWARD E HALF-BRIDGE.....	156
5.11 - PERDAS EM UM DIODO.....	156

5.12 - CÁLCULO TÉRMICO.....	159
5.13 - O MOSFET.....	161

CAPÍTULO 6

COMANDOS DE BASE DO TRANSISTOR BIPOLAR E GATILHO DO MOSFET

6.1 - INTRODUÇÃO.....	171
6.2 - COMANDOS DE BASE NÃO-ISOLADOS.....	171
6.3 - COMANDOS DE BASE ISOLADOS.....	176
6.4 - COMANDO DE GATILHO DO MOSFET.....	191
6.5 - CIRCUITOS DE COMANDOS NÃO-ISOLADOS.....	193
6.6 - CIRCUITOS DE COMANDOS DE GATILHO ISOLADOS.....	195

CAPÍTULO 7

CIRCUITOS DE COMANDO DAS FONTES CHAVEADAS

7.1 - A QUESTÃO DO ISOLAMENTO.....	197
7.2 - A FONTE AUXILIAR.....	199
7.3 - CIRCUITOS INTEGRADOS PWM DEDICADOS.....	201
7.4 - SOFT-START (PARTIDA PROGRESSIVA).....	205
7.5 - CIRCUITOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE.....	205
7.6 - O ISOLADOR ÓTICO.....	207
7.7 - REGULADOR DE SAÍDA.....	211
7.8 - PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÃO NA SAÍDA.....	212

CAPÍTULO 8

RESPOSTA TRANSITÓRIA E ESTABILIDADE

8.1 - INTRODUÇÃO.....	215
8.2 - EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	220
8.3 - EXEMPLOS DE OBTENÇÃO DE FUNÇÃO-TRANSFERÊNCIA.....	222
8.4 - DIAGRAMA DE BODE.....	224

8.5 - EXEMPLO.....	229
8.6 - CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE	231
8.7 - REPRESENTAÇÃO DAS FONTES CHAVEADAS	233
8.8 - CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO EMPREGADOS COM OS AMPLIFICADORES OPERACIONAIS.....	242
8.9 - MÉTODO PRÁTICO PARA O CÁLCULO DO CONTROLADOR DE UM CONVERSOR FORWARD	249
8.10 - EXEMPLO DE PROJETO.....	251

CAPÍTULO 9

SUPRESSÃO DE INTERFERÊNCIA RADIOLÉTRICAS (RFI) NAS FONTES CHAVEADAS

9.1 - INTRODUÇÃO	257
9.2 - ESPECIFICAÇÕES DOS NÍVEIS DE INTERFERÊNCIA	257
9.3 - CAUSAS DA INTERFERÊNCIA	259
9.4 - PROPAGAÇÃO DAS TENSÕES PARASITAS	262
9.5 - EXEMPLO NUMÉRICO	264
9.6 - MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA RÁDIO-INTERFERÊNCIA	265
9.7 - INFLUÊNCIA DA CAPACITÂNCIA ENTRE ENROLAMENTOS	273
9.8 - OUTRAS FONTES DE RUÍDO	274
9.9 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE FILTRO DE REDE	276

CAPÍTULO 10

EXEMPLO DE PROJETO DO ESTÁGIO DE POTÊNCIA DE UMA FONTE CHAVEADA BASEADO NO CONVERSOR FLYBACK

10.1 - INTRODUÇÃO	285
10.2 - ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO.....	285
10.3 - ARQUITETURA DO SISTEMA	286
10.4 - PROJETO DA FONTE CHAVEADA.....	286
10.4.a - DADOS DA FONTE AUXILIAR.....	286
10.4.b - POTÊNCIA DE ENTRADA E SAÍDA DA FONTE	289
10.4.c - CONVERSOR FLYBACK	289
10.4.d - CÁLCULO DOS CAPACITORES	291
10.4.e - DIMENSIONAMENTO DOS DIÓDOS	293

10.4.f - SEÇÃO DOS CONDUTORES	295
10.4.g - DIMENSIONAMENTO DO INTERRUPTOR	298
10.4.h - DIMENSIONAMENTO DOS DISSIPADORES DE CALOR DOS REGULADORES LINEARES.....	300
10.5 - ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES.....	301

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O EMPREGO DE CAPACITORES.....	303
APÊNDICE 2 - CÁLCULO TÉRMICO DE TRANSFORMADORES E INDUTORES COM NÚCLEO DE FERRITE	311
APÊNDICE 3 - ESCOLHA DO NÚCLEO COM RESTRIÇÃO DE PERDAS NO FERRITE	319
APÊNDICE 4 - OUTRAS TOPOLOGIAS DE FONTES CHAVEADAS	325
APÊNDICE 5 - NÚCLEOS DE FERRITE TIPO E	329
APÊNDICE 6 - TABELA DE FIOS ESMALTADOS	331

INTRODUÇÃO

As fontes chaveadas começaram a ser desenvolvidas na década de 60, para serem empregadas nos programas espaciais. O objetivo era substituir as fontes reguladas convencionais, do tipo lineares, que são volumosas, pesadas e dissipativas, por fontes compactas e de alto rendimento.

Com o avanço da microeletrônica e com a necessidade cada vez maior de se produzir equipamentos compactos e de baixo consumo, as fontes chaveadas começaram a ser empregadas generalizadamente. Pode-se destacar os seguintes empregos:

- Computadores e microcomputadores;
- Periféricos (impressoras, terminais, etc...);
- Telecomunicações;
- Eletrodomésticos;
- Equipamentos médicos;
- Satélites;
- Aviões e similares;
- Equipamentos militares.

Além disso, as fontes chaveadas são largamente empregadas como fontes de alimentação para os circuitos de comando de conversores de maior potência, como aqueles destinados ao acionamento de motores elétricos e sistemas No-Breaks.

Uma fonte chaveada, apesar de operar com maior rendimento e ocupar menor espaço que uma fonte convencional, tem algumas desvantagens:

1. A resposta transitória é de menor qualidade (mais lenta);
2. Produz ondulação na tensão de saída;
3. Produz interferência radioelétrica e eletromagnética;
4. Tem-se revelado menos robusta;
5. Emprega um número de componentes muito maior;
6. Emprega componentes eletrônicos mais sofisticados e mais raros.

Pode-se assegurar que todos os esforços dos pesquisadores, tanto os teóricos, quanto os projetistas, passando pelos fabricantes de componentes, são dirigidos para reduzir as desvantagens das fontes chaveadas em relação às convencionais.

Até o final da década de 70, empregava-se como interruptor o Transistor Bipolar de Potência e as frequências eram normalmente de 20kHz.

Nos anos 80, sobretudo para pequenas potências, generalizou-se o emprego do MOSFET e do diodo ultra-rápido, o que possibilitou o emprego de frequências acima de 100kHz.

Mais recentemente os laboratórios dedicaram-se ao desenvolvimento das fontes com comutação suave, as quais podem operar com frequências na faixa dos MHz, rendimento próximo a 90% e pouca geração de ruído radioelétrico.

A representação em blocos de uma fonte chaveada "off-the-line" (retificação e filtragem diretamente da rede, sem transformador de baixa frequência de isolamento de entrada), é mostrada na Fig. 1.

As etapas fundamentais a serem cumpridas no projeto de uma fonte chaveada são as seguintes:

a) Especificar:

- Tensões e correntes de saída;
- Frequência da rede;
- Tensões nominais, máxima e mínima da rede;
- Ondulação de 120Hz na saída;
- Ondulação da saída na frequência de comutação;
- Hold-Up time;
- Temperatura ambiente no local em que a fonte será instalada;
- Proteções exigidas;
- Rendimento;
- Regulação de carga;
- Regulação de linha;
- Resposta transitória;
- Tensão de isolamento;
- Nível de interferência Radioelétrica e Eletromagnética.

b) Definir:

- Topologia do conversor;
- Frequência de comutação;
- Interruptor principal (IGBT, MOSFET, etc.);
- Isolamento (transformador de comando de base/gatilho ou isolador ótico no laço de realimentação).

c) Cálculo do estágio de entrada:

- Retificador;
- Capacitor de filtragem;

- Limitação da corrente de pré-carga do capacitor de filtragem.

d) Projeto do conversor

e) Cálculo do transformador de isolamento de alta frequência

f) Cálculo do estágio de saída:

- Retificador;
- Indutor e Capacitor de Filtragem.

g) Circuito de comando de base ou *gate*

h) Projeto do circuito de compensação (*estabilidade e resposta transitória*)

i) Escolha do CI-PWM e cálculo dos componentes externos

j) Projeto dos circuitos de proteção

k) Cálculo da fonte auxiliar

l) Cálculo do filtro de rádio frequência

Ao longo deste curso, cada um dos blocos que compõem uma fonte chaveada será analisado individualmente; da análise serão estabelecidas as ferramentas básicas e os procedimentos que deverão ser seguidos no projeto de uma fonte chaveada.

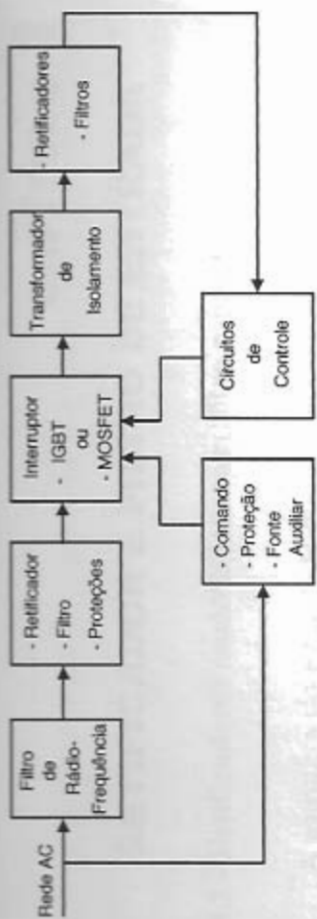


Fig. 1: Representação em blocos de uma fonte chaveada "off-the-line".