

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO  
DE UMA FONTE DE POTÊNCIA CA  
TRIFÁSICA A QUATRO FIOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Márcio Stefanello**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2006**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO  
DE UMA FONTE DE POTÊNCIA CA  
TRIFÁSICA A QUATRO FIOS**

**por**

**Márcio Stefanello**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Controle de Processos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. Dr. Hilton Abílio Gründling**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2006**

S816p

Stefanello, Márcio, 1978-

Projeto e desenvolvimento de uma fonte de potência CA trifásica a quatro fios / por Márcio Stefanello ; Hilton Abílio Gründling. – Santa Maria, 2006  
108 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrica, RS, 2006.

1. Engenharia elétrica 2. Controlador RMRAC 3. Controle Discreto 4. Fontes de potência CA 5. Inversão de tensão I. Gründling, Hilton Abílio, orient. II. Título

CDU: 621.3

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO  
DE UMA FONTE DE POTÊNCIA CA  
TRIFÁSICA A QUATRO FIOS**

elaborada por  
**Márcio Stefanello**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Hilton Abílio Gründling, Dr. Sc. (UFSM)**  
(Orientador)

---

**Emerson Giovani Carati, Dr. Eng. (UTFPR)**

---

**José Renes Pinheiro, Dr. Eng. (UFSM)**

Santa Maria, 6 de abril de 2006



*AOS MEUS PAIS OLIVINDO STEFANELLO E MARIA S. STEFANELLO, MEUS PRIMEIROS MESTRES, PELO SEU AMOR, DEDICAÇÃO E POR DEPOSITAREM EM MIM TODA A SUA CONFIANÇA EM TODOS OS MOMENTOS*

*A MINHA IRMÃ ANDRÉIA STEFANELLO, PELA SUA AMIZADE E APOIO MESMO DISTANTE,  
DEMONSTRANDO SER UMA IRMÃ EM TODOS OS SENTIDOS*

*A MINHA NAMORADA SIRLEI MORAES, MINHA GRANDE COMPANHEIRA E GRANDE RESPONSÁVEL PELO MEU  
CRESCIMENTO COMO SER HUMANO. PELO SEU AMOR, APOIO E COMPREENSÃO NOS MUITOS  
MOMENTOS DE AUSÊNCIA DURANTE O DESENVOLVIMENTO DESTES TRABALHOS*



## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer em primeiro lugar ao professor Hilton Abílio Gründling pela sua orientação e dedicação demonstrada desde o período de iniciação científica e durante o curso de mestrado, aos professores Humberto Pinheiro, José Renes Pinheiro e Hélio Leães Hey pelos ensinamentos e pelas aulas ministradas, sempre demonstrando comprometimento com o aprendizado e crescimento dos seus alunos.

Agradeço aos colegas e amigos do GEPOC, que proporcionaram um agradável ambiente de trabalho, com companheirismo e troca de informações. Em especial aos amigos Fernando Botterón, Rafael Cardoso, Robinson Camargo e Leandro Michels pela ajuda e conhecimentos que foram de grande ajuda para a conclusão deste trabalho.

Quero agradecer também aos funcionários do PPGEE, NUPEDEE e ao GEPOC, que me auxiliaram para a conclusão deste trabalho. Um agradecimento a CAPES, pelo apoio financeiro.

Um agradecimento especial a Universidade Federal de Santa Maria, que além de me oferecer o ensino, também permitiu a minha estadia em Santa Maria durante todo o período de graduação e até o final deste trabalho.

Agradeço de modo especial a minha família, meus pais, minha irmã e a minha namorada Sirlei. Todos eles, que em muitos momentos souberam compreender a minha ausência e em outros, a minha insegurança diante dos problemas.

A Deus por tudo

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA FONTE DE POTÊNCIA CA TRIFÁSICA A QUATRO FIOS**

AUTOR: MÁRCIO STEFANELLO

ORIENTADOR: PROF. DR. HILTON ABÍLIO GRÜNDLING

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 7 de abril de 2006.

Este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo de Fontes de Potência CA onde é apresentado o desenvolvimento de um protótipo. Os diversos estágios que compõem o sistema, desde a topologia do conversor, do filtro, da instrumentação e do controlador são apresentados e analisados. O protótipo desenvolvido é uma fonte trifásica a quatro fios, que utiliza um inversor de tensão de quatro braços. Esta topologia permite uma maior flexibilidade na geração de formas de onda desbalanceadas ou em condições de cargas desequilibradas, simplificando também o problema de controle do sistema. Este trabalho procura primeiramente justificar a utilização e o estudo de Fontes de Potência CA, neste sentido são dados alguns exemplos de ensaios e normas, cujos testes demandam a sua utilização. As aplicações são em geral relacionadas a equipamentos eletro-eletrônicos e acionamento de outras plantas como vibradores eletromecânicos. Deste modo, as Fontes de Potência CA são equipamentos que podem ser utilizados tanto na indústria quanto em laboratórios didáticos e de pesquisa. Em praticamente todas as aplicações, é mostrado que um bom desempenho na geração de formas de onda é necessário. Este desempenho está relacionado à capacidade de geração de formas de onda com baixa distorção harmônica, não raro, em condições de frequência e amplitude variáveis e com cargas de comportamento não-linear. Deste modo, a seleção de uma topologia de conversor adequado não basta, são também necessários controladores que garantam um bom desempenho do sistema, mesmo em condições adversas de carga e em presença de dinâmicas não-modeladas. As dinâmicas não-modeladas são oriundas das várias etapas que compõem o sistema, mas geralmente são relacionadas às incertezas sobre o modelo da planta e da carga. Neste sentido, este trabalho descreve não apenas o protótipo implementado e questões topológicas relativas a ele, mas também aplica um Controle Robusto por Modelo de Referência ou RMRAC (*Robust Model Reference Adaptive Control*) para o controle da planta. Esta técnica garante robustez do sistema em malha fechada mesmo na presença de dinâmicas não modeladas e distúrbios. O controlador utilizado faz uso de um algoritmo de adaptação paramétrica do tipo Gradiente, no qual quatro parâmetros são adaptados. Este fato leva a uma nova equação do erro, que é utilizada para a implementação do controlador.

Palavras Chave: Controlador RMRAC, Controle Discreto, Fonte de Potência CA, Inversores de Tensão

## **ABSTRACT**

Dissertation  
Pos-Graduation Program on Electrical Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **DESIGN AND DEVELOPMENT OF A THREE-PHASE FOUR-WIRE AC POWER SOURCE**

AUTHOR: MÁRCIO STEFANELLO  
SUPERVISOR: HILTON ABÍLIO GRÜNDLING  
Santa Maria, april 2006

This work presents a contribution to the study of AC Power Sources, where a prototype's development is presented. The stages that compose the system, including converter topology, filter, instrumentation and controller, are presented. The developed prototype is a three-phase four-wire source, which uses a four-leg voltage source inverter. This topology increases the flexibility for unbalanced waveforms generation or unbalanced load conditions, also simplifying the control problem of the process. This work first looks for justifying the use and the study of AC Power Sources, in this sense, some examples of tests and norms, whose tests demand its use, are given. The applications are in general related to electrical and electronic equipments and for driving electromechanical plants such as shakers. In this sense, AC Power Sources are equipment that can be used both in industry applications and didactic or research laboratories. In practically all applications, it is shown that good performance in waveforms generation is necessary. This performance is related to the ability for waveforms generation with low harmonic distortion even in conditions of variable frequency or amplitude and with nonlinear loads behavior. In this way, the use of an adequate converter topology is not enough, are too necessary controllers to guarantee performance for the system, even in adverse load conditions or in presence of unmodeled dynamics. The unmodeled dynamics are derived from some stages that compose the system, but they are generally related to the uncertainties on the model of the plant and load. Then, this work not only describes the implemented prototype and topological relative questions but also applies a Robust Model Reference Adaptive Control (RMRAC) for the plant control. This technique improves the robustness in the closed loop system even under presence of unmodeled dynamics and disturbances. The controller makes use of a Gradient type algorithm for parametric adaptation with four adapted parameters, which leads to a new error equation that is used for the controller's implementation

Keywords: RMRAC Controller, Discret Control, AC Power Source, Voltage Source Inverters

# SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO .....	20
2	FONTES DE POTÊNCIA CA .....	26
2.1	Aplicações .....	26
2.2	Topologias de Fontes de Potência CA e a Topologia Proposta .....	36
2.3	Sumário .....	42
3	MODELAGEM DO INVERSOR E FILTRO .....	43
3.1	Modelagem da Planta .....	43
3.2	Estratégia de Modulação para o Inversor a Quatro Braços .....	44
3.3	Sumário .....	50
4	CONTROLADOR RMRAC ( <i>ROBUST MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL</i> ) .....	51
4.1	Descrição da Planta e do Modelo de Referência .....	52
4.2	Estrutura do Controlador .....	54
4.3	Algoritmo de Adaptação Paramétrica .....	57
4.4	Sumário .....	58
5	RESULTADOS DE SIMLAÇÃO .....	59
5.1	Simulação da Planta e Controlador .....	59
5.2	Sumário .....	66
6	PROTÓTIPO IMPLEMENTADO .....	67
6.1	DSP TMS230C2812 .....	67
6.1.1	Descrição da CPU .....	68
6.1.2	Periféricos Principais – <i>Event Manager</i> e ADC .....	70
6.1.3	Programação .....	73
6.2	Módulo Retificador-Inversor .....	74
6.2.1	Retificador .....	74

6.2.2	Inversor .....	75
6.2.3	Circuito de acionamento dos IGBT's.....	76
6.3	Filtro LC.....	77
6.4	Aquisição das Medidas para Controle da Fonte de Potência CA .....	79
6.5	Interface entre o DSP e o Circuito de Acionamento do Inversor.....	80
6.6	Sumário .....	81
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	82
7.1	Resultados Experimentais .....	82
7.2	Sumário .....	86
8	CONCLUSÕES .....	87
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
	APÊNDICE A TESTE DE UM ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FASE PARA UM FILTRO.....	
	ATIVO PARALELO .....	92
	APÊNDICE B FILTRO DE KALMAN .....	95
	APÊNDICE C ESTRUTURA DO PROGRAMA IMPLEMENTADO NO DSP PARA O CONTROLE	
	DO PROTÓTIPO .....	97
	C.1 Programa Principal .....	97
	C.2 Rotina de cálculo da Lei de Controle .....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama representativo de uma Fonte de Potência CA .....	22
Figura 2.1: Configuração usada para ensaios de vibração.....	27
Figura 2.2: Circuito de ensaio segundo a norma IEC1000-3-2 .....	29
Figura 2.3: Curva de Perceptibilidade Humana a variações na iluminação ([15]).....	30
Figura 2.4: Circuito de teste de <i>flicker</i> de acordo com a IEC-725 .....	31
Figura 2.5: Fontes de Potência CA (a) não-lineares e (b) lineares .....	37
Figura 2.6: Número de fabricantes que informaram a característica.....	38
Figura 2.7: Fator de potência e número de fabricantes.....	39
Figura 3.1: Inversor trifásico a quatro fios, filtro LC e carga.....	43
Figura 3.2: Inversor quatro-braços e planta a ser controlada .....	45
Figura 3.3: Possíveis vetores de comutação [21] .....	47
Figura 3.4: Seqüência de comutação para um PWM centrado.....	48
Figura 3.5: PWM trifásico de forma de onda modulada .....	49
Figura 3.6: Detalhe de em um ciclo da fundamental par a figura anterior .....	49
Figura 4.1: Controlador RMRAC.....	52
Figura 5.1: Sistema inversor, planta e controlador simulados.....	59
Figura 5.2: Tensões de saída da planta (—) e modelo de referência (····) .....	62
Figura 5.3: Parâmetros adaptados e erro de rastreamento .....	62
Figura 5.4: Forma de onda fundamental e harmônicas .....	63
Figura 5.5: Tensões de saída e correntes nos indutores para uma fundamental de 300Hz .....	64
Figura 5.6: Formas de onda trifásicas desequilibradas de 50Hz para carga desbalanceada.....	65
Figura 5.7: Tensões desequilibradas com cargas desbalanceadas em 50Hz .....	65
Figura 5.8: Afundamento de dois ciclos na tensão de saída.....	66
Figura 6.1: Diagrama de blocos do protótipo implementado .....	67
Figura 6.2: Diagrama de blocos simplificado da eZdsp™ F2812.....	
(Fonte: Texas Instruments®).....	68
Figura 6.3: Operação do <i>timer</i> , geração do PWM e IRQ's .....	72
Figura 6.4: Diagrama de blocos do conversor A/D do TMS320F2810/12 .....	72
Figura 6.5: Etapas de implementação do programa desde o código fonte até o código executável.....	73

Figura 6.6: Retificador trifásico não-controlado .....	74
Figura 6.7: Forma de onda moduladora PWM e função $f(t)$ modulada .....	75
Figura 6.8: Formas de onda de um IGBT na comutação.....	76
Figura 6.9: Diagrama de blocos do circuito de acionamento.....	
SKHI22BH4 (Fonte: Semikron®).....	78
Figura 6.10: PWM de 12kHz e forma de onda modulada.....	78
Figura 6.11: Espectro harmônico normalizado.....	79
Figura 6.12: Circuito de isolamento e condicionamento de sinais .....	79
Figura 6.13: Circuito para medição do Barramento CC.....	80
Figura 6.14: Envio dos sinais PWM do DSP e geração das saídas para as quatro pernas .....	81
Figura 7.1: Afundamento e Elevação da tensão de saída (a) e detalhes dos transitórios (b)....	83
Figura 7.2: Variação periódica da tensão de saída com .....	84
Figura 7.3: Fundamental em 60Hz e 5° harmônica. Escalas horizontal.....	
de 10ms/div e vertical de 200V/div.....	84
Figura 7.4: Saída da planta ( $y$ ) e saída do modelo de referência ( $y_m$ ).....	
Escala vertical de 100V/div.....	85
Figura 7.5: Geração trifásica equilibrada com uma das fases 50% mais carregada.....	85
Figura 7.6: Varredura AC.....	86
Figura A.1 – Circuito para teste do algoritmo de sincronização NPSF.....	92
Figura A.2 – Forma de onda fundamental com 60Hertz e 5° harmônica gerada .....	93
Figura A.3 – FFT da forma de onda da figura Figura A.2 .....	93
Figura A.4 – Formas de onda seno e cosseno obtidas pelo algoritmo.....	
de sincronização NPSF .....	94
Figura A.5 – Espectro harmônico das formas de onda da Figura A.4.....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites das harmônicas de corrente segundo a norma IEC1000-3-2.....	28
Tabela 2.2 – Distorções máximas com o EUT conectado.....	29
Tabela 2.3 – Níveis de teste para quedas e interrupções curtas.....	32
Tabela 2.4 – Classificação dos equipamentos segundo a norma IEC61000-4-28.....	33
Tabela 2.5 – Variação de frequência .....	34
Tabela 2.6 – Avaliação do resultado num ensaio segundo a norma IEC 61000-4-28.....	34
Tabela 2.7 – Tempos de teste para a norma MIL-STD-704.....	35
Tabela 2.8 – Valores limites em regime permanente segundo a norma MIL-STD-704 .....	36
Tabela 2.9 – Número de equipamentos e faixa de tensão de entrada.....	39
Tabela 2.10 – Tensão de saída, faixa de potência e número de equipamentos.....	40
Tabela 2.11 – Frequência de saída (amostragem de 273 produtos).....	41
Tabela 2.12 – Potência de saída e THD associada para os equipamentos informados.....	41
Tabela 2.13 – Variáveis medidas e número de equipamentos que possuem a medição.....	42
Tabela 3.1 – Estados de comutação, tensões de fase em “abc” e em coordenadas $\alpha\beta O$ .....	46
Tabela 5.1 – Parâmetros da planta, inversor e controle.....	60
Tabela 6.1 – Memória interna do C28x .....	70
Tabela 6.2 – Especificações para comutação .....	76
Tabela 6.3 – Características elétricas e de tempo do circuito de acionamento .....	77



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Ampère
A/D	Conversor Analógico-Digital
ALU	<i>Arithmetic Logic Unity</i> ( Unidade de Lógica e Aritmética)
ANSI	<i>American National Standard Institute</i> (Instituto Americano de Padronização Nacional)
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i> (Circuitos Integrados de Aplicação Específica)
C	Capacitor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador de Sinal Digital)
EUT	<i>Equipment Under Test</i> (Equipamento em teste)
Hz	Hertz, unidade de frequência
H	Henry
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional )
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Gatilho Isolador)
IRQ	<i>Interrupt Request</i> (Pedido de Interrupção)
JTAG	<i>Join Action Test Group</i>
L	Indutor
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> (Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas)
PC	<i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
PFC	<i>Power Factor Correction</i> (Correção de Fator de Potência)

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RAM	<i>Random Acces Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computing</i> (Conjunto Reduzido de instruções de Computador)
SISO	<i>Single Input Single Output</i> (Única Entrada Única Saída)
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)
UPS	<i>Uninterruptable Power Supply</i> (Fonte Ininterrupta de Energia)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$abc$	Sistema de coordenadas do sistema trifásico
$D_m(s)$	Polinômio Hurwitz de grau $n^*=n-m$
$\delta_0, \delta_1, \delta_m$	Ganhos do RMRAC
$\Delta_a(s), \Delta_m(s)$	Dinâmicas não-modeladas aditiva e multiplicativa
$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$	Valores de tempo para o SVM
$e_1$	Erro de rastreamento
$\varepsilon$	Erro Aumentado
$F$	Pólo dos filtros auxiliares do controlador RMRAC
$f_{sw}$	Frequência de comutação
$\phi$	Erro e adaptação paramétrica
$f_1$	Frequência fundamental da forma de onda
$G(s)$	Planta no domínio da frequência
$G_0(s)$	Modelo conhecido da Planta no domínio da frequência
$\eta$	Variável de saída da dinâmica não modelada do processo
$\varphi$	Erro de adaptação do ganho <i>feedforward</i>
$k_m$	Ganho do Modelo de Referência
$k_p$	Ganho da parte modelada da planta
$\lambda$	Constante do RMRAC
$M_0$	Valor maior que a norma do vetor $[\theta^*]$
$\bar{m}$	Sinal de normalização modificado
$m$	Ordem do polinômio do numerador de $G_0(s)$
$\mu$	Ganho da dinâmica não-modelada

$\bar{\mu}$	Constante do RMRAC
$n$	Ordem do polinômio do denominador de $G_0(s)$
$n^*$	Diferença entre a ordem dos polinômios do numerador e do denominador
$\eta$	Erro de dinâmica não modelada
$\mathbf{P}$	Matriz de Covariância
$q$	Parâmetro do controlador RMRAC
$\theta, \theta^*$	Vetores de parâmetros estimado e verdadeiro
$R$	Parâmetro do controlador RMRAC
$r(s)$	Referência
$\sigma_0$	Constante do RMRAC
$\sigma$	Parâmetro para a Modificação Sigma
$T_s$	Tempo de amostragem para controle
$u$	Lei de Controle
$V_{cc}$	Barramento CC
$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$	Tensões das pernas do inversor em coordenadas trifásicas
$V_{\alpha}, V_{\beta}, V_0$	Tensões das pernas do inversor em coordenadas $\alpha\beta 0$
$y$	Saída da planta
$y_m$	Saída do Modelo de Referência
$W_m(s)$	Modelo de Referência
$\omega_1, \omega_2$	Filtros auxiliares do RMRAC
$\omega$	Vetor de regressão
$\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c$	Constantes de amortecimento dos modelo SISO da planta em abc
$\zeta_m$	Constante de amortecimento do Modelo de Referência
$\zeta$	Vetor de regressão filtrado pelo modelo de referência

## CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

---

Nas últimas décadas, o desenvolvimento das técnicas de processamento de energia elétrica e o crescente avanço tecnológico têm possibilitado uma redução no custo de muitos equipamentos eletro-eletrônicos, e deste modo tornando-os acessíveis a uma parcela cada vez maior da população. Também na indústria, a evolução que muitos setores vêm sofrendo nas últimas décadas ocasionou um aumento no uso de equipamentos, principalmente no de máquinas elétricas. Assim, o consumo de energia elétrica por cargas não-lineares tais como conversores monofásicos, trifásicos, reatores eletrônicos e por cargas indutivas como, por exemplo, fornos de indução e máquinas elétricas, tende a aumentar.

A degradação da qualidade da energia elétrica é a consequência imediata do consumo de energia por cargas não-lineares e de comportamento fortemente reativo. Como exemplos clássicos de problemas associados à energia elétrica podem-se citar: o aumento da potência reativa, as flutuações de tensão, subtensões e sobretensões, variações na frequência e distorção harmônica. A presença de oscilações e componentes harmônicas na rede elétrica não significa que equipamentos eletro-eletrônicos, a ela conectados, não possam funcionar apropriadamente, isto depende muito mais da suscetibilidade destes equipamentos quando da operação frente a estas condições adversas. Algumas organizações internacionais como a *American National Standard Institute (ANSI)* e a *International Electrotechnical Commission (IEC)*, estabeleceram normas aplicáveis a equipamentos eletro-eletrônicos diversos, com o objetivo de impor limites na injeção de harmônicos na rede elétrica, estipular índices de desempenho e condições para teste destes equipamentos.

Um equipamento que é apropriado às tarefas de ensaio e acionamento de plantas elétricas é a chamada Fonte de Potência CA. Este equipamento deve ter a capacidade de gerar formas de onda monofásicas ou trifásicas, que dependendo da aplicação, pode gerar formas de onda com componentes harmônicas e em alguns casos com desequilíbrio, no caso de sistemas polifásicos. De um modo geral, a operação da Fonte de Potência CA pode ser pré-programada pelo usuário de modo a gerar diversas formas de onda, incluindo variação de amplitude, variação de frequência e inserção de componentes senoidais, para a geração de formas de onda com harmônicas.

Existem muitos fabricantes de Fontes de Potência CA como a California Instruments, Hewlett Packard, Agilent, MKS Instruments. As Fontes de Potência CA comerciais visam testes de plantas elétricas, possuem um sistema supervisorio, que é um programa que controla a geração das formas de onda, segundo as normas escolhidas para o ensaio. Existem ensaios que são relacionados aos mais diversos fenômenos presentes nos sistemas de alimentação (rede pública ou geração isolada) e às imposições de desempenho dos equipamentos eletro-eletrônicos. A seguir são citadas algumas normas e aplicações, cuja implementação num ensaio é feita total ou parcialmente por meio de uma Fonte de Potência CA: As normas IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-3 [1] estabelecem limites para as correntes harmônicas injetadas na rede elétrica e também para a avaliação de equipamentos, quanto à possibilidade de causarem oscilações nas tensões e na iluminação, a níveis perceptíveis ao olho humano, os chamados *flicker*<sup>1</sup>. A norma IEC 1000-4-11 [2] estabelece padrões para ensaios de equipamentos cuja corrente por fase não exceda 16A. Esta norma aborda casos de variações acentuadas na amplitude da tensão como interrupções e quedas. A norma IEC 1000-4-28 [3] estabelece um método de teste para produtos que operam em sistemas elétricos onde há uma variação acentuada de frequência (até 15%). Um exemplo disto são os sistemas de geração isolada como em aviões, navios e até mesmo em casos onde a força motriz usada para acionar o gerador é obtida por um motor a combustão. Dado o uso crescente na utilização de sistemas ininterruptos de alimentação (UPS) [4], existem normas específicas para estes tipos de equipamentos. Os ensaios mais comumente aplicados são regidos pela IEC 62040-2 e pela EN 50091-2, que são normas de compatibilidade eletromagnética, e a IEC 62040-3 e a EN 50091-3, que definem testes e métodos de ensaio e limites de desempenho para as formas de onda de saída em relação a variações na entrada.

Instrumentos em aviões militares e comerciais devem operar de modo adequado mesmo em casos de transientes ou qualquer problema no sistema elétrico de alimentação. Neste sentido algumas normas como a MIL-STD-704E e RTCA/DO-160 [5], especificam limites elétricos de funcionamento normais, de emergência e de funcionamento anormal para estes instrumentos.

Em equipamentos a base de materiais magnéticos como transformadores e motores elétricos, o ensaio pode ser útil para a avaliação das suas características, principalmente quanto ao nível de saturação e aquecimento. Em motores elétricos, por exemplo, o aquecimento tem como causa principal as componentes harmônicas de corrente na rede

---

<sup>1</sup> Flutuação na iluminação perceptível ao olho humano

elétrica. Estas harmônicas significam também a presença de uma componente de seqüência de fase negativa, a qual provoca vibrações no motor devido a torques negativos em relação ao produzido pela freqüência fundamental. Algumas normas aplicadas ao ensaio de máquinas elétricas são a IEC 112-B e IEC 112-E.

A norma ANSI/ASAE EP455 [6] especifica testes para os mais diversos componentes eletro-eletrônicos utilizados na agricultura. São também determinados os limites de resistência mecânica à vibração de peças automotrizes. O uso de uma Fonte Potência CA neste caso é reservado ao acionamento do vibrador eletromecânico como em Chen *et al* [7] e DellaFlora e Grundling [8].

Uma estrutura de uma Fonte de Potência CA é dada Figura 1.1. De um modo geral a implementação é feita por estágios que envolvem a isolação e alguma etapa de correção de fator de potência, um estágio de conversão de energia e o estágio de saída. Dependendo das características de desempenho elétrico exigidos pela norma a ser aplicada aos ensaios, os estágios apresentados podem ser implementados de modo diferente. Deste modo, dada à variedade de possibilidades para a implementação de Fontes de Potência CA, algumas considerações podem ser feitas para diferenciá-las do ponto de vista topológico. Uma forma de classificar as Fontes de Potência CA é quanto ao modo pelo qual a etapa de amplificação é realizada. Em fontes lineares, esta etapa é realizada por um amplificador linear, onde transistores de potência operam na região linear, sintetizando uma forma de onda que é repassada a carga por meio de transformadores. A fim de aumentar a densidade de potência, muitas Fontes de Potência CA passaram a ser implementadas por um amplificador comutado ou não-linear como em Low [9] e Broeck e Lurkens [10], caracterizando as fontes não-lineares, bastante difundidas e comercializadas atualmente.

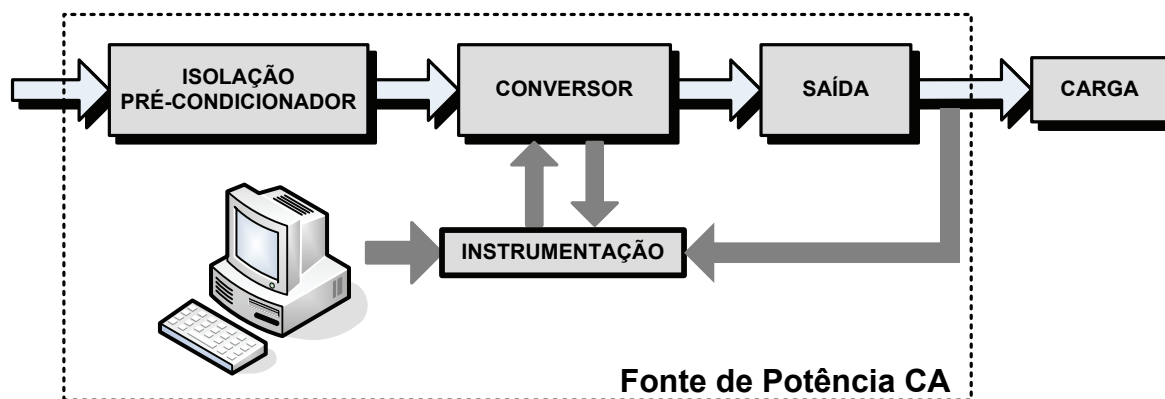


Figura 1.1: Diagrama representativo de uma Fonte de Potência CA

Em fontes não-lineares, um amplificador a base de comutação de chaves eletrônicas, sintetiza a forma de onda por meio de uma modulação, geralmente por largura de pulso, é a chamada modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). A forma de onda modulada na saída do amplificador apresenta um conteúdo harmônico tal, que para esta aplicação a filtragem é imprescindível para o aproveitamento pela carga. Em Fontes de Potência CA esta função é realizada no estágio de saída por um filtro passa-baixas indutivo-capacitivo (filtro LC). Em fontes lineares, o estágio de saída compreende a isolação da forma de onda gerada por meio de transformadores.

No estágio de entrada, é feita a correção do fator de potência e a conversão CA-CC de modo a prover um barramento com tensão constante e *ripple* (flutuação da forma de onda em estado permanente, após os transitórios) mínimo, para o estágio de amplificação. O circuito para correção do fator de potência é usado para compensar as não linearidades causadas pelas etapas de retificação e também de amplificação para o caso de fontes não-lineares.

A malha de controle de uma Fonte de Potência CA compreende toda uma seqüência de etapas que vai desde a aquisição das grandezas elétricas a serem medidas, o condicionamento destes sinais e o cálculo da ação de controle por meio de um controlador, analógico ou discreto. A saída do controlador é injetada na planta por meio de um atuador, que no caso é o amplificador. Cabe ressaltar que as Fontes de Potência CA, na sua grande maioria, possuem um sistema supervisorio. Este sistema é um programa implementado em um microcontrolador ou computador que pode responder pelo cálculo do controlador, interface entre o usuário e o equipamento, programação de formas de onda, leitura dos resultados, impressão de relatórios e outras.

De um modo geral, em ensaios que utilizam Fontes de Potência CA, a distorção harmônica máxima permitida fica em torno de 1 a 2%. Este requerimento pode ser difícil de ser atendido, principalmente em equipamentos baseados em inversores, com cargas de comportamento não-linear e mesmo variantes no tempo. Deste modo, quanto maior a banda passante do filtro de saída da fonte CA, maior é a distorção harmônica total, ou THD, da forma de onda modulada em PWM.

Para a redução da THD a níveis aceitáveis, as Fontes de Potência CA não-lineares possuem em geral um inversor comutando a taxas de dezenas de quilohertz como em Low [9] e Tzou *et al* [11], o que facilita a filtragem das componentes harmônicas oriundas da comutação. Para a compensação de distorções causadas por cargas, controladores de elevado desempenho devem ser aplicados. O desempenho neste caso refere-se à rápida resposta transitória e baixo erro de rastreamento mesmo em presença de cargas não-lineares ou com



dinâmicas não-modeladas. Neste sentido Low [12] implementa um controlador por modos deslizantes (*Sliding Mode Control*) para uma Fonte de Potência CA monofásica. Este controlador garante robustez ao sistema em malha fechada, mesmo na presença de variações paramétricas no sistema e distúrbios externos. O mesmo autor em [9] desenvolve um controlador preditivo generalizado ou GPC (*Generalized Predictive Control*), para reduzir o erro em regime permanente. Em ambos os casos, o modelo do sistema é utilizado para o projeto do controlador, o que pode representar um problema quando da inserção de cargas não-lineares.

O filtro de saída de uma Fonte de Potência CA tem a função de filtragem da forma de onda da tensão modulada em PWM, de modo a fornecer à carga uma forma de onda cujo conteúdo harmônico oriundo da comutação seja o menor possível. Entretanto, dinâmicas não modeladas inerentes à planta e carga podem comprometer o desempenho do sistema em malha-fechada deteriorando a resposta do controlador e o levando em muitos, casos à instabilidade. Com o objetivo de conferir robustez à planta em malha fechada, Carati *et al* [13] aplicaram, um Controle Adaptativo Robusto por Modelo de Referência ou RMRAC (*Robust Model Reference Adaptive Control*) com uma ação repetitiva, para o controle de uma Fonte de Potência CA. Neste controlador, a adaptação paramétrica do controlador RMRAC compensa eventuais dinâmicas da planta diferentes das de um modelo de referência, e a ação repetitiva compensa não linearidades cíclicas como as que ocorrem quando da inserção de uma carga retificada. A mesma estrutura de controle foi usada por Richter *et al* [14], onde um controlador MIMO-RMRAC com ação repetitiva foi aplicado no controle de uma Fonte de Potência CA trifásica, o qual demonstrou boa resposta com um baixo erro de rastreamento mesmo em condições de carga não-linear.

Com o objetivo de obter uma boa resposta transitória e com baixo erro em regime permanente, Tzou *et al* [11] utilizaram um controle por alocação de pólos via retroação de estados. Esta técnica garante uma rápida resposta transitória com capacidade de rejeição de distúrbios. Uma ação repetitiva também foi adicionada de modo a minimizar o erro em regime permanente.

Apesar das aplicações existentes para as Fontes de Potência CA, são poucos os trabalhos científicos que abordam o assunto, tanto que muitas das referências aqui citadas são referentes a fabricantes comerciais e normas internacionais. Neste sentido, este trabalho procura apresentar uma contribuição ao estudo de Fontes de Potência CA, apresentando aspectos relativos à implementação e ao controle. Para isto, foi desenvolvido um protótipo trifásico que foi aplicado na geração de distúrbios e distorções comumente encontrados em

sistemas elétricos de alimentação. Este protótipo é baseado em um inversor de tensão a quatro braços, onde as tensões de fase podem ter sua amplitude alterada de modo mais acentuado devido à capacidade de condução de corrente de neutro.

Um controlador RMRAC foi utilizado para o controle do sistema em malha fechada, o qual foi modelado em coordenadas “abc” como três sistemas SISO, e implementado em um DSP de ponto fixo de 32 bits. Foram apresentados e discutidos os principais pontos críticos da implementação de uma Fonte de Potência CA, que são relativos principalmente à topologia do conversor e filtro utilizados.

Na seqüência este trabalho é organizado como segue. O Capítulo 2 mostra algumas normas em cujos testes as Fontes de Potência CA podem ser aplicados. Também neste capítulo são apresentadas algumas características elétricas dos equipamentos comerciais e topologias de equipamentos. O Capítulo 3 trata da modelagem da planta e da descrição da implementação da modulação *space vector*, e o Capítulo 4 apresenta o controlador RMRAC. No Capítulo 5 são obtidos resultados por simulação, a fim de testar o desempenho do controlador numa etapa anterior à da implementação no DSP. O protótipo desenvolvido é descrito no Capítulo 6. Os resultados experimentais obtidos são apresentados no Capítulo 7 e o Capítulo 9 conclui o trabalho.

## CAPÍTULO 2

# FONTES DE POTÊNCIA CA

---

As Fontes de Potência CA são equipamentos utilizados em testes ou em qualquer aplicação onde é necessária a geração de formas de onda periódicas e principalmente senoidais. Como exemplos podem-se citar formas de onda senoidais e senoidais com harmônicas, com amplitudes e frequências diferentes do padrão disponível no sistema elétrico de distribuição e mesmo formas de onda desbalanceadas. A maioria das normas especifica os limites de THD da fonte CA utilizada para o ensaio. Entretanto, de um modo geral, pode-se dizer que a forma de onda deve possuir uma baixa distorção harmônica tal que sua interferência no resultado do teste seja a mínima possível. Não é por acaso que a grande maioria das Fontes de Potência CA possuem uma THD menor que 1%, como por exemplo, os equipamentos utilizados em ensaios de suscetibilidade a distorção harmônica. É importante salientar que do ponto de vista de mercado, as Fontes de Potência CA aplicadas ao ensaio de equipamentos segundo normas mais avançadas, possuem em geral uma interface de comunicação com uma plataforma computadorizada ou com um DSP.

### 2.1 Aplicações

No capítulo anterior foram citadas algumas aplicações e normas que fazem uso de uma Fonte de Potência CA para a execução de tarefas de ensaio. Algumas destas se encontram mais detalhadas neste capítulo. Com o objetivo de apontar para aplicações e níveis de desempenho necessários a este tipo de equipamento.

a) *Ensaio de Vibração*: Esta aplicação refere-se ao ensaio de vibração de peças e equipamentos. Uma norma que estabelece diretrizes para este tipo de ensaio é a ANSI/ASAE EP455 [6] que é utilizada, além de outras aplicações, para testes de peças de máquinas agrícolas. Neste tipo de ensaio, o equipamento a ser testado ou EUT (*Equipment Under Test*) é fixado sobre a mesa vibratória, sendo esta acionada pela fonte de potência CA como mostrado na Figura 2.1. Alguns exemplos típicos de ensaios estabelecidos por esta norma são:

**Exemplo:**

Ensaio senoidal com varredura logarítmica desde 10 a 2000Hz;

Ensaio com deslocamento controlado de 10Hz a 55Hz;

Busca dos pontos de ressonância do componente em teste;

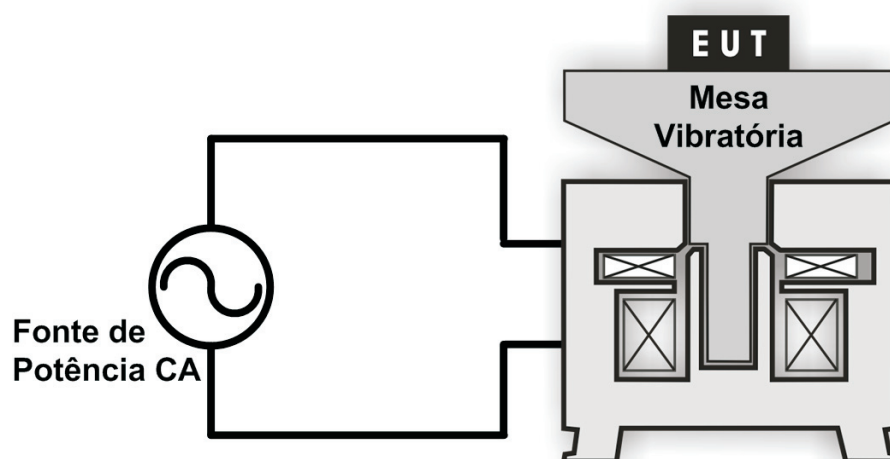


Figura 2.1: Configuração usada para ensaios de vibração

b) *Injeção de Harmônicas*: Neste tipo de ensaio, um equipamento em teste ou também chamado EUT (*Equipment Under Test*), é avaliado quando da inserção de componentes harmônicas na forma de onda de alimentação. Um exemplo é a norma de IEC 1000-3-2 [1]. Entre outros parâmetros, esta norma define os limites para as correntes harmônicas para quatro classes de equipamentos:

- **Classe A:** Circuitos de acionamento de Motores;
- **Classe B:** Ferramentas elétricas portáteis que operam diretamente da rede de  $230V_{CA}$ ;
- **Classe C:** Equipamentos de iluminação com potência de entrada  $>25W$ ;
- **Classe D:** Equipamentos com níveis de potência entre 75-600W (inclui TV's, computadores);

Os limites para as correntes harmônicas para cada classe desses equipamentos são mostrados na Tabela 2.1. Para testes segundo esta norma, a configuração do circuito é mostrada na Figura 2.2. Este circuito é baseado na Fonte de Potência CA, que gera as formas de onda com harmônicos, em um circuito de medição e no EUT.

Tabela 2.1 – Limites das harmônicas de corrente segundo a norma IEC1000-3-2

Ordem da Harmônica (n)	IEC1000-3-2			
	Classe A Arms	Classe B Arms	Classe C % da fundamental	Classe D <sup>2</sup>
2	1,080	1,620	2%	---
3	2,300	3,450	30 x FP <sup>3</sup> %	<b>3,4 mA/Watt</b>
4	0,430	0,645	---	---
5	1,140	2,160	10%	<b>1,9 mA/Watt</b>
6	0,300	0,450	---	---
7	0,770	1,155	7%	<b>1,0 mA/Watt</b>
8	0,230	0,345	---	---
9	0,400	0,600	5%	<b>0,5 mA/Watt</b>
10	0,184	0,276	---	---
11	0,330	0,495	3%	<b>0,35 mA/Watt</b>
12	0,153	0,230	---	---
13	0,210	0,315	3%	<b>0,296 mA/Watt</b>
<b>Pares (14-40)</b>	1,84/n	2,760/n	---	---
<b>Ímpares(15-39)</b>	2,25/n	3,338/n	3%	<b>3,85/n (mA/Watt)</b>

Fonte: [15].

<sup>2</sup> mA/Watt da potência de entrada (75-600W)

<sup>3</sup> FP é o fator de potência

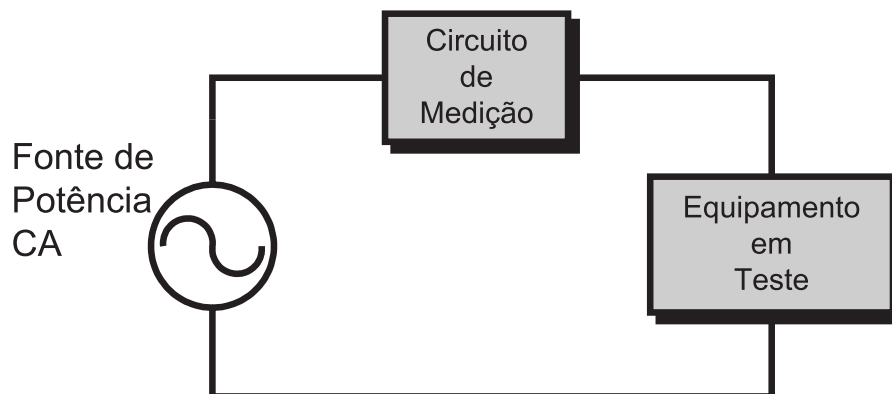


Figura 2.2: Circuito de ensaio segundo a norma IEC1000-3-2

Fontes de Potência CA aplicadas a este tipo de teste devem influenciar o mínimo possível as correntes harmônicas. Para isto, a norma IEC 1000-3-2, também define os limites máximos de distorção permitidos para a Fonte de Potência CA. A Tabela 2.2 mostra estes valores.

Tabela 2.2 – Distorções máximas com o EUT conectado

Harmônica n°.	Distorção
3	0,9%
5	0,4%
7	0,3%
9	0,2%
Pares de 2 – 10	0,2%
Ímpares de 11 – 40	0,1%

Além dos requisitos relativos à THD da forma de onda de saída, a baixa impedância de saída também é um requerimento importante:

*c) Redução de “flicker” no Sistema de Iluminação:* Existem normas para estabelecer limites para as oscilações na iluminação perceptíveis ao olho humano, os chamados *flicker*. Estas oscilações se originam da flutuação na tensão de alimentação nos sistemas de iluminação. Algumas causas de flutuações na tensão são relacionadas aos picos de corrente em fornos industriais, aparelhos de ar-condicionado e aquecedores de água, por exemplo. Uma norma de compatibilidade eletromagnética utilizada é a IEC 1000-3-3 [1]. Esta norma define as condições de medição, requerimentos da

Fonte de Potência CA, flutuação de tensão e limites de *flicker* para ensaios que medem a capacidade de um equipamento eletrônico causar alterações na tensão da rede.

Testes baseados nesta norma alguns destes índices:

- **$P_{st}$  (Short-term flicker):** Este é um termo que indica a percepção do olho humano a variações percentuais de amplitude e frequência, na iluminação. A intensidade do *flicker* é avaliada num período de 10 minutos, no qual este índice é calculado. O valor máximo é  $P_{st}=1$ , valores maiores não são tolerados, significando que o equipamento, quando da inserção na rede elétrica, pode vir a causar variações não toleráveis. O gráfico da Figura 2.3 mostra a curva do  $P_{st}$ . Esta curva foi obtida submetendo pessoas a variações de iluminação numa dada frequência. Para cada condição de “flutuação de tensão por minuto” e “percentagem de variação”, foi estabelecido um ponto que é o limite  $P_{st}=1$  para aquelas condições, e assim para os demais casos. Nota-se que para variações em torno de 17Hz (1052 flutuações por minuto), o olho humano é mais perceptível, pois para uma menor variação percentual (3%) o índice  $P_{st}=1$ .

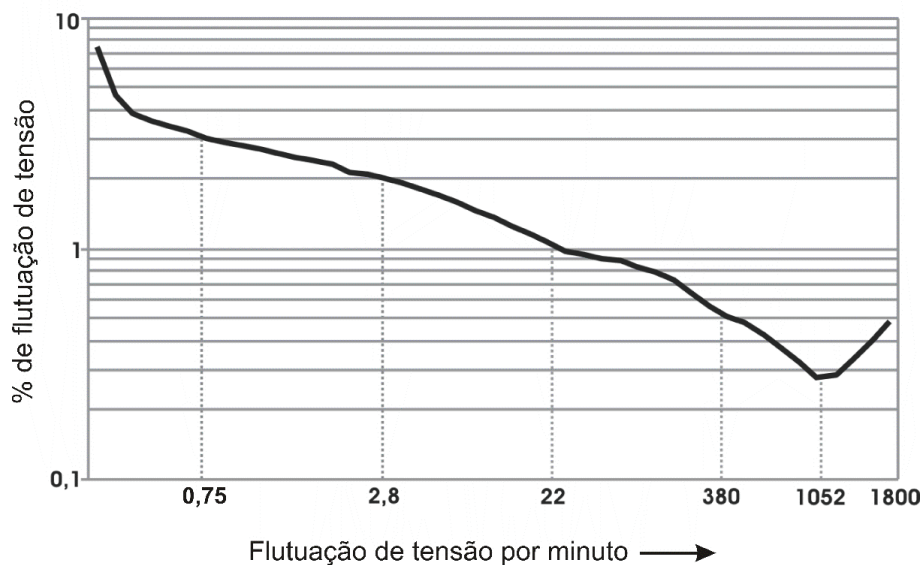


Figura 2.3: Curva de Perceptibilidade Humana a variações na iluminação ([15])

- **$P_{lt}$  (Long-term flicker):** O equipamento é avaliado durante 2 horas com vários valores de  $P_{st}$ ,  $P_{lt} \leq 0,65$  é o valor limite. Para equipamentos que consomem altos picos de corrente e causam alterações na tensão, e podem

causar *Flicker* na iluminação, os termos  $P_{st}$  e  $P_{lt}$  não são utilizados. Entretanto, utilizam-se os parâmetros  $d_c$ ,  $d(t)$  e  $d_{max}$ , com os limites máximos multiplicados por 1,33;

- **$d_c$  (Alteração relativa de tensão em regime permanente):** É a diferença relativa entre duas tensões adjacentes.  $d_c$  deve ter um valor  $\leq 3\%$ ;
- **$d(t)$  (Alteração relativa da tensão):** A alteração da tensão em rms relativa ao seu valor nominal. O valor limite é  $d(t) \leq 3\%$ ;
- **$d_{max}$ :** É a diferença entre os valores rms máximo e mínimo relativos ao valor nominal,  $d_{max}$  deve ser  $\leq 3\%$ ;

O circuito de medição e teste de *flickers* causados por um equipamento conectado a um circuito elétrico, é mostrado na Figura 2.4. Em ensaios como este, é necessária a inserção de uma impedância de referência que é determinada pela norma IEC-725, cujos valores são  $0,4+j0,25\Omega$  para redes monofásicas e  $0,24+j0,15\Omega$  (linha) e  $0,16+j0,10\Omega$  (neutro) para trifásicas.

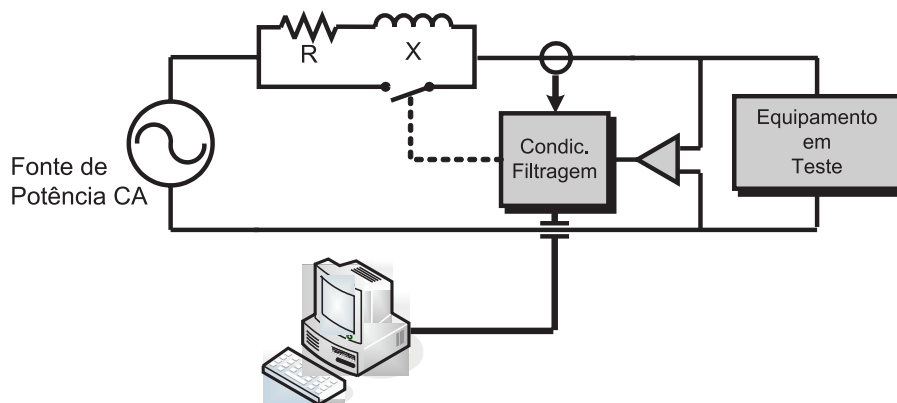


Figura 2.4: Circuito de teste de *flicker* de acordo com a IEC-725

Apesar da impedância em série  $R+jX$  adicionada, a norma IEC1000-3-3 estabelece que Fontes de Potência CA dedicadas a este tipo de ensaio devem possuir a impedância de saída menor possível. Além disso, são características desejáveis, uma distorção harmônica total menor que 3% e uma variação máxima de 2% da tensão de saída em torno do valor nominal com carga constante;



d) *Quedas de Tensão e Interrupções*: A norma IEC 61000-4-11 é uma norma geral que define testes segundo a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Níveis de teste para quedas e interrupções curtas

Norma	Categoria do Produto	Níveis de Teste	Critério de falha
EN50082-1: 1997	Imunidade – Residencial, comercial e de iluminação Industrial	0% (0V) por 5 seg. 70% para 10ms. 40% para 100ms.	C B C
EN50082-2: 1995	Imunidade – Industrial	N/A	N/A
EN50082-2:	Imunidade – Industrial	0% (0V) por 5 seg. 70% para 10ms. 40% para 100ms.	C B C
EN50082-1997	Imunidade para equipamentos elétricos destinados a profissionais, processos industriais e didáticos.	0% (0V) por 1 ciclo. 0% para 0,5 ciclo 0° 0% para 0,5 ciclo 180°	
EN50082-1997	Imunidade para equipamentos domésticos e similares	0% (0V) por 10 ms. 70% para 1000ms. 40% para 200ms.	Especificado pelo fabricante

Fonte: [16].

As quedas de tensão e interrupções podem ter várias causas. Muitas vezes, as interrupções são causadas por cargas que acionam disjuntores, fazendo com que os aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao circuito elétrico sofram esta influência. Existem outras causas mais remotas como, por exemplo, as quedas de energia devido a fenômenos naturais, como tempestades e contato de condutores entre si na rede de distribuição. Em casos de falta no sistema de distribuição, um circuito de recuperação

automático é acionado ciclicamente para tentar normalizar o fornecimento. Isto pode causar uma seqüência de curtas interrupções de tensão. As flutuações na tensão são tipicamente causadas por cargas cuja potência consumida varia continuamente. Testes de imunidade às interrupções e flutuações de tensão são requerimentos importantes para garantir um produto que se mantenha em operação mesmo na presença destes tipos de problemas. A IEC 61000-4-11 é uma norma aplicada ao ensaio de equipamento cujos níveis de corrente elétrica não excedam 16A. Além de definir os métodos de geração e aplicação dos testes de interrupções e flutuação na tensão, esta norma define os níveis de tensão utilizados.

e) *Variação de freqüência*: Em casos como o de sistemas de geração isolados, a freqüência da tensão fornecida pode variar significativamente em relação ao que ocorre na rede elétrica. A norma IEC 61000-4-28 é uma norma que trata de especificações para testes de imunidade a variação de freqüência. Esta norma define classes de equipamentos para testes como mostrado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classificação dos equipamentos segundo a norma IEC61000-4-28

Classe	Descrição
Classe1	Equipamentos sensíveis que são geralmente alimentados por equipamentos como UPS's.
Classe2	Equipamentos utilizados na indústria, onde os níveis de compatibilidade são os mesmos que os conectados à rede pública.
Classe3	Equipamentos usados na indústria, onde motores, máquinas de solda e cargas similares estão presentes.
ClasseX	Equipamentos que compartilham a mesma rede com cargas que provocam grandes distúrbios, como por exemplo, fornos elétricos.

Fonte: [16].

A alteração na freqüência é aplicada num período de 120 segundos, com um intervalo de tempo mínimo de 60 segundos entre cada variação. A variação de freqüência deve ocorrer na passagem por zero, com um tempo de transição de 10

segundos. A Tabela 2.5 mostra a relação da variação percentual em função do tipo de equipamento a ser ensaiado.

Tabela 2.5 – Variação de freqüência

Nível do teste	Classificação do ambiente	Variação de freqüência
Nível1	Classes 2 e 3	$\pm 3\%$ da freq. nominal
Nível2	Classes 2 e 3	+4% e -6% da freq. nominal
Nível3	Equipamentos usados em redes não interligadas	$\pm 15\%$ da freq. nominal
NívelX	Classe específica de produtos	Aberto

Fonte: [16].

A Tabela 2.6 mostra os critérios para avaliação do equipamento em teste. De um modo geral, o EUT deve manter o funcionamento sem danificação durante o teste.

Tabela 2.6 – Avaliação do resultado num ensaio segundo a norma IEC 61000-4-28

Critério A:	O EUT deve manter a operação normalmente e dentro das especificações do fabricante
Critério B:	O EUT opera normalmente após o teste. Não é permitida a alteração no estado de operação e nem a perda de dados (dependendo do equipamento), entretanto a perda de desempenho é aceitável.
Critério C:	O EUT opera normalmente, mas para isso requer a intervenção do usuário para restabelecer as condições de funcionamento, a perda de dados e desempenho é permitida.
Critério D:	Durante ou após o teste, o EUT sofre degradação ou mau funcionamento que não é recuperável devido à danos ao equipamento ( <i>hardware</i> ou <i>software</i> ) ou perda de dados.

Fonte: [16].

Para este tipo de aplicação, a Fonte de Potência CA utilizada deve ter uma amplitude de  $\pm 2\%$  da tensão nominal e a freqüência de  $\pm 0,3\%$ .

Tabela 2.7 – Tempos de teste para a norma MIL-STD-704

Teste			Tempo de teste
Regime Permanente			
	Tensão	Nível	3 min.
		Modulação	2 min.
		Desbalanceamento	3 min./fase
		<i>Ripple</i>	2 min.
	Fase	Desbalanceamento	3 min./fase
	Forma de Onda	Distorção	2 min.
	Frequência	Nível	3 min.
		Modulação	4 min.
Transiente			
	Tensão	Alta	6 seg.
		Baixa	6 seg.
	Frequência	Alta	19 seg.
		Baixa	19 seg.
Anormal			
	Tensão	Sobretensão	110 seg.
		Subtensão	110 seg.
	Frequência	Sobrefrequência	19 seg./Rev. E e 14 seg./Rev. D
		Subfrequência	19 seg./Rev. E e 14 seg./Rev. D
Emergência			
	Tensão		3 min.
	Frequência		3 min.

Fonte: [17].

f) *Normas MIL-STD-704 e RTCA/DO-160*: Estas normas são aplicadas a testes de equipamentos usados em navios e aviões. São definidos limites de variação nas formas de onda (amplitude, frequência, fase) em transitórios e em regime permanente. A Tabela 2.8 mostra os limites de operação em regime permanente, para

a norma RTCA/DO-160. Não foram obtidos dados relativos aos limites máximos de operação em regime permanente.

Tabela 2.8 – Valores limites em regime permanente segundo a norma MIL-STD-704

Modo	AC	DC	DC
Tensão	113-118V <sub>rms</sub>	24-29V <sub>DC</sub>	260-280V <sub>DC</sub>
Frequência	393-407Hz		
Variação de fase	116°-124°		
Desbalanceamento de Tensão	<3V <sub>rms</sub> máx.		
<i>Ripple</i>		<1,5V máx	<6 V máx

Fonte: [17].

Os tempos para cada tipo de teste da norma MIL-STD-704 são dados na Tabela 2.7. Para a norma RTCA/DO-160, como não foram obtidos valores limites para operação em regime permanente, os tempos de teste serão omitidos.

## 2.2 Topologias de Fontes de Potência CA e a Topologia Proposta

Nesta seção será feita uma breve revisão de topologias aplicáveis às Fontes de Potência CA e a descrição da topologia proposta que foi utilizada na implementação do protótipo. Não tendo o objetivo de fazer uma relação detalhada ou mesmo uma revisão acerca das topologias utilizadas, apenas serão abordados as principais topologias e os pontos principais que as distinguem.

A Figura 1.1 ilustra a estrutura de uma Fonte de Potência CA básica. Entretanto, as etapas envolvidas no processo de transferência e controle de energia elétrica, desde o estágio de entrada até a saída, podem ser realizadas de modo diferente. Apesar das diferentes especificações para cada aplicação, de um modo geral existe a necessidade de se fornecer uma tensão contínua com um *ripple* mínimo. Esta tensão contínua é então utilizada por um amplificador de potência na conversão em tensão ou corrente alternada para alimentar a carga. A Figura 2.5 mostra o diagrama de blocos representativo para as topologias existentes.

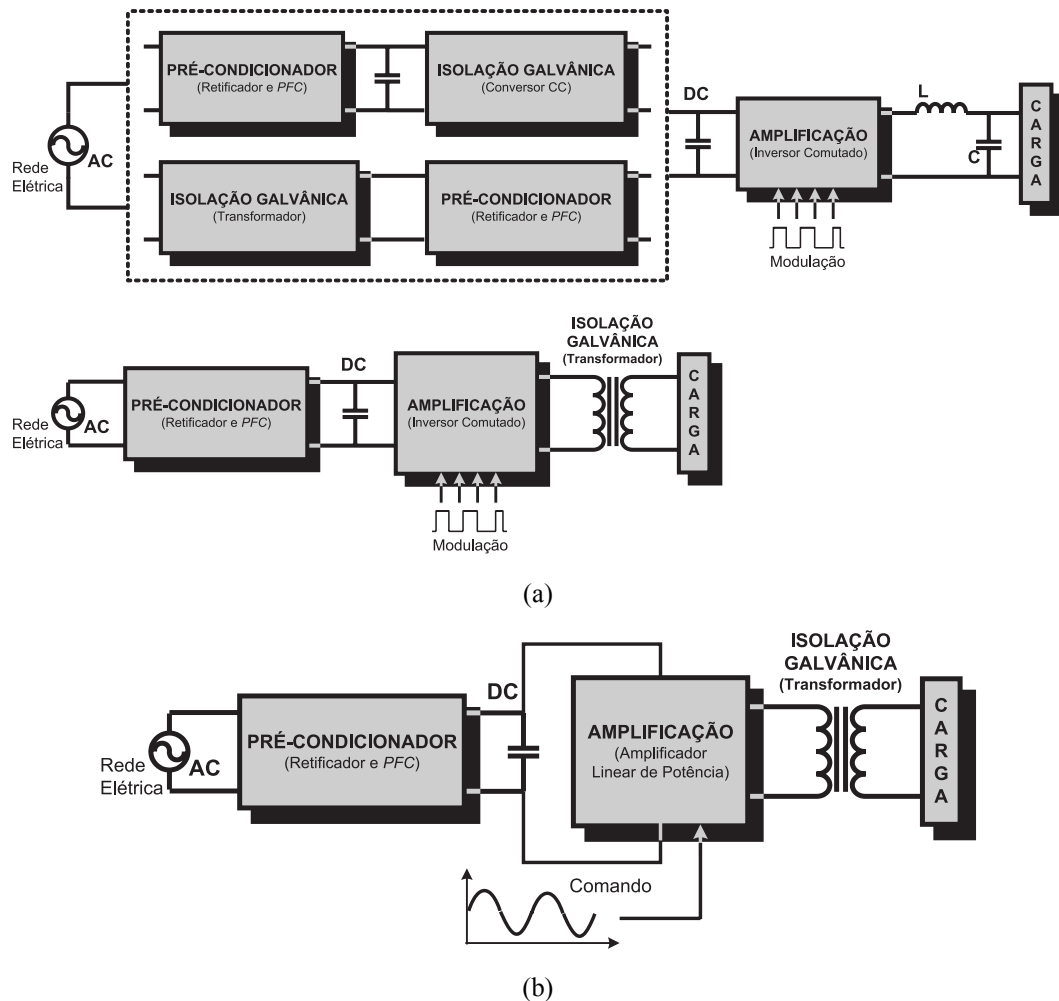


Figura 2.5: Fontes de Potência CA (a) não-lineares e (b) lineares

De acordo com uma pesquisa de mercado realizada, alguns resultados relativos aos estágios de entrada, saída e características gerais dos equipamentos comerciais foram obtidos e são resumidamente descritos a seguir:

*a) ESTÁGIO DE ENTRADA* – As Fontes de Potência CA demandam uma determinada característica de estágio de entrada em função do nível de potência do equipamento. Para potências maiores que 3kW a grande maioria dos equipamentos possui entrada trifásica. Isto cobre um percentual de 47% dos equipamentos analisados. Para potências menores a entrada é monofásica, o que representa um percentual de 36% e no restante dos equipamentos, 4% representa os que possuem entrada trifásica e monofásica e 3% os de entrada bifásica.

Em geral, as Fontes de Potência CA são projetadas para operarem com tensão de entrada na frequência de 50Hz ou 60Hz, visto que estes são os padrões de frequência do sistema de distribuição internacionais. Alguns fabricantes possuem equipamentos

que operam em 400Hz para aplicações em aviões e navios. A Figura 2.6 mostra as faixas de frequência da tensão de entrada e o número de fabricantes que produzem equipamentos para estas especificações.

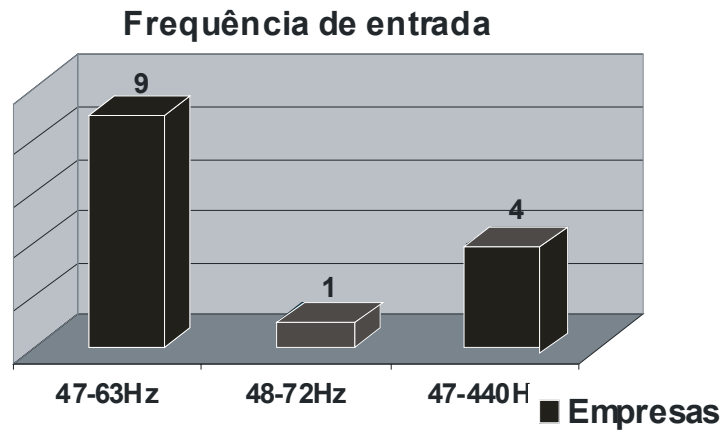


Figura 2.6: Número de fabricantes que informaram a característica de faixa de frequência da tensão de entrada para seus produtos

Quanto aos níveis de tensão, não é possível estabelecer uma tendência, visto que os equipamentos são projetados para atender um mercado consumidor específico. Devido a isto, encontram-se equipamentos que demandam tensões de 110V, 220V, 440V e valores próximos. Poucos equipamentos possuem níveis de tensão de entrada numa faixa mais ampla como 110-220V. A Tabela 2.9 mostra o número de equipamentos para cada faixa de tensão de entrada.

Quanto ao fator de potência, o gráfico da Figura 2.7 mostra o número de fabricantes e o fator de potência dos seus equipamentos. O número de equipamentos com fator de potência inferior a 0,75 é o maior, 32% contra 3% e 19% para os equipamentos com fator de potência entre 0,75-0,88 e maior que 0,88, respectivamente. Entretanto, apenas dois fabricantes produzem estes equipamentos.

Tabela 2.9: Número de equipamentos e faixa de tensão de entrada

Tensão de entrada	Número de equipamentos	Tensão de Entrada	Número de equipamentos
100	4	128/220	11
110	10	200/208	3
115	41	220/240	11
200	2	220/380	11
208	19	400/440	22
220	1	110/115/120	3
230	29	200/208/220	1
240	6	208/220/240	7
480	1	100/115/120/128	58
115/120	2	110/115/120/128	4
115/230	16	200/208/220/240	58
120/208	8	110/220/230/240	9

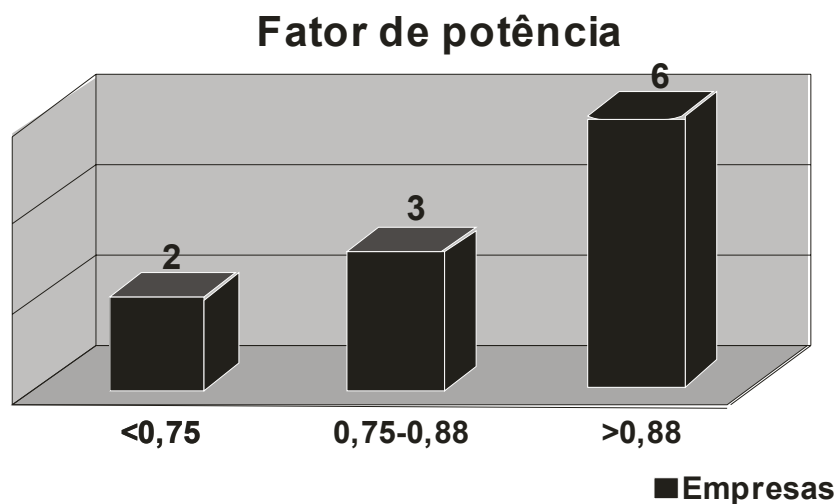


Figura 2.7: Fator de potência e número de fabricantes

A grande maioria das Fontes de Potência CA possui um circuito retificador na entrada, o que implica na injeção de harmônicos na rede elétrica. Deste modo, há uma tendência de que, por imposição de normas internacionais, os equipamentos eletro-eletrônicos mais atuais possuam um estágio de correção de fator de potência



ou PFC (*Power Factor Correction*). De acordo com a pesquisa mercadológica realizada, 15 a 20% dos equipamentos analisados possuem algum estágio PFC.

Outra característica importante é a regulação de linha, que relaciona a variação da tensão de saída com relação à variação da tensão de entrada, quanto menor o valor da regulação, menor a variação da tensão. Dos equipamentos que informam estes dados, 89% deles possuem uma regulação de linha inferior a 0,5%, 8% entre 0,5% e 1%. Apenas 1% dos equipamentos possui regulação superior a 1%.

*b) ESTÁGIO DE SAÍDA* – De um modo geral, o número de equipamentos monofásicos disponíveis no mercado tende a ser maior que para os demais. Em torno de 47% dos equipamentos possuem saída monofásica e 20% trifásica. Existem também equipamentos bifásicos, que representam um total de 7%. O restante é representado por equipamentos monofásicos modulares, que podem ser operados em cascata de modo a produzir uma saída trifásica ou em alguns casos com maior número de fases. Quanto aos níveis de tensão de saída, a maioria dos equipamentos possui capacidade de geração de 0-350V<sub>rms</sub>. A Tabela 2.10 mostra os dados obtidos.

Tabela 2.10: Tensão de saída, faixa de potência e número de equipam

	<1kW	1-5kW	5-10kW	10-50kW	>50kW
<b>0-150V</b>	3	1	0	0	0
<b>0-250V</b>	0	1	0	1	11
<b>0-350V</b>	51	104	46	35	11
<b>0-400V</b>	0	2	1	1	0
<b>Total</b>	<b>54</b>	<b>108</b>	<b>47</b>	<b>37</b>	<b>22</b>
<b>s/ inf.</b>	<b>5</b>				

Em muitos tipos de testes, a capacidade de geração de formas de onda com variação na frequência é uma especificação necessária. As frequências capazes de serem geradas, em geral, podem variar desde alguns hertz a até dezenas de quilohertz. A Tabela 2.11 mostra os valores percentuais baseados no número de equipamentos levantados na pesquisa mercadológica realizada.

Tabela 2.11: Frequência de saída (amostragem de 273 produtos)

Faixa de Frequência	Percentual informado
45-500Hz	36%
45-1000Hz	21%
45-3000Hz	16%
45-5000Hz	26%
> 5kHz	1%

Em equipamentos como Fontes de Potência CA, cuja grande aplicação é em ensaios de outros equipamentos ou sistemas, esta deve apresentar uma característica de fonte de tensão a mais ideal possível. Esta necessidade faz com que a tecnologia empregada na sua elaboração garanta, entre outras, uma THD menor possível. A THD é um parâmetro difícil de ser analisado em casos como o de Fontes de Potência CA, ao passo que num mesmo equipamento, ocorrem variações neste índice à medida que ocorrem variações na frequência e na amplitude das formas de onda. A Tabela 2.12 mostra o número de equipamentos para cada característica de potência e THD.

Tabela 2.12: Potência de saída e THD associada para os equipamentos informados

	<1kW	1-5kW	5-10kW	10-50kW	>50kW
<1%	32	36	10	4	10
1-1,99%	14	35	24	16	5
2-3%	3	18	8	12	8
>3%	3	8	2	0	0
<b>Total</b>	<b>52</b>	<b>97</b>	<b>44</b>	<b>23</b>	<b>23</b>
s/ inf.	25				

c) *CARACTERÍSTICAS DOS CIRCUITOS DE INSTRUMENTAÇÃO* – Muitas Fontes de Potência CA possuem medição e visualização de variáveis elétricas envolvidas. A Tabela 2.13 mostra a característica de medição e o número de equipamentos com esta característica.

Tabela 2.13: Variáveis medidas e número de equipamentos que possuem a medição

Faixa de Frequência	Equipamentos que Possuem medição	Equipamentos que não possuem medição
Fase	40	233
Frequência	121	152
Fator de Potência	52	221
Potência	151	122

A medição das variáveis elétricas é feita por meio de um conversor analógico-digital (A/D), cuja precisão está relacionada, entre outros, ao número de bits do conversor. Foi observada uma tendência em se utilizar um A/D de 14bits.

### 2.3 Sumário

Este capítulo apresenta a descrição de uma série de aplicações nas quais as Fontes de Potência CA podem ser inseridas. Muitas destas aplicações, apesar de não terem sido contempladas pelo trabalho, foram inseridas apenas para demonstrar a aplicabilidade e viabilidade do estudo e desenvolvimento deste tipo de equipamento. Procurou-se relacionar as topologias mais comuns que podem ser aplicados na implementação de Fontes de Potência CA, bem como as características elétricas dos equipamentos comerciais existentes no mercado. Os dados obtidos foram resultados de uma pesquisa de mercado realizada no grupo de pesquisa GEPOC (Grupo de Eletrônica de Potência e Controle), onde foram relacionados diversos fabricantes e produtos existentes no mercado mundial.

## MODELAGEM DO INVERSOR E FILTRO

Este capítulo trata da modelagem da planta e da estratégia de modulação empregada para o controle do inversor. Como mencionado em capítulos anteriores, neste trabalho foi utilizado uma topologia de inversor a quatro braços. Estes inversores de tensão têm sido aplicados até então na implementação de fontes de potência de elevado desempenho, principalmente para o controle do neutro em cargas desbalanceadas Zhang *et al* [18] ou em filtros ativo paralelo como em Quinn *et al* [19]. Neste trabalho, faz-se uso desta topologia para a geração de formas de onda desbalanceadas, o que é necessário em diversos testes de equipamentos eletro-eletrônicos.

O inversor de tensão a quatro fios com um filtro LC de saída é mostrado na Figura 3.1.

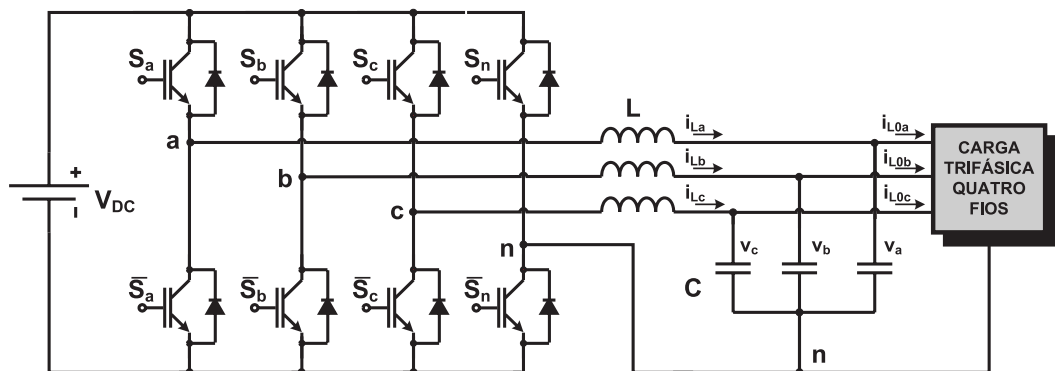


Figura 3.1: Inversor trifásico a quatro fios, filtro LC e carga

### 3.1 Modelagem da Planta

Para a modelagem matemática, a planta considerada é o filtro LC e uma carga R. Considerando como saída, as tensões de fase e como entrada as tensões geradas no centro de cada braço **a**, **b**, e **c** em relação ao centro do braço **n**, a planta pode ser modelada em função de transferência como

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}(s)\mathbf{U} \quad (3.1)$$

Em (3.1), os vetores de saída da planta  $\mathbf{Y}$  e o vetor de entrada  $\mathbf{U}$  são dados respectivamente por  $\mathbf{Y} = [V_a(s) \ V_b(s) \ V_c(s)]^T$  e  $\mathbf{U} = [U_a(s) \ U_b(s) \ U_c(s)]^T$ . A matriz  $\mathbf{G}(s)$  é formada por funções de transferência

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_a \omega_n s + \omega_n^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_b \omega_n s + \omega_n^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_c \omega_n s + \omega_n^2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde  $\omega_n = 1/\sqrt{LC}$  e  $\zeta_x = 1/2R_x \left( \sqrt{L/C} \right)$ . Nota-se em (3.2) que se o sistema é a quatro fios, o problema de controle fica simplificado, uma vez que este se reduz ao controle de três sistemas SISO desacoplados.

### 3.2 Estratégia de Modulação para o Inversor a Quatro Braços

A fim de sintetizar formas de onda a partir de inversores de tensão, técnicas de modulação têm sido estudadas durante décadas. A técnica de modulação que é amplamente aplicada a inversores de tensão é a baseada na largura de pulso, ou PWM. A modulação PWM se resume na determinação do tempo em que cada chave eletrônica permanece conduzindo durante um determinado intervalo de tempo fixo. Esta janela de tempo representa justamente a forma de onda modulada em largura de pulso.

Por muitas décadas, o PWM baseado em portadora senoidal foi amplamente utilizado em muitas aplicações, vide Bowes [20]. Com o avanço dos microcontroladores, a modulação *space vector* tornou-se uma técnica de modulação PWM muito utilizada em inversores. A relativa facilidade na implementação digital e a ampla faixa linear na modulação, são características notáveis desta técnica.

A apresentação da estratégia de modulação *space vector* será feita para um inversor quatro braços, já que esta foi a topologia utilizada na implementação do protótipo. Na

concepção do algoritmo de modulação, é assumido que no inversor da Figura 3.2, as chaves eletrônicas de cada braço são comutadas de modo complementar, ou seja, quando alguma das chaves eletrônicas superiores  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  ou  $S_n$  estiverem conduzindo, ou em nível lógico “1”, a chave correspondente  $\bar{S}_a$ ,  $\bar{S}_b$ ,  $\bar{S}_c$  ou  $\bar{S}_n$  deverá estar aberta, ou seja, em nível lógico “0”.

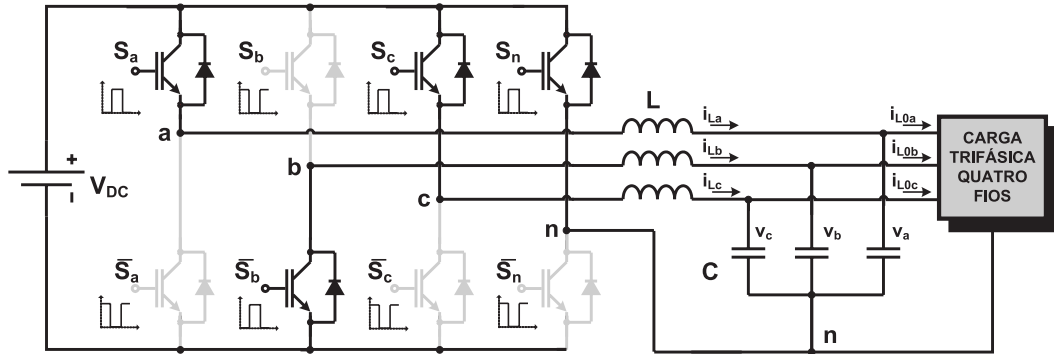


Figura 3.2: Inversor quatro-braços e planta a ser controlada

Considerando a operação complementar, existem 16 ( $2^4$ ) possíveis estados de comutação. No caso, a implementação foi realizada em coordenadas  $\alpha\beta O$ , que consiste em transformar as três tensões de fase  $v_{an}$ ,  $v_{bn}$  e  $v_{cn}$  em valores  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$  e  $v_O$  pela aplicação da transformação linear (3.3). A Tabela 3.1 mostra os possíveis estados de comutação e os valores das tensões de fase em coordenadas “abc” e “ $\alpha\beta O$ ”.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_O \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Tabela 3.1 – Estados de comutação, tensões de fase em “abc” e em coordenadas  $\alpha\beta O$ 

Vetores	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_n$	$v_{an}$	$v_{bn}$	$v_{cn}$	$v_\alpha$	$v_\beta$	$v_O$
$v^0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$v^1$	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	$-\sqrt{3}$
$v^2$	0	0	1	0	0	0	1	$-\frac{\sqrt{6}}{6}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^3$	0	0	1	1	-1	-1	0	$-\frac{\sqrt{6}}{6}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^4$	0	1	0	0	0	1	0	$-\frac{\sqrt{6}}{6}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^5$	0	1	0	1	-1	0	-1	$-\frac{\sqrt{6}}{6}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^6$	0	1	1	0	0	1	1	$-\frac{\sqrt{6}}{3}$	0	$2\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^7$	0	1	1	1	-1	0	0	$-\frac{\sqrt{6}}{3}$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^8$	1	0	0	0	1	0	0	$\frac{\sqrt{6}}{3}$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^9$	1	0	0	1	0	-1	-1	$\frac{\sqrt{6}}{3}$	0	$-2\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^{10}$	1	0	1	0	1	0	1	$-\frac{\sqrt{6}}{6}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$2\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^{11}$	1	0	1	1	0	-1	0	$\frac{\sqrt{6}}{6}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^{12}$	1	1	0	0	1	1	0	$\frac{\sqrt{6}}{6}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$2\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^{13}$	1	1	0	1	0	0	-1	$\frac{\sqrt{6}}{6}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
$v^{14}$	1	1	1	0	1	1	1	0	0	$\sqrt{3}$
$v^{15}$	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fonte: [21].

Na modulação *space vector* os vetores de comutação  $v^i$  para  $i = 0, \dots, 15$  mostrados na tabela anterior descrevem uma estrutura vetorial no  $\mathfrak{R}^3$ , como mostrado na Figura 3.3.

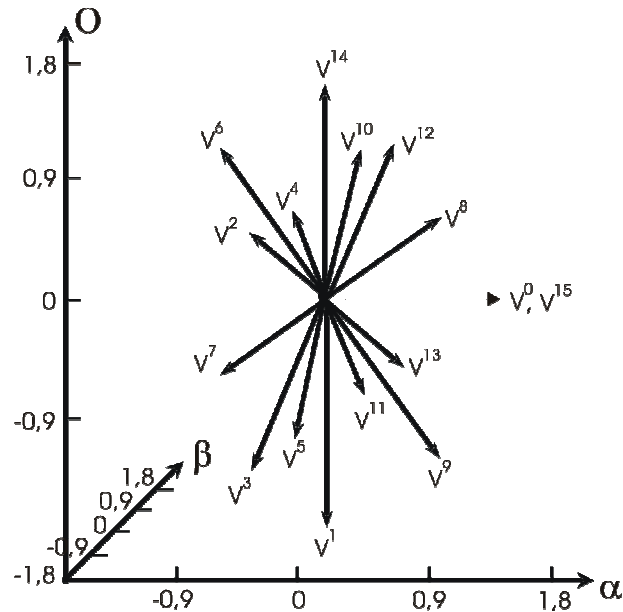


Figura 3.3: Possíveis vetores de comutação [21]

A cada período de comutação uma seqüência de vetores é implementada, sendo sua escolha feita com base no valor da lei de controle em coordenadas  $\alpha\beta O$ ,  $[v_\alpha \ v_\beta \ v_O]^T$ . Na escolha da seqüência de comutação, leva-se em conta os critérios desejados de desempenho para o inversor. A seqüência pode ser escolhida: para minimizar a THD de saída, diminuir as perdas de comutação, diminuir a complexidade de implementação ou de acordo com a capacidade de processamento disponível. Em geral, um número maior de comutações por período tende a diminuir a THD do PWM e aumentar as perdas por comutação, sendo necessário uma maior capacidade de processamento.

A Figura 3.3 forma um dodecaedro, onde é possível inscrever 24 setores. Para cada setor é especificada uma seqüência de vetores que irão sintetizar a ação de controle correspondente. Portanto, para uma dada forma de onda a ser modulada, basta saber em qual tetraedro ela está situada, para saber a correta seqüência de comutação.

Supõem-se, por exemplo, que para um período qualquer de comutação, a lei de controle  $[v_\alpha \ v_\beta \ v_O]^T$  está localizada no Setor 1, e que para este setor a seqüência de comutação escolhida é  $v^0, v^8, v^{12}, v^{14}, v^{15}, v^{14}, v^{12}, v^8, v^0$ . Para uma modulação PWM centrada, a forma de onda obtida é dada na Figura 3.4.



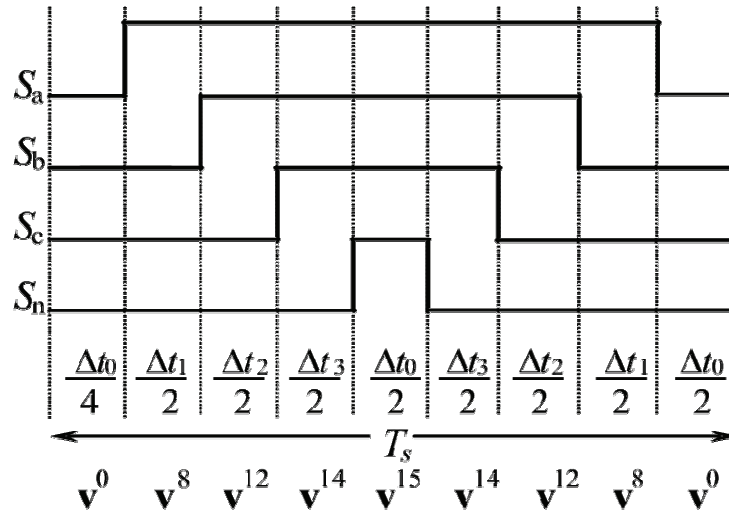


Figura 3.4: Seqüência de comutação para um PWM centrado

Note que os tempos onde cada vetor estabelece o comportamento do inversor são:

- $v^0/v^{15}$ :  $\Delta t_0$ ;
- $v^8$ :  $\Delta t_1$ ;
- $v^{12}$ :  $\Delta t_2$ ;
- $v^{14}$ :  $\Delta t_3$ ;

Para a identificação do setor ao qual uma lei de controle  $u_{\alpha\beta 0}$  pertence, são determinados os planos de separação.

O cálculo dos intervalos de tempo de atuação de cada vetor é dado como segue:

$$u_{\alpha\beta 0} = \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} v^8 & v^{12} & v^{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_1 & \Delta t_2 & \Delta t_3 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta t_1 & \Delta t_2 & \Delta t_3 \end{bmatrix}^T = T_s \begin{bmatrix} v^8 & v^{12} & v^{14} \end{bmatrix}^{-1}$$

Deste modo, de posse da matriz  $\begin{bmatrix} v^8 & v^{12} & v^{14} \end{bmatrix}^{-1}$ , podem-se determinar os intervalos de tempo  $\Delta t_1, \Delta t_2$  e  $\Delta t_3$  para os quais os vetores correspondentes acionam o inversor. O restante do tempo  $\Delta t_0 = T_s - (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3)$  é compartilhado pelos vetores nulos  $v^0/v^{15}$ . Estes vetores são assim denominados, pois em qualquer um dos casos a tensão na entrada do filtro é nula para todas as fases. A forma de onda PWM resultante está mostrada nas figuras abaixo.

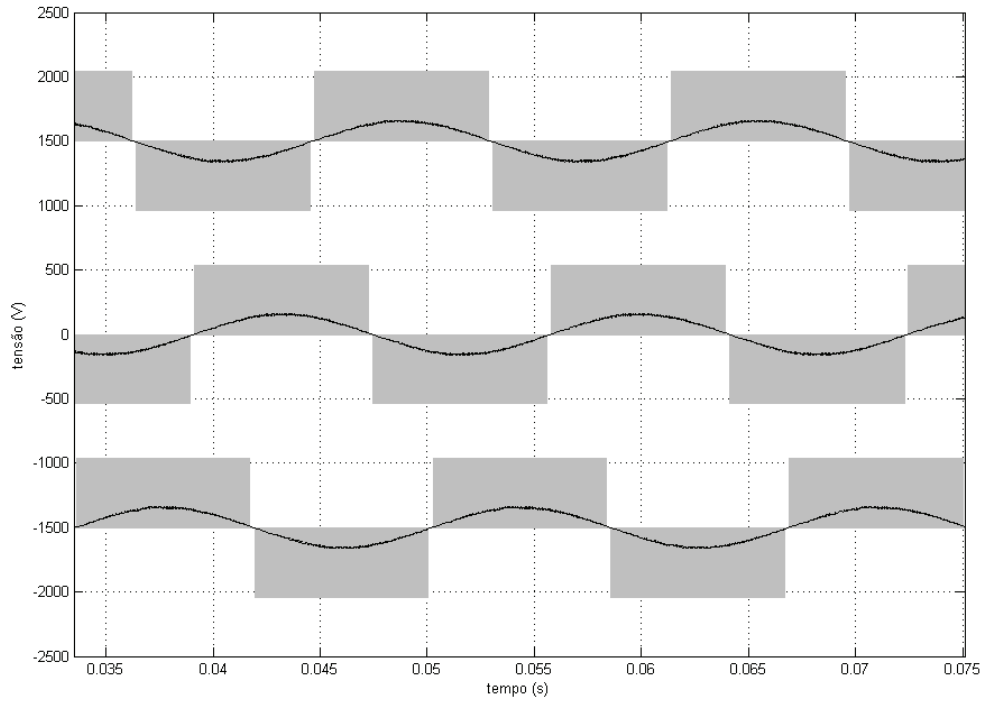


Figura 3.5: PWM trifásico de forma de onda modulada

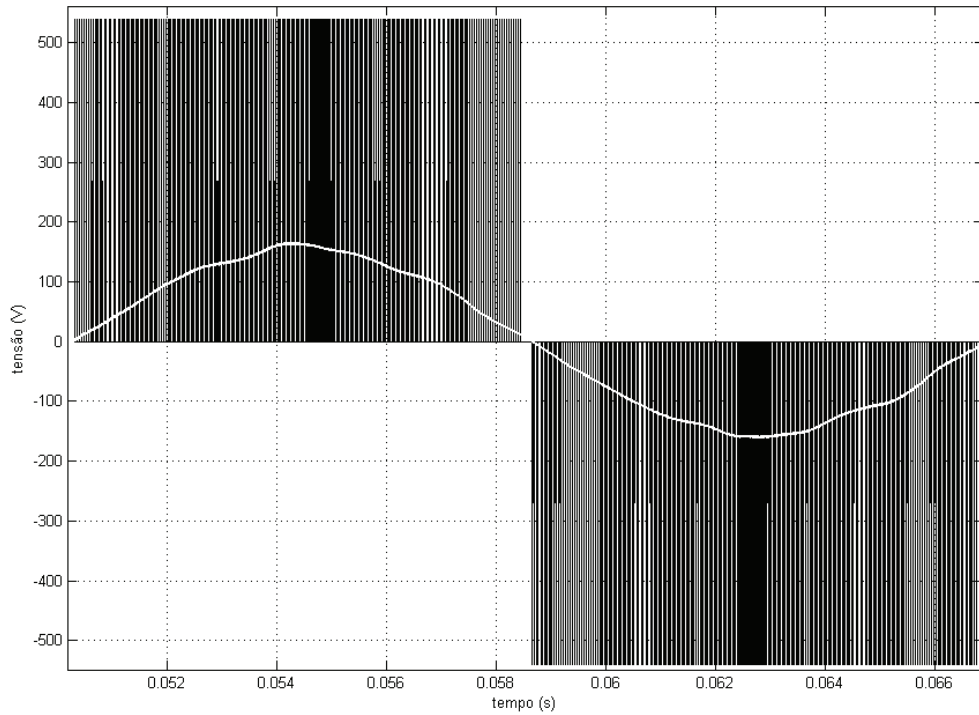


Figura 3.6: Detalhe de em um ciclo da fundamental par a figura anterior