**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

CLÁUDIO JOSÉ DE OLIVEIRA JÚNIOR

**Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de
passagem por semi ciclos otimizados**

**São Paulo
2006**

CLÁUDIO JOSÉ DE OLIVEIRA JÚNIOR

**Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de
passagem por semi ciclos otimizados**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de Potência
Orientador: Prof. Dr. Wilson Komatsu

São Paulo
2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de setembro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira Júnior, Cláudio José de

Controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem por semi-ciclos otimizados / C.J. de Oliveira Júnior. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006.

70 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

**1.Controle de potência por ciclos inteiros (Otimização)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.**

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Dedicatória

Á minha esposa Adriana, ao meu filho Mardoqueu e aos meus pais, Cláudio (em memória) e Ivone, com muito amor, carinho e admiração pela força, compreensão, presença e incansável apoio que me deram, e dão, não só na realização deste trabalho, como em toda a vida.

Agradecimentos

A Deus e à minha família por tudo.

Ao Prof. Dr. Wilson Komatsu, meu orientador, pela atenção, paciência e crédito dispensado ao meu trabalho e por sua importante definição e orientação.

Ao Prof. Dr. José Aquiles Baesso Grimoni, por possibilitar o acesso às normas técnicas da biblioteca do IEE-USP (Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP).

Ao Prof. Dr. Nelson Kagan pela oportunidade de participar do curso de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Rubens Gedraite por ensinar os primeiros passos e acreditar em minha capacidade.

Ao Prof. Dr. Antonio Del Priori pelo atendimento a atenção.

Ao Prof. Dr. Walter Kaiser por disponibilizar o Laboratório de Eletrônica de Potência e pela assessoria prestada.

Ao Prof. Dr. Lourenço Matakas Júnior e ao Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann pelas importantes observações e sugestões fornecidas.

Ao pessoal do Laboratório de Eletrônica de Potência, Fernando Ortiz Martinz, Maurício Galassi e Marco Antonio de Oliveira, que me ajudaram quando tive necessidade.

A todos os colaboradores da Lorenzetti, especialmente o Eng. Paulo Sérgio Valle de Carvalho e os Srs. João Adriano de Couto, José Antônio Langraff, Claudines Pivetta e Ivo Piccinato, que muito me ensinaram e ajudaram.

À Iceberg, na pessoa do Eng. Fábio Wolstein, pelo apoio prestado.

À Expertise Engenharia, na pessoa do Eng. Josué de Camargo, pelo empréstimo de instrumento de sua propriedade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Portanto, qualquer que me confessar diante dos homens, eu o confessarei diante de meu Pai, que está nos céus.”

Matheus – cap.10 – v.32

Resumo

Os modernos equipamentos elétricos de aquecimento de água de passagem, popularmente conhecidos como chuveiros, duchas ou aquecedores, possuem como elementos aquecedores resistências elétricas constituídas por um fio de liga metálica enrolado, geralmente em ferro-cromo-alumínio ou níquel-cromo. O controle da temperatura da água é usualmente realizado pelo controle do fluxo d'água e pela mudança das derivações (“taps”) presentes na resistência. A simplicidade deste controle se opõe à sua falta de flexibilidade para impor ajuste simultâneo de temperatura e vazão d'água. Um controle eletrônico de potência é oferecido como diferencial nos modelos mais sofisticados.

Os modelos atualmente existentes no mercado são implementados com controle eletrônico por ângulo de fase, e é sabido que esse tipo de controle gera problemas de distorção harmônica de corrente das redes de energia, com a presença de harmônicas superiores de corrente (acima da fundamental) cuja filtragem é de difícil implementação devido ao nível de potência envolvido e às dimensões físicas dos aparelhos de aquecimento.

Como alternativa a esse tipo de controle existe o controle por ciclos inteiros, o qual não gera harmônicas superiores de corrente, mas traz outro inconveniente, que é a produção de variação de tensão da rede de energia, que acarreta variação de luminosidade nas lâmpadas da instalação em níveis de frequência perceptíveis ao olho humano (fenômeno conhecido como cintilação ou “flicker”).

O objetivo do presente trabalho é propor uma solução otimizada ao controle de potência por ciclos inteiros, onde o mesmo é implementado por semi ciclos inteiros “otimizados” de forma a não gerar distorção harmônica nem cintilação de luminosidade perceptível ao olho humano.

Abstract

Modern electrical direct water heating (DWH) equipments use electrical resistances built with metal alloys (iron-chrome-aluminum or nickel-chrome) as heating elements. Water temperature control is usually made with water flow control, as well as with resistance tap changing. The simplicity of this approach conflicts with to the lack of flexibility to allow simultaneous control of both water flow and its temperature. Therefore, an electronic power control is usually found in more sophisticated models.

Usually the electronic power control is implemented by using phase angle control, which causes higher order current harmonics distortion of AC line currents, and filtering is difficult due to the high level of power involved and to the limited dimensions of typical electrical DWH equipment.

The alternative for this type of power control is the cycle-by-cycle power control, which does not generate higher order current harmonics but creates line voltage variation, which in turn provokes lighting level variation and resulting unsteadiness on visual sensation, also known as flicker.

The aim of the present work is to present an optimized solution for a half-cycle power control, in a way that does not generate harmonic distortion nor eye perceptible level of flicker.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE TABELAS.....	XIX
LISTA DE FIGURAS.....	XX
1) INTRODUÇÃO	1
2) ESTADO DA ARTE NAS TÉCNICAS DE CONTROLE DE POTÊNCIA EM AQUECEDORES ELÉTRICOS DE PASSAGEM	2
2.1) Controles de potência mecânicos	2
2.1.1) Controle de potência liga / desliga manual.....	2
2.1.2) Controle de potência liga / desliga automático.....	3
2.1.3) Controle de potência com chave seletora com haste dielétrica.....	3
2.1.4) Controle de potência com tampa giratória.....	6
2.1.5) Controle de potência com botões de acionamento	7
2.1.6) Controle de potência com microchaves.....	7
2.1.7) Controle de potência com ajuste da vazão no próprio aparelho	8
2.1.8) Controle de potência remoto com cabo de aço.....	9

2.2) Equipamentos com controle de potência eletrônico	9
2.2.1) Controle de potência por retificação com diodos	9
2.2.2) Controle de potência por ângulo de fase	10
2.2.2.1) Controle eletrônico por ângulo de fase com malha fechada	11
2.2.2.2) Controle eletrônico por ângulo de fase com comando remoto.....	12
2.2.2.3) Controle eletrônico por ângulo de fase com filtro “anti RFI”	13
2.2.3) Controle de potência por ciclos inteiros	14
2.3) Aquecedores elétricos de passagem com recursos especiais	15
2.3.1) Com pressurizador.....	15
2.3.2) Jato dirigível.....	16
3) CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS	17
3.1) Eliminação do “flicker” através da diminuição do período de repetição T – tentativa	17
3.1.1) Conceito	17
3.1.2) Análise.....	18
3.2) Proposta de solução para o efeito flicker: otimização do período de repetição T.....	19
3.2.1) Conceito	19
3.2.2) Análise do “flicker” de acordo com a Norma IEC-61000-3-3	21
3.2.3) Níveis de potência em função do número de elementos aquecedores	22
3.2.3.1) Definição	22
3.2.3.2) Formas de onda.....	23
4) RESULTADOS DE SIMULAÇÕES DO CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS.....	28
4.1) Harmônicos.....	28
4.1.1) Formas de onda de corrente.....	28
4.1.2) Plotagem de harmônicos.....	29
4.1.3) Interpretação dos valores simulados conforme a IEC-61000-3-4.....	31

4.2) Flicker	33
4.2.1) Ensaio de flicker	33
4.2.2) Análise de Flicker sob a ótica da IEC-61000-3-5	33
 5) RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS.....	45
5.1) Harmônicos.....	45
5.1.1) Ensaios iniciais para obtenção de formas de onda e espectros com carga de baixa potência	45
5.1.1.1) <i>Análise dos resultados em baixa potência</i>	48
5.1.2) Ensaios para obtenção de formas de onda e espectros com carga real de aquecedores elétricos	49
5.1.2.1) <i>Espectro de corrente / componentes harmônicos</i>	50
5.1.3) Análise dos resultados com carga real.....	54
5.2) Flicker	55
5.2.1) Gráficos	55
5.2.2) Análise dos resultados	56
5.2.3) Medição direta de “flicker” com um “flickermeter”	57
 6) CONCLUSÃO	60
 7) BIBLIOGRAFIA.....	61
 ANEXO A – EXEMPLOS DE IMPLEMENTAÇÃO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS ..	64
A.1) Diagrama de blocos do controle de potência por ciclos inteiros otimizados.....	64
A.2) Descrição dos blocos do controle eletrônico de potência por ciclos inteiros otimizados	64
A.3) Circuitos eletrônicos.....	65
A.3.1) Circuito eletrônico para um único elemento aquecedor	65
A.3.1.1) <i>Considerações sobre o circuito eletrônico com 1 elemento aquecedor (figura 5.2)</i>	68
A.3.2) Circuito eletrônico com dois elementos aquecedores	69

<i>A.3.2.1) Considerações sobre o circuito eletrônico com 2 elementos aquecedores (figura 5.4).....</i>	<i>70</i>
---	-----------

Lista de Siglas

1	IEC	International Electrotechnical Commission
2	INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
3	MU	Modelo de Utilidade
4	PI	Patente de Invenção
5	RFI	Radio frequency interference
6	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
7	UIE	Union Internationale pour Applications de Electricité
8	COBEP	Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência
9	IEV	International Electrotechnical Vocabulary
10	FAME	Fábrica de Aparelhos e Material Elétrico Ltda.
11	PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
12	EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

1	m.c.a.	metro de coluna de água
2	T1	período de tempo, dentro de t, no qual a forma de onda de corrente encontra-se ativa (ligada)
3	T	período total de repetição da senóide de corrente
4	Hz	hertz
5	s	segundo
6	RL	Relatório de Laboratório
7	ch/min	“changes per minute” ou variações por minuto
8	ΔV	variação de tensão eficaz na rede
9	CC	corrente contínua
10	T2	período otimizado da forma de onda de corrente para não gerar “flicker”
11	P	potência ativa do equipamento
12	$P_{\text{máx}}$	potência máxima do equipamento
13	ms	milissegundo
14	iB	corrente (potência) baixa (elemento aquecedor de menor potência);
15	iA	corrente (potência) alta (elemento aquecedor de maior potência).
16	PB	potência PB [menor, baixa]
17	PA	potência PA [maior, alta]
18	W	watt
19	N_s	número de “steps” ou número de níveis de potência
20	P_T	somatória de potência de todos elementos
21	mp	potência do elemento de menor potência

22	N_e	número de elementos aquecedores
23	p.u.	por unidade
24	fft	“Fast Fourier Transformer” ou Transformada Rápida de Fourier
25	CA	corrente alternada
26	THD	“total harmonic distortion” ou distorção harmônica total
27	PWHD	“partial weighted harmonic distortion” ou distorção harmônica parcial ponderada (PWHD) do sistema
28	I_n	corrente eficaz da componente harmônica de ordem “n”
29	n	ordem da componente harmônica
30	Σ	somatória
31	I_1	corrente eficaz da componente harmônica fundamental
32	R_{sce}	razão de curto circuito
33	S_{CC}	potência de curto circuito do sistema
34	S_{equ}	potência aparente nominal do equipamento
35	α	fator dependente do tipo de ligação
36	$U(t_1)$ e $U(t_2)$	dois valores sucessivos quaisquer de tensão eficaz
37	ΔU	diferença entre dois valores sucessivos quaisquer de tensão eficaz
38	ΔI	variação de corrente eficaz na carga
39	ΔI_p	parte ativa da variação de corrente ΔI na carga
40	ΔI_q	parte reativa da variação de corrente ΔI na carga
41	J	número complexo equivalente à raiz quadrada de -1
42	$I(t_1)$ e $I(t_2)$	dois valores sucessivos quaisquer de corrente na carga
43	Z	impedância complexa da rede
44	R	resistência elétrica da rede

45	X	reatância da rede
46	d	queda de tensão normalizada para a tensão eficaz nominal
47	V	volt
48	V_{rede}	tensão elétrica complexa da rede
49	V_p	parte ativa da tensão eficaz da rede
50	V_q	parte reativa da tensão eficaz da rede
51	Z_{carga}	impedância complexa da carga
52	R_{carga}	resistência elétrica da carga
53	X_{carga}	indutância da carga
54	P_{carga}	potência complexa da carga
55	Q	potência reativa da carga
56	VAr	volt-ampère reativo
57	Z_{total}	impedância complexa total da rede somada à impedância da carga
58	R_{ref}	resistência elétrica da rede
59	X_{ref}	reatância da rede
60	R_{total}	resistência elétrica da rede somada à resistência da carga
61	X_{total}	reatância da rede somada à da carga
62	I_{total}	corrente total complexa na carga
63	I_p	parte ativa da corrente total na carga
64	I_q	parte reativa da corrente total na carga
65	ΔV_p	parte ativa da variação de tensão eficaz na rede
66	ΔV_q	parte reativa da variação de tensão eficaz na rede
67	$d \%$	queda de tensão percentual normalizada para a tensão eficaz nominal
68	dQ	quantidade de calor necessária para produzir um incremento de temperatura $d\theta$ num corpo de massa m

69	cal	caloria
70	m	massa
71	kg	quilograma
72	c	calor específico
73	dθ	incremento de temperatura
74	°C	graus Celsius
75	dt	variação temporal
76	s ⁻¹	segundo elevado a -1, ou 1/s
77	V _z	vazão
78	kg/L	quilograma por litro
79	η	rendimento do aquecedor
80	K	kelvin
81	kW	quilowatt
82	L/min	litro por minuto
83	i (t)	corrente em função do tempo
84	v (t)	tensão em função do tempo
85	V _{ef}	tensão eficaz
86	C _n	capacitor
87	VDR	varistor
88	DZ _n	diodo zener
89	R _n	resistor
90	D _n	diodo
91	Q _n	transistor
92	CR	chave rotativa
93	C.I.	circuito integrado

94	VDD	terminal de alimentação do C.I. (pólo positivo)
95	VSS	terminal de alimentação do C.I. (pólo negativo)
96	TOCK	detetor de passagem por zero do C.I. que recebe o sinal da rede
97	P_n	portas de entrada lógica do C.I.
98	OSC_n	saída de sinal do C.I. para comutação da carga
99	MCLR	“reset” da memória do C.I.
100	PIC	família de microcontroladores da Microchip
101	A	ampère
102	mA	miliampère
103	kHz	quilohertz
104	Chuv.	chuveiro
105	Ch. $_n$	canal de osciloscópio
106	V_{ref}	tensão de referência
107	t	tempo
108	mm^2	milímetro quadrado
109	m	metro
110	P_{ST}	probabilidade de “flicker” tempo curto (“short time”)
111	Z_n	impedância dos cabos da rede
112	Lâmp.Inc.	Lâmpada incandescente
113	$P_{STmédio}$	Valor médio de medições de P_{st}
114	F	fator de forma
115	t_f	tempo de impressão de “flicker”
116	$d_{máx}$	queda de tensão máxima normalizada para a tensão eficaz nominal
117	T_P	período de tempo para avaliação de flicker
118	V_{LCD}	tensão eficaz na lâmpada com o chuveiro desligado

119	$Z_{\text{Lâmpada}}$	impedância da lâmpada
120	V_{BL}	tensão eficaz no ramo da lâmpada
121	V_{LCL}	tensão eficaz na lâmpada com o chuveiro ligado
122	Ω/km	ohms por quilômetro

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Níveis de potência em função da quantidade de elementos aquecedores.....	27
Tabela 4.1: Nível de harmônicos permissível para equipamentos com potência aparente nominal menor ou igual a 1/33 da potência de curto-circuito da instalação conforme tabela 1 da IEC-61000-3-4.....	31
Tabela 4.2: Nível de harmônicos permissível para equipamentos monofásicos (fase-neutro), interfásicos (fase-fase) ou trifásicos desequilibrados que não atendem à tabela anterior conforme IEC-61000-3-4 (tabela 2)	32
Tabela 4.3: Equipamentos de aquecimento de água com níveis de potência próximos a 7.000W	35
Tabela 4.4: Planilha de cálculo para determinar a queda de tensão na rede gerada por um aquecedor elétrico de 7500W, 220V com dois elementos aquecedores.....	35
Tabela 4.5: Queda de tensão na rede em função da potência do equipamento (com dois elementos aquecedores) e frequência de flutuação máxima permitida para não ultrapassar o limite de flicker estabelecido pela IEC-61000-3-3.....	36
Tabela 5.1: Raias (somente até a 4ª) do espectro de corrente com o aquecedor elétrico em 1/3 da potência.....	51
Tabela 5.2: Raias (somente até a 4ª) do espectro de corrente com o aquecedor elétrico em 2/3 da potência.	52
Tabela 5.3: Andamento temporal das medidas de PST, tensão e corrente no chuveiro para 1/3 da potência total. A potência foi calculada a partir da tensão e da corrente. Média e desvio padrão referem-se somente às últimas dez medidas.....	58
Tabela 5.4: Andamento temporal das medidas de PST, tensão e corrente no chuveiro para 2/3 da potência total. A potência foi calculada a partir da tensão e da corrente. Média e desvio padrão referem-se somente às últimas dez medidas.....	58

Lista de Figuras

- Fig.2.1: Primeiro chuveiro eletro-automático fabricado por Lorenzo Lorenzetti em 1951. (a) representação do aparelho desligado; (b) representação na posição ligado. Fonte: INPI, patente n. MU 1194, 02 julho 1951..... 3
- Fig.2.2: Vista superior de um chuveiro elétrico de três temperaturas com controle de potência mecânico por haste dielétrica. Fonte: INPI, patente n. MU 75034040-3, 15 maio 1995. 4
- Fig.2.3: corte de um chuveiro elétrico de quatro temperaturas com controle de potência mecânico por haste dielétrica, onde se verifica que o mesmo é implementado com duas teclas de acionamento (indicadas pelos números 47 e 48 na figura) e sistema mecânico mais complexo que o aparelho de três temperaturas. Fonte: INPI, patente n. MU 6901586-4, 11 agosto 1989.....5
- Fig.2.4: vista explodida de aparelho com controle de potência mecânico com tampa giratória e disco seletor de temperaturas. Fonte: INPI, patente n. PI 9300061-8, 08 janeiro 19936
- Fig.2.5: corte de aparelho com controle de potência mecânico com tampa giratória acoplada à haste dielétrica. Fonte: INPI, patente n. PI 9700871-0, 06 fevereiro 1997.6
- Fig.2.6: corte de aparelho com controle de potência realizado por cames e microchaves. Fonte: INPI, patente n. MU 7302398-1, 06 dezembro 1993.7
- Fig.2.7: detalhe em corte do mecanismo de aparelho com controle de potência mecânico por ajuste da vazão através de botão abaixo do espalhador (a) e ao lado do corpo (b). Fontes: a) INPI, patente n. MU 7702602-0, 12 novembro 1997; b) INPI, patente n.9905769-7, 01 dezembro 1999.8
- Fig.2.8: Chuveiro com controle remoto de potência com cabo de aço. Fonte: INPI, patente n. MU 7801445-0, 02 abril 1998.9
- Fig.2.9: Esquema elétrico do controle de potência por retificação com diodos. Fonte: INPI,

patente n. MU 7903092-0, 17 dezembro 1999.	10
Fig.2.10: Exemplo de esquema elétrico de controle de potência por ângulo de fase. Fonte: INPI, patente n. PI 9300696-9, 19 fevereiro 1993.	11
Fig.2.11: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com malha fechada. Fonte: INPI, patente n. PI 0003032-5, 21 junho 2000.....	12
Fig.2.12: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com comando remoto. Fonte: INPI, patente n. MU 6702096, 23 setembro 1987.....	13
Fig.2.13: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com filtro LC. Fonte: INPI, patente n. MU 7101119, 23 maio 1991.	13
Fig.2.14: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ciclos inteiros. Fonte: INPI, patente n PI 9802736-0, 30 janeiro 1998.....	14
Fig.2.15: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com pressurizador. Fonte: INPI, patente n PI 0002332-9, 07 junho 2000.	15
Fig.2.16: Exemplo de aparelho com controle de potência eletrônico por ângulo de fase com jato dirigível. Fonte: INPI, patente n PI 9709092-1, 04 novembro 1997.....	16
Fig.3.1: Aplicação de ciclos inteiros de tensão para 2/3 da potência total disponível	17
Fig.3.2: Aplicação de ciclos inteiros de tensão para 1/3 da potência total disponível.	18
Fig.: 3.3: Curva de cintilação, que relaciona a queda de tensão percentual ($\Delta V/V$) e a frequência de oscilação [variações/minuto], onde abaixo da curva a probabilidade de ocorrência de flicker é pequena e acima dela é bastante grande. (IEC-61000-3-3)	19
Fig.3.4: Aplicação de meios ciclos de tensão (ciclos inteiros modificados) para a obtenção de 1/3 da potência total disponível.....	20
Fig. 3.5: Aplicação de meios ciclos de tensão (ciclos inteiros modificados) para a obtenção de	

2/3 da potência total disponível.....	20
Fig.: 3.6: Corrente de dois elementos aquecedores A e B, onde B tem o dobro da resistência ôhmica de A	23
Fig.:3.7: Auxílio gráfico: Relacionando senóides de corrente com barras para indicar a presença e intensidade de semi-ciclos de corrente.	23
Fig. 3.8: nível 01 (Potência Nula) (0% do total)	24
Fig. 3.9: nível 02 (1/3 PB) (11,1% do total).....	24
Fig. 3.10: nível 03 (2/3 PB) (22,2% do total).....	24
Fig. 3.11: nível 04 (PB completo) (33,3% do total)	24
Fig. 3.12: nível 05 (1/3 PA + 2/3 PB) (44,4% do total)	24
Fig. 3.13: nível 06 (2/3 PA + 1/3 PB) (55,6% do total)	24
Fig. 3.14: nível 07(PA completo) (66,7% do total).....	25
Fig. 3.15: nível 08(PA + 1/3 PB) (77,8% do total).....	25
Fig. 3.16: nível 09(PA + 2/3 PB) (88,9% do total).....	25
Fig. 3.17: nível 10(PA + PB) (100% do total).....	25
Fig. 4.1: Forma de onda de corrente representando 1/3 da corrente eficaz total, obtida com o Matlab. Escala de corrente em p.u. e escala de tempo em 10.000 pontos representando 12 semiciclos da rede.....	28
Fig.4.2: Forma de onda de corrente representando 2/3 da total obtida com o Matlab. Escalas de corrente e tempo nas mesmas condições das da figura 4.1.....	29
Fig. 4.3: Espectro da forma de onda de 1/3 da corrente em função da frequência em Hz.	30
Fig. 4.4: Espectro da forma de onda de 2/3 da corrente em função da frequência em Hz.	30

Fig. 4.5: Influência da potência elétrica do aquecedor na queda de tensão da rede (d%) e na frequência de chaveamento.	37
Fig. 4.6: Step 1 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. Percebe-se que a forma de onda de tensão não sofre queda alguma, pois nesse step a energia consumida é nula.	40
Fig. 4.7: Step 2 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. A forma de onda de tensão apresenta diminuição nos ciclos em que a carga consome energia, assim como no step 3 (figura 4.8 a seguir).	40
Fig. 4.8: Step 3 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. A forma de onda de tensão, assim como no step 2, apresenta diminuição nos ciclos em que a carga consome energia.	41
Fig. 4.9: Step 4 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. Percebe-se que a forma de onda de tensão apresenta diminuição para todos os steps, pois nesse step consome-se energia em todos os ciclos.	41
Fig. 4.10: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 1	42
Fig. 4.11: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 2	42
Fig. 4.12: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 3	43
Fig. 4.13: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 4	43
Fig.5.1: Esquema do circuito montado com uma lâmpada para obtenção do espectro de	

corrente do controle eletrônico para 1 elemento aquecedor	45
Fig.5.2: Fotografia do protótipo do circuito eletrônico utilizado nos ensaios para obtenção de formas de onda de corrente e espectro.....	46
Fig. 5.3: Forma de onda e espectro de corrente para a carga de baixa potência comutada em 1/3 da potência disponível. Espectro obtido com janela retangular, com valores das raias em ampères eficazes	46
Fig. 5.4: Forma de onda e espectro de corrente para a carga de baixa potência comutada em 2/3 da potência disponível. Espectro obtido com janela retangular, com valores das raias em ampères eficazes	47
Fig. 5.5: Formas de onda de tensão e corrente a carga de baixa potência comutada em 1/3 da potência disponível	47
Fig. 5.6: Formas de onda de tensão e corrente a carga de baixa potência comutada em 2/3 da potência disponível	48
Fig. 5.7: Esquema de ligação para obtenção de formas de onda e espectros do aquecedor elétrico montado com o circuito eletrônico proposto	49
Fig. 5.8: Formas de onda de tensão e corrente do aquecedor elétrico com 1/3 da potência disponível	50
Fig. 5.9: Formas de onda de tensãso e corrente do aquecedor elétrico com 2/3 da potência disponível	50
Fig. 5.10: Forma de onda e espectro da corrente cm o aquecedor elétrico em 1/3 da potência disponível. Espectro obtido com janela retangular, com valores das raias em ampères eficazes ..	51
Fig. 5.11: Forma de onda e espectro da corrente cm o aquecedor elétrico em 2/3 da potência disponível. Espectro obtido com janela retangular, com valores das raias em ampères eficazes ..	52
Fig. 5.12: Espectro de tensão do aquecedor com 1/3 da potência disponível (“Step 1”).....	53

Fig. 5.13: Espectro de tensão do aquecedor com 2/3 da potência disponível (“Step 2”).....	53
Fig. 5.14: Espectro de tensão do aquecedor com 0/3 (0%) da potência disponível (“Step 0”), ou seja, com o chuveiro desligado.....	54
Fig. 5.15: Flutuação de tensão eficaz medida na rede com o aquecedor elétrico comutado em 1/3 da potência disponível	55
Fig. 5.16: Flutuação de tensão eficaz medida na rede com o aquecedor elétrico comutado em 2/3 da potência disponível.	55
Fig. 5.17: Circuito elétrico para medição direta de “flicker” com um “flickermeter”.	57
Fig.A.1: Diagrama de blocos do controle eletrônico de potência por ciclos inteiros otimizados ..	64
Fig. A.2: Circuito eletrônico por ciclos inteiros otimizados com 1 elemento aquecedor.....	65
Fig.A.3: Resistor “pull-up” interno ao circuito integrado	68
Fig.A.4: Circuito eletrônico por ciclos inteiros otimizados com 2 elementos aquecedores.....	69

1) INTRODUÇÃO

O controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem é um item de conforto extra cada vez mais difundido, pois, com ele é possível regular a temperatura ao gosto do usuário sem alterar significativamente a vazão de água através do aquecedor (sem um controle eletrônico de potência disponível, a alteração da vazão tem sido o modo mais usado para o ajuste fino da temperatura da água).

O controle de potência pode ser realizado por componentes eletrônicos, e o mais conhecido e utilizado atualmente é o implementado através do controle por ângulo de fase, o qual gera indesejáveis componentes harmônicos de corrente nas redes de energia.

Uma alternativa para controle de potência eletrônico é implementar o controle por ciclos inteiros, onde o problema dos componentes harmônicos da frequência fundamental é minimizado, porém surgem outros problemas, como flutuação da tensão da rede de energia, o que provoca a cintilação luminosa de lâmpadas (efeito “flicker”), a qual acarreta problemas às instalações e equipamentos e, principalmente, à saúde e conforto das pessoas.

O objetivo deste trabalho é propor um controle eletrônico de potência para uso em aquecedores elétricos de passagem, utilizando o conceito de controle por ciclos inteiros, porém de forma otimizada, de modo a não gerar componentes harmônicos da fundamental de corrente, nem cintilação perceptível nas lâmpadas.

Neste capítulo 1 (Introdução) é citado de forma sucinta o objetivo do sistema.

No capítulo 2 é feito um estudo sobre o estado da arte de controle de potência de aquecedores elétricos de água de passagem.

O capítulo 3 descreve o controle de potência por ciclos inteiros otimizados, detalha o conceito, os níveis de potência possíveis e fornece alguns exemplos de implementação.

Os capítulos 4 e 5 fornecem simulações computacionais e resultados experimentais obtidos através de ensaios do sistema, onde são analisados os níveis de componentes harmônicos e efeito “flicker”, comparando-os com as normas e “Technical Reports” da IEC e é verificada a compatibilidade com as mesmas.

O capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho e fornece sugestões para trabalhos futuros.

2) ESTADO DA ARTE NAS TÉCNICAS DE CONTROLE DE POTÊNCIA EM AQUECEDORES ELÉTRICOS DE PASSAGEM

Este capítulo descreve o estado da arte passado e presente nos aquecedores elétricos de passagem produzidos no Brasil.

No Brasil, é muito difundido o banho por aspersão realizado através de aquecedor elétrico de passagem, onde o aquecimento de água por meio de efeito Joule tem sido a alternativa preferida para a obtenção de água quente corrente em pontos de utilização da rede hidráulica predial, devido ao baixíssimo custo de um chuveiro elétrico, à facilidade de instalação e à reduzida manutenção exigida por esses aparelhos.

2.1) CONTROLES DE POTÊNCIA MECÂNICOS

2.1.1) CONTROLE DE POTÊNCIA LIGA / DESLIGA MANUAL

Os primeiros aquecedores elétricos de água no Brasil foram fabricados nos anos 40 e início dos anos 50 e apresentavam apenas duas condições: ligado e desligado. Basicamente, valiam-se de um única resistência elétrica, energizada pela ação de uma chave interruptora acionada através de uma alavanca manual (Fernandes, 2002).

O grande problema apresentado nesse tipo de aparelho reside no fato de o usuário ter que estar sempre atento para não deixar o aparelho na posição ligada e o fluxo de água desligado para não queimar a resistência elétrica, além de controlar a temperatura da água pela da mesma, como em todos os produtos com controle de potência mecânico. Atualmente não se fabrica mais esse tipo de aparelho.

2.1.2) CONTROLE DE POTÊNCIA LIGA / DESLIGA AUTOMÁTICO

Em meados dos anos 50 os aquecedores continuavam apresentando dois níveis de potência e surgiram os primeiros modelos automáticos (Lorenzetti S/A, 2006), cujo acionamento elétrico consistia em o usuário ligar apenas a vazão de água, já que tais aparelhos possuíam um elemento sensor de pressão, chamado diafragma, em seu interior, o qual acionava os contatos elétricos assim que a pressão da rede hidráulica acionasse tal sensor, princípio utilizado até os dias atuais.

O problema de queimar a resistência por descuido do usuário já fora solucionado, porém era um chuveiro com apenas dois níveis de potência.

Fig.2.1: Primeiro chuveiro eletro-automático fabricado por Lorenzo Lorenzetti em 1951. (a) representação do aparelho desligado; (b) representação na posição ligado. Fonte: INPI, patente n. MU 1194, 02 julho 1951.

2.1.3) CONTROLE DE POTÊNCIA COM CHAVE SELETORA COM HASTE DIELÉTRICA

Os chuveiros com controle de potência mecânico tiveram um incremento de níveis de potência através dos aparelhos construídos com duas resistências elétricas ligadas em série e

três terminais, sendo um em cada ponta da resistência e um outro terminal no “ponto comum” de ambas as resistências, onde uma haste dielétrica é inserida, ou não, entre os contatos elétricos móveis e fixos do aquecedor conforme o ajuste pelo usuário (Lorenzetti, 1989). Os níveis de potência são obtidos da seguinte forma:

- a) Potência nula: ambas as resistências estão desenergizadas;
- b) Potência média: as resistências estão ligadas em série;
- c) Potência máxima: apenas uma das resistências é ligada, fazendo com que a corrente circulante pela mesma seja maior que a corrente circulante pelo conjunto todo, dissipando maior potência.

Fig.2.2: Vista superior de um chuveiro elétrico de três temperaturas com controle de potência mecânico por haste dielétrica.

Fonte: INPI, patente n. MU 75034040-3, 15 maio 1995.

Os aparelhos desse tipo podem ainda possuir quatro níveis de temperatura se as duas resistências elétricas tiverem valores ôhmicos diferentes e forem ligadas em paralelo, além de algumas adaptações construtivas na chave seletora (Lorenzetti, 1995). Os níveis de potência serão dados por:

- a) Potência nula: ambas as resistências estão desenergizadas;

b) Potência 1: a resistência elétrica de maior valor ôhmico, e, por consequência, menor potência, é energizada, e a outra permanece desligada;

c) Potência 2: a resistência elétrica de menor valor ôhmico, e, por consequência, maior potência, é energizada, desligando a outra;

d) Potência máxima: ambas as resistências são energizadas.

Chuveiros com duas resistências independentes podem fazer cinco níveis de potência, porém, devido à complexidade do sistema mecânico, dificuldades no ajuste pelo usuário no dia a dia, aliadas ao fato de tal solução não poder ser aplicada em aparelhos de uso popular e baixo custo, impedem a sua fabricação. O número de níveis de potência também pode ser incrementado caso o chuveiro possua mais que duas resistências, porém os problemas para implementação são os mesmos.

Fig.2.3: corte de um chuveiro elétrico de quatro temperaturas com controle de potência mecânico por haste dielétrica, onde se verifica que o mesmo é implementado com duas teclas de acionamento (indicadas pelos números 47 e 48 na figura) e sistema mecânico mais complexo que o aparelho de três temperaturas. Fonte: INPI, patente n. MU 6901586-4, 11

agosto 1989.

2.1.4) CONTROLE DE POTÊNCIA COM TAMPA GIRATÓRIA

A potência em chuveiros pode ser comutada através de tampa giratória montada no aparelho, ligada mecanicamente ao eixo de um disco seletor munido de contatos e ligações elétricas (Produtos Elétricos Corona, 1993), cuja solução reduz o custo de fabricação e aumenta a resistência mecânica do equipamento.

Fig.2.4: vista explodida de aparelho com controle de potência mecânico com tampa giratória e disco seletor de temperaturas.

Fonte: INPI, patente n. PI 9300061-8, 08 janeiro 1993.

Existem aparelhos com tampa giratória ligada mecanicamente a uma chave de múltiplas posições (Gomes, 1997), cujo princípio de funcionamento é o mesmo dos aparelhos com haste dielétrica.

Fig.2.5: corte de aparelho com controle de potência mecânico com tampa giratória acoplada à haste dielétrica. Fonte: INPI, patente n. PI 9700871-0, 06 fevereiro 1997.

2.1.5) CONTROLE DE POTÊNCIA COM BOTÕES DE ACIONAMENTO

Esse tipo de aparelho possui em seu corpo, na porção frontal um botão conectado ao mecanismo de acionamento, de forma que, quando pressionado pelo usuário, o acionador comprime uma mola e movimenta o came circular, alterando a posição dos contatos e o nível de potência do aparelho (Carmona, 2000). Uma vez pressionado o botão, sua mola está comprimida e ele só retorna à posição original se outro botão for acionado. O retorno do came também é facilitado por uma mola de tração. O came circular gira em torno de um eixo fixo e é vinculado aos acionadores dos botões através de um apoio deslizante. O encaixe do acionador no botão é feito através de uma rótula que permite pequenas rotações entre o botão e o acionador, facilitando a sua montagem.

2.1.6) CONTROLE DE POTÊNCIA COM MICROCHAVES

Fig.2.6: corte de aparelho com controle de potência realizado por cames e microchaves. Fonte: INPI, patente n. MU 7302398-1, 06 dezembro 1993.

A comutação de potência por microchaves consiste em o equipamento possuir módulo de contatos independente, que aciona cada uma das resistências elétricas por meio de um

came, que é um eixo cilíndrico com saliências espalhadas adequadamente pela sua extensão superficial, o qual, ao girar, atua ou não sobre as microchaves (Corona, 1991). Tal tipo de chuveiro apresenta um mecanismo de trava que impede a mudança de potência do aparelho em funcionamento e também o acionamento da chave de fluxo com o aparelho desligado, protegendo, assim os contatos elétricos contra arco voltaico e a resistência contra queima precoce, aumentando a vida útil do aparelho. O controle de potência com microchaves pode também ser realizado através de came ligado mecanicamente a uma tampa giratória (Corona, 1993).

2.1.7) CONTROLE DE POTÊNCIA COM AJUSTE DA VAZÃO NO PRÓPRIO APARELHO

A potência pode ser controlada pela vazão no registro de água da instalação predial. Alguns chuveiros possuem o controle da vazão incorporado. Esse controle é realizado através de um dispositivo que ajusta o diâmetro de saída da água do aparelho, podendo ter um botão rotativo abaixo do espalhador (Lorenzetti, 1997) ou ao lado do corpo (Lorenzetti, 1999). O grande problema desse tipo de aparelho é o aumento da pressão hidráulica interna com a redução da passagem de água.

Fig.2.7: detalhe em corte do mecanismo de aparelho com controle de potência mecânico por ajuste da vazão através de botão

abaixo do espalhador (a) e ao lado do corpo (b). Fontes: a) INPI, patente n. MU 7702602-0, 12 novembro 1997; b)

INPI, patente n.9905769-7, 01 dezembro 1999.

2.1.8) CONTROLE DE POTÊNCIA REMOTO COM CABO DE AÇO

Existem aparelhos que possuem controle de potência a distância, onde o aparelho propriamente dito é ligado através de um cabo de aço ou correia dentada a uma caixa situada à mão do usuário que contem pequenas engrenagens ou cremalheiras, que, através de um botão acessível ao usuário, transmitem movimento ao cabo de aço e deste para um came acionador, o qual permite comutar os níveis de potência.

Fig.2.8: Chuveiro com controle remoto de potência com cabo de aço. Fonte: INPI, patente n. MU 7801445-0, 02 abril 1998.

2.2) EQUIPAMENTOS COM CONTROLE DE POTÊNCIA ELETRÔNICO

2.2.1) CONTROLE DE POTÊNCIA POR RETIFICAÇÃO COM DIODOS

O controle de potência por retificação com diodos consiste em instalar um diodo com uma chave em paralelo diretamente em uma das fases do equipamento, fazendo com que este tenha três níveis de potência com uma única resistência elétrica, que é a potência nula, a forma de onda da tensão da rede retificada em meio ciclo através do diodo e a forma de onda

completa com a chave fechada curto-circuitando o diodo (Corona, 1999). O inconveniente deste tipo de controle é o aparelho ser alimentado com tensão contínua no nível de potência médio, o que reduz a vida útil da resistência elétrica devido à corrosão produzida. Atualmente não há produção para esse tipo de equipamento.

Fig.2.9: Esquema elétrico do controle de potência por retificação com diodos. Fonte: INPI, patente n. MU 7903092-0, 17 dezembro 1999.

2.2.2) CONTROLE DE POTÊNCIA POR ÂNGULO DE FASE

O controle eletrônico de potência por ângulo de fase consiste em inserir um semicondutor de potência em série com a resistência elétrica, que será comandado por pulsos no “gate” vindos de um circuito eletrônico. O ajuste de potência é feito pelo usuário através de um potenciômetro que, juntamente com outros resistores e capacitores, forma o circuito de tempo, o qual gera um atraso no disparo do semicondutor de potência controlando, assim, a forma de onda de corrente fornecida à resistência elétrica e, conseqüentemente, a potência dissipada e a temperatura da água (Tarcha, 1980; Zolet, 1993; Lorenzetti, 2000). O problema desse tipo de controle é a geração de componentes harmônicos através da distorção da forma de onda, que causa problemas em instalações e equipamentos, entre os quais podem ser citados:

- a) Redução da vida útil de transformadores e funcionamento inadequado de motores;
- b) Perdas nos condutores das instalações elétricas;

- c) Interferência irradiada em redes de comunicações;
- d) Disparo intempestivo de disjuntores;
- e) Corrente excessiva no condutor neutro de instalações elétricas, além de outras.

Fig.2.10: Exemplo de esquema elétrico de controle de potência por ângulo de fase. Fonte: INPI, patente n. PI 9300696-9, 19 fevereiro 1993.

O controle de potência por ângulo de fase é o mais usado atualmente pelos fabricantes de chuveiros elétricos e, em função disso, existem muitas variações e melhorias inseridas nesses equipamentos, entre as quais algumas podem ser destacadas:

2.2.2.1) Controle eletrônico por ângulo de fase com malha fechada

Possui teclado para inserção, pelo usuário, da temperatura final desejada e medidores de temperatura de água na entrada e na saída do aparelho, os quais informam essas medidas ao controlador eletrônico, que ajusta a potência necessária para atingir o nível desejado (Silva; Farias, 1991; Gonçalves, 2000; Araújo; Silva, 2001).

Fig.2.11: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com malha fechada.

Fonte: INPI, patente n. PI 0003032-5, 21 junho 2000.

2.2.2.2) Controle eletrônico por ângulo de fase com comando remoto

O usuário possui um controle de potência próximo à altura das mãos, facilitando o ajuste desejado, que pode ser transmitido ao aparelho por meio de cabos de aço com engrenagens e polias, as quais efetuam o giro de um potenciômetro (Souza, 1987; Corona, 1999), pode também ser realizado com o circuito eletrônico separado do chuveiro e ligado ao mesmo por meio de condutores elétricos (Pereira, 1991) ou por luz infravermelha (Antunes, 1989; Corona, 1998).

Fig.2.12: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com comando remoto. Fonte:

INPI, patente n. MU 6702096, 23 setembro 1987.

2.2.2.3) Controle eletrônico por ângulo de fase com filtro “anti RFI”

Consiste de sistema de filtro na entrada do circuito eletrônico composto por indutor em série e capacitor em paralelo (Dourado, 1991), para atenuação de amplitude dos componentes harmônicos. A prática em campo demonstra que esse tipo de filtro não apresenta os resultados esperados quanto à redução dos níveis dos harmônicos, além de gerar um ruído audível no chuveiro, característico de transformador.

Fig.2.13: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com filtro LC. Fonte: INPI,

patente n. MU 7101119, 23 maio 1991.

2.2.3) CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS

O controle de potência por ciclos inteiros baseia-se no fato de o “gate” do semiconductor de potência sempre ser ligado no instante em que a forma de onda de tensão da rede de energia passe pelo valor nulo, atenuando o nível dos componentes harmônicos de corrente da rede. Os aparelhos que apresentam esse tipo de controle podem ter o circuito incorporado no chuveiro (Corona, 1998) ou com comando remoto, cuja ligação pode ser implementada por condutores elétricos (Werlang, 1995) ou por luz infravermelha (Casara, 1997; Corona, 1998).

Fig.2.14: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ciclos inteiros. Fonte: INPI, patente n PI 9802736-0, 30 janeiro 1998.

Este tipo de controle não é muito usual em chuveiros elétricos e o maior problema reside no fato de a comutação cíclica de “pacotes” de senóides provocar o surgimento na rede de uma queda de tensão com a mesma frequência de modulação da corrente e, como essa frequência é baixa, acarretar oscilação de luminosidade nas lâmpadas incandescentes, o conhecido efeito “flicker”.

Para resolver esse tipo de problema, o presente trabalho propõe uma filosofia onde a oscilação de luminosidade ocorra em faixas de frequências imperceptíveis ao olho humano, pois o maior problema do efeito “flicker” é o fator humano, embora, em hospitais, os diagnósticos por imagem computadorizada também podem ser prejudicados pela oscilação de tensão.

2.3) AQUECEDORES ELÉTRICOS DE PASSAGEM COM RECURSOS ESPECIAIS

Os recursos especiais que podem dotar os aquecedores podem ou não ser de natureza elétrica e se destinam a aumentar o valor agregado para aparelhos de faixas de preços superiores (“topo de linha”), e são colocados aqui para ilustrar os esforços dos fabricantes de diferenciar seus produtos em um mercado disputado.

2.3.1) COM PRESSURIZADOR

Este tipo de equipamento é projetado para ser instalado onde a altura manométrica da caixa d’água é menor que 2,5 m.c.a.¹, de modo a aumentar a vazão do aparelho (Silva, 2000).

Fig.2.15: Exemplo de esquema elétrico do controle de potência eletrônico por ângulo de fase com pressurizador. Fonte: INPI, patente n PI 0002332-9, 07 junho 2000.

¹ metro de coluna de água

2.3.2) JATO DIRIGÍVEL

Composto de trilho vertical de apoio da ducha, que pode deslizar sobre o mesmo variando a altura e o ângulo do jato de água (Souza, 1997).

Fig.2.16: Exemplo de aparelho com controle de potência eletrônico por ângulo de fase com jato dirigível. Fonte: INPI, patente n PI 9709092-1, 04 novembro 1997.

3) CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS

Este capítulo aborda um controle de potência por ciclos inteiros otimizado, cujo principal objetivo é a minimização de “flicker”.

3.1) ELIMINAÇÃO DO “FLICKER” ATRAVÉS DA DIMINUIÇÃO DO PERÍODO DE REPETIÇÃO T - TENTATIVA

3.1.1) CONCEITO

Referindo-se às figuras 3.1 e 3.2, a potência da carga deve ser controlada através da aplicação de ciclos inteiros de tensão da rede durante um período T_1 para um período total de repetição T. O objetivo final deve ser o controle da potência sem o aparecimento de “flicker” nem oscilação de temperatura que sejam detectáveis pelo usuário do aquecedor elétrico.

Fig.3.1: aplicação de ciclos inteiros de tensão para 2/3 da potência total disponível

Fig.3.2: aplicação de ciclos inteiros de tensão para 1/3 da potência total disponível.

Para uma combinação de três ciclos da rede, como visto nas figuras 3.1 e 3.2, são possíveis quatro níveis de potência (temperatura), que são as duas mostradas nas figuras, a ausência total de sinal (bloqueio total) e a forma de onda completa (condução plena).

3.1.2) ANÁLISE

A tensão da rede elétrica no Brasil possui frequência fundamental de 60Hz (período de 1/60 s). Considerando-se como período de repetição T duas senóides completas, $T=1/30$ s a frequência de repetição será 30 Hz.

Testes internos realizados nos Laboratórios da Lorenzetti demonstraram que as pessoas participantes destes testes não sentem essa oscilação (embora tenham sido testes com um número limitado de pessoas e que dependem da sensibilidade de cada indivíduo). Conclui-se, portanto, que a oscilação da temperatura de saída de aquecedores de passagem, para esses períodos de repetição T , não deve representar problema, pois os tempos ligado / desligado são extremamente pequenos, e devem estar abaixo da sensibilidade normal dos indivíduos.

O “flicker”, entretanto, não foi resolvido através desse método, pois, avaliando a curva de irritabilidade (figura 3.3) transcrita da norma IEC-61000-3-3, observa-se que a máxima frequência capaz de causar irritação da visão humana a variações de luminosidade é maior

que 3.000 variações por minuto, mais especificamente 3.600 variações por minuto, numa condição de até 2% de queda de tensão, o que equivale a dizer que, conforme IEC-61000-3-3, esse limite é de 30 Hz.

Fig.:3.3: Curva de cintilação, que relaciona a queda de tensão percentual ($\Delta V/V$) e a frequência de oscilação

[variações/minuto], onde abaixo da curva a probabilidade de ocorrência de flicker é pequena e acima dela é bastante grande. (IEC-61000-3-3)

A faixa de percepção, para a maioria das pessoas vai até 30 Hz (Deckmann, 2002) e, portanto, chaveamento de três ciclos completos não são suficientes para eliminar o efeito flicker.

3.2) PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA O EFEITO FLICKER: OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE REPETIÇÃO T

3.2.1) CONCEITO

Pode-se afirmar que, de imediato, existem duas maneiras de atenuar o flicker:

- 1) Diminuir o ΔV para valores abaixo dos propostos na curva de cintilação da norma IEC-61000-3-3;
- 2) Aumentar a frequência de oscilação de tensão para valores acima de 30Hz.

A primeira maneira, que é diminuir o ΔV , não pode ser obtida para controle por ciclos inteiros “on-off”, pois aquecedores elétricos de passagem comutam altas potências.

O presente trabalho propõe uma forma de atenuar o flicker através da comutação por ciclos inteiros modificada, que permita o aumento da frequência de oscilação, segunda maneira descrita acima.

A proposta é uma configuração onde o período de repetição T continua sendo igual a três senóides de 60 Hz, porém a forma de comutação deve ser tal que a frequência de modulação seja maior que 30 Hz e o nível CC (valor médio da forma de onda de tensão) seja sempre nulo.

Chegou-se às seguintes configurações:

Fig.3.4: Aplicação de meios ciclos de tensão (ciclos inteiros modificados) para a obtenção de 1/3 da potência total disponível.

Fig. 3.5: Aplicação de meios ciclos de tensão (ciclos inteiros modificados) para a obtenção de 2/3 da potência total disponível.

Tal controle é denominado originalmente neste trabalho “controle por semi-ciclos inteiros otimizados”, e a potência é dada por:

$$P = P_{máx} \cdot \frac{T_1}{T} \quad (3.1)$$

Por este método podem ser obtidos quatro níveis de potência (temperatura): os dois indicados nas figuras 3.4 e 3.5, a ausência total de sinal e a forma de onda completa. Sob a ótica de variação de temperatura, os tempos ligado / desligado são extremamente pequenos ($T=25\text{ms}$ para três semi-ciclos de 60Hz) e a configuração proposta está de acordo ao uso em aquecedores de passagem de água.

Esse sistema, por ser controle por semi-ciclos inteiros, não produz harmônicas de corrente ímpares múltiplas de 60 Hz.

3.2.2) ANÁLISE DO “FLICKER” DE ACORDO COM A NORMA IEC-61000-3-3

A Norma IEC-61000-3-3:1994+A1:2001 define , no item 3.5 a flutuação de tensão (“voltage fluctuation”) como “uma série de variações da tensão eficaz da rede avaliada como um valor único em cada semi-ciclo sucessivo entre as passagens por zero da tensão da rede”. (texto original: “*series of changes of r.m.s. voltage evaluated as a single value for each successive half-period between zero-crossings of the source voltage.*”), ou seja, deve-se “medir” o valor eficaz da tensão da rede em cada semi-ciclo e montar um gráfico em função do tempo. Sabe-se que, em condições normais, o valor eficaz de um semi-ciclo positivo é exatamente igual ao valor eficaz de um semi-ciclo negativo para formas de onda com valor médio nulo, o que faz com que as formas de onda das figuras 3.4 e 3.5 não tenham frequências fundamentais de 20 Hz (2.400 variações/minuto) e sim 40 Hz (4.800 variações/minuto) (Komatsu, Oliveira Júnior, Carvalho, 2005).

A Nota 3 do item 4.2.3.2 da mesma Norma (IEC-61000-3-3:1994+A1:2001) informa que nenhuma extrapolação gráfica deve ser feita nas figuras da norma para evitar erros inaceitáveis (texto original: “*Note 3 Extrapolation outside the range of the figures may lead to unacceptable errors*”), ou seja, a figura 3.4 está representada até 3.000 variações/minuto e a configuração proposta produz cintilações em 4.800 variações/minuto (acima do “range” estabelecido pela norma) e estudos demonstram que a máxima frequência de percepção humana está em torno de 30 Hz (3.600 variações/minuto) (Deckmann, 2002).

Conclui-se, portanto, que a proposta está de acordo com os limites estabelecidos pela IEC-61000-3-3:1994+A1:2001.

Com o chaveamento proposto, o flicker passa a ser em 40 Hz, acima do limiar de desconforto de olho humano, podendo, inclusive, trabalhar com quedas de tensão maiores que 2%, conforme observa-se na curva de cintilação (figura 3.3). Assim, com um único elemento aquecedor consegue-se o controle de potência em quatro posições, sem harmônicas múltiplas de 60 Hz, sem flicker e com oscilação de temperatura desprezível do fluxo de massa a ser aquecida (água).

3.2.3) NÍVEIS DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE ELEMENTOS AQUECEDORES

3.2.3.1) Definição

Conforme visto, com um único elemento aquecedor (resistor elétrico) pode-se ter quatro níveis de potência. Se a quantidade de elementos aquecedores for ampliada, aumentará o número de níveis de potência do aquecedor.

O aumento do número de elementos aquecedores deve seguir algumas orientações:

- 1) Conforme descrito no item 3.2.1, uma resistência pode ser comutada em 04 “steps” distintos de potência;

2) É feita uma análise inicial com o uso de duas resistências, onde uma possui o dobro da resistência da outra, possuindo, portanto, potências e correntes distintas (uma será o dobro da outra, inversamente), como a seguir:

Fig.: 3.6: Corrente de dois elementos aquecedores A e B, onde B tem o dobro da resistência ôhmica de A .

Na figura 3.6, tem-se que:

i_B : Corrente (Potência) Baixa (elemento aquecedor de menor potência);

i_A : Corrente (Potência) Alta (elemento aquecedor de maior potência).

3.2.3.2) Formas de onda

Para facilidade de visualização, representam-se as formas de onda como gráficos de barras, onde uma barra vertical indica que há a presença de determinado semi-ciclo, independente deste ser positivo ou negativo (figura 3.7). Na ausência do semi-ciclo, não há barras verticais. Para facilitar mais ainda a visualização, representa-se i_B como barras marrons e i_A como barras azuis.

Fig.:3.7: Auxílio gráfico: Relacionando senóides de corrente com barras para indicar a presença e intensidade de semi-ciclos de corrente.

Desta forma, com o uso de duas resistências A e B, onde B possui o dobro da resistência de A, é possível realizar, para três semiciclos da rede, dez níveis de potência (levando-se em conta que a corrente i_B , ao circular pelo elemento aquecedor dissipa a potência P_B [maior, alta] e a corrente i_A , ao circular pelo outro elemento aquecedor dissipa a potência P_A [menor, baixa]), conforme as figuras 3.8 a 3.17:

Fig. 3.8: nível 01 (Potência Nula) (0% do total)

Fig. 3.9: nível 02 ($1/3 P_B$) (11,1% do total)

Fig. 3.10: nível 03 ($2/3 P_B$) (22,2% do total)

Fig. 3.11: nível 04 (P_B completo) (33,3% do total)

Fig. 3.12: nível 05 ($1/3 P_A + 2/3 P_B$) (44,4% do total)

Fig. 3.13: nível 06 ($2/3 P_A + 1/3 P_B$) (55,6% do total)

Fig. 3.14: nível 07(PA completo) (66,7% do total)

Fig. 3.15: nível 08(PA + 1/3 PB) (77,8% do total)

Fig. 3.16: nível 09(PA + 2/3 PB) (88,9% do total)

Fig. 3.17: nível 10(PA + PB) (100% do total)

Nas figuras anteriores (3.8 a 3.17) observa-se que:

- 1) Estão representados três semicírculos, onde as senóides foram substituídas por barras verticais coloridas;
- 2) Considerou-se apenas a existência ou não da corrente, ou seja, independentemente dela ser positiva ou negativa, foi representada como positiva na presença de sinal ou nula na ausência de sinal;

3) As “barras” azuis representam o elemento aquecedor de maior potência e as “barras” marrons o elemento aquecedor de menor potência, e a potência maior é o dobro da menor.

Pode-se aumentar ainda mais o número de níveis de potência se forem colocadas mais resistências. Para se obter degraus de potência iguais, “a resistência a ser inserida deve possuir o dobro da potência do elemento aquecedor existente de maior potência”. Para ilustrar numericamente esta regra, tem-se um elemento aquecedor de 1500 W. Conforme determinado anteriormente, demonstrou-se que um único elemento aquecedor perfaz quatro níveis de potência: 0W, 500W, 1000W e 1500W. Verifica-se que cada nível é separado por um terço do valor (500W) da potência do elemento aquecedor. Para inserir um novo elemento aquecedor, este deve possuir o dobro da potência do primeiro elemento aquecedor: 3000W. Os seguintes níveis de potência serão obtidos: 0W, 500W, 1000W, 1500W, 2000W, 2500W, 3000W, 3500W, 4000W e 4500W, ou seja, 10 níveis, conforme figuras 3.8 a 3.17. Para inserir um terceiro elemento aquecedor, este deve possuir o dobro da potência do elemento aquecedor de maior potência: 6000W (haverá 22 níveis de potência, de 0W a 10.500W, separados por 500W), e assim sucessivamente.

Desta forma, pode-se escrever uma regra prática como a seguir:

$$N_s = \frac{3 \cdot P_T}{mp} + 1 \quad (3.2)$$

ou

$$N_s = [(2^{N_e} - 1) \cdot 3] + 1 \quad (3.3)$$

Para as fórmulas 3.2 e 3.3 são definidos:

N_s : Número de Steps

P_T : Somatória de Potência de todos Elementos

mp : Potência do Elemento de Menor Potência

N_e : Número de Elementos Aquecedores

A partir das fórmulas 3.2 e 3.3 pode ser construída a tabela 3.1:

Tabela 3.1: Níveis de potência em função da quantidade de elementos aquecedores

Quantidade de Elementos Aquecedores	Quantidade de níveis de potência
1	4
2	10
3	22
4	46
5	93
6	190
7	382
8	765

Na prática, os equipamentos utilizam um ou dois elementos aquecedores devido à dificuldade de fabricação e montagem e pequeno ganho resultante no incremento (variação de degraus) de potência.

4) RESULTADOS DE SIMULAÇÕES DO CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS

4.1) HARMÔNICOS

4.1.1) FORMAS DE ONDA DE CORRENTE

Para simular os harmônicos de corrente das formas de onda propostas, é usado o software Matlab[®] versão 4.2c.1 (Mathworks, 1994), onde as formas de onda são obtidas através de 10.000 pontos que representam 12 semiciclos, obtendo-se as figuras a seguir:

Fig. 4.1: Forma de onda de corrente representando 1/3 da corrente eficaz total, obtida com o Matlab. Escala de corrente em p.u. e escala de tempo em 10.000 pontos representando 12 semiciclos da rede.

Fig.4.2: Forma de onda de corrente representando 2/3 da total obtida com o Matlab. Escalas de corrente e tempo nas mesmas condições das da figura 4.1.

Nas figuras 4.1 e 4.2 verifica-se que os valores de corrente estão normalizados para o valor de pico, ou seja, variam de -1 a $+1$ (ou seja, 1 p.u. corresponde ao valor de pico) e o eixo das abcissas está em função do número de pontos da simulação, que nesse caso são 4096 amostras para 15 semiciclos da rede.

4.1.2) PLOTAGEM DE HARMÔNICOS

Plota-se o espectro para cada forma de onda acima, que foi declarada como um vetor de 10.000 elementos. Sabe-se *a priori* que a frequência da rede CA no caso das figuras 4.1 e 4.2 é de 60Hz.

Os espectros obtidos são fornecidos nas figuras 4.3 e 4.4 respectivamente:

Espectro de corrente para 1/3 da potência

Fig. 4.3: Espectro da forma de onda de 1/3 da corrente em função da frequência em Hz.

Espectro de corrente para 2/3 da potência

Fig. 4.4: Espectro da forma de onda de 2/3 da corrente em função da frequência em Hz.

4.1.3) INTERPRETAÇÃO DOS VALORES SIMULADOS CONFORME A IEC-61000-3-4

O “*Technical Report*” IEC-61000-3-4 estabelece limites para cada componente harmônico de corrente e também para a distorção harmônica total (THD) e a distorção harmônica parcial ponderada (PWHD) do sistema.

A distorção harmônica total (THD) e a distorção harmônica parcial ponderada (PWHD) são definidas nos itens 3.1 e 3.2 do “*Technical Report*” IEC 61000-3-4 e transcritos a seguir:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (4.1)$$

$$PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \cdot \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (4.2)$$

Os limites de emissão harmônica são estabelecidos no item 5 do “*Technical Report*” IEC 61000-3-4, cujos valores foram traduzidos para o português e inseridos nas tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Nível de harmônicos permissível para equipamentos com potência aparente nominal menor ou igual a 1/33 da potência de curto-circuito da instalação conforme tabela 1 da IEC-61000-3-4

Número da harmônica (n)	Corrente harmônica admissível (I_n / I_1 [%])
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	0,6
23	0,9
25	0,8
27	0,6
29	0,7
31	0,7
33	0,6

Tabela 4.2: Nível de harmônicos permissível para equipamentos monofásicos (fase-neutro), interfásicos (fase-fase) ou trifásicos desequilibrados que não atendem à tabela anterior conforme IEC-61000-3-4 (tabela 2)

R _{sce} * mínimo	Fatores de distorção de corrente admissíveis [%]		Harmônicos de corrente individuais admissíveis					
	THD	PWHD	I ₃	I ₅	I ₇	I ₉	I ₁₁	I ₁₃
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Nota1: Os valores das harmônicas pares não devem ultrapassar 16/n %.

Nota 2: Interpolação linear entre valores sucessivos de R_{sce} são permitidos.

Nota 3: Em caso de equipamentos trifásicos desequilibrados, estes valores se aplicam a cada fase.

* $R_{sce} = \frac{S_{cc}}{\alpha \cdot S_{equ}}$, onde:

- R_{sce}: Taxa de curto circuito
- S_{cc}: Potência de curto circuito do sistema
- S_{equ}: Potência aparente nominal do equipamento
- α : Fator dependente do tipo de ligação:
 - $\alpha = 3$ para aparelhos monofásicos (fase-neutro)
 - $\alpha = 2$ para aparelhos interfásicos (fase-fase)
 - $\alpha = 1$ para aparelhos trifásicos desequilibrados

Na simulação em Matlab o sistema proposto não gera componentes harmônicos múltiplos inteiros de 60 Hz, e algumas inter-harmônicas múltiplas de 20 Hz são geradas devido ao fato de a forma de onda proposta possuir frequência fundamental de 20Hz, e as harmônicas ímpares existentes (100 Hz, 140 Hz, etc.) estão baseadas nesta frequência (20 Hz). Nota-se ainda que os harmônicos ímpares comuns (180 Hz, 300 Hz) também não estão presentes como é esperado.

Analisando os resultados encontrados, pode-se observar que o sistema está de acordo com ambas as tabelas (4.1 e 4.2) pois não gera nenhum componente harmônico (exceto o fundamental, que é 3ª harmônica de 20Hz), seja par ou ímpar, e o THD calculado está em torno de 27 %, se considerados os inter-harmônicos.

O maior problema causado pelos inter-harmônicos está na faixa das frequências menores que a fundamental (sub-harmônicos), que é a cintilação de luminosidade (“flicker”) das lâmpadas da instalação (IEEE, Interharmonic Task Force Working Document IH101, 2001).

4.2) FLICKER

4.2.1) ENSAIO DE FLICKER

As formas de onda das figuras 4.1 e 4.2 demonstram como a corrente da carga varia no tempo, de forma cíclica, e provoca queda de tensão na rede, devido à impedância desta rede.

Um aquecedor elétrico qualquer apresenta como carga uma resistência elétrica, o que equivale a dizer que a queda de tensão na rede estará, aproximadamente, em fase com a corrente elétrica da carga. Essa queda de tensão cíclica na rede provocará o aparecimento de cintilação de luminosidade (flicker) nas lâmpadas da instalação, principalmente nas lâmpadas incandescentes, embora também possa ser observado em lâmpadas de outros tipos.

Pode-se prever o nível de cintilação através de cálculos (IEC-61000-3-3), pois o nível de queda de tensão pode ser conhecido.

4.2.2) ANÁLISE DE FLICKER SOB A ÓTICA DA IEC-61000-3-5

O flicker, ou cintilação de luminosidade, ou ainda instabilidade da sensação visual, é causado por duas frentes [IEV 161-08-13]:

- a) flutuação da intensidade luminosa (luminância).
- b) flutuação da distribuição espectral (variação de cor da fonte luminosa).

No caso do sistema em estudo, não será considerada a variação da distribuição espectral (está se desprezando a variação da cor emitida pelas lâmpadas incandescentes, de quase branco para quase amarelo, conforme varia a tensão (e portanto a potência) aplicada).

A base para avaliação do flicker é a variação de tensão característica nos terminais do equipamento sob teste, que é a diferença entre dois valores sucessivos quaisquer $U(t_1)$ e $U(t_2)$ de tensão eficaz, segundo o item 4.1 da IEC-61000-3-3.

$$\Delta U = U(t_1) - U(t_2) \quad (4.3)$$

Os valores de $U(t_1)$ e $U(t_2)$ podem ser medidos ou calculados. Quando deduzidos de formas de onda obtidas em osciloscópio, deve-se levar em consideração distorções que podem estar presentes na forma de onda.

A variação de tensão ΔU é devida à queda de tensão na impedância complexa do sistema, causada pela variação de corrente (ΔI) na carga.

ΔI_p e ΔI_q são as partes ativa e reativa, respectivamente, da variação de corrente ΔI .

$$\Delta I = \Delta I_p - j \cdot \Delta I_q \quad (4.4)$$

$$\Delta I = I(t_1) - I(t_2) \quad (4.5)$$

Portanto, a queda de tensão na rede será dada por:

$$\Delta U = Z \cdot \Delta I \quad (4.6)$$

$$\Delta U = \left| \Delta I_p \cdot R + \Delta I_q \cdot X \right| \quad (4.7)$$

Daí, a queda de tensão normalizada para a tensão eficaz nominal, será dada por:

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} \quad (4.8)$$

O cálculo de valores para o sistema proposto pode ser exemplificado por números para determinar a queda de tensão eficaz na rede e verificar a compatibilidade da mesma com os limites estabelecidos pela norma.

O equipamento a ser tomado como exemplo, por facilidade de cálculos, será um aquecedor elétrico de 7.500W, 220V, com dois elementos aquecedores, e também, devido ao fato de essa classe de potência (próxima de 7.000W) ser bastante comum entre os fabricantes, conforme pode ser visto na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Equipamentos de aquecimento de água com níveis de potência próximos a 7.000W

Fabricante	Modelos	Potência (W)
Corona (www.corona.com.br)	Mega Banho	7.500
Lorenzetti (www.lorenzetti.com.br)	Jet Master, Blinducha, Futura, Evolution	7.500
Cardal (www.cardal.com.br)	Potenza, Clássica, Eletrônica, 5T	7.600
Fame (www.fame.com.br)	Banho Máximo	7.000

A planilha de cálculo da tabela 4.4 auxilia nos resultados obtidos:

Tabela 4.4: Planilha de cálculo para determinar a queda de tensão na rede gerada por um aquecedor elétrico de 7500W, 220V com dois elementos aquecedores

Dados do Equipamento		V_{rede}	V_p	V_q	Módulo	Fase
Tensão [V]	220	Z_{carga}	220	0	220	0
Potência [W]	7500		R_{carga}	X_{carga}	Módulo	Fase
Nº Elem.Aqueced.	2	P_{carga}	9,68	0,00	9,68	0
Steps	10		P [W]	Q [VAr]	Módulo	Fase
Pot.cada step [W]	833,33	Z_{total}	5.000	0	5.000	0
Pot.Máx.Comutação [W]	5000		R_{ref} [60 Hz]	jX_{ref} [60 Hz]	Módulo	Fase
			0,40	0,30	0,50	36,87
			R_{total}	X_{total}	Módulo	Fase [°]
		I_{total}	10,08	0,30	10,08	1,70
			I_p	I_q	Módulo	Fase
		ΔV	21,83	0	21,83	0
			ΔV_p	ΔV_q	Módulo	Fase
		d %	8,73	0	8,73	0
			4,96%			

A tabela 4.4 mostra que um aquecedor elétrico 7500W, 220V irá produzir na rede uma queda de tensão de 4,96% (a impedância equivalente da rede está de acordo com o estabelecido na norma IEC-61000-3-3, adaptada de 50 Hz para 60 Hz) e, consultando a figura 3.4 (reprodução com alguns detalhes adicionais da figura 4 da IEC-61000-3-3), que

estabelece os limites de variação de tensão para cargas com variação retangular de corrente, verifica-se que a frequência de flutuação deve ser menor que 0,2 variações / minuto (“changes per minute”), ou seja:

$$d = \frac{\Delta V}{V} = f \left(\frac{0,2 \frac{\text{variações}}{\text{min}}}{120} = 0,0016667 \text{ Hz} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ Hz} \right) \quad (4.9)$$

A frequência de flutuação de tensão (corrente) da rede deve ser menor ou igual a $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$ para evitar algum problema de cintilação de luminosidade nas lâmpadas da rede, pois 4.96% é uma queda de tensão muito grande.

Diminuindo a potência do equipamento com o objetivo de reduzir a probabilidade de flicker na rede, verifica-se que o nível de potência para atingir o estabelecido pela norma IEC-61000-3-3 é muito baixo e impraticável para aquecedores elétricos de passagem com dois elementos aquecedores.

Tabela 4.5: Queda de tensão na rede em função da potência do equipamento (com dois elementos aquecedores) e frequência de flutuação máxima permitida para não ultrapassar o limite de flicker estabelecido pela IEC-61000-3-3.

Potência [W]	d%	ch/min	Hz
6000	4,00%	0,3	0,0025
5400	3,61%	0,4	0,0033
4000	2,96%	0,8	0,0067
3200	2,17%	2,0	0,0167
2000	1,36%	18,0	0,1500
1460	1,00%	24,0	0,2000

A última linha da tabela 4.5 informa que um aquecedor de 1.460W deve ter a corrente elétrica comutada em uma frequência máxima de 0,2Hz para provocar queda de tensão máxima na rede de 1%. O gráfico da figura 4.5 fornece uma melhor visualização do problema.

Fig. 4.5: Influência da potência elétrica do aquecedor na queda de tensão da rede (d%) e na frequência de chaveamento.

Sob a ótica de incremento de temperatura da água, um chuveiro de 1.460W pode ser analisado da seguinte maneira:

A massa a ser aquecida e o tempo de aquecimento (contato físico entre o elemento aquecedor e a massa) são muito importantes.

Seja a “Equação Fundamental da Calorimetria” (Ramalho; Nicolau; Toledo, Os Fundamentos da Física-2, 1992)

$$dQ = m.c.d\theta \quad (4.10)$$

Onde:

dQ : quantidade de calor necessária para produzir um incremento de temperatura $d\theta$ num corpo de massa m [cal];

m : massa do corpo [kg];

c : calor específico do corpo [cal/(kg.°C)];

$d\theta$: incremento de temperatura [°C].

Pode-se reescrever a equação 4.10 como a seguir:

$$d\theta = \frac{dQ}{m.c} \quad (4.11)$$

Como dQ é variação de calor, e calor é energia, pode-se afirmar que o calor será a potência variando no tempo, ou, o seguinte produto:

$$dQ = P.dt \quad (4.12)$$

Onde:

dt : variação temporal, ou tempo decorrido [s^{-1}].

Então, chega-se à seguinte equação:

$$d\theta = \frac{P.dt}{m.c} \quad (4.13)$$

Observando-se a equação 4.13, percebe-se que o incremento de temperatura $d\theta$ é proporcional à razão (dt/m) , que é o inverso da vazão V_Z , pois vazão pode ser definida como massa (ou volume) transportada numa unidade de tempo, ou seja:

$$V_Z = \frac{m}{dt} \quad (4.14)$$

Isso equivale dizer que o incremento de temperatura $d\theta$ é inversamente proporcional à vazão V_Z .

Considerando que o fluído é a água ($c=1 \text{ cal/kg.}^\circ\text{C}$; $d=1\text{kg/L}$), obtem-se a seguinte expressão prática, muito usada pelos fabricantes de aparelhos de aquecimento de água:

$$d\theta = \frac{(14,33).P.\eta}{V_Z} \quad (4.15)$$

Onde:

$d\theta$: incremento de temperatura [K ou $^\circ\text{C}$];

P : potência do equipamento [kW];

η : rendimento do aquecedor [%];

V_Z : vazão [L/min].

Um aparelho de 1.460 W, numa vazão típica de 3 L/min, considerando um rendimento, também típico, de 90 % irá produzir um incremento de temperatura de 6,28°C (de acordo com a equação 4.15) e só poderá ser usado, por exemplo, na cidade de São Paulo, em dias de verão intenso (30°C) (Equipamentos de aquecimento de água de passagem possuem altas eficiências energéticas, variando de 90% a 95%, inclusive este é um item que consta na embalagem do produto, na etiqueta do PROCEL, de uso obrigatório pelos fabricantes). Em dias de temperatura média (25°C), para atingir a temperatura média ideal da água na saída, a vazão deve ser reduzida para 1,6 L/min, diminuindo o conforto de banho tornando-o impraticável (a vazão mínima aceitável é de 3 L/min) (Jornal do encanador, Coluna de Água Quente, Junho de 2001). No inverno seria impossível utilizar o chuveiro.

A conclusão é que a queda de tensão gerada na rede de energia elétrica pode provocar níveis de cintilação de luminosidade incompatíveis com a norma, porém, se essa cintilação estiver em uma frequência não perceptível pelo olho (cérebro) humano, tal equipamento estará de acordo com o estabelecido pela IEC-61000-3-3.

O exemplo dado é um aparelho de 7500W, 220V, onde a queda de tensão na rede gerada pelo mesmo é de 4,96%, ou seja, para uma rede de frequência eficaz nominal de 220V, a forma de onda de tensão, para cada nível de potência, será dada pelos gráficos das figuras 4.6 a 4.9, simulados no software Excel[®], versão 97 (www.microsoft.com)

Fig. 4.6: Step 1 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. Percebe-se que a forma de onda de tensão não sofre queda alguma, pois nesse step a energia consumida é nula.

Fig. 4.7: Step 2 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. A forma de onda de tensão apresenta diminuição nos ciclos em que a carga consome energia, assim como no step 3 (figura 4.8 a seguir).

Fig. 4.8: Step 3 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. A forma de onda de tensão, assim como no step 2, apresenta diminuição nos ciclos em que a carga consome energia.

Fig. 4.9: Step 4 simulado para um aquecedor elétrico 7500W, 220V, $Z_{rede}=0,40+j0,30 \Omega$. Percebe-se que a forma de onda de tensão apresenta diminuição para todos os steps, pois nesse step consome-se energia em todos os ciclos.

Os gráficos das figuras 4.10 a 4.13 a seguir mostram a variação de tensão ao longo do tempo como barras (em valores eficazes) em função do número de semi-ciclos, para melhor visualização em relação às das figuras 4.6 a 4.9.

Fig. 4.10: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 1

Fig. 4.11: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 2

Fig. 4.12: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 3

Fig. 4.13: Variação do valor eficaz de tensão em função do número de semi-ciclos para o step 4

Sabe-se, conforme discutido em 3.1.2, que a frequência de oscilação de tensão eficaz deve ser maior que 30 Hz (3.600 variações por minuto) para que o equipamento possa ser considerado compatível com a norma IEC-61000-3-3 (ver fig.3.4).

Observando as figuras 4.11 (step 2) e 4.12 (step 3) verifica-se que a tensão eficaz varia ciclicamente a cada 3 semiciclos, e, para a forma de onda fundamental de 60 Hz, cada semiciclo vale 1/120 segundos e 3 semiciclos valerão, portanto, $3/120 = 1/40$ segundos, o que equivale a dizer que a flutuação de tensão eficaz e, por consequência, a cintilação de luminosidade, possui frequência de 40 Hz (4.800 variações por minuto).

A frequência de oscilação de 40 Hz (4.800 variações por minuto) indica que o equipamento gerará cintilação de luminosidade em níveis imperceptíveis, acima do limiar de irritabilidade e, portanto, compatível com os limites estabelecidos pela norma.

5) RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS

Este capítulo descreve os resultados experimentais com controle e potência por ciclos inteiros otimizados.

5.1) HARMÔNICOS

5.1.1) ENSAIOS INICIAIS PARA OBTENÇÃO DE FORMAS DE ONDA E ESPECTROS COM CARGA DE BAIXA POTÊNCIA

O Esquema da figura 5.1 foi montado em laboratório com o objetivo de extrair as formas de onda no tempo e os respectivos espectros para carga de baixa potência.

Fig.5.1: Esquema do circuito montado com uma lâmpada para obtenção do espectro de corrente do controle eletrônico para 1 elemento aquecedor

Fig.5.2: Fotografia do protótipo do circuito eletrônico utilizado nos ensaios para obtenção de formas de onda de corrente e espectro

Para o ensaio esquematizado na figura 5.1 utilizou-se o circuito de controle montado com o microcontrolador PIC-12C508 da Microchip e uma lâmpada de 60W-220V para simular a carga, com o intuito de obter o espectro sem se montar o circuito num aquecedor real, que demanda maior potência e a necessidade de um ponto de água corrente, não disponível neste ensaio inicial. O osciloscópio usado foi o Tektronix modelo TDS3014B.

Verificaram-se experimentalmente os espectros para as formas de onda de corrente de 1/3 da potência e 2/3 da potência, conforme figuras 5.3 e 5.4, respectivamente.

Fig. 5.3: Forma de onda e espectro de corrente para a carga de baixa potência comutada em 1/3 da potência disponível.

Espectro obtido com janela retangular, com valores das raia em ampères eficazes.

Fig. 5.4: Forma de onda e espectro de corrente para a carga de baixa potência comutada em 2/3 da potência disponível.

Espectro obtido com janela retangular, com valores das raízes em ampères eficazes.

São apresentadas a seguir as formas de onda de tensão e corrente em 1/3 e 2/3 da potência, com a lâmpada de 220V-60W como carga:

Fig. 5.5: Formas de onda de tensão e corrente a carga de baixa potência comutada em 1/3 da potência disponível.

Fig. 5.6: Formas de onda de tensão e corrente a carga de baixa potência comutada em 2/3 da potência disponível.

A tensão da rede está em fase com a corrente da carga, pois a lâmpada incandescente usada neste ensaio inicial apresenta apenas carga resistiva, não gerando defasagem entre corrente e tensão.

5.1.1.1) *Análise dos resultados em baixa potência*

Os resultados obtidos demonstram que o espectro de corrente está de acordo com o esperado, onde não aparece nenhum componente harmônico de 60 Hz (exceto o fundamental, que também é a terceira harmônica de 20Hz), pois a raiz fundamental, neste caso, é 20Hz e as harmônicas ímpares existentes (100 Hz, 140 Hz, etc.) estão baseadas nesta frequência (20 Hz), e, ainda, os harmônicos ímpares comuns (180 Hz, 300 Hz) também não estão presentes.

Os componentes existentes, tomando como base a frequência fundamental da rede de 60 Hz, não são múltiplos inteiros e não são harmônicos e, sim, inter-harmônicos.

Os inter-harmônicos, para frequências maiores que a fundamental (60 Hz) podem ser analisados normalmente como os componentes harmônicos (IEEE Interharmonic Task Force Working Document IH101, 2001), porém o maior problema causado por eles está na faixa das

baixas frequências (sub-harmônicos), que é a cintilação de luminosidade (“flicker”) das lâmpadas da instalação.

5.1.2) ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DE FORMAS DE ONDA E ESPECTROS COM CARGA REAL DE AQUECEDORES ELÉTRICOS

O aquecedor elétrico modelo Jet Master, fabricado pela Lorenzetti, foi adaptado com o circuito eletrônico proposto no presente trabalho, conforme o esquema da figura 5.7.

Fig. 5.7: Esquema de ligação para obtenção de formas de onda e espectros do aquecedor elétrico montado com o circuito eletrônico proposto.

As formas de onda de corrente e tensão obtidas, considerando apenas as críticas em nível de componentes harmônicos e “flicker”, são apresentadas nas figuras 5.8 e 5.9.

Fig. 5.8: Formas de onda de tensão e corrente do aquecedor elétrico com 1/3 da potência disponível

Fig. 5.9: Formas de onda de tensão e corrente do aquecedor elétrico com 2/3 da potência disponível

5.1.2.1) Espectro de corrente / componentes harmônicas

Os espectros de corrente, obtidos através da função fft do osciloscópio Tektronix TDS3014B, medidas apenas até as mais significativas em nível de componentes harmônicos e “flicker”, são apresentados nas figuras 5.10 e 5.11. Uma comparação com os correspondentes espectros das simulações (figuras 4.3 e 4.4) comprova a coerência entre medidas e simulação.

Fig. 5.10: Forma de onda e espectro da corrente em o aquecedor elétrico em 1/3 da potência disponível. Espectro obtido com janela retangular, com valores das raiais em ampères eficazes.

As raiais medidas (somente até a 4^a, usando-se o cursor do osciloscópio) estão compiladas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Raias (somente até a 4^a) do espectro de corrente com o aquecedor elétrico em 1/3 da potência.

Raia	Frequência [Hz]	Valor [A eficazes]
1	20	13,2
2	60	10,6
3	100	6,5
4	140	2,4

Verifica-se que a raiz quadrada da soma dos quadrados das correntes de cada raia resulta praticamente na corrente eficaz medida pelo osciloscópio (as raiais com menor valor contribuem pouco para o valor total da corrente eficaz).

Fig. 5.11: Forma de onda e espectro da corrente cm o aquecedor elétrico em 2/3 da potência disponível. Espectro obtido com janela retangular, com valores das raia em ampères eficazes.

As raia medidas (somente até a 4^a, usando o cursor do osciloscópio) são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Raia (somente até a 4^a) do espectro de corrente com o aquecedor elétrico em 2/3 da potência.

Raia	Frequência [Hz]	Valor [A eficazes]
1	20	13,4
2	60	21,2
3	100	6,5
4	140	2,4

Verifica-se que a raiz quadrada da soma dos quadrados das correntes de cada raia, assim como no caso do aquecedor fornecendo 1/3 da potência, resulta praticamente na corrente eficaz medida pelo osciloscópio (as raia com menor valor contribuem pouco para o valor total da corrente eficaz).

Observou-se, também, os espectros da tensão da rede para "Step 1" e "Step 2", processados via Matlab, obtendo-se as figuras 5.16 e 5.17.

Fig. 5.12: Espectro de tensão do aquecedor com 1/3 da potência disponível ("Step 1")

Fig. 5.13: Espectro de tensão do aquecedor com 2/3 da potência disponível ("Step 2")

5.1.3) ANÁLISE DOS RESULTADOS COM CARGA REAL

Os espectros de corrente (figuras 5.10 e 5.11) e de tensão (figuras 5.12 e 5.13), obtidos com carga real no aquecedor elétrico estão dentro do esperado e, assim como os resultados obtidos com uma lâmpada de 60W-220V, não apresentam componentes harmônicos de 60 Hz (exceto o fundamental, que é a terceira harmônica de 20Hz), porém existem alguns componentes inter-harmônicos de corrente (100 Hz, 140 Hz, etc.) múltiplos de 20 Hz, que é a frequência fundamental e, como dito anteriormente, para frequências acima de 60 Hz, tais inter-harmônicos podem ser analisados como harmônicos por causarem os mesmos problemas que os componentes harmônicos (IEEE Interharmonic Task Force Working Document IH101, 2001) e abaixo da fundamental são chamados de sub-harmônicos e causam flutuação de tensão na rede, ocasionando cintilação de luminosidade em lâmpadas. Os espectros de tensão mostram que há uma pequena distorção harmônica em 20 Hz e 100 Hz, talvez devido ao batimento (por modulação assimétrica), e também em 300 Hz (5ª harmônica de 60 Hz), que já estava presente no “step 0” (chuveiro desligado), conforme pode ser visto na figura 5.14.

Fig. 5.14: Espectro de tensão do aquecedor com 0/3 (0%) da potência disponível (“Step 0”), ou seja, com o chuveiro desligado

5.2) “FLICKER”

Para a verificação dos níveis de “flicker”, a tensão eficaz na rede foi medida a cada semiciclo e optou-se colocar esses valores em um gráfico gerado no software Excel para se comparar com os níveis estabelecidos na IEC-61000-3-3.

5.2.1) GRÁFICOS

Os valores medidos de tensão eficaz na rede foram os seguintes:

Fig. 5.15: Flutuação de tensão eficaz medida na rede com o aquecedor elétrico comutado em 1/3 da potência disponível.

Fig. 5.16: Flutuação de tensão eficaz medida na rede com o aquecedor elétrico comutado em 2/3 da potência disponível.

5.2.2) ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tensão eficaz do sistema varia conforme os gráficos mostrados nas figuras 5.15 e 5.16. No Step 1 (figura 5.15) a tensão eficaz permanece dois semiciclos no nível “maior” e um semiciclo no nível “menor”, repetindo essa seqüência de maneira cíclica, enquanto no Step 2 (figura 5.16) a seqüência é um semiciclo no nível “maior” e dois semiciclos no nível “menor”, também de forma cíclica.

A forma de onda principal possui freqüência de 60Hz e, a duração de cada é 1/120 s, portanto três semiciclos possuem duração de $3/120 \text{ s} = 25 \text{ ms}$, ou seja, a cada 25 ms o valor eficaz da tensão da rede varia duas vezes, pois inicia o período dos três semiciclos no nível “maior”, passa para o nível “menor” e retorna para o nível “maior”, ou vice-versa, dependendo da referência adotada, porém o importante, nesse caso, é o valor de duas variações (“changes”) a cada 25 ms, que é equivalente a 80 variações por segundo e, conseqüentemente, 4.800 variações por minuto.

A figura 3.4, extraída da norma IEC-61000-3-3, conforme discutido no capítulo 3, apresenta flutuação de tensão até 3.000 variações por minuto, e a nota 3 do item 4.2.3.2 da mesma norma informa que nenhuma extrapolação gráfica deve ser feita nas figuras (da norma) para evitar erros inaceitáveis e estudos demonstram que a freqüência máxima de percepção humana está em torno de 30 Hz (3.600 variações/minuto) (Deckmann, 2002).

A queda de tensão máxima, a título informativo, considerando os valores máximos e mínimos medidos nas figuras 5.15 e 5.16, deu-se no Step 1 e foi de 2,23%.

Conclui-se, portanto, que a proposta está de acordo com os limites de flutuação de tensão estabelecidos pela IEC-61000-3-3.

5.2.3) MEDIÇÃO DIRETA DE “FLICKER” COM UM “FLICKERMETER”

Uma das formas previstas na IEC-61000-3-3 para determinação do “flicker” é a medição direta através de um “flickermeter”. Para isso, foi montado em laboratório o circuito elétrico da figura 5.17. Para se simular uma instalação elétrica típica, o chuveiro foi instalado no fim de um cabo de 6mm^2 com 30 m de comprimento conectado ao quadro de distribuição do laboratório. Este diâmetro de cabo e a distância ao quadro de distribuição são valores típicos recomendados por fabricantes de chuveiros elétricos, baseados em normas de instalações elétricas como a NBR-5410. O “flickermeter” usado foi o modelo MARH-VF da RMS Sistemas Eletrônicos (www.rms.com.br). A lâmpada incandescente destinou-se à visualização de eventual efeito “flicker” presente durante o experimento. Embora a lâmpada tenha um consumo bem maior que um “flickermeter”, isto é, o “flickermeter” praticamente não carrega o circuito, deve ser lembrado que o problema da variação de tensão na rede de energia analisado aqui foi justamente o de cintilação luminosa. Não foi notado “flicker” perceptível nesta lâmpada nos ensaios realizados.

Fig. 5.17: Circuito elétrico para medição direta de “flicker” com um “flickermeter”¹

¹ Para o cálculo com o uso dos cabos de 6mm^2 utilizou-se como impedância padrão $3,69+j0,13 \Omega/\text{km}$ para instalação embutida e $3,69+j0,12 \Omega/\text{km}$ para instalação ao “ar livre”. Fonte: Manual Pirelli de Dimensionamento – Baixa Tensão – 2006 – páginas 64 e 66 – www.prysmian.com.br

O ensaio foi realizado com a rede de alimentação fornecendo a tensão nominal de 220V e para os “steps” com 1/3 e 2/3 da potência total por serem os que causariam problemas de geração de “flicker”. Os valores medidos e calculados estão nas tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3: andamento temporal das medidas de PST, tensão e corrente no chuveiro para 1/3 da potência total. A potência foi calculada a partir da tensão e da corrente. Média e desvio padrão referem-se somente às últimas dez medidas.

Hora	PST	Tensão eficaz (V)	Corrente Eficaz (A)	Potência (W)
09:43	7,346	214	18,85	4033,9
09:55	1,663	215,4	18,05	3887,97
10:01	0,9	215,6	18,54	3997,224
10:11	1,133	215,4	18,5	3984,9
10:22	0,999	214,8	17,55	3769,74
10:30	1,089	215,4	18,4	3963,36
10:45	0,921	214,7	17,31	3716,457
10:50	1,058	215,1	17,42	3747,042
11:00	0,909	213,6	18,25	3898,2
11:10	1,149	213,9	18,4	3935,76
11:20	1,056	214,2	17,4	3727,08
11:30	0,911	214,7	18,5	3971,95
11:40	1,023	215,9	18	3886,2
Média	1,0248	214,77	17,973	3860,0689
Desvio Padrão	0,084341	0,681248853	0,474363784	102,8980121

Tabela 5.4: andamento temporal das medidas de PST, tensão e corrente no chuveiro para 2/3 da potência total. A potência foi calculada a partir da tensão e da corrente. Média e desvio padrão referem-se somente às últimas dez medidas.

Hora	PST	Tensão eficaz (V)	Corrente Eficaz (A)	Potência (W)
11:50	1,092	211,2	26,06	5503,872
12:00	10,071	213,1	26,23	5589,613
12:10	1,002	210,4	25,32	5327,328
12:20	1,106	211,1	26,06	5501,266
12:30	1,084	212,3	25,6	5434,88
12:40	0,955	211,7	26,17	5540,189
12:50	1,103	213,4	26,04	5556,936
13:00	1,099	213,2	25,3	5393,96
13:10	0,961	211,1	25,55	5393,605
13:20	1,089	211,3	25,06	5295,178
13:30	1,063	211,1	25,08	5294,388
Média	1,0575	211,9	25,6075	5426,30025
Desvio Padrão	0,05883	0,895823643	0,415955226	95,15683083

As 10 (dez) últimas medidas de PST [probabilidade de “flicker” tempo curto (“probability in a short time”)] foram usadas para se determinar a média e desvio padrão do PST. Os resultados foram:

Para 1/3: $PST=1,025\pm0,084$

Para 2/3: $PST=1,058\pm0,059$

De acordo com a norma IEEE Std 1453-2004, os níveis aceitáveis de PST para sistemas de baixa tensão devem ser menores que 1,0 (um vírgula zero, com uma casa decimal), baseado numa probabilidade de ocorrência de 95%, conforme definido pela norma. No arranjo experimental o “flickermeter” foi colocado em paralelo com o chuveiro para se medir o mais alto nível de PST possível. Como em uma instalação elétrica convencional o chuveiro é instalado em um ramal separado de outras cargas, é adequado se supor que todas as outras cargas ligadas ao mesmo quadro de distribuição do chuveiro serão submetidas a níveis de “flicker” menores que os do chuveiro, visto que os níveis de variação de tensão no resto da instalação também serão menores.

A análise dos resultados mostra que esta implementação de ciclos inteiros modificada leva efetivamente à diminuição do “flicker” em uma instalação adequadamente preparada (no caso com os cabos de alimentação com seção adequada à potência do equipamento e ramais segregados de acordo com as normas de instalações elétricas), e tais resultados podem ser analisados e interpretados à luz das normas existentes, mostrando a viabilidade da solução proposta.

6) CONCLUSÃO

O controle eletrônico de potência em aquecedores elétricos de passagem mais conhecido e utilizado atualmente é o implementado através do controle por ângulo de fase, o qual gera indesejáveis componentes harmônicos de corrente nas redes de energia.

Uma alternativa para controle de potência eletrônico é implementar o controle por ciclos inteiros, onde o problema dos componentes harmônicos da frequência fundamental é minimizado, porém surgem outros problemas, como flutuação da tensão da rede de energia, o que provoca a cintilação luminosa de lâmpadas (efeito “flicker”), a qual acarreta problemas às instalações e equipamentos e, principalmente, à saúde e conforto das pessoas.

A solução apresentada neste trabalho propõe um controle eletrônico de potência para uso em aquecedores elétricos de passagem, utilizando o conceito de controle por ciclos inteiros, porém de forma otimizada, de modo a não gerar componentes harmônicos da fundamental de corrente e de tensão, nem cintilação perceptível nas lâmpadas.

Os resultados mostraram que com o conceito proposto a distorção na corrente (e consequentemente na tensão no ponto de acoplamento do aquecedor à rede) dá-se em frequências abaixo da fundamental, porém acima das frequências que causariam problemas sob o ponto de vista de “flicker”. Os valores medidos experimentalmente mostram que a relação de variação de tensão versus frequência pode ser colocada abaixo dos limites indicados na curva de cintilação da IEC-61000-3-3, levando-se em conta uma instalação feita de maneira adequada.

Para trabalhos futuros sugere-se que seja estudado a aplicação desta técnica de ciclos inteiros otimizados em cargas trifásicas industriais de alta potência, como os fornos de resistência usados na indústria metalúrgica para fusão de bronze e outros não-ferrosos.

7) BIBLIOGRAFIA

Antunes, R.J. **Circuito eletro-eletrônico em chuveiro comandado por controle remoto**, BR n. PI 8905688, 01 novembro 1989.

Araújo, A.B.; Silva, I.J.D. **Controlador para aquecedores instantâneos com controle automático de temperatura, energia elétrica e água**, BR n. PI 0107369-9, 30 janeiro 2001.

Arrilaga, J.; Bradley, A.; Bodger, P.S. **“Power System Harmonics”**. John Wiley & Sons, 1989.

Bird, B.M.; King, K.G.; Pedder, D.A.G. **“An Introduction to Power Electronics”**, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1993.

Botura Júnior, G.; Ferreira, L.O.S. **Controlador eletrônico de potência para chuveiros elétricos, torneiras elétricas e equipamentos de aquecimento resistivo em geral**, BR n. PI 8800848, 24 fevereiro 1988.

Carmona, W. **Disposição Introduzida em mecanismo de comutação de temperatura acionado por botões**, BR n. MU 8000653-1, 18 abril 2000.

Casara, A.L. **Controlador lógico de temperatura para chuveiros** BR n. PI 9705989-7, 24 outubro 1997.

Deckmann, S.M. **“IT-012: Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica”**. Unicamp, 2002.

Dourado, C.V. **Controlador de temperatura para chuveiros elétricos**, BR n. MU 7101119, 23 maio 1991.

Gomes, J.C.M. **Aperfeiçoamento em chuveiro elétrico**, BR n. PI 9700871-0, 06 fevereiro 1997.

Gonçalves, A.J.B. **Controle de temperatura automático para chuveiro**, BR n. PI 0003032-5, 21 junho 2000.

Halpin, S.M.; Bergeron, R.; Blooming, T.M.; Burch, R.F.; Conrad, L.E.; Key, T.S. **“Voltage and lamp flicker issues: should the IEEE adopt the IEC approach?”** IEEE Trans. On Power Delivery, v.18, n.3, July 2003, p.1088- 1097.

IEC-61000-3-2. Edition 2.1; 2001.

IEC-61000-3-3. Edition 1.1; 2002.

IEC-61000-3-4. Première édition; 1998.

IEC-61000-3-5. Première édition, 1998.

IEEE Std 1453-2004. IEEE Recommended Practice for Measurements and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems. IEEE, 2005.

Inmetro. **Projeto de Norma de Chuveiros Elétricos - Requisitos de desempenho e segurança de aparelhos eletrodomésticos fixos de aquecimento instantâneo de água**; Inmetro; Revisão 04; 2001.

Jesus, N.C.; Castoldi, F.T.; Nonenmacher, CF.B.; Santos, T.F.; Oliveira, H.R.P.M.; Papaléo, G. **“Análise da Influência de Cargas Não-Lineares: Avaliação dos Efeitos e Limites de Cortes de Tensão (Voltage Notching)”**. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, 5. Sergipe, Aug. 2003.

Lorenzetti, C.L. **Aperfeiçoamento em chuveiro elétrico**. BR n. PI 9905769-7, 01 dezembro 1999.

Lorenzetti, C.L. **Circuito eletrônico para controle de potência em aquecedores hidrotérmicos**, BR n. PI 0003009-0, 20 julho 2000.

Lorenzetti, C.L. **Circuito Eliminador de Harmônicas e Flicker em Aquecedores Elétricos de Passagem**, BR n. PI 0103054-0, 20 julho 2001.

Lorenzetti, C.L. **Disposição em redutor de fluxo regulável para chuveiro**. BR n. MU 7702602-0, 12 novembro 1997.

Lorenzetti, C.L. **Disposição introduzida em chave seletora de temperatura para aquecedores elétricos hidrotérmicos**, BR n. MU 7503040-3, 15 maio 1995.

Lorenzetti, C.L. **Disposições construtivas introduzidas em aquecedores elétricos instantâneos de temperatura regulável**, BR n. MU 6901586-4, 11 agosto 1989.

Lorenzetti S/A. Indústrias Brasileiras Eletrometalúrgicas, **Ensaio de Laboratório: Curvas de Pressão x Vazão, Temperatura x Vazão**.

Lorenzetti S/A. Indústrias Brasileiras Eletrometalúrgicas, **Estudos sobre Redução de Harmônicas**.

Mais, L.P.M. **Problemas de calor e acústica: Física para colégio e vestibular**. Rio de Janeiro: Editora Nacionalista, 1959. 192p.

Nazareth, P.S. **Comando a distância da temperatura do chuveiro elétrico**. BR n. PI 0002229-2, 12 junho 2000.

NBR5410:2004. Instalações Elétricas de Baixa Tensão. ABNT, 2004.

Pereira, F.G. **Thermocontrol – Regulador eletrônico de temperatura para chuveiro, torneira e aquecedor elétrico**, BR n. MU 7102565, 07 novembro 1991.

PIC – 12C5XX – Series User's Manual – Microchip – 2002.

Procobre. **Qualidade de Energia - Harmônicas**; Procobre - Instituto Brasileiro do Cobre.

Produtos Elétricos Corona Ltda. **Chuveiro elétrico com controle remoto de temperatura e pressão de água**, BR n. MU 7801445-0, 02 abril 1998.

Produtos Elétricos Corona Ltda.. Tommaso, H. **Aquecedor eletrônico**, BR n. PI 9903491-3, 13 agosto 1999.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Chave seletora de potência**, BR n. MU 7100999, 16 maio 1991.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Comando de controle à distância para aparelhos elétricos em geral**, BR n. PI 9802759-0, 27 julho 1998.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Conjunto seletor de temperatura aplicável a chuveiros e assemelhados**. BR n. PI 9300061-8, 08 janeiro 1993.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Controlador de potência para chuveiros elétricos e outros**, BR n. PI 9802736-0, 30 janeiro 1998.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Controlador de temperatura de água para chuveiros, torneiras, aquecedores e outros**, BR n. PI 9801884-1, 01 abril 1998.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Controle de potência por retificação**, BR n. MU 7903092-0, 17 dezembro 1999.

Produtos Elétricos Corona Ltda. Tommaso, H. **Disposição construtiva em sistema de chaveamento para aquecedores de água e assemelhados**, BR n. MU 7302398-1, 06 dezembro

1993.

Ramalho Júnior, F. et.al. **Os fundamentos da física: Livro do professor**. 5ª edição. São Paulo: Editora Moderna, 1991. 89p.

Rashid, M.H. “**Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**”. Prentice Hall, 2nd Edition, 1993.

Silva, A.C. **Aperfeiçoamentos introduzidos em chuveiro elétrico com circuito eletrônico de controle de temperatura**, BR n. PI 0002332-9, 07 junho 2000.

Silva, A.C. **Aperfeiçoamentos introduzidos em circuito eletrônico de controle de potência para cargas resistivas**, BR n. PI 0002202-0, 15 junho 2000.

Silva, A.R.; Farias, V.F. **Chuveiro auto controlado**, BR n. MU 7100681, 08 março 1991.

SILVEIRA, D.D. **Controlador externo de temperatura da água de chuveiro elétrico**, BR n. MU 8002662-1, 27 outubro 2000.

Souza, J.Z. **Controle eletrônico de temperatura para duchas, chuveiros e torneiras elétricas**, BR n. MU 6702096, 23 setembro 1987.

Souza, W. **Ducha eletrônica com jato dirigível**, BR n. PI 9709092-1, 04 novembro 1997.

Tarcha, G. **Dispositivo para regulação de temperatura**, BR n. PI 8002514, 24 abril 1980.

Werlang, F.L.L. **Disposição em controlador gradual para aquecimento de água**, BR n. PI 9505459-6, 22 dezembro 1995.

Zolet, I.L. **Dispositivo eletrônico de controle linear de temperatura de água de chuveiros elétricos**, BR n. PI 9300696, 19 dezembro 1993.

ANEXO A – EXEMPLOS DE IMPLEMENTAÇÃO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Este anexo fornece alguns exemplos de implementação do controle de potência por ciclos inteiros otimizados.

A.1) DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS

O controle de potência por ciclos inteiros otimizados pode ser descrito através de diagrama de blocos conforme a figura A.1 a seguir:

Fig.A.1: Diagrama de blocos do controle eletrônico de potência por ciclos inteiros otimizados

A.2) DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DO CONTROLE ELETRÔNICO DE POTÊNCIA POR CICLOS INTEIROS OTIMIZADOS

A alimentação do circuito é realizada pela rede pública de energia. A fonte CC consiste em componentes destinados a prover a tensão elétrica necessária ao funcionamento dos componentes eletrônicos de baixa tensão. O “Reset” do controlador serve para proteção do mesmo em casos de variação abrupta de tensão da rede pública de alimentação. O bloco de seleção de níveis consiste de um potenciômetro comandado pelo usuário e informa ao sistema

o nível desejado. O microcontrolador comuta o bloco de chaveamento de potência, que é composto de chave eletrônica (TRIAC), ligada ao elemento aquecedor. O detetor de passagem por zero determina o instante em que a senóide da rede passa pelo valor zero e está localizado internamente ao microcontrolador.

A.3) CIRCUITOS ELETRÔNICOS

A.3.1) CIRCUITO ELETRÔNICO PARA UM ÚNICO ELEMENTO AQUECEDOR

Fig. A.2: Circuito eletrônico por ciclos inteiros otimizados com 1 elemento aquecedor

A figura A.2 apresenta uma opção de circuito eletrônico para utilização em rede pública CA de 220V.

Os componentes eletrônicos e suas funções são detalhados a seguir:

- Rede de Alimentação: energia elétrica CA fornecida pela concessionária;
- Elemento Aquecedor: resistor de potência do aparelho, cuja função é aquecer o fluido passante (água) até a temperatura desejada pelo usuário;
- TRIAC: elemento semiconductor, responsável, em conjunto com o circuito, pelo chaveamento da potência fornecida à carga. A cada meio ciclo da senóide da rede, pulsos

de corrente são dados (ou não) no “gate”, fazendo com que tal semi ciclo seja (ou não) fornecido à carga;

- C_1 : capacitor, que tem por função filtrar ruídos da rede de alimentação;
- VDR: varistor para proteção contra eventuais aumentos de tensão na rede de energia;
- DZ_1 : diodo “zener”, cuja função é manter constante a tensão em seus terminais e, conseqüentemente, a tensão fornecida ao circuito de baixa potência e ao circuito integrado;
- R_1 : resistor, que proporciona uma queda de tensão em seus terminais e forma um divisor da tensão da rede com o diodo “zener” e o capacitor C_2 ;
- C_2 : capacitor que forma um divisor de tensão com R_1 e DZ_1 ;
- D_1 : retifica e abaixa a tensão do diodo “zener” de 5,6 V para 5,0 V, para alimentação do circuito integrado;
- C_3 : capacitor eletrolítico, que tem a função de filtrar o “ripple” de tensão após a retificação;
- C_4 : capacitor usado em paralelo com a alimentação do circuito integrado para filtragem adicional de ruídos;
- R_4 : resistor, cuja função é limitar a corrente a ser fornecida à base do transistor Q_1 ;
- Q_1 : Transistor NPN, que recebe pulsos de corrente positivos em sua base e, ao recebê-los, fornece pulsos de corrente negativos ao “gate” do TRIAC, para que este (o TRIAC) funcione nos quadrantes II e III, onde a corrente de “gate” é mais baixa;
- R_3 : resistor para limitação da corrente elétrica fornecida ao “gate” do TRIAC;

- CR: chave rotativa que, conforme a posição em que se encontra, e em conjunto com D₂, D₃ e D₄, fornece pulsos às entradas P₀ e/ou P₁, em quatro posições distintas;
- D₂, D₃ e D₄: diodos, que complementam, juntamente com a chave rotativa CR, a lógica binária de alimentação das portas P₀ e P₁, sendo que, no Step 1 não há sinal nas portas, no Step 2 há sinal em P₀, no Step 3 há sinal em P₁ e no Step 4 há sinal em ambas as portas.;
- R₂: resistor para limitação dos pulsos de corrente fornecidos ao circuito integrado, indicadores da passagem por zero da senóide da rede;
- Q₂, R₅, R₆ e R₇: transistor NPN e resistores, que formam um circuito auxiliar, cuja função é limpar (“reset”) o circuito integrado caso ocorram variações de tensão na rede de alimentação;
- C.I.: circuito integrado, que pode ser um microcontrolador, um microprocessador ou um circuito dedicado, que é o principal componente do circuito e funciona como o cérebro do sistema. Na figura A.2 está desenhado o microcontrolador PIC 12C508 (<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/40139e.pdf>, sítio visitado em 18/06/2006). O C.I. é informado da passagem da senóide da rede por zero através do terminal Tock, fornecendo corrente à base do transistor Q₁ através do terminal Osc₂, e, conforme posição da Chave Rotativa, pode assumir quatro posições distintas: zero, um, dois ou três pulsos em Q₁ a cada três pulsos no terminal Tock. As entradas P₀ e P₁ são digitais. Caso ocorra variação na tensão da rede, será fornecido um sinal no terminal MCLR, limpando o programa, o qual fica nesta posição enquanto o sistema não voltar ao normal.

A.3.1.1) Considerações sobre o circuito eletrônico com 1 elemento aquecedor

(figura A.2)

O circuito eletrônico da figura A.2 foi projetado para trabalhar em uma rede de alimentação CA de 220V. Caso haja necessidade de funcionamento em 127V, pode-se alterar o capacitor C_2 ou o resistor R_1 convenientemente de modo a manter constantes a corrente de estabilização do diodo “zener” e a corrente fornecida ao circuito.

As entradas P_0 e P_1 do circuito integrado são configuradas como portas digitais e constituídas internamente por resistores “pull-up”, conforme figura A.3 a seguir:

Fig.A.3: Resistor “pull-up” interno ao circuito integrado

O funcionamento do circuito da figura A.2 pode ser assim descrito:

- com a chave rotativa CR na posição aberta (mostrada na figura A.3), a corrente elétrica originada no VDD (positivo da fonte) circula pelos resistores “pull-up”, os quais estão internamente ligados ao terminal VDD, fornecendo nível de tensão alto à porta interna (5 V);
- ao se fechar a chave rotativa CR, a corrente circulará através dos diodos D_2 a D_5 (conforme posição da Chave CR, pois a figura A.3 representa apenas uma porta), fazendo com que a porta interna receba um nível de tensão baixo (0 V);
- observa-se, no circuito da figura A.2, que existe um único elemento aquecedor e, portanto, há quatro níveis de potência. Percebe-se, também, que existe uma porta do C.I.

sobrando (Osc₂), a qual não está ligada ao circuito, e tem utilidade em chuveiros formados por dois elementos aquecedores, descrito em A.3.2.

A.3.2) CIRCUITO ELETRÔNICO COM DOIS ELEMENTOS AQUECEDORES

Pode-se incrementar os níveis de potência do circuito inserindo um ou mais elementos aquecedores, conforme tabela 3.1, através de reconfiguração do circuito e das portas P₀ e P₁.

O circuito, para esta nova configuração, apresentar-se-á com as seguintes modificações, conforme figura A.4 a seguir:

Fig.A.4: Circuito eletrônico por ciclos inteiros otimizados com 2 elementos aquecedores

A.3.2.1) Considerações sobre o circuito eletrônico com 2 elementos aquecedores

(figura A.4)

No circuito da figura A.4, verifica-se as seguintes diferenças em relação ao da figura A.2:

- A Chave Rotativa CR está ligada ao terminal positivo da fonte e possui dez posições, que correspondem aos dez níveis de potência;
- Cada saída da Chave CR está ligada a um resistor que faz um divisor de tensão com o Resistor de entrada da Chave (R_{19}), fornecendo uma tensão específica à porta P_0 do C.I.;
- Os resistores R_8 a R_{16} possuem valores distintos de resistência para fornecer distintos níveis de tensão à porta P_0 ;
- A porta P_0 , neste caso, é configurada como entrada analógica e possui internamente um conversor analógico-digital, o qual modifica o sinal analógico da entrada para um sinal digital a ser trabalhado internamente pelo C.I.;
- A porta P_1 não é utilizada;
- A saída Osc_1 está sendo utilizada para mandar pulsos de corrente à base do transistor Q_3 , que alimenta o “gate” do TRIAC 2, o qual, por sua vez, comanda a potência a ser transferida ao elemento aquecedor 2.